СПРАВОЧНИК ПРОЕКТИРОВЩИКА

Металлические конструкции

Том 3

Стальные сооружения, конструкции из алюминиевых сплавов. Реконструкция, обследование, усиление и испытание конструкций зданий и сооружений

1999

ББК 38.54
М 54
УДК 624.014 (035.5)

Печатается по решению Ученого совета института ЦНИИпроектстальконструкция им. Н.П.Мельникова

Рецензенты: специалисты кафедры «Металлические конструкции» Московского государственного строительного университета (зав.кафедрой д.т.н. профессор Ю.И.Кудишин).

Металлические конструкции. В 3 т. Т.3. Стальные сооружения, конструкции из алюминиевых сплавов. Реконструкция, обследование, усиление и испытание конструкций зданий и сооружений. (Справочник проектировщика) / Под общ. ред. заслуж. строителя РФ, лауреата госуд. премии СССР В.В.Кузнецова (ЦНИИпроектстальконструкция им. Н.П.Мельникова) – М.: изд-во АСВ, 1999. – 528 стр. с илл.

ISBN 5-87829-057-X
ISBN 5-87829-081-0

Справочник проектировщика «Металлические конструкции» общим объемом 150 а.л. в трех томах подготовлен коллективом ведущих ученых и специалистов стран СНГ по строительным металлоконструкциям. В справочнике обобщен мировой опыт проектирования и строительства традиционных и уникальных зданий и сооружений из металла, нашли отражение отечественные и зарубежные исследования и разработки последнего двадцатилетия. Впервые публикуются материалы по разработке проектов, изготовлению и монтажу дымовых труб, транспортерных галерей, градирен, крановых эстакад и др. Переживаемое страной резкое сокращение инвестиций и связанное с этим ускоренное старение эксплуатируемого металлофонда придают особую актуальность новому разделу из трех глав, в котором изложены обоснованные практикой рекомендации по организации, оснащению и выполнению реконструктивных, обследовательских и диагностических работ, а также методам усиления конструкций, элементов и узлов, исчерпавшим ресурс безотказной работы.

Коллектив авторов уверен в том, что выход этого капитального труда обеспечит снижение риска разрушений и отказов, повысит эффективность инвестиционных затрат и конкурентоспособность российских строителей, избавит от непрофессионализма множество предприятий, организаций, АО, СП и частных предпринимателей.

Справочник предназначен для работников научных и проектных организаций, работников экспертных базовых центров, конструкторских бюро, руководителей служб заводов-изготовителей металлоконструкций, строительно-монтажных организаций, работников технического надзора за эксплуатацией, студентов, аспирантов и преподавателей Вузов и др.

ISBN 5-87829-057-X
ISBN 5-87829-081-0

© Издательство АСВ, 1999
© Кузнецов В.В. и коллектив авторов, 1999

ГЛАВА 1

АНТЕННЫЕ СООРУЖЕНИЯ

1.1. Общие сведения. Нагрузки и воздействия

1.1.1. Современные виды антенных устройств и их классификация. В общем случае антенное устройство состоит из: а) приемо-передающего комплекса; б) фидерных трактов и облучающих устройств; в) собственно антенны (если ею является устройство) или антенн, устанавливаемых на специальных опорах с механизмами спуска и подъема; г) опорно-поворотных устройств или механизмов, позволяющих перемещать антенные устройства; д) приводов, приводящих в движение антенные устройства, и автоматических устройств, управляющих их движением; е) строительной части (фундаментов или опорных зданий, кабин, лифтов, лестниц, ограждений и др.).

Здесь рассматриваются лишь конструкции, указанные в п. «в» и частично в пп. «г», «е».

Классификация антенных устройств может быть осуществлена по следующим признакам: назначению, характеру силовых воздействий, конструктивному типу.

Таблица 1.1. Классификация антенных устройств

По назначению антенн	По характеру силовых воздействий	По конструктивному типу
Радиовещание*	Метеорологические:** ветер, обледенение, снег, температура	Опоры: башни, мачты, комбинированные решения
Телевидение	Сейсмические	Системы
Релейная связь*	Гравитационные***	Параболические полноповоротные антенны
Навигация*	Инерционные***	Специальные полноповоротные или частично вращающиеся антенны
Локация*	Взрывные**	Устройства для поддержания антенных структур

Примечания:

* Выполняются как стационарными, так и перевозными.

** При перемещении антенны в радиопрозрачное укрытие она не испытывает полностью или частично этих воздействий.

*** Имеют особое значение для подвижных, особенно, полностью поворотных антенн.

1.1.2. Требования, предъявляемые к металлическим конструкциям антенных устройств. Специфическими требованиями, предъявляемыми к металлическим конструкциям антенных устройств, являются:

А. Создание таких конструктивных форм, при которых метеорологические, гравитационные и температурные воздействия минимальны.

Б. Ограничение деформаций (линейных и угловых) конструкций, возникающих при любых воздействиях и в процессе эксплуатации при определенных режимах

работы. Максимальное линейное отклонение фактической формы элементов антенного устройства от теоретической по нормали к ней обычно не должно превышать $\Delta_{N\text{макс}} \le \kappa_\lambda \lambda$, где λ – длина волны, на которой работает антенное устройство; κ_λ – коэффициент, характеризующий порядок отклонения (в долях от λ), при котором еще не возникает существенного снижения эффективности работы антенного устройства, в первом приближении можно принимать значение $\kappa_\lambda \cong \frac{1}{10} \div \frac{1}{16}$.

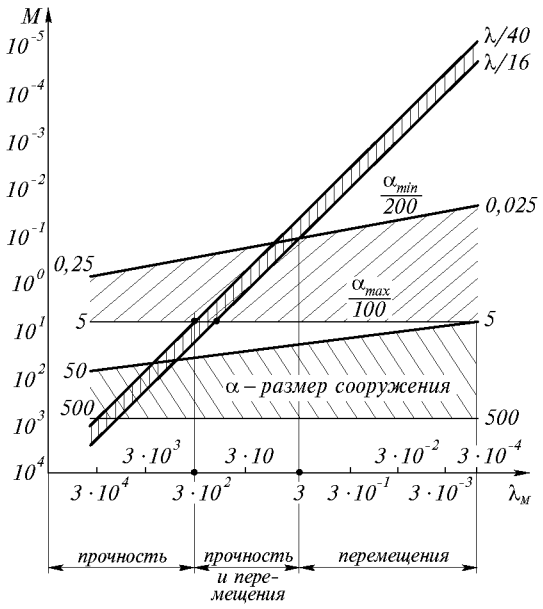


Рис.1.1. График расчета антенных устройств по I и II предельным состояниям

Для современных антенных устройств, характерные размеры (высота и протяженность) которых находятся преимущественно в интервале от 50 до 500 м, суммарные максимальные отклонения, возникающие при выверке и в результате деформирования конструкций от силовых воздействий при эксплуатации, не превышает 1/100–1/200 от величины характерного размера. Сообразуясь с этим, установлена область длины радиоволн (рис.1.1), для которых решающим является первое или второе предельные состояния; учитывая их особенность, оказывается возможным принять необходимые меры: изменить схему несущих конструкций, использовать автоматические устройства для уменьшения отклонений и др.

Максимальное угловое отклонение $\Delta\alpha$ оси антенны (например, фокальной) от заданного положения также ограничено предельным значением его отношения к углу $\theta_{0,5}$ диаграммы направленности антенны на половине мощности $\Delta\alpha \le \kappa_\alpha \theta_{0,5}$, где в первом приближении можно принимать $\kappa_\alpha \le 0,25$.

В. Регулирование отклонений от теоретической формы и положения элементов антенного устройства, возникающих как в начальный период при изготовлении и монтаже конструкций антенны, так и в период эксплуатации в результате изменения напряженно-деформированного состояния конструкций. Начиная с определенных значений λ и размеров антенн, требования к точности изготовления и монтажа конструкций намного выходят за рамки возможностей не только заводов металлоконструкций, но и специализированных заводов. Прежде всего, требуется разработка специальных конструктивных и монтажных мероприятий, обеспечивающих заданную точность антенны по окончании ее сборки на месте монтажа. У вращаемых по углу места антенн весовые деформации не могут быть скомпенсированы в начальный период путем выверки и уменьшены при эксплуатации путем дополнительного вложения металла. Возникает необходимость разработки принципиально новых конструктивных построений, позволяющих сохранять заданные форму и взаимоположение элементов антенного устройства с большой точностью при его вращении и воздействии на него различных метеофакторов.

Г. Необходимость принятия специальных мер, в том числе и конструктивных, по удалению снега и гололеда, снижающих эффективность работы антенны, а также по уменьшению влияния температурного воздействия.

Д. Возможность дальнейшей модернизации металлических конструкций, поскольку быстрое развитие науки и техники приводит к ускоренному моральному старению радиотехнических схем.

Е. Необходимость всемерной унификации решений различных видов антенных устройств и установление определенного ряда и градаций в соответствии с радиотехническими требованиями, размерами и климатологией.

Ж. Разработка таких конструктивных решений и приспособлений для монтажа, которые позволяют осуществлять скоростной монтаж в сложных условиях работы на большой высоте при возможных неблагоприятных метеорологических воздействиях.

1.1.3. Общие указания по нагрузкам и воздействиям. В соответствии со СНиП 2.01.07-85 нагрузки разделяются на *постоянные* и *временные* (длительные, кратковременные, особые).

В антенных устройствах и опорах к *постоянным нагрузкам* относятся: а) масса постоянных частей несущих конструкций и фундаментов; б) масса оборудования, элементов и помещений, без которых не может функционировать данное сооружение; в) масса механизмов, приводящих в движение антенные устройства, и автоматических устройств, управляющих их движением; г) воздействие предварительного напряжения элементов конструкций; д) масса и давление грунта.

К *длительным нагрузкам* относятся: а) масса частей сооружений, которые в процессе эксплуатации могут изменяться (временные площадки, лестницы, перегородки и др.); б) масса оборудования, которое в процессе эксплуатации может изменять положение или может модернизироваться; в) средние скорости ветра, при которых возможно возникновение колебаний сооружений в целом или его отдельных частей; г) инерционные силы, возникающие при вращении или перемещении сооружения или его частей, если вращение или перемещение непрерывны при их эксплуатации.

К *кратковременным нагрузкам* относятся: а) ветровые максимальной интенсивности; б) обледенение; в) изменение температуры в пределах одних суток, а также изменение температуры от солнечной радиации; г) осадки (снег, дождь, отложение пыли); д) инерционные при быстрых вращениях или перемещениях сооружений; е) от массы людей, инструментов, временного оборудования; ж) возникающие при перевозке и возведении сооружений; з) воздействия подвесного подъемно-транспортного оборудования.

К *особым нагрузкам* и воздействиям относятся: а)сейсмические и взрывные воздействия; б) вызываемые неисправностью или поломкой оборудования (например, отказ от работы автоматических устройств, регулирующих усилия в антенных полотнах; одностороннее тяжение проводов вследствие обрыва или опускания антенн и др.); в) неравномерность осадки основания.

Капитальность сооружений устанавливается технологической организацией в зависимости от их срока службы:

I класс капитальности – срок службы 50 лет;

II класс капитальности – срок службы 25 лет;

III класс капитальности – срок службы 10 лет.

В зависимости от класса капитальности устанавливаются требования к материалам и покрытиям, предохраняющим от коррозии, и предписываются специальные меры по предотвращению появления усталости в связи с увеличением числа циклов колебаний.

К первому классу капитальности относятся сооружения, имеющие особо важное народнохозяйственное значение, и объекты, моральное старение которых весьма мало (обелиски, памятники культуры, смотровые устройства, сооружения, легко подвергающиеся модернизации, метеорологические опоры и др.), а также

некоторые виды сооружений, предназначенные для комплексного использования. Коэффициент надежности по ветровой нагрузке для них $\gamma_f = 1{,}4$.

Ко второму классу сооружений относятся наиболее распространенные виды сооружений, предназначенные для выполнения функциональных задач. Коэффициент надежности по ветровой нагрузке для них $\gamma_f = 1{,}4$.

К третьему классу капитальности относятся временные и перевозные сооружения. Коэффициент надежности по ветровой нагрузке для них $\gamma_f = 1{,}3$.

Основные значения коэффициентов условий работы для антенных сооружений, опор и их элементов приведены в табл.1.2. Наиболее вероятные сочетания нагрузок и воздействий и значения коэффициентов сочетаний n_c для основных сочетаний, состоящих из постоянных, длительных и кратковременных нагрузок и воздействий и для особых значений, составленных из постоянных длительных, некоторых кратковременных и одной из особых нагрузок и воздействий, указаны в табл.1.3. Если для данного вида сооружений установлены наиболее неблагоприятные сочетания нагрузок и воздействий, то для него разрешается производить расчет только на них.

Таблица 1.2. Коэффициенты условий работы γ_c

№ п.п.	Элементы конструкций	γ_c	Примечание
1	Несущие элементы, за исключением указанных ниже	1	
2	Гибкие предварительно напряженные элементы	0,9	
3	Оттяжки мачт:		*По отношению к расчетному
	а) постоянные	0,8*	сопротивлению при растяжении
	б) временные	1*	стального каната принимаем
4	Раскосы из канатов	0,9*	равным значению разрывного
5	Анкерные тяжи	0,65	усилия каната в целом, установленному ГОСТами или заводскими сертификатами, деленному на коэффициент безопасности по материалу 1,6 (СНиП II-23-81*, табл.44*,46)
6	Болты и валики при работе на:		
	а) изгиб	1	
	б) срез	0,9	
7	Фланцы, работающие на:		
	а) растяжение кольцевого типа	1,1	
	б) растяжение остальных типов	0,9	
	в) изгиб	0,8	
8	Проушины при работе на:		
	а) растяжение	0,65	без учета концентрации
	б) смятие и выкалывание	1	
9	Лестницы, переходные площадки и подобные элементы	1	
10	Прочие элементы – согласно СНиП II-23-81*(табл.46)		

1.1.4. Масса конструкций. Масса оборудования и механизмов принимается по данным каталогов, типовым проектам или заданию. Масса конструкции q_i определяется, сообразуясь с данными аналогичных типовых или индивидуальных проектов q_0. Если все геометрические размеры рассматриваемого i-го сооружения изменены в κ_n раз по сравнению с сооружением, принятым в качестве эталона ($\kappa_n = 1$), а внешние воздействия изменены в κ_ω раз, то масса конструкции с новыми параметрами может быть принята по приближенной формуле

$$q_i = q_0 \kappa_n^3 \cdot \kappa_\omega^{\frac{1}{2}}. \qquad (1.1)$$

Таблица 1.3. Расчетные сочетания нагрузок

Сочетание	Комбинации в сочетаниях	Коэффициенты сочетания нагрузок n_c											
		масса	предварительное напряжение	ветер	обледенение	снег	температура	инерционные средние	инерционные максимальные	сейсмика	односторонние при обрыве	монтажные	взрывные
Основные	1	1	1,1	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	2	1	1	1	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	3	1	1	0,25	1	1*	–	–	–	–	–	–	–
	4	1	1	1**	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	5	1	1	0,9	–	–	0,9	–	–	–	–	–	–
	6	1	1	0,9	–	–	–	–	–	–	–	0,9	–
	7	1	1	0,25-0,5***	–	–	–	1	–	–	–	–	–
Особые	1	1	1	0,25	–	–	–	–	–	1	–	–	–
	2	1	1	0,25	–	–	–	–	–	–	–	–	1
	3	1	1	0,8	–	–	–	–	–	–	1	–	–
	4	1	1	0,25	0,8	–	–	–	–	–	1	–	–
	5	1	1	0,25***	–	–	–	–	1	–	–	–	–
	6	1	1	–	0,55***	–	–	–	–	–	–	–	–

Примечание. При наихудших направлениях ветра:
* только в элементах площадок при ее площади более 15 м^2;
** зональное воздействие ветра;
*** значения этих коэффициентов может быть уточнено в задании.

На ранних стадиях проектирования масса различных опор ориентировочно может быть определена по номограммам, построенным применительно к III ветровому району и приведенным на рис.1.2, 1.3, 1.4. При использовании указанных величин для других ветровых районов данные, приведенные на указанных номограммах, следует умножить на коэффициент

$$\kappa = \left(\frac{q^{в}_{н,i}}{q^{в}_{н,III}} \right)^{\frac{1}{2}}, \qquad (1.2)$$

где $q^{в}_{н,i}$ – нормативный скоростной напор для ветрового района, в котором расположено сооружение на отметке, равной половине высоты сооружения; $q^{в}_{н,III}$ – то же, но для III ветрового района.

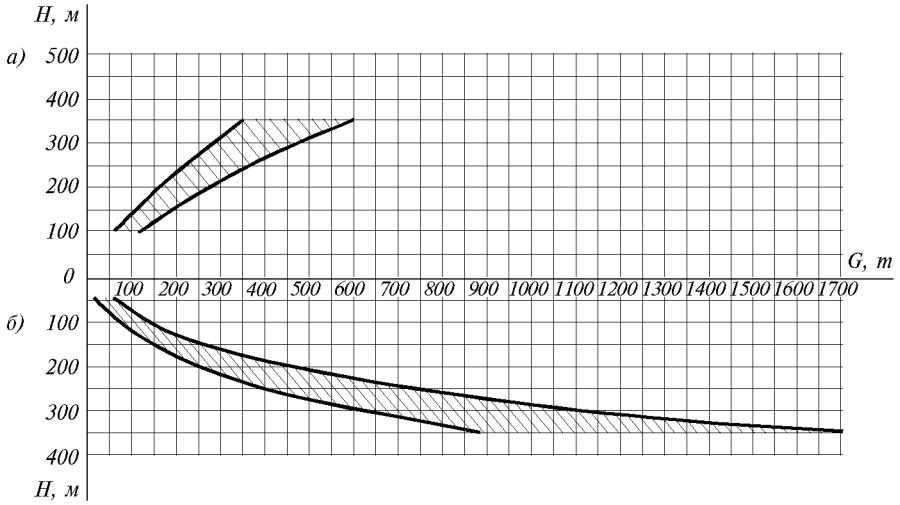


Рис.1.2. Масса телевизионных опор в зависимости от высоты (III ветровой р-н)
а – мачты; *б* – башни

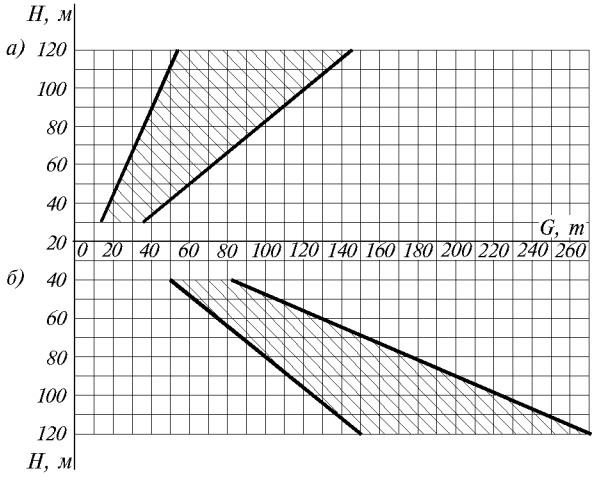


Рис.1.3. Масса опор радиорелейных линий
(III ветровой р-н)
а – мачты; *б* – башни

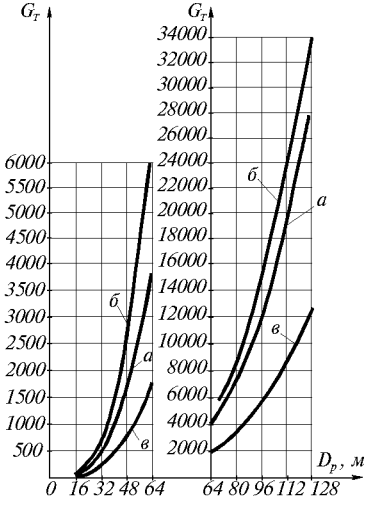


Рис.1.4. Масса радиотелескопов
а – тип РТ-64; *б* – тип РТ-70;
в – тип РТ-128

Продольные силы в стволах опор определяются по формулам:
для башен

$$N = N_{ств} + N_{об}, \tag{1.3}$$

для мачт

$$N = N_{ств} + N_{об} + N_o + N_m, \tag{1.4}$$

где $N_{ств}$ – усилие от массы вышележащего ствола; $N_{об}$ – усилие от массы вышерасположенного оборудования; N_o – усилие от массы оттяжек, приходящееся на вышележащие оттяжечные узлы; N_m – вертикальная составляющая тяжения всех вышележащих оттяжек.

Нагрузки от массы прикладываются в точках, установленных технологическими заданиями. Сообразуясь с этим, в решетчатых конструкциях необходимо такое построение схемы, чтобы силы веса сосредотачивались в узлах и лишь в виде исключения допускается приложение сил веса вне узлов. При этом элементы конструкции должны быть рассчитаны на одновременное действие осевых сил и моментов.

Для сооружений или их частей, вращающихся относительно горизонта, необходимо учитывать изменение положения центра тяжести относительно вертикальной оси.

При определении нагрузки от массы следует принимать следующие значения коэффициентов надежности по нагрузке γ_f для:

– фасонных частей и узлов – 1,2;

– оборудования и массы несущих конструкций – 1,1 при расчете на прочность и 0,9 при расчете на опрокидывание и отрыв;

– оттяжек мачт – 1;

– прецизионных устройств, в первую очередь для вращающихся относительно горизонтальной оси, значения указанных коэффициентов могут приниматься лишь в первой стадии проектирования. В дальнейшем масса должна приниматься по исполнительным чертежам и в случае необходимости должно производиться необходимое изменение распределения массы по объему конструкции.

1.1.5. Воздействие ветра. Наблюдения, проводимые над скоростью ветра в одной произвольной точке пространства, показывают, что скорость ветра непрерывно изменяется (рис.1.5). При этом изменение скорости ветра от его среднего значения, вычисленного за некоторый промежуток времени (по СНиП 2.01.07-85, п.6.4 скорость ветра на уровне 10 м над поверхностью земли для местности типа А, соответствующая 10-минутному интервалу осреднения и превышаемая в среднем раз в пять лет) может быть представлено в виде ряда Фурье:

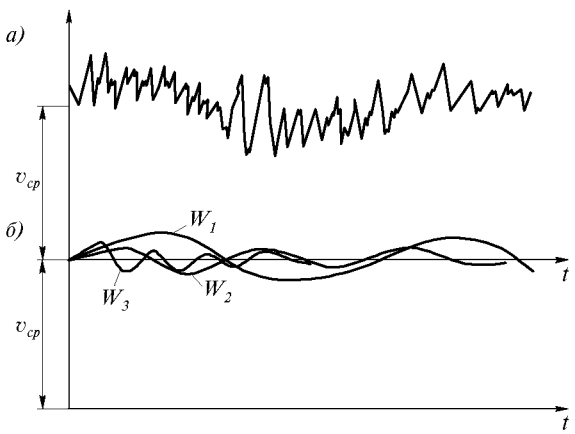


Рис.1.5. Изменение скорости ветра в изолированной точке в зависимости от времени
а – случайная зависимость; *б* – разложение пульсаций в точке

$$V_i = V_{ср} + \sum^{\infty} a_\xi \sin \omega_\xi t_i. \tag{1.5}$$

Для практических задач ограничиваются некоторым конечным числом членов ряда. При этом выбираются такие частоты ω_ξ, которые соответствуют собственным частотам колебаний сооружения (рис.1.5*б*):

$$V_{i,макс} = V_{ср} + \sum^{n} a_\xi \sin\omega_\xi t_i = V_{ср}(1+m). \tag{1.6}$$

Здесь $V_{ср} = \frac{1}{t}\int^{t} V_i dt$ – среднее значение скорости за 10 мин.; a_ξ, м/сек^2 – доля пульсации, соответствующая данной частоте; $\Delta V_{макс} = \sum a_\xi$ – наибольшее значение пульсации скорости ветра; t_i, сек – время, при котором $\Delta V = \Delta V_{макс}$; ω_ξ – частоты собственных колебаний сооружения в целом или его отдельных частей; m_v – коэффициент пульсации скорости ветра

$$m_v = \frac{\sum^{n} a_\xi \sin\omega_\xi t_i}{V_{ср}} = \frac{\Delta V_{макс}}{V_{ср}}, \tag{1.7}$$

принимаемый по данным наблюдений.

Значение $V_{ср}$ зависит от структуры ветрового потока. Применительно к особенностям воздействия ветрового потока на сооружения, в настоящее время могут быть выделены следующие виды структур ветрового потока.

А. *Максимальные величины скорости ветра*, наблюдаемые при штормах большой длительности, когда турбулентность вызывает полное перемешивание масс воздуха. При этом скорость ветра возрастает с высотой по логарифмическому (1.8) или степенному (1.9) законам:

$$V_z = V_{10}\frac{\lg\frac{z}{z_0}}{\lg\frac{z_{10}}{z_0}}; \tag{1.8}$$

$$V_z = \left(\frac{z}{z_{10}}\right)^{1/m}, \tag{1.9}$$

где V_z – скорость ветра на отметке Z; V_{10} – осредненная скорость ветра на отметке 10 м; Z_0 – относительная шероховатость поверхности земли, принятая: для типа местности А $Z_0 \approx 0{,}1$ м и для типа местности В $Z_0 \approx 2{,}5$ м; $m = 7$ по американским стандартам.

В нормативных данных всех стран учитывается вероятностное значение возможных максимумов скорости ветра V_{10} (на уровне флюгера) при осреднении в течение двух минут.

Средние значения скоростного напора ветра ($q^{6}_{ср} = q_0$), соответствующие установившемуся скоростному напору на высоте 10 м в зависимости от района России, должны приниматься по СНиП 2.01.07-85. Там же приводятся значения коэффициента κ, учитывающего изменение скоростного напора в зависимости от высоты Z и типа А, В или С местности.

Б. *Максимальная в некоторых зонах*, но неравномерная по высоте скорость ветра, возникающая в пограничном слое атмосферы вследствие мезоструйных течений. Максимальные значения скорости ветра при мезоструйных течениях достигают расчетных скоростей, указанных на рис.1.6. Поскольку ось мезоструйного течения может располагаться на любой высоте в пределах пограничного слоя атмо-

сферы, при этом толщина слоя, имеющего максимальную скорость ветра, может быть различной, то расположение и толщина слоя должны выбираться, сообразуясь с наихудшими видами загружения для данного вида сооружения. Пример вариантов изменения скорости ветра с высотой для мачт принимается применительно к схемам, приведенным на рис.1.6, а для башен – согласно рис.1.7. Уменьшение скорости ветра в зонах спада определяется в зависимости от толщины этой зоны (Δh, м) и ветрового района по формуле

$$V_{мин} = V_z - \kappa \Delta V, \qquad (1.10)$$

где V_z – принимается согласно ранее установленному порядку по СНиП; ΔV – определяется по графику на рис.1.8; κ – вычисляется по формуле (1.2).

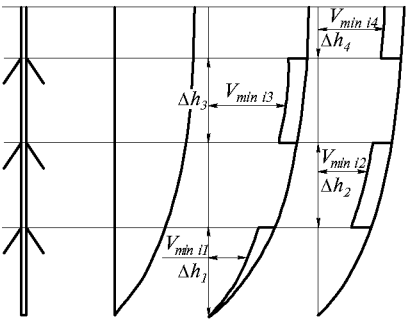


Рис.1.6. Варианты зонального изменения скорости ветра для мачт

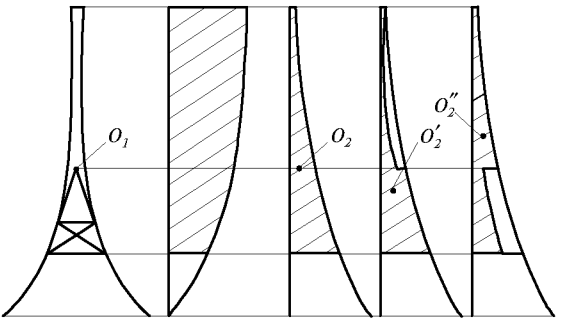


Рис.1.7. Варианты изменения скорости ветра у башен

При этом должно быть выдержано условие:

$$25 \text{ м/с} \geq \kappa \Delta V \leq V_z. \qquad (1.11)$$

В. *Локальные воздействия ветра* при локальных штормах, вихревых шквалах, торнадо, тропических циклонах и т.д. должны учитываться только в районах с часто повторяющимися указанными явлениями. При этом скорость ветра, достигающая штормовых значений вблизи поверхности земли, с высотой почти не возрастает. Данные о локальных воздействиях должны быть получены от местных метеостанций и согласованы с Главной Геофизической Обсерваторией России.

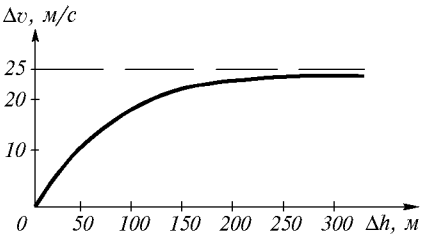


Рис.1.8. Изменение значения скорости ветра ΔV в зависимости от рассматриваемой зоны Δh

Г. *Пульсационное воздействие ветра* характеризуется значением коэффициента пульсации скоростного напора ветра:

$$m_q = \frac{q_{макс} - q_{ср}}{q_{ср}} = \frac{\left(V_{ср} + \Delta\, V_{макс}\right)^2 - V_{ср}^2}{V_{ср}^2} \approx \frac{2\Delta\, V_{макс}}{V_{ср}} = 2m_v. \qquad (1.12)$$

Значения коэффициентов пульсации скоростного напора в одной произвольной точке пространства приняты согласно СНиП 2.01.07-85. Вероятность одновременного воздействия пульсаций скоростного напора в точках, различно расположенных в пространстве по отношению к направлению ветрового потока (рис.1.9) по сравнению с точкой (0), для которой величина пульсации принята максимальной, характеризуется значением коэффициента корреляции, получаемого на основании эмпирической формулы

$$\kappa_{кор x,y,z} = \frac{\Delta V^{\text{вероятн}}_{x,y,z}}{\Delta V_0} = e^{-c^0_{x,y,z}(x,y,z)V^{-1}f}, \qquad (1.13)$$

где индексы x, y, z при $\kappa_{кор}$, ΔV, C^0 характеризуют положение точки, для которой устанавливается коэффициент корреляции по отношению к точке «0», где величина пульсации принята максимальной; (x, y, z) – одна из координат системы; V – скорость ветра; f – частота пульсаций ветрового потока; C^0 – метеорологические характеристики: $C^0_x = 20$; $C^0_y = 1$ и $\kappa_{кор x,y} = 1$; $C^0_z = 4 \div 8$ ($C^0_z = 4$ при неустойчивой, а $C^0_z = 8$ при нейтральной стратификации).

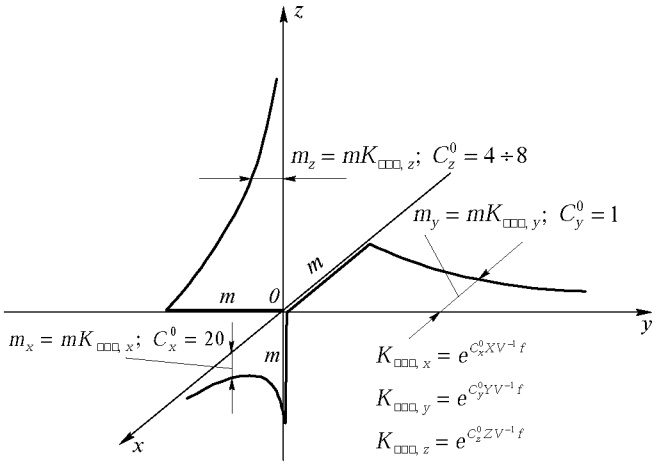


Рис.1.9. Графическое изображение изменения коэффициента корреляции $K_{кор.}$ в направлении ветра (ось Y), по высоте (ось Z) и по горизонтали, перпендикулярно направлению ветра

Д. Оценка влияния пульсаций ветрового потока осуществляется в соответствии со СНиП 2.01.07-85.

Целесообразно использовать работу [6] и зависимость по формуле (1.13), принимая частоту пульсаций f, равной частоте собственных колебаний по наиболее опасной форме. В этом случае целесообразно использовать свойство некоторых параметров, в которые входит значение $\kappa_{кор}$.

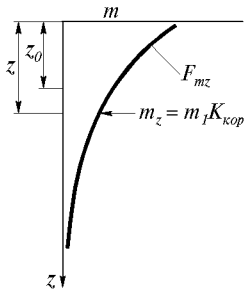


Рис.1.10. Положение центра тяжести Z_0 эпюры, характеризующей изменение коэффициента корреляции $K_{кор.}$ относительно произвольной точки 0

F_0 – площадь эпюры $\kappa_{кор}$ по всей высоте сооружения, характеризующая одновременность действия пульсации:

$$F_0 = \int_0^{H \to \infty} \kappa_{кор} dz = \frac{V}{C^0_z f} \qquad (1.14)$$

расстояние от места приложения максимального значения пульсации до центра тяжести площади эпюры $\kappa_{кор}$ (рис.1.10).

$$z_0 = \frac{\int_0 \kappa_{кор} z dz}{F_0} = \frac{V}{C^0_z f}. \qquad (1.15)$$

На рис.1.11 изображены схемы конструкций: башни, мачты и горизонтального элемента. Для всех этих конструкций принято, что FC_x = const; m = const. Наихудшей формой колебаний для случаев *а* и *б* является первая (для случая *б* первая форма, полагая, что в узлах оттяжек шарниры). В этом случае дополнительный момент от действия пульсаций скоростного напора будет следующим.

Случай *а*:

$$M_{макс.кор} = mq\ F_0\ (H - Z_0)\ FC_x, \qquad (1.16)$$

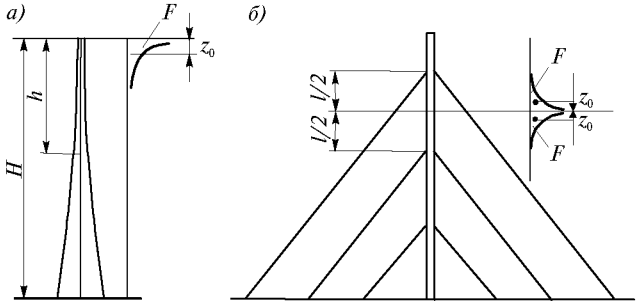


Рис.1.11. Характерные случаи при определении наиболее опасных воздействия пульсации ветрового потока для: *а* – башен; *б* – мачт

причем при постоянном значении m и $\kappa_{кор} = 1$

$$M_{макс} = \frac{mqH^2}{2} FC_x \tag{1.17}$$

или

$$\eta^{б}_{кор} = \frac{M_{макс,кор}}{M_{макс}} = \frac{2V}{C^0_z fH}\left(1 - \frac{V}{C^0_z fH}\right). \tag{1.18}$$

Случай *б*:

$$M_{макс,кор} \approx mqF_0\left(\frac{1}{2} - z_0\right)FC_x, \tag{1.19}$$

причем при постоянном значении m и $\kappa_{кор} = 1$

$$M_{макс} = \frac{mql^2}{8} FC_x \tag{1.20}$$

или

$$\eta^{м}_{кор} = \frac{M_{макс,кор}}{M_{макс}} = \frac{4V}{C^0_z fl}\left(1 - \frac{2V}{C^0_z fl}\right). \tag{1.21}$$

Для случая горизонтального элемента используются выражения (1.19) и (1.20) с заменой значения C^0_z соответствующими значениями C^0_x и $l_б$ значением α.

При изменении скорости ветра значения $\eta^{б}_{кор}$ и $\eta^{м}_{кор}$, указанные в табл.1.4, следует умножить на коэффициент

$$\kappa_v = V_i/25, \tag{1.22}$$

где V_i – скорость ветра на рассматриваемом участке сооружения, м/с.

Таблица 1.4. Значения $\eta^{б}_{кор}$ и $\eta^{м}_{кор}$ для $V = 25$ м/с и $C^0_z = 8$

Наименование	Размер, м	*f*, Гц					
		0,1	0,2	0,4	0,8	1,6	3,2
$\eta^{б}_{кор}$	h 25	–	–	–	0,072	0,038	0,019
	h 50	–	–	0,072	0,038	0,019	0,01
	h 100	–	0,072	0,038	0,019	0,01	0
	h 200	0,072	0,038	0,019	0,01	0	0
$\eta^{м}_{кор}$	l 25	–	–	–	–	–	0,144
	l 50	–	–	–	–	0,144	0,075
	l 100	–	–	–	0,144	0,075	0

Е. *Основные положения расчета при аэродинамической неустойчивости:*

а) Аэроупругие характеристики. Явления аэродинамической неустойчивости возникают в высоких сплошностенчатых гибких конструкциях цилиндрической, призматической (пирамидальной) формы при удлинении:

– в консольных сооружениях и элементах

$$\eta_{HD} = \frac{H}{D_{ср}} \geq 10, \qquad (1.23)$$

– в однопролетных элементах:

с шарнирным опиранием концов

$$\eta_{HD} \geq 17, \qquad (1.24)$$

с защемленными от поворота концами

$$\eta_{HD} \geq 40, \qquad (1.25)$$

где H – длина элемента (или высота сооружения); $D_{ср}$ – среднее значение диаметра или размера поперечного сечения, перпендикулярного направлению ветрового потока.

Для гибких сооружений опасны два вида автоколебаний: ветровой резонанс и галопирование.

Возникновение ветрового резонанса возможно в области значений критической скорости $V_{кр.i}$, соответствующей i-й форме собственных колебаний, определяемой по формуле

$$V_{кр.i} = \frac{D_{ср}}{T_i Sh}, \qquad (1.26)$$

где T_i – период собственных колебаний i-го тона сооружения или элемента конструкций; Sh – число Струхаля, зависящее от формы профиля.

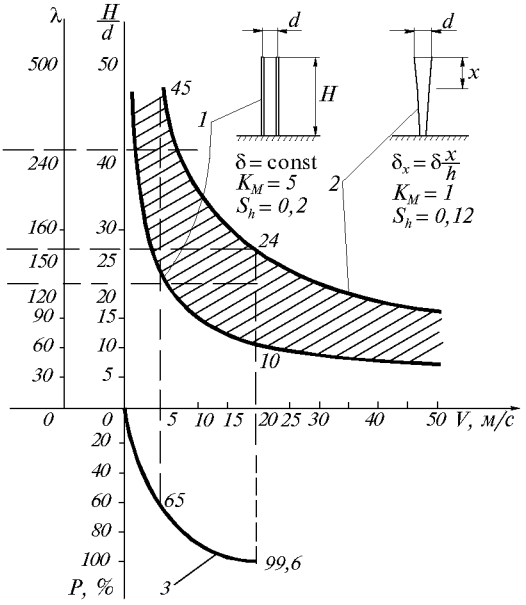


Рис.1.12. Области опасных скоростей ветра для консольных цилиндрических тел при изменении значения – H/d (или λ) при цилиндре постоянной площади поперечного сечения (*1*) и при линейно изменяющейся площади по длине цилиндра (*2*), а также вероятность возникновения колебаний (*3*)

При отсутствии экспериментальных данных число Струхаля может быть ориентировочно определено по формуле

$$Sh = 0{,}225/C_x\,. \qquad (1.27)$$

Области опасных скоростей ветра для консольных цилиндрических тел при изменении значений η_{HD} или $\lambda = 2H/r$ приведены на рис.1.12, где r – радиус инерции сечения в направлении, перпендикулярном ветровому потоку. Данные, приведенные на рис.1.12, могут быть использованы и для других условий опирания, но при иных соотношениях $H/D_{ср}$:

- для шарнирного опирания обоих концов балки

$$H_ш/D_{ср} = 1{,}7\,H/D_{ср}\,; \qquad (1.28)$$

- для защемленных концов

$$H_з/D_{ср} = 4\,H/D_{ср}\,, \qquad (1.29)$$

где H, $H_ш$, $H_з$ – соответственно длина сооружения или элемента сооружения консольно закрепленного, шарнирно опертого по обоим концам, заделанного по обоим концам.

Для консоли постоянной жесткости и внешних габаритных размеров начало галопирующих колебаний возможно при скорости ветра

$$V \geq V_{\varepsilon} = \frac{32M\delta}{DH\left(C_x + \frac{dC_y}{d\alpha}\right)T_i}, \qquad (1.30)$$

где $4/\rho = 32$ – численный коэффициент, имеющий размерность $кг^{-1}\cdot с^{-2}\cdot м^4$; δ – логарифмический коэффициент колебаний; M – масса сооружения ($кг\cdot с^2\cdot м^{-1}$); C_x – коэффициент лобового сопротивления при данном направлении ветрового потока, характеризуемом углом α; $C_y = f_y(\alpha)$ – коэффициент подъемной силы, зависящий от угла атаки α.

б) *Моделирование.* Проведение испытаний полужестких моделей (упруго закрепленных жестких отсеков) в аэродинамических трубах рекомендуется для выявления качественной картины обтекания колеблющегося профиля воздушным потоком, определения аэродинамических коэффициентов лобового сопротивления C_x, подъемной силы C_y продольного момента m_z и т.д., а также ориентировочной оценки эффективности и выбора параметров аэродинамических средств гашения колебаний.

При экспериментальном определении величины C_x, C_y, m_z необходимо соблюдать геометрическое подобие полужесткой модели натурной конструкции и подобие по числам Рейнольдса:

$$\left[\mathrm{Re}_н = \frac{V_н d_н}{\nu_н}\right] = \left[\mathrm{Re}_м = \frac{V_м d_м}{\nu_м}\right], \qquad (1.31)$$

причем индексы *н* и *м* относятся соответственно к натурному объекту и модели.

Для тел с острыми боковыми кромками соблюдение подобия по Re желательно, но не обязательно; для профилей с круглым и эллиптическим поперечным сечением и сечением в виде многоугольника со скругленными углами подобие по Re обязательно. Необходимо также соблюдение масштаба шероховатости

$$\left[\overline{\kappa}_н = \frac{e_н}{d_н}\right] = \left[\overline{\kappa}_м = \frac{e_м}{d_м}\right], \qquad (1.32)$$

где e – средняя высота бугорка шероховатости и создание в трубах потока, имеющего параметры натурного ветрового потока (профиль скорости ветра, порывистость и пр.).

В значение C_x, определенное путем испытаний в аэродинамической трубе с закрытой рабочей частью, следует вводить поправку, учитывающую соотношение размеров модели и рабочей части трубы в том случае, когда модель занимает более 5% площади сечения рабочей части трубы:

$$C_x = C'_x\left(\frac{F_{сеч.тр} - F_{мод}}{F_{сеч.тр}}\right)^2, \qquad (1.33)$$

где C'_x – замеренное в опыте значение коэффициента лобового сопротивления; $F_{сеч.тр}$ – площадь отверстия аэродинамической трубы; $F_{мод}$ – теневая площадь модели.

Проведение испытаний аэроупругих моделей в аэродинамических трубах (динамические испытания) рекомендуется для определения диапазона углов атаки, опасных по условиям возникновения автоколебаний, величин критических скоростей и амплитуд предельных циклов автоколебаний, величин динамических прогибов, изгибающих моментов и напряжений, а также количественной оценки эффективности механических и аэродинамических средств гашения колебаний конструкций. Динамические испытания конструкций должны производиться на аэроупругих моделях, а для

оценки величины напряжений в действительной конструкции – на конструктивно подобных натуре моделях. При таких испытаниях должно соблюдаться геометрическое подобие натуре, подобие по числу Коши (C_0^*), числу Струхаля (Sh) и числу Рейнольдса (Re). Последнее обязательно для тел, не имеющих острых боковых кромок.

$$\left[C^*_{он} = \frac{(EJ)_н}{\rho_н V_н^2 d_н^4}\right] = \left[C^*_{ом} = \frac{(EJ)_м}{\rho_м V_м^2 d_м^4}\right], \qquad (1.34)$$

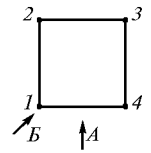
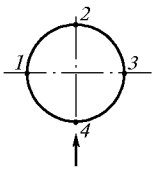
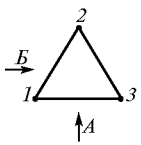
$$\left[Sh_н = \frac{d_н}{V_н T_н}\right] = \left[Sh_м = \frac{d_м}{V_м T_м}\right], \qquad (1.35)$$

где EJ – жесткость конструкции или модели.

Для соблюдения при модельных экспериментах в аэродинамических трубах с небольшими размерами рабочей части подобия одновременно по числам Re, Sh и C_0^* необходимо проводить испытания с повышенной плотностью рабочей среды, т.е. в трубах с повышенным давлением.

в) *Основные положения расчета при аэродинамической неустойчивости.* Если максимальная скорость ветра в рассматриваемом районе на данной высоте $V_{макс}$ меньше $V_{кр,i}$ (формула 1.26), то возникновение ветрового резонанса невозможно. В большинстве случаев $V_{кр,i} < V_{макс}$, т.е. возможно возникновение резонансных колебаний. Если $V_{макс} > V_г$ (формула 1.30), то расчет на галопирование не производится. Усилия, возникающие в направлении действия ветра и в поперечном направлении при резонансе, складываются геометрически. В табл.1.5 приведены некоторые наиболее характерные случаи сложения усилий или перемещений $X^{рез}(Z)$, возникающих при резонансе с соответственно статической и динамической составляющей усилий или перемещений $X^с(Z)$, $X^д(Z)$ от действия ветра по потоку.

Таблица 1.5. Характерные случаи сложения усилий и перемещений при срывных воздействиях

№ случая	Схема	Направление ветра и расчетные точки	Формула $X^i(Z)$
I		А для всех точек	$\sqrt{\left[X^{рез}(Z)\right]^2 + \left[X^с(Z) + X^д(Z)\right]^2}$
		Б 1,3	$X^{рез}(Z)$
		2,4	$X^с(Z) + X^д(Z)$
II		1,3	$X^{рез}(Z)$
		2,4	$X^с(Z) + X^д(Z)$
III		А 2	$X^с(Z) + X^д(Z)$
		3,1	$\sqrt{\left[X^{рез}(Z)\right]^2 + \left[X^с(Z) + X^д(Z)\right]^2}$
		Б 2	$X^{рез}(Z)$
		3,1	$\sqrt{\left[X^{рез}(Z)\right]^2 + \left[X^с(Z) + X^д(Z)\right]^2}$

При определении усилий или перемещений при резонансе

$$X^{рез}(Z) = \frac{\pi}{\delta} X^{c}(Z) \qquad (1.36)$$

логарифмический декремент колебаний принимается равным $\delta = 0{,}05$, если нет данных, обосновывающих его отличие от указанного значения.

При определении статического воздействия силы поперек ветрового потока $X^c(Z)$, коэффициент C_y поперечной силы принимается на основании экспериментальных данных. Для кругового цилиндра, согласно СНиП, $C_y = 0{,}25$.

Напряжения в конструкции, полученные на основе данных об усилиях при колебаниях, не должны превышать значений, получаемых согласно СНиП II-23-81* и коэффициентов, указанных в приложении 8 к нему, при количестве циклов нагружения более $5 \cdot 10^6$. В случае отсутствия в СНиП или настоящем справочнике значения коэффициента C_y он может быть определен экспериментальным путем.

1.1.6. Обледенение. Нормативная гололедная нагрузка ($p_к$) определяется согласно [31].

В тех случаях, когда известно, что в районе строительства возможны регулярные случаи образования плотных гололедно-изморозевых отложений типа смеси с плотной наружной коркой обледенения и с последующими ветрами $V \approx 0{,}5 V_{макс}$, расчет должен производиться по специальным техническим условиям, согласованным с ГГО.

1.1.7. Температура. Нормативные температурные климатические воздействия определяются согласно [31]. В случае необходимости уточнения характера изменения температуры по высоте сооружения предлагается использовать график, приведенный на рис.1.13, на котором показан характер изменения температуры воздуха с высотой в слое от поверхности земли до высоты 2 км. Значение температур у земли даны через 4°. По значениям температуры наружного воздуха наиболее холодной пятидневки ($t_{хол.пят}$) на графике выбирается кривая, у которой значение температуры воздуха вблизи земной поверхности (считываемое по оси абсцисс), равно значению температуры воздуха наиболее холодной пятидневки ($t_{хол.пят}$). По этой кривой определяется характер изменения расчетной температуры для сооружений по высоте. В том случае, если значение $t_{хол.пят}$ окажется между 4-х градусными интервалами температурных кривых, нужные значения $t_{расч}$ определяются с помощью интерполяции между ближайшими значениями температурных кривых на графике.

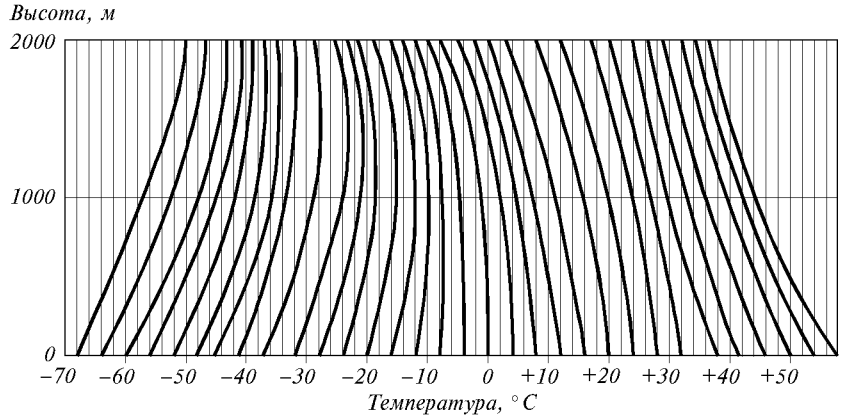


Рис.1.13. Изменения температуры воздуха с высотой и в слое над поверхностью земли до 2000 м

1.1.8. Особые воздействия

а) *Сейсмические воздействия*. При определении сейсмических воздействий на опоры следует руководствоваться СНиП II-7-81*. Применительно к нормам на сейсмические воздействия возможно вести расчет опор от действия подземных взрывов. Величина коэффициента сейсмичности κ_c принимается по данным специализированных организаций.

б) *Монтажные воздействия и воздействия при транспортировании*. При определении монтажных нагрузок необходимо учитывать способы монтажа (осуществляемого путем наращивания, подращивания, подъема целиком, комбинированным способом), влияющие на изменение расчетной схемы по отношению к конечной, являющейся эксплуатационной.

При нестандартных условиях транспортирования элементы конструкций опор должны быть рассчитаны в соответствии со схемами их укладки и характером силовых воздействий при транспортировке.

в) *Прочие особые воздействия*. Воздействия при воздушных взрывах учитываются в соответствии со специальными нормами. Одностороннее тяжение антенн, возникающее в результате опускания или их обрыва, учитывается в особых условиях, оговоренных в задании на проектирование.

Сохранность мачт от разрушения при обрыве одной из оттяжек мачт может учитываться в расчете только при специальных заданиях заказчика для объектов с особой ответственностью. При этом оговариваются особые условия напряженного состояния. Изменение режима натяжения оттяжек при их съеме должно учитываться путем изменения в худшую сторону величины предварительного натяжения на ±25%. В оговариваемых при задании условиях возможен учет просадок фундаментов у мачт и башен. При просадках, вызывающих увеличение напряжений в элементах конструкции по отношению к расчетному сопротивлению на 20% и более, необходимо принимать конструктивные меры по сохранению расчетных параметров.

1.2. Конструктивные решения и методы расчета башен

1.2.1. Схемы башен. В табл.1.6 приведены области наиболее рациональных параметров решетчатых башен в зависимости от высоты сооружений и доли воздействия технологического оборудования.

Применение башен неправильной формы в плане, в первую очередь, в виде прямоугольника рационально в тех случаях, когда характер силового воздействия, обуславливаемый действием в основном горизонтальных сил, различен относительно поперечного сечения опоры, но постоянен по времени. С целью создания равнопрочной конструкции соотношение сторон при прямоугольном плане должно удовлетворять следующему условию:

$$a_x / a_y \approx M_{xz} / M_{yz} , \qquad (1.37)$$

где M_{xz}, M_{yz} – моменты, действующие в указанных плоскостях (z – вертикальная ордината); a_x, a_y – размеры сторон прямоугольника.

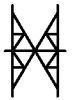
1.2.2. Виды решеток и размещение диафрагм. В башнях применяются виды решеток, указанные в табл.1.6.

Для опор высотой более 100 м при трубчатых поясах и коэффициенте $Q_{об}/(Q_{об}+Q_{св}) \le 0{,}025$ наиболее экономична перекрестная предварительно напряженная решетка из круглой стали повышенной прочности или из канатов. При высоте до 50 м для некоторых видов опор применяются прокатные профили. На рис.1.14 приведены основные виды решеток, применяющихся в опорах линий электропередачи.

Таблица 1.6. Области рациональных параметров решетчатых башен

Высота, м	$\frac{Q_{об}}{Q_б + Q_{об}}$	Форма в плане			Сортамент				Класс стали		Внешняя конфигурация		
				многоугольник					С 235	С 285 С 345			
до 50	0	+			+				+			+	+
	0,25	+			+				+			+	+
	0,5		+		+	+			+			+	+
	1,0		+	+	+	+			+	+	+	+	+
100	0	+			+				+			+	+
	0,25	+	+		+				+			+	+
	0,5		+		+				+			+	+
	1,0		+	+	+	+			+	+	+	+	+
200	0	+			+				+			+	+
	0,25	+	+		+				+			+	+
	0,5		+	+	+				+	+		+	+
	1,0			+	+	+	+	+	+	+		+	+
400	0	+			+				+			+	+
	0,25		+	+	+				+	+		+	+
	0,5			+	+		+	+		+		+	+
	1,0			+	+	+	+			+		+	+

Окончание табл. 1.6.

Высота, м	$\frac{Q_{об}}{Q_б + Q_{об}}$	Геометрические параметры		Монтажные соединения			Вид решетки		
		$\frac{a_{осн}}{H}$	$\frac{a_в}{H}$	сварка	высокопрочные болты	фланцы			
до 50	0	$\frac{1}{20} \div \frac{1}{10}$	В соответствии с требованиями задания	При монтаже способом подращивания или подъема целиком		При поясах из труб	При поясах из труб	При поясах из  или ●	При любом сортаменте
	0,25								
	0,5				+				
	1,0				+				
100	0								При поясах из труб
	0,25								
	0,5								
	1,0				+				
200	0								
	0,25								
	0,5								
	1,0				+				
400	0								
	0,25								
	0,5								
	1,0				+				

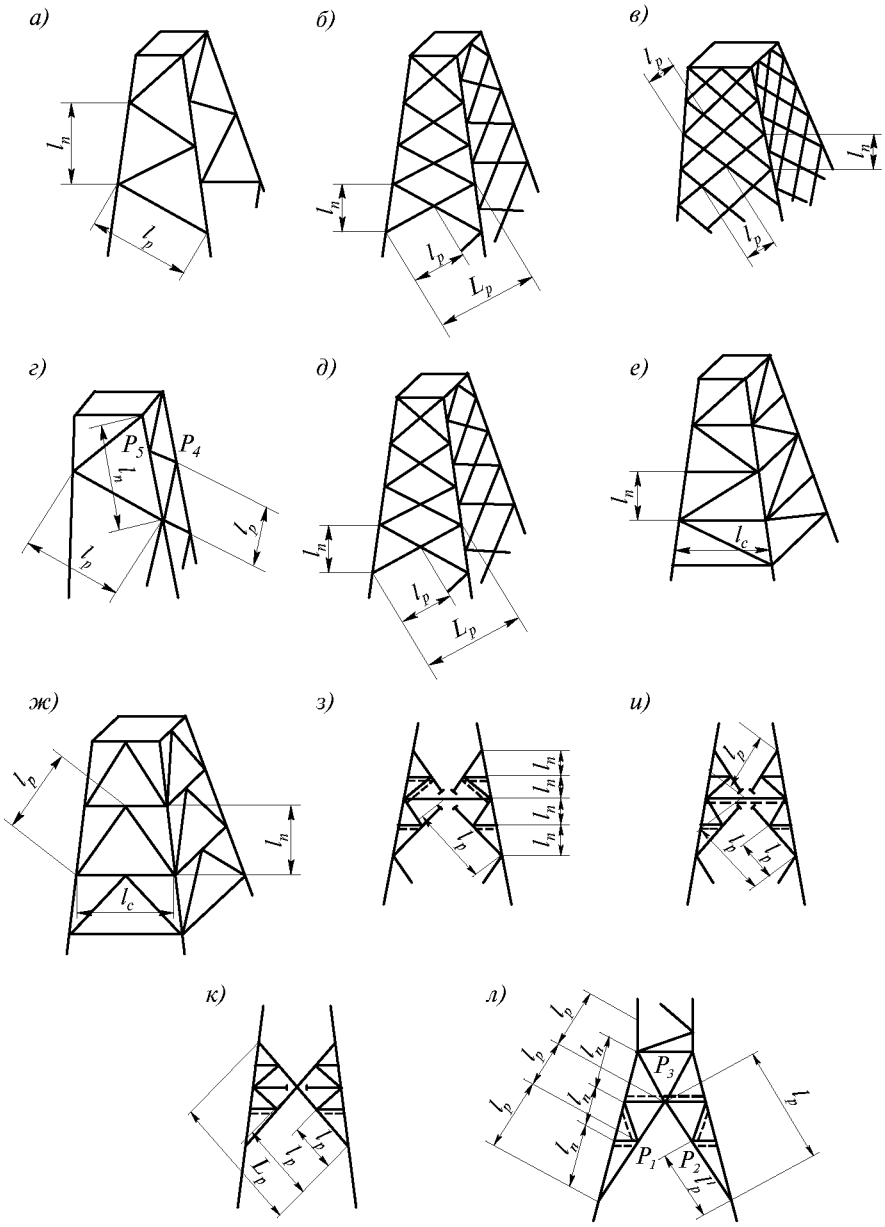


Рис.1.14. Основные виды решеток применяющиеся в опорах линий электропередачи: *а* – треугольная с несовмещенными в смежных гранях узлами; *б* – то же, но перекрестная; *в* – сложная перекрестная; *г* – треугольная с совмещенными в смежных гранях узлами; *д* – то же, но перекрестная; *е* – треугольная с распорками; *ж* – с восходящими раскосами; *з*, *к*, *л* – ромбические треугольные

При опорах большой высоты (300 м и более) с целью использования существующего на металлургических заводах проката вынуждены применять в основании правильные многоугольники с большим числом сторон. В этом случае для уменьшения числа операций по соединению решетки на монтаже целесообразно применение блочной системы решетки по схеме, указанной на рис.1.15.

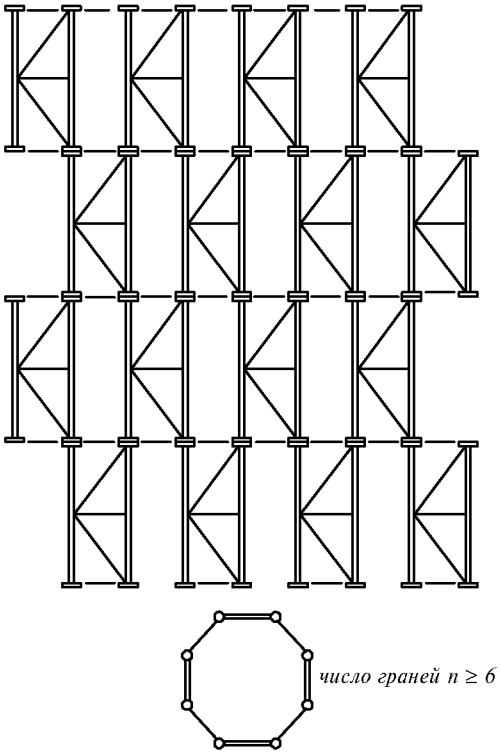


Рис.1.15. Блочная схема решетки для башен

Если диафрагмы не несут специальных нагрузок, а обеспечивают геометрическую неизменяемость формы поперечного сечения при распределенном действии ветра, то их необходимо устанавливать в местах переломов и при отсутствии надлежащих обоснований не реже, чем через интервалы, равные трехкратному среднему размеру описанного по поясам диаметра.

1.2.3. Особенности расчета решетчатых башен. Башни являются внешне статически определимыми системами и методика определения в рассматриваемом сечении M, N, Q зависит от параметров башни и решетки. Перераспределение усилий между отдельными элементами башен: поясами, раскосами и распорками зависит не только от формы в плане и направления силовых воздействий, но и от схемы решетки. Обычно пренебрегают жесткостью узлов башен при отношении высоты пояса (d) к пролету панели (l_n) больше 0,1. Внутренне статически неопределимыми являются системы с перекрестными раскосами, при расчете которых должно учитываться влияние сил веса и предварительного натяжения. В башнях с симметричной формой поперечного сечения для случая крестообразных раскосов без предварительного натяжения распределение усилий между отдельными поясами и гранями (решеткой) при отсутствии местных сил может определяться по формулам:

$$N_{пояса\ макс} = 2M_{об}(nr_{оп}\cos\alpha)^{-1}; \tag{1.38}$$

$$Q_{гр\ max} = 2Q_{об}n^{-1}; \tag{1.39}$$

$$N_{пояса\ р} = -\frac{p_{об}}{n\cos\alpha}\cdot\frac{\sin\alpha_p tg^2\alpha_p\dfrac{F_p}{F_{pn}}+\left(1+tg^2\alpha_p\right)\dfrac{F_n}{F_{pn}}}{2\cos\alpha_p+\sin\alpha_p tg^2\alpha_p\dfrac{F_p}{F_{pn}}+\left(1+tg^2\alpha_p\right)\dfrac{F_n}{F_{pn}}}; \tag{1.40}$$

$$N_{раск\ р} = -\frac{p_{об}}{n\cos\alpha}\cdot\frac{1}{2\cos\alpha_p+\sin\alpha_p tg^2\alpha_p\dfrac{F_p}{F_{pn}}+\left(1+tg^2\alpha_p\right)\dfrac{F_n}{F_{pn}}}; \tag{1.41}$$

$$N_{расп\ р} = N_{раск\ р}\sin\alpha_p, \tag{1.42}$$

где $M_{об}$, $Q_{об}$, $p_{об}$ – соответственно общие изгибающий момент, поперечная сила и вертикальное усилие в рассматриваемом сечении; n – число граней; $r_{оп}$ – описанный радиус по центру сечения; α – угол наклона пояса к вертикали; α_p – угол наклона раскоса к вертикали; F_n, F_p, F_{pn} – соответственно площади поясов, раскосов и распорок.

При статически определимой решетке формула (1.40) приобретает следующий вид:

$$N_{\text{пояса } p \text{ стат опр}} = -\frac{p_{об}}{n\cos\alpha}; \qquad (1.40а)$$

$$N_{\text{раск } p \text{ стат опр}} \approx 0 \approx N_{\text{расп } p \text{ стат опр}}. \qquad (1.40б)$$

Усилия от кручения, действующие в плоскостях граней, определяются по формуле

$$Q_{\text{пан } M_{кр}} = \frac{M_{кр}}{nr_{оп}\cos\frac{\pi}{n}}. \qquad (1.43)$$

На указанное усилие рассчитываются лишь элементы решетки; усилия в поясах

$$N_{\text{пояс, } M_{кр}} = 0. \qquad (1.44)$$

При крестовой решетке в местах заделки поясов в фундамент со статической неопределимостью от действия сил веса должен учитываться распор, величина которого в каждой грани равна

$$H_p = \frac{P}{n\cos\alpha}\cdot\frac{\sin\alpha_p}{2\cos\alpha_p + \left(1+tg^2\alpha_p\right)\frac{F_n}{F_p}}. \qquad (1.45)$$

Усилие по биссектрисе центрального угла равно

$$H_{p.бис} = 2H_p\sin\frac{\alpha}{2} = 2H_p\sin\frac{\pi}{n}, \qquad (1.46)$$

где $\alpha = 2\pi/n$; n – число граней.

При изменении температуры воздуха по сравнению с температурой в момент замыкания первой секции башни на фундамент действуют следующие горизонтальные силы в направлении биссектрисы угла между гранями:

$$H_{t\,бис} \cong \frac{3\alpha\, t}{2\cos\pi/n}\cdot\frac{aEJ}{l_n^3}, \qquad (1.47)$$

где a – сторона грани в основании; l_n – высота панели, примыкающей к фундаменту; J – момент инерции пояса.

При этом на пояс башни и на фундамент действует изгибающий момент, равный

$$M_{изг.t} = H_{t\,бис}\, l_n. \qquad (1.48)$$

Расчет от действия горизонтальных сил целесообразно вести независимо от составляющих, нормальных граням, суммируя получающиеся усилия.

Расчет от действия нормальных сил и изменения температуры следует вести, руководствуясь ранее изложенными соображениями. При этом в запас принимается

$$\cos\pi/n = 1. \qquad (1.49)$$

При действии крутящего момента при прямоугольной форме распределение усилий между гранями может приниматься по следующим формулам:

$$Q_x = M_{кр}/(2a_y), \qquad (1.50)$$

$$Q_y = M_{кр}/(2a_x) \qquad (1.51)$$

Обозначения приведены на рис.1.16.

Башни должны обязательно проверяться на зональное воздействие ветра (рис.1.7), используя формулы (1.10) и (1.11).

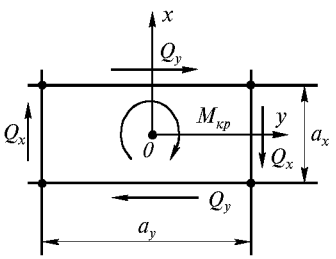


Рис.1.16. Схема распределения усилий в гранях ствола прямоугольной формы при действии крутящего момента

При расчете решетчатого ствола рациональна следующая последовательность расчета:

а) устанавливаются габаритные размеры башни и геометрическая схема разбивки на панели, руководствуясь опытом и соображениями, изложенными в предыдущих разделах;

б) приближенно задаются значением периода собственных колебаний башни по первой форме по формуле:

$$T_1 \approx \frac{H(\text{м})}{100}(\text{сек}); \tag{1.52}$$

в) принимая на основании опыта и соображений, изложенных в предыдущих пунктах, установленные габаритные размеры и геометрическую разбивку ствола на зоны для верхней секции, задаются размером сечений, входящих в состав элементов, и определяется нагрузка и усилия в элементах этой секции и напряжения;

г) если напряжения в одном из основных элементов (пояс, раскос, распорка)

$$\sigma \neq Rm, \tag{1.53}$$

то изменяют сечения и производят перерасчет до тех пор, пока

$$\sigma \approx Rm, \tag{1.54}$$

д) после определения путем расчета размеров сечений верхней секции переходят к расчету следующей секции. При этом принимается полученная нагрузка от вышележащей секции и методом попыток, как и для первой секции, определяют сечения во второй секции;

е) аналогично ведется расчет и всех нижележащих секций.

В тех случаях, когда имеются программы для расчета башен на ПЭВМ, ручной счет может быть использован лишь для приближенных расчетов, или качественной оценки результатов расчетов на ПЭВМ.

С целью унификации сечений расчет ведут не для всех секций, а группируя одинаковые сечения в 2-х или даже в 3-х секциях. В качестве первого приближения можно принимать следующее число рассчитываемых сечений при высоте до 50 м – 4÷5, 100 м – 6÷8, 200 м – 8÷12, 400 м – 10÷16.

После первого этапа расчета уточняют применительно к полученным в результате характеристикам (распределением масс и жесткостей сечения ствола по высоте), значение периода собственных колебаний и при существенном отличии (более чем в 1,5 раза) от первоначального производят перерасчет конструкции. Для определения периодов собственных колебаний башен целесообразно использовать существующие программы, составленные в различных организациях для различных классов ПЭВМ.

Наиболее опасные направления ветра при расчете поясов (А) и решетки (Б) башен с различной формой поперечного сечения в плане показаны на рис.1.17.

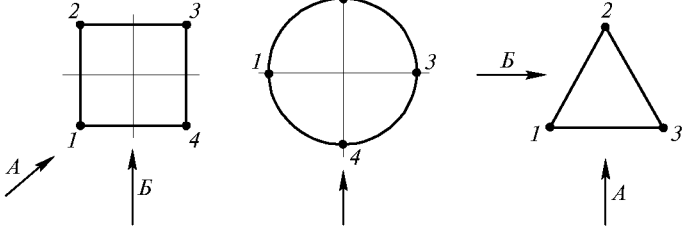


Рис.1.17. Схемы наиболее опасных направлений ветра: *А* – при расчете поясов; *Б* – при расчете решетки для башен с различной формой поперечного сечения

Прогиб башни в плоскости данной грани может быть определен как функция прогиба этой грани по формуле

$$y_j = \sum \frac{N_i N_{ji} l_i}{F_i E} = \frac{1}{E} \sum \sigma_i \overline{N}_{ji} l_i, \qquad (1.55)$$

где y_j – прогиб в данной грани в точке j от внешних воздействий, вызывающих в произвольном i-м элементе данной грани с площадью F_i усилие N_i; $\sigma_i = N_i / F_i$ – напряжение в i-м элементе; N_{ji} – усилие в i-м элементе от силы $H = 1$, приложенной в точке j в направлении искомого отклонения; l_i – длина i-го элемента.

Если плоскость грани не совпадает с направлением действующих сил и составляет с ним угол α (рис.1.18), то перемещение башни в точке j равно

$$y_{\alpha j} = y_j \cos\alpha = \frac{\cos\alpha}{E} \sum \sigma_i \overline{N}_{ji} l_i. \qquad (1.56)$$

Угол поворота сечения башни в вертикальной плоскости можно в первом приближении определять, сообразуясь с поворотом одной из граней:

$$\varphi = \frac{\left(Z_{1j} - Z_{2j}\right)\cos\alpha}{l_n a}, \qquad (1.57)$$

где Z_{1j} и Z_{2j} – вертикальные перемещения двух точек грани (см.рис.1.18):

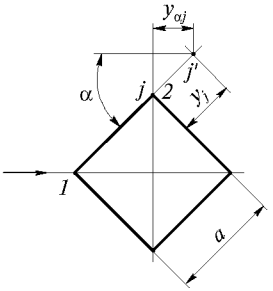


Рис.1.18. Связь между перемещением изолированной плоской грани фермы, образующей грань башни, и перемещением башни

$$Z_{1j} = \frac{1}{E} \sum \sigma_i N_{ji} v_1 l_i, \qquad (1.58)$$

$$Z_{2j} = \frac{1}{E} \sum \sigma_i N_{ji} v_2 l_i. \qquad (1.59)$$

Для упрощения расчета допускается использовать результаты, полученные по формуле (1.57)

$$\varphi = \left(Z_{\alpha j} - Z_{\alpha(j-1)}\right) / l_n \,, \qquad (1.60)$$

где j, $j-1$ – узлы ближайших по высоте панелей башни; l_n – размер панели (расстояние между j и $j-1$ точками).

1.3. Конструктивные решения и методы расчета мачт

1.3.1. Общие сведения. Мачты, применяемые в настоящее время, могут быть разделены на два вида: стационарные и перебазируемые. Последние, в свою очередь, подразделяют на перевозные и мобильные.

Приведенное разделение мачт, главным образом, характеризуется временем нахождения мачты или сооружения, в состав которого она входит, на одном месте. Отнесение мачты к одному из указанных выше видов предъявляет определенные требования по затрате времени для ее перевода из транспортного положения в рабочее (в стационарном варианте – времени монтажа). Эти требования в значительной степени влияют на конструктивное решение мачты.

Мачта состоит из трех основных частей:

а) ствола – упругого стержня, располагаемого обычно вертикально, способного воспринимать продольные и поперечные нагрузки, которые могут иметь различные направления в плане по отношению к стволу, в связи с изменением направления ветра;

б) оттяжек, являющихся упругими опорами для ствола;

в) фундаментов: центрального, на который опирается или в который заделывается ствол мачты, и анкерных, к которым крепятся оттяжки.

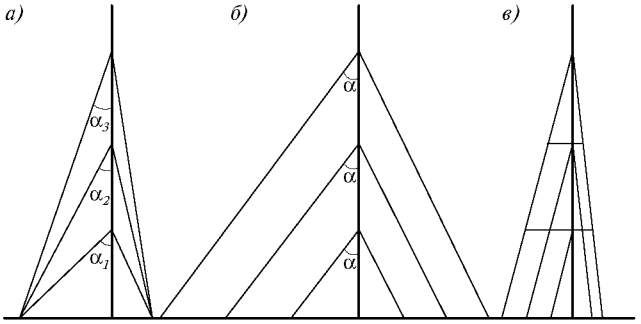


Рис.1.19. Схемы мачт
а – с оттяжками, сходящимися у одного анкера; *б* – с оттяжками, закрепленными у разных анкеров; *в* – с реями, уменьшающими провисание оттяжек

Иногда, в целях уменьшения провисания оттяжек и улучшения виброустойчивости мачт, устанавливают реи, сокращающие пролеты оттяжек. Схемы мачт без рей и с реями даны на рис.1.19.

На мачту при ее эксплуатации постоянно действуют: силы веса ствола $g_{j\,ств}$, оттяжек $g_{j\,от}$, а также усилия от предварительного натяжения оттяжек в каждом j-м узле мачты:

$$N_{jot} \approx \sigma_{jot} F_j n_j \cos\alpha_j, \qquad (1.61)$$

где j – индекс, указывающий на положение узла крепления оттяжки к стволу мачты; 0, t – индексы, указывающие на то, что напряжение монтажное (0 – при отсутствии ветра и обледенения при соответствующей температуре воздуха t); F_j – площадь поперечного сечения оттяжки; σ_{jot} – монтажное напряжение в оттяжках данного яруса при рассматриваемой температуре; n_j – число оттяжек данного яруса в плане; α_j – угол наклона хорд оттяжек к стволу.

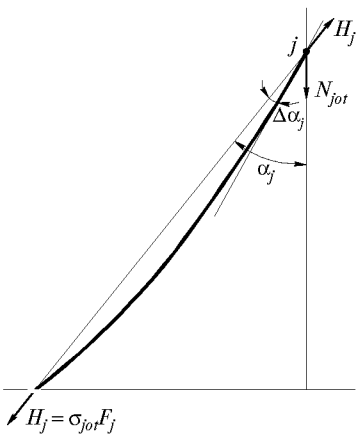


Рис.1.20. Схема усилий в оттяжке

Для уточнения монтажного воздействия при определении N_{jot}, следует принимать за угол α_j угол между стволом и касательной в точке крепления оттяжек к стволу. Достаточное уточнение достигается при использовании формулы

$$N_{jot} \approx \sigma_{jot} F_j n_j \cos\left(\alpha_j - \Delta\alpha_j\right), \qquad (1.62)$$

где $\Delta\alpha_j \approx g_{ij} h_j \mathrm{tg}\alpha_j \left(2\sigma_{jot} F_j\right)^{-1}$ – угол между хордой и касательной у оттяжки (рис.1.20).

Допускается рассчитывать мачту и проводить оптимизацию ее параметров, используя следующие допущения:

а) мачта расчленяется на ствол и оттяжки;

б) статический расчет производится в соответствии с методикой, изложенной далее, и в соответствии с ней определяются как в нелинейной системе жесткости узлов, которые в дальнейшем расчете на динамическую добавку принимаются постоянными;

в) определение собственных частот и форм колебаний ствола мачты производится только для первого тона при ручном счете, а при использовании ПЭВМ количество учитываемых в расчете тонов определяется в соответствии с п.6.8 СНиП 2.01.07-85 [31];

г) приращение напряжений и перемещений от динамических добавок определяется для каждой формы раздельно, поэтому среднеквадратические значе-

ния динамической добавки суммируются со статическими значениями согласно [31]

$$X = X^c + \sqrt{\sum \left(X_i^д\right)^2}, \tag{1.63}$$

где X^c, $X^д$ – усилия или перемещения соответственно от статической и динамической нагрузки при i-й форме собственных колебаний;

д) усилия в оттяжках находятся из расчета отдельных вант на суммарные нагрузки от расчетного ветра с учетом коэффициента пульсаций и коэффициента корреляции, принимаемых согласно [31] и прикладываемых статически к оттяжке, у которой точка крепления к стволу мачты переместилась в положение, определяемое от суммарных воздействий – статических и динамических добавок.

Мачты высотой более 500 м обязательно проверяют на зональное воздействие ветра (рис.1.6), используя формулы (1.10) и (1.11). Предотвращение колебаний оттяжек мачт выбором соответствующих параметров в настоящее время невозможно вследствие изменчивости многих параметров оттяжек и воздействий. Поэтому при конструировании необходимо использовать апробированные способы предотвращения колебаний, а расчет деталей крепления оттяжек мачт к стволу проводить на выносливость в соответствии со СНиП II-23-81*.

1.3.2. Основные положения расчета нитей. Расчетные данные для нитей, нагруженных равномерно по длине (цепная линия), по горизонтали (парабола) и в направлении радиусов (окружность), приведены в табл.1.7.

При загрузке нити сосредоточенными силами (изоляторы, подвески, механические детали и пр.) расчет можно вести на распределенную эквивалентную нагрузку, которая при числе сосредоточенных сил более трех и равномерном их распределении по пролету может быть определена по формуле

$$g_{экв} \approx \sum p_i / l \tag{1.64}$$

или во всех случаях

$$g_{экв} \approx 8\, M_{макс} / l^2\ , \tag{1.65}$$

где $M_{макс}$ – максимальный изгибающий момент, определенный как для однопролетной балки от действия сил p_i.

Если наклонная нить, имеющая распределенный вес, удовлетворяет условию

$$f_0 / l \le \operatorname{tg}\alpha / 160, \tag{1.66}$$

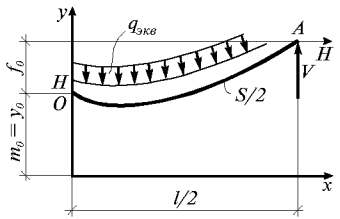
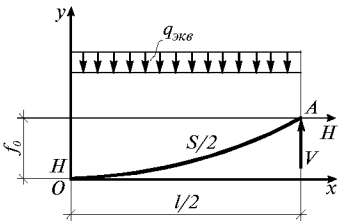
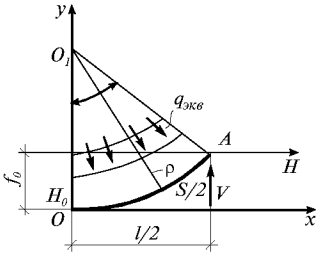
то ее можно рассчитывать как нить пролетом l под нагрузкой $g_0 \sin\alpha$ (пренебрегая касательными составляющими $g_0 \cos\alpha$), так как погрешность в расчете не превышает 5%. При более точных расчетах или невыполнении условия (1.66) необходимо учитывать касательные составляющие и определять усилия в верхней и нижней точках закрепления наклонной нити оттяжки по формулам:

$$T_A = \sqrt{F^2\sigma_0^2 - F\sigma_0^2 g_0 h + \frac{g_0^2 l^2}{4}} \approx H_0 - \frac{g_0 l}{2}; \tag{1.67}$$

$$T_B = \sqrt{F^2\sigma_0^2 + F\sigma_0^2 q_0 h + \frac{g_0^2 l^2}{4}} \approx H_0 + \frac{g_0 l}{2}; \tag{1.68}$$

где $H_0 = \sigma_0 F$; H_0 – монтажное усилие в середине оттяжки; T_A – усилие в оттяжке у точки закрепления к анкеру; T_B – усилие в оттяжке у точки закрепления к стволу; q_0 – эквивалентный вес 1 м длины оттяжки; $h = l\cos\alpha$ – расстояние между точками закрепления оттяжки по вертикали; l – длина оттяжки по хорде.

Таблица 1.7. Основные расчетные данные для нитей различного очертания

Расчетный показатель			Нагрузка на нить		
			постоянная по длине	постоянная по длине горизонтальной проекции (хорде)	постоянная и действующая в направлении радиусов с центром O_1
Схема приложения нагрузок и обозначения					
Уравнение кривой			$y = y_0 ch\frac{x}{y_0}$, где $y_0 + f_0 = y_0 ch\frac{l}{2y_0}$.	$y = \frac{g_{экв}x^2}{2H}$.	$y = \rho - \sqrt{\rho^2 - x^2}$, где $\rho = \frac{l^2 + 4f_0^2}{8f_0}$.
Вид кривой			Цепная линия	Парабола	Окружность
Длина дуги S	Формула	точная	$S = l\left[1 + \frac{8}{3}\left(\frac{f_0}{l}\right)^2 + \frac{32}{15}\left(\frac{f_0}{l}\right)^4 + \ldots + \frac{\left(f_0/l\right)^{2n}\cdot 2^{4n}}{(2n+1)!}\right]$; $\frac{f_0}{l} \le 1$.	$S = l\left[1 + \sum_{n=1}^{\infty}\left(\frac{f_0}{l}\right)^{2n}(-1)^{n+1} \times \left|\prod_{k=1}^{n}(2k-3)\right|\frac{2^{3n}}{n!(2n+1)}\right]$; $f_0/l < 1/4$	$S = l\left[1 + \sum_{n=1}^{\infty}\frac{\prod_{k=1}^{n}(2k-1)2^{4n}}{(2n+1)\prod_{k=1}^{n}(2k)}\left(\frac{f_0}{lk}\right)^{2n}\right]$; $\frac{f_0}{l} \le \frac{1}{2}$ $S = 2\pi\rho - l\left[1 + \sum_{n=1}^{\infty}\frac{\prod_{k=1}^{n}(2k-1)2^{4n}}{(2n+1)\prod_{k=1}^{n}(2k)}\left(\frac{f_0}{lk}\right)^{2n}\right]$; $f_0/l > 1/2$

Окончание табл. 1.7

Расчетный показатель			Нагрузка на нить		
			постоянная по длине	постоянная по длине горизонтальной проекции (хорде)	постоянная и действующая в направлении радиусов с центром O_1
Длина дуги S	Формула	приближенная	$S \approx l\left[1+\frac{8}{3}\cdot\left(\frac{f_0}{l}\right)^2\right]$	$S \approx l\left[1+\frac{8}{3}\cdot\left(\frac{f_0}{l}\right)^2\right]$	$S \approx l\left[1+\frac{8}{3}\cdot\left(\frac{f_0}{lk}\right)^2\right]$, где $k = 1+\frac{4f^2}{l^2}$
Зависимость между прогибом в нижней точке нити f_0 и усилием H			$H \approx \frac{g_{экв}l^2}{8f_0} = \text{const}$	$H \approx \frac{g_{экв}l^2}{8f_0} = \text{cons}t$	$H = \frac{g_{экв}(l^2+4f_0^2)}{8f_0} = \text{const}$
Усилия	вертикальное V_i		$V = \frac{g_{экв}S}{2}$	$V = \frac{g_{экв}l}{2}$	$V_i = T\sin\varphi$
	горизонтальное H_i		$H_i = H = \frac{g_{экв}l^2}{8f_0} = \text{const}$	$H_i = H = \frac{g_{экв}l^2}{8f_0} = \text{const}$	$H_i = T\cos\varphi$
	в нити T_i		$T_i = \sqrt{H^2+V^2} = H\sqrt{1+\left(\frac{4f_0S}{l^2}\right)^2}$	$T_i = \sqrt{H^2+V^2} = H\sqrt{1+\left(\frac{4f_0}{l^2}\right)^2}$	$T_i = T = g_{экв}\rho = \text{const}$

Обозначения: $g_{экв} = k_{экв}\gamma F$, Н/м; γ – удельный вес нити, Н/м^3; $k_{экв}$ = удельный вес нити с учетом дополнительных элементов к чистому весу нити; F – площадь поперечного сечения нити, м^2.

Истинная длина нити, т.е. длина в напряженном состоянии при постоянной температуре

$$l_u = l\frac{1+8f^2/3l^2}{1+\sigma/E} \approx l\left(1+\frac{8}{3}\cdot\frac{f^2}{l^2}-\frac{\sigma}{E}\right), \tag{1.69}$$

а с учетом возможного изменения температуры на t по сравнению с моментом натяжения

$$l_u = l\frac{1+8f^2/3l^2}{(1+\sigma/E)[1+(\pm\alpha t)]} \approx l\left(1+\frac{8}{3}\cdot\frac{f^2}{l^2}-\frac{\sigma}{E}-(\pm\alpha t)\right). \tag{1.70}$$

В связи с нелинейной зависимостью между нагружением и изменением напряжений разрешается при расчете нитей учитывать предельные состояния введением специального коэффициента η.

$$\sigma \le R_{yк}\gamma_c\eta; \tag{1.71}$$

$$R_{yк} = R_{ип}/\gamma_m, \tag{1.72}$$

где $R_{ип}$ – временное сопротивление разрыву каната в целом; $\gamma_m = 1{,}6$ – коэффициент надежности [32, п.3.9]; γ_c – коэффициент условия работы [32,табл.6];

$$\eta = \frac{q_{пред}}{q_{доп}} = \sqrt{1+\frac{3}{8}\cdot\frac{R_{ип}}{E}\left(\frac{l}{f}\right)^2\cdot\frac{k_{зап}-1}{k_{зап}}(1-k_\Delta)}, \tag{1.73}$$

$k_{зап}$ – фактический коэффициент запаса при расчете в линейной постановке;

$$k_\Delta = \pm\nu\frac{E}{F} = \pm\frac{\Delta\,1}{1}\cdot\frac{E}{R_{ип}/k_{зап}-\sigma_0}; \tag{1.74}$$

ν – коэффициент, характеризующий податливость опоры; σ_0 – монтажное напряжение; k_Δ – знак зависит от направления смещения опоры, а размер – от значений входящих в эту величину параметров:

$$\text{при } \eta > 1 \quad k_\Delta < 1; \quad \text{при } \eta < 1 \quad k_\Delta > 1. \tag{1.75}$$

В связи с нелинейностью зависимости между усилием в канате и нагрузкой принцип суперпозиции при определении усилия от изменяющихся нагрузок неприменим. Изменение напряженного состояния при изменении нагрузок описывается уравнениями, приведенными в табл.1.8.

1.3.3. Схемы мачт. Схемы мачт принимаются в зависимости от технологических требований (размещения оборудования, ограничения перемещений, удобства эксплуатации, класса капитальности) и должны удовлетворять технико-экономическим требованиям, которые характеризуются приведенными затратами: капитальными и эксплуатационными. В табл.1.9 приведены основные параметры, влияющие на оптимальность решения мачты в зависимости от высоты сооружения и доли воздействия ветра на оборудование, вертикальные тракты и другие элементы, необходимые для обеспечения технологических процессов.

Наиболее удобны геометрические соотношения:

$$H/r_{оп}; \tag{1.76}$$

$$l/r_{оп}; \tag{1.77}$$

$$n = H/l, \tag{1.78}$$

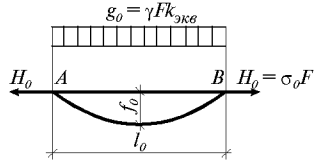
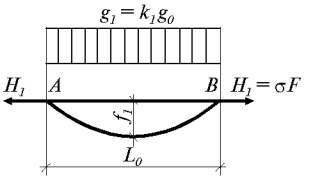
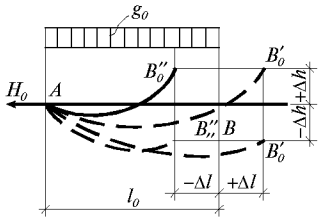
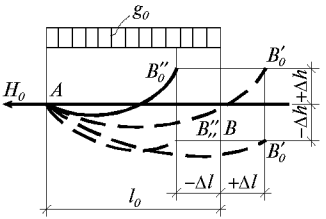
где H – высота мачты; $r_{оп}$ – радиус описанной окружности по центрам поясов; l – расстояние между точками крепления двух смежных оттяжек; n – число ярусов оттяжек.

При выполнении условия

$$cEt/r \ge \sigma_{oi} \le \psi R_y \tag{1.79}$$

в конструкции гладкого ствола цилиндрической оболочки местная потеря устойчивости не возникает, и усиление ствола не требуется, ребра жесткости устанавливают по конструктивным соображениям.

Таблица 1.8. Частные случаи расчетных формул для гибкой нити

Закрепление опор	I нагрузка $g_0 = \gamma F k_{экв}$		II нагрузка $g_1 = k_1 g_0 = k_1 \gamma F k_{экв}$	
	Схема	Формула	Схема	Формула
Неподвижное		$\frac{l_u}{l_0} = \frac{1+\frac{8f_0^2}{3l_0^2}}{1+\frac{\sigma_o}{E}} = 1+\frac{8f_0^2}{3l_0^2} - \frac{\sigma_0}{E} =$ $= 1+\frac{\gamma^2 k_{экв}^2 l_0^2}{24\sigma_0^2} - \frac{\sigma_0}{E};$ $\sigma_0 = \frac{g_0 l_0^2}{8 f_0 F} = \frac{\gamma k_{экв} l_0^2}{8 f_0};$ $\frac{8}{3}\frac{f_0^2}{l_0^2} = \frac{\gamma^2 k_{экв}^2 l_0^2}{24\sigma_0^2}$		$\left(\sigma_1 - \frac{A_1}{\sigma_1^2}\right) - \left(\sigma_0 - \frac{A_0}{\sigma_0^2}\right) = 0$ $A_1 = \frac{p_1^2 E}{24 F^2} = \frac{k_1^2 k_{экв}^2 \gamma^2 l_0^2 E}{24} = k_1^2 A_0;$ $p_1 = g_1 l_0 = k_1 \gamma F k_{экв} l_0;$ $f_1 = \frac{g_1 l_0^2}{8\sigma_1}$
Смещающееся		$\left(\sigma_1 - \frac{A_0}{\sigma_1^2}\right) - \left(\sigma_0 - \frac{A_0}{\sigma_0^2}\right) =$ $= \frac{E}{l_0}\left[(\pm\Delta l) + \frac{(\pm\Delta h_0)^2}{2(l_0 \pm \Delta l)}\right]$		$\left(\sigma_1 - \frac{A_1}{\sigma_1^2}\right) - \left(\sigma_0 - \frac{A_0}{\sigma_0^2}\right) =$ $= \frac{E}{l}\left[(\pm\Delta l) + \frac{(\pm\Delta h^2)}{2(l_0 \pm \Delta l^2)}\right]$

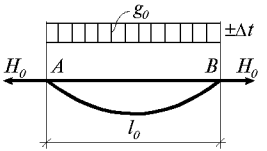
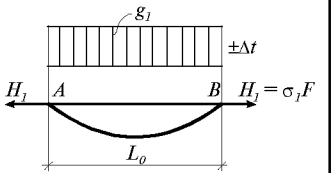
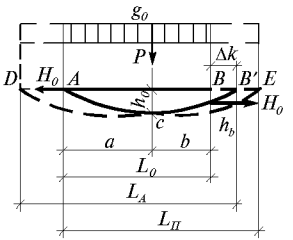
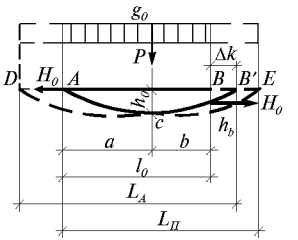
Закрепление опор	I нагрузка $g_0 = \gamma F k_{экв}$		II нагрузка $g_1 = k_1 g_0 = k_1 \gamma F k_{экв}$	
	Схема	Формула	Схема	Формула
Неподвижное	 $tu' = tu + (\pm\Delta t)$ или $tu' = tu\,[1+(\pm\alpha\Delta t)]$	$\left(\sigma_t - \frac{A_1}{\sigma_t^2}\right) - \left(\sigma_0 - \frac{A_0}{\sigma_0^2}\right) =$ $= -\alpha(\pm\Delta t)E$		$\left(\sigma_t - \frac{A_1}{\sigma_t^2}\right) - \left(\sigma_0 - \frac{A_0}{\sigma_0^2}\right) =$ $= -\alpha(\pm\Delta t)E$
Закрепление опор	Нагрузки g_p и p			
	Схема	Формула	Схема	Формула
Неподвижное		$A = \frac{g_0 l_0}{2} + \frac{pb}{l_0};$ $B = \frac{g_0 l_0}{2} + \frac{pa}{l_0};$ $H_0 = \frac{g_0 ab}{2h_0}(1+2k),$ где $k = \frac{p}{g_0 l_0};$ $L_n = l_0 + 2bk;$ $L_A = l_0 + 2aK$		$H_0 = \frac{g_0 ab(1+2k)}{2\left(h_c - h^a_{ba+b}\right)},$ где $k = \frac{p}{g_0 l_0};$ $A = \frac{g_0 l_0}{2} + \frac{pb}{l_0} + \frac{H_0 h_b}{l_0};$ $B = \frac{g_0 l_0}{2} + \frac{pa}{l_0} + \frac{H_0 h_c}{l_0};$

Таблица 1.9. Основные параметры, влияющие на оптимальность решения мачт

Высота, м	$\frac{Q_{об}}{Q_м + Q_{об}}$	Форма в плане			Сортамент элементов ствола			Класс стали	
		△	□	○	○	[[	●	С 245	С285; С 345
До 100	0	+			+		+	+	
	0,25	+			+		+	+	
	0,5	+	+	+	+	+	+	+	+
200	0	+			+			+	
	0,25	+	+	+	+			+	+
	0,5	+	+	+	+		+	+	+
400	0	+		+	+			+	+
	0,25	+	+	+	+		+	+	+
	0,5	+	+	+	+		+	+	+
800	0	+	+	+	+		+	+	+
	0,25	+	+	+	+		+		+
	0,5	+	+	+	+		+		+

Высота, м	$\frac{Q_{об}}{Q_м + Q_{об}}$	Схема решетки		Монтажное соединение		Геометрические параметры				Число оттяжек в плане		
		⋈	⋈	сварка	болты	α	$H/r_{оп}$	$l/r_{оп}$	n	3	4	>4
До 100	0	+	+	Только при	+	$\geq 20^0$ с реями	≤800	≤50	≤6*	+		
	0,25	+	+	подъеме	+					+		
	0,5	+	+	целиком	+					+	+	
200	0	+	+	+	+					+		
	0,25	+	+	+	+					+	+	
	0,5	+		+	+					+	+	+
400	0		+	+	+	$60^0 \geq \alpha \geq 30^0$ без рей				+	+	+
	0,25		+	+	+					+	+	+
	0,5		+	+	+					+	+	+
800	0		+	+	+					+	+	+
	0,25		+	+	+					+	+	+
	0,5		+	+	+					+	+	+

* За исключением случаев, когда нагрузки велики и требуется установка в ярусе 2–3 канатов. В этом случае их рационально разнести по высоте сооружения $n > 6$.

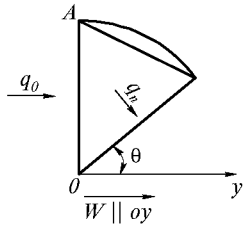


Рис.1.21. Значения нормальной составляющей ветровой нагрузки на элемент единичной длины при нормальном действии ветровой нагрузки q_0 и под углом q_n

1.3.4. Основные положения расчета. Определение нагрузок на оттяжки. Определение равнодействующей силы на оттяжку мачты от массы, всегда направленной вертикально, и действия ветра, направление которого произвольно, производится по формуле (обозначения и схема – на рис.1.21 и 1.22):

$$p_n = g\sqrt{k^2 \sin^4\theta - 2k\cos\alpha\ \sin\theta\ cos\theta + \sin^2\alpha}, \quad (1.80)$$

где g – эквивалентная масса 1 м длины оттяжек; $k = q_0/g$ – коэффициент, характеризующий отношение ветровой нагрузки на 1 м длины каната при нормальном к канату направлении ветра q_0 к эквивалентной массе 1 м длины каната:

$$\cos\theta = \sin\alpha\ \cos\varphi;$$
$$\sin\theta = \sqrt{1 - \sin^2\alpha\ \cos^2\varphi}, \quad (1.81)$$

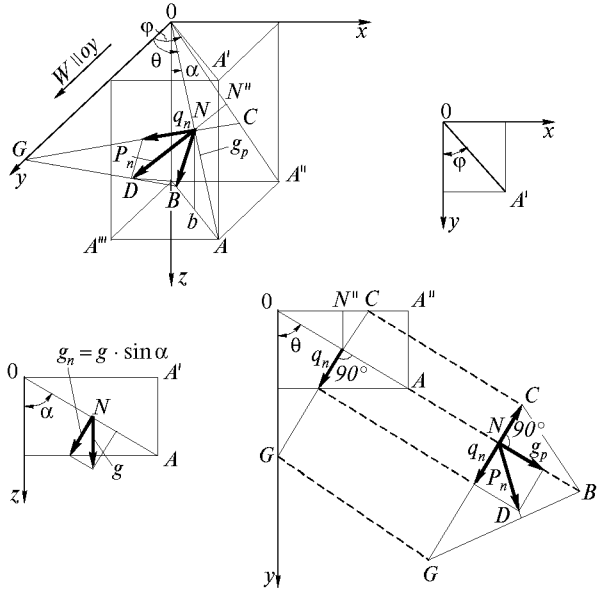


Рис.1.22. Схема суммирования нормальных составляющих от силы тяжести g_p и ветра q_n при произвольном положении элемента единичной длины

В формуле (1.80) учитывается закономерность в изменении воздействия ветра на оттяжку при изменении направления ветра по формуле СНиП 2.01.07-85 [31]:

$$q_n = q_0 \sin^2\theta. \quad (1.82)$$

В практике проектирования предыдущих лет в запас принималось

$$q_{n\,np} = q_0 \sin\theta. \quad (1.83)$$

причем формула (1.80) имела вид

$$p_{n\,np} = g\sqrt{k^2 \sin^2\theta - 2k\cos\alpha\ \cos\theta + \sin^2\alpha}, \quad (1.84)$$

Изменение равнодействующей нагрузки, определенной по СНиП 2.01.07-85, по отношению к ранее действовавшим нормам характеризуется коэффициентом

$$\eta = \frac{p_n}{p_{n\,np}} = \sqrt{\frac{k^2 \sin^4\theta - 2k\cos\alpha\sin\theta\cos\theta + \sin^2\alpha}{k^2 \sin^2\theta - 2k\cos\alpha\cos\theta + \sin^2\alpha}}. \quad (1.85)$$

Значения этого коэффициента при изменении k и α при $\varphi = 0$ (расчетный случай для оттяжек) приведены на рис.1.23.

Балочные (без учета распора нити) составляющие воздействия ветра и массы нитей на ствол при полярно симметрично расположенных в плане оттяжках и равенстве их сечений могут быть определены (рис.1.24) следующим образом:

а) направление горизонтальной составляющей, действующей на ствол от действия ветра на оттяжки, совпадает с направлением ветра ($X = 0$);

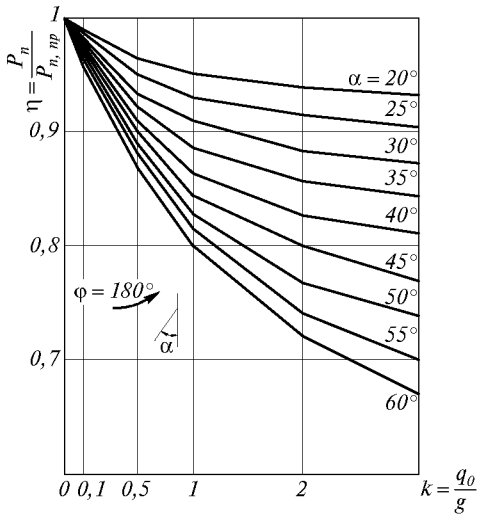


Рис.1.23. Изменение коэффициента $\eta = P_n / P_{n_{пр.}}$ в зависимости от угла наклона оттяжки к вертикали α и $K = q_0/g$

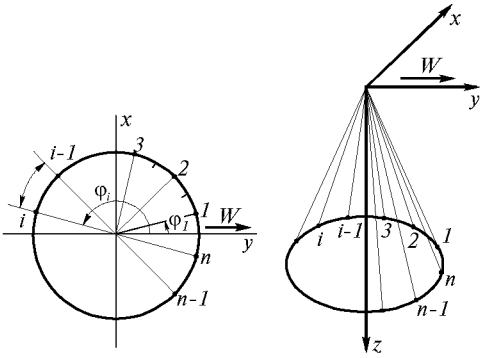


Рис.1.24. Обозначения для определения балочных составляющих усилий ветровой нагрузки на оттяжки

б) суммарное усилие (балочное) на ствол от действия ветра на оттяжки не зависит от их расположения по отношению к направлению ветрового потока φ_1 и коэффициента k, а зависит лишь от числа тросов n, угла их наклона к вертикальной оси α при закономерности:

$$y = \frac{q_0 n l}{4}\left(1 + \cos^2 \alpha\right); \tag{1.86}$$

в) суммарная вертикальная составляющая не зависит от угла φ_1 и k и является лишь функцией угла наклона оттяжек α;

$$z = \frac{gnl}{2}\left(1 + \cos\alpha\right). \tag{1.87}$$

В зависимости от числа ярусов оттяжек n, числа оттяжек в каждом ярусе m, способа закрепления ствола к фундаменту (шарнирное, жесткое, упругое), а также от направления действия горизонтальных сил по отношению к расположению оттяжек (произвольное, симметричное) число неизвестных, которыми являются усилия в оттяжках и смещение узлов в горизонтальной плоскости (по координатам x и y) при симметричном расположении оттяжек и симметричном направлении горизонтальных сил, может быть определено по табл.1.10.

Таблица 1.10. Число неизвестных при расчете мачт

Число оттяжек в каждом ярусе	Число неизвестных при условии, что ствол	
	жестко или упруго заделан в основании	шарнирно закреплен к основанию
Четное	$\frac{(m+4)n}{2}$	$\frac{(m+4)n-2}{2}$
Нечетное	$\frac{(m+5)n}{2}$	$\frac{(m+5)n-2}{2}$

В общем случае для определения неизвестных используются:

а) уравнения статики, устанавливающие равновесие узлов по координатам x и y (рис.1.25), $2n$ уравнений вида

$$\left.\begin{aligned}\sum x = \sum F_i \sigma_i \sin\varphi_i + Q_{xi} = 0;\\ \sum y = \sum F_i \sigma_i \cos\varphi_i + Q_{yi} = 0;\end{aligned}\right\}; \qquad (1.88)$$

б) уравнения общности деформации точек крепления оттяжек данного яруса к стволу мачты – mn уравнений вида

$$-\left(x_0 \sin\varphi_i + y_0 \cos\varphi_i\right) = \frac{n\left(1+tg^2\alpha_k\right)}{Etg\alpha_k}\cdot\left[\left(\sigma_i - \frac{A_i}{\sigma_i^2}\right) - \left(\sigma_0 - \frac{A_0}{\sigma_0^2}\right)\right], \qquad (1.89)$$

где $\alpha_k = \alpha - \Delta\alpha$.

в) уравнения неразрывности упругой линии верхнего «в» и нижнего «н» участков ствола в рассматриваемой k-й точке крепления оттяжек, всего $2n$ уравнений вида

$$\varphi_{k,н,x} = \varphi_{k,в,x}, \qquad \varphi_{k,н,y} = \varphi_{k,в,y}. \qquad (1.90)$$

Индексы x и y указывают, что углы поворота находятся соответственно в плоскости xz или yz (z – вертикальная ось).

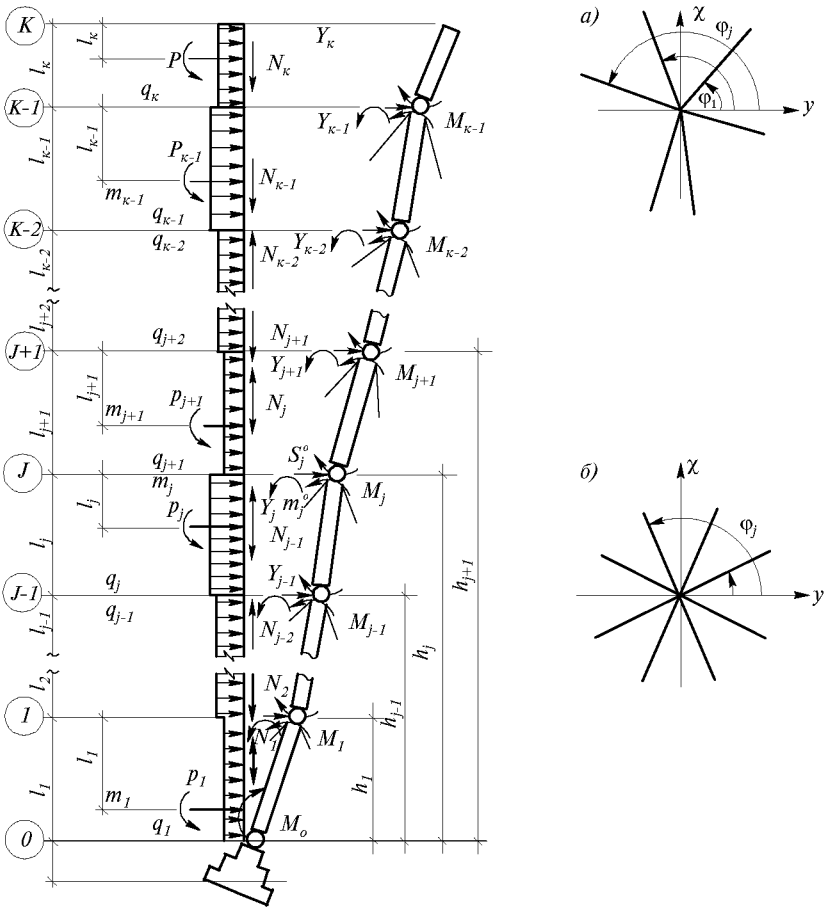


Рис.1.25. Обозначения изгибающих моментов и перемещений в мачте
а – общий случай расположения оттяжек в узле; *б* – симметричное расположение оттяжек

Число уравнений различного вида, необходимых для нахождения неизвестных, приведено в табл.1.11. Число оттяжек в каждом ярусе

Таблица 1.11. Число и вид уравнений при расчете мачт

Число оттяжек в каждом ярусе	Число и вид уравнений, необходимых для совместного решения							
	ствол заделан в основании (формулы)				ствол шарнирно оперт (формулы)			
	(1.92), (1.93)	(1.94)	(1.95), (1.96)	всего	(1.92), (1.93)	(1.94)	(1.95), (1.96)	всего
Четное	n	$\frac{mn}{2}$	n	$\frac{(m+4)n}{2}$	n	$\frac{mn}{2}$	$n-1$	$\frac{(m+4)n-2}{2}$
Нечетное	n	$\frac{(m+1)n}{2}$	n	$\frac{(m+5)n}{2}$	n	$\frac{(m+1)n}{2}$	$n-1$	$\frac{(m+5)n-2}{2}$

Обычно горизонтальные силы действуют примерно в одной плоскости, и тогда число уравнений уменьшается в 2 раза.

Уравнение $\Sigma y = 0$ может быть записано в следующем развернутом виде (обозначения смотри на рис.1.25):

$$-M_{i-1}\frac{1}{l_i}+M_i\left(\frac{1}{l_i}+\frac{1}{l_{i+1}}\right)-M_{i+1}\frac{1}{l_{i+1}}-y_{i-1}\frac{N_i}{l_i}+y_i\left(\frac{N_i}{l_i}+\frac{N_{i+1}}{l_{i+1}}\right)-$$
$$-y_{i+1}\frac{N_{i+1}}{l_{i+1}}+\frac{q_i l_i+q_{i+1}l_{i+1}}{2}+\frac{q_{om}n_{om}h_i\left(1+\cos^2\alpha\right)}{4\cos\alpha}+\frac{m_i}{l_i}-\frac{m_{i+1}}{l_{i+1}}-H_i=0, \tag{1.91}$$

а уравнение $\varphi_{k,n,x} = \varphi_{k,в,x}$

$$M_{i-1}\frac{l_i}{6EJ_i}\Phi(u_i)+M_i\frac{1}{3E}\left[\frac{l_i}{J_i}\Psi(u_i)+\frac{l_{i+1}}{J_{i+1}}\Psi(u_{i+1})\right]+M_{i+1}\frac{1}{6EJ_{i+1}}\times$$
$$\times\Phi(u_{i+1})+y_{i-1}\frac{1}{l_i}-y_i\left(\frac{1}{l_i}+\frac{1}{l_{i+1}}\right)+\overline{y}_{i+1}\frac{1}{l_{i+1}}+\frac{q_i l_i}{24EJ_i}x(u_i)+\frac{q_{i+1}l_{i+1}}{24EJ_{i+1}}x(u_{i+1})+ \tag{1.92}$$
$$+\frac{m_i l_i}{3EJ_i}\Psi(u_i)+\frac{m_{i+1}l_{i+1}}{6EJ_{i+1}}\Phi(u_{i+1})=0.$$

Функции $\Phi(u)$, $\psi(u)$ и $x(u)$ учитывают влияние нормальной силы на угол поворота рассматриваемой опоры (табл.1.12): $\Phi(u)$ – от действия момента, приложенного у противоположной опоры; $\psi(u)$ – от действия момента, приложенного у рассматриваемой опоры; $x(u)$ – от действия поперечной силы, в зависимости от характеристики, где

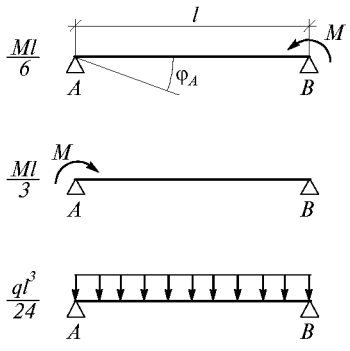
$$u=\frac{l}{2}\sqrt{\frac{N}{EJ}}. \tag{1.93}$$

Выражение этих функций следующее:

$$\Phi(u)=\frac{3}{u}\left(\frac{1}{\sin 2u}-\frac{1}{2u}\right);$$
$$\psi(u)=\frac{3}{2u}\left(\frac{1}{2u}-\frac{1}{\operatorname{tg}2u}\right);$$
$$x(u)=\frac{3(\operatorname{tg}u-u)}{u^2}. \tag{1.94}$$

Численные значения этих коэффициентов могут быть взяты из таблиц, приведенных в работе С.П.Тимошенко [33].

Таблица 1.12. Влияние нормальных сил на угол поворота

Углы поворота φ на левой опоре однопролетной балки при	
отсутствии осевой нормальной силы	наличии осевой нормальной силы
	

В формуле (1.91) значение H_i соответствует значению $\sum F_i \sigma_i \sin\varphi_i$, т.е. равно действующей реакции канатов на ствол мачты. Из уравнений (1.91) и (1.92) значения M и y могут быть определены при условии, что известно значение H_i, которое выражается через функции перемещения данной опоры и ее жесткости v_i. При заданных значениях v_i эта система уравнений позволяет найти искомые неизвестные.

После решения системы уравнений необходимо проверить правильность принятых предпосылок по формуле (1.95). Должно осуществляться равенство

$$H_i = F_i \sin\alpha \sum \sigma_i \cos\varphi_i = \left[\frac{dH_i}{dy}\left(y_i + y_{pi}\right)\right] = \left[\frac{H_i - H_{i-1}}{y_i - y_{i-1}}\left(y_i + y_{pi}\right)\right]. \qquad (1.95)$$

Положением точек y_i и y_{i+1} на кривой *1* (рис.1.26) задаются, а значение y_{pi} получают. Если правая и левая часть уравнения (1.95) отличается более чем на 5%, то задаются новым положением точек на кривой *1* (вместо i, $i-1$ – некоторые точки k и $k-1$), и вновь решают упомянутую систему уравнений. При ручном расчете для каждого яруса оттяжек строится кривая зависимости между H и y (кривая *1* на рис.1.26) в предположении, что нагрузка от веса и ветра на оттяжки постоянна и соответствует принятому наихудшему загружению. Таким образом можно учесть перераспределение усилий в неразрезном стволе, сохраняя неизменными воздействия на оттяжки. В этой кривой характерны точки: *1* $H_{от} = -H_{стр}$, в которой ствол мачты наклоняется в направлении, обратном воздействию ветра (см. рис.1.26*б*); точка 2 – $y = 0$, в которой при заданных соотношениях $q_{макс}$ и $q_{мин}$, действующих на подветренную и заветренную оттяжки, H_2 обеспечивает нулевое положение ствола. Пересечение кривой *1* и *2* дает истинное значение H и y при заданной скорости ветра. Кривая *2* характеризует фактическое изменение усилия и прогиба в системе (при точном решении) при непрерывном возрастании ветра и сохранении закономерности в эпюре скоростного напора. Метод попыток дает возможность приблизиться к истинному значению H и y. На рис.1.26 показано: первая попытка – точки i и $i-1$ далеки от точки *3*; вторая попытка – точки k и $k-1$ приблизились к точке *3*.

Оптимизация, заключающаяся в первую очередь в уменьшении M и N, производится изменением начальных параметров σ_0, иногда α и F оттяжек, и $\Sigma F_i c_{xi}$ – ствола и требует повторных расчетов.

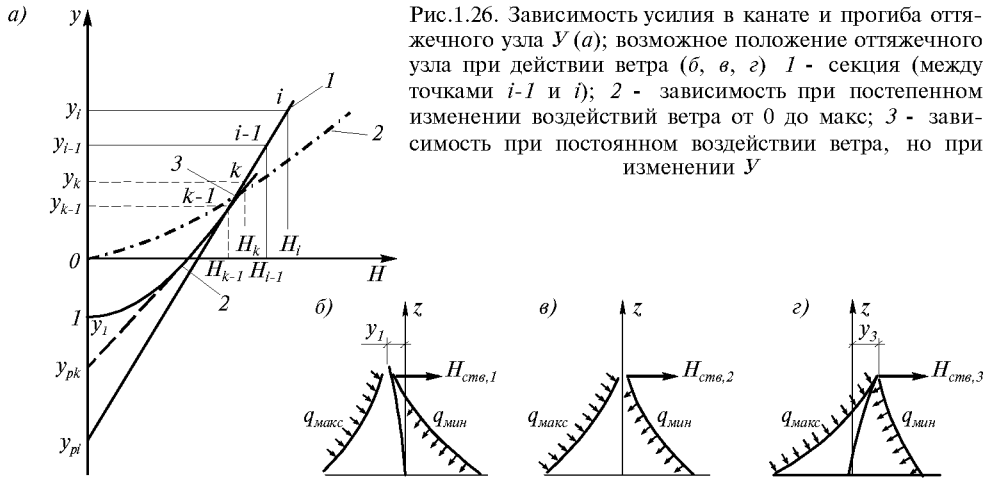


Рис.1.26. Зависимость усилия в канате и прогиба оттяжечного узла *У* (*а*); возможное положение оттяжечного узла при действии ветра (*б*, *в*, *г*) *1* - секция (между точками *i-1* и *i*); *2* - зависимость при постепенном изменении воздействий ветра от 0 до макс; *3* - зависимость при постоянном воздействии ветра, но при изменении *У*

Чтобы уменьшить трудоемкость расчета при подборе оптимальных параметров, используется метод заданных эпюр моментов, заключающийся в том, что для ствола мачты задаются эпюрой моментов и в соответствии с ней определяют опорные реакции и упругую линию ствола мачты; затем задаются значением прогиба одного из узлов крепления оттяжек и в соответствии с ним и упругой линией определяют прогибы во всех других оттяжечных узлах.

Зная смещение узла y_i и значение опорной реакции H_i, находят раздельно для каждого яруса оттяжек площади сечения канатов:

$$F_i = \frac{H_i}{\Sigma\sigma_i \cos\varphi_i}, \text{ при этом } \sigma_{imакс} \le \frac{\sigma_{вр}}{\gamma_m \cdot \gamma_c}, \qquad (1.96)$$

где $\sigma_{вр}$ – временное сопротивление каната (разрывное усилие каната в целом, деленное на площадь поперечного сечения), γ_m – коэффициент надежности по материалу ($\gamma_m = 1{,}6$); γ_c – коэффициент условий работы (как правило, принимается равным 0,8).

Затем из выражения (1.89) находят значение σ_0, удовлетворяющее заданному значению H_i и $\sigma_i = \sigma_{макс}$.

При назначении эпюры моментов необходимо учитывать схему мачты. На рис.1.27 указаны два наиболее часто встречающихся случая: *а*) равномерное распределение нагрузки по высоте мачты при размере консоли не более половины пролета и *б*) то же, при большой консоли. Этот случай весьма часто встречается в мачтах для поддержания телевизионных антенн. Если по конструктивным соображениям целесообразно сечения в пролете и на опорах мачты делать одинаковыми, то

$$M_{оп} = M_{пр}. \qquad (1.97)$$

Следует иметь в виду, что, исходя из равенства нулю положительной и отрицательной части эпюры моментов, в пролете при равномерном приложении внешней поперечной нагрузки $M_{оп} = 2M_{пр}$

$$\int^{l} M dl = 0. \qquad (1.98)$$

При заделке мачт в основании следует принимать момент

$$M_0 \ge \frac{2}{3} M_{бал} = \frac{ql^2}{12}. \qquad (1.99)$$

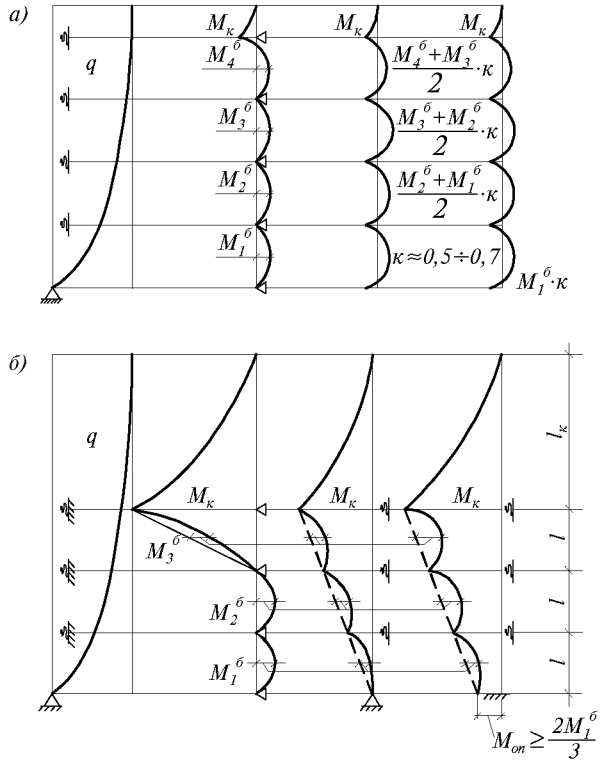


Рис.1.27. Особенности в назначении заданных эпюр моментов в мачтах

а, б – при соответственно малых и больших размерах консоли по сравнению с пролетом

Расчет ствола в плоскости действия момента проводится по деформированной схеме, и поэтому проверки на общую устойчивость в плоскости действия момента не требуется. Устойчивость элементов решетчатого ствола в пределах панели и местную устойчивость сплошностенчатого ствола мачты проверяют в соответствии со СНиП II-23-81*.

Общая потеря устойчивости при действии сил собственного веса с обледенением, изменении начального натяжения оттяжек и понижении температуры воздуха наиболее вероятна в направлении, не совпадающем с плоскостью действия момента. При трех оттяжках в плане наиболее вероятна потеря устойчивости при ветре на оттяжку, когда натяжение в боковых оттяжках ослаблено.

Для отыскания параметров, при которых будут удовлетворены требования по сохранению установленного коэффициента запаса устойчивости κ_y (табл.1.13), используют следующий прием:

а) находят значение одной или обеих характеристик жесткости $F_i\sigma_{0i}$ (и соответственно ν_i) и EJ_i при

$$N_i = N_{0i}\kappa_y, \tag{1.100}$$

$$N_{0i} = n\sigma_{0i}F_{omi}\cos\alpha_i\kappa_{нор}, \tag{1.101}$$

где $\kappa_{нор} \approx 1,1$ – коэффициент, характеризующий изменение нормальной силы с ростом смещения опоры; σ_{0i} – предварительное напряжение в i-м узле оттяжек;

б) значения нормальных сил не изменяют:

$$N_i = N_{0i}, \tag{1.102}$$

но одну или обе характеристики изменяют

$$\sigma_i F_{omi} = \sigma_{0i}F_{omi}\kappa_y^{-1}; \quad \nu_i = \nu_{0i}\kappa_y, \tag{1.103}$$

$$\nu_{0i} = \sum_1^n \left(\frac{H_i^3}{H_i^3 + 2A_i}\right) \times \frac{EF_i\cos^2\alpha_i\cos^2\varphi_i}{l_i}; \tag{1.104}$$

$$EJ_i = EJ_{0i}\kappa_y^{-1}, \tag{1.105}$$

приравнивая определитель D, составленный из коэффициентов при неизвестных в системе линейных уравнений (1.106) и (1.107), нулю, находят необходимые для

обеспечения принятого коэффициента устойчивости κ_y значения σ_{0i}, F_{omi} или EJ_i или обе характеристики одновременно:

$$-\frac{M_{i-1}}{l_i}+M\left(\frac{1}{l_i}+\frac{1}{l_{i+1}}\right)-\frac{M_{i+1}}{l_{i+1}}-y_{i-1}\frac{N_i}{l_i}+y_i\left(\frac{N_i}{l_i}+\frac{N_{i+1}}{l_{i+1}}\right)- \\ -y_{i+1}\frac{N_{i+1}}{l_{i+1}}-\nu_i y_i=0; \tag{1.106}$$

$$M_{i-1}\frac{l_{i-1}}{6EJ_{i-1}}\Phi(u_i)+M_i\frac{1}{3E}\left[\frac{l_i}{J_i}\cdot\psi(u_i)+\frac{l_{i+1}}{J_{i+1}}\psi(u_{i+1})\right]+ \\ +M_{i+1}\frac{l_{i+1}}{6EJ_{i+1}}\Phi(u_{i+1})+y_{i-1}\frac{1}{l_{i-1}}-y_i\left(\frac{1}{l_i}+\frac{1}{l_{i+1}}\right)+y_{i+1}\frac{1}{l_{i+1}}=0. \tag{1.107}$$

Таблица 1.13. Значение коэффициентов запаса устойчивости

Вид потери устойчивости	Коэффициент
Общая с учетом жесткости ствола	κ_y = 1,3 согласно СНиП II-23-81* п.16.13
Местная, цилиндрических сжатых по оси оболочек	ψ, согласно СНиП II-23-81*, формула 100
Местная, сжатых элементов решетчатых конструкций	φ, φ_e, согласно СНиП II-23-81*

Кроме выполнения общих требований, необходимо выдержать следующее условие для каждого пролета мачты:

$$N_i\kappa_y\le\frac{\pi^2EJ_i}{(\mu\cdot l_i)^2}, \tag{1.108}$$

где μ – коэффициент приведения длины; для средних пролетов мачты и нижнего пролета при заделке ствола в основании μ = 1, для нижнего при шарнирном опирании и верхнего во всех случаях μ = 1,4.

1.3.5. Расчет мачт при помощи ПЭВМ. Приведенные в предыдущих пунктах методы расчета мачт и оттяжек практического применения в настоящее время не находят.

Расчет мачт производится с использованием пакета программ статического и динамического расчета мачт на оттяжках «СУДМ» для ПЭВМ типа IBM PC. Эта программа позволяет:

а) производить сбор нагрузок: весовых, гололедных, ветровых в соответствии с разделами 6 и 7 [31];

б) проверять устойчивость мачты в монтажном состоянии;

в) производить расчет мачты на сочетание следующих нагрузок: собственный вес сооружения, тяжение в оттяжках, статическая составляющая ветровой нагрузки, соответствующая температура окружающего воздуха. При этом азимутальное направление ветрового воздействия по отношению к мачте может быть любым.

Для мачт с тремя оттяжками в плане расчет, как правило, ведется на три направления ветра: на оттяжку, по биссектрисе угла между оттяжками, перпендикулярно одной из оттяжек. Для мачт с четырьмя оттяжками в плане расчет, как правило, ведется на два направления ветрового воздействия: на оттяжку и по биссектрисе угла между оттяжками;

г) оценивать устойчивость равновесия для всех вариантов нагружения и определять коэффициенты запаса и формы потери устойчивости;

д) определять частоты собственных колебаний ствола мачты для монтажного состояния и всех видов нагружений, а также формы собственных колебаний;

е) определять динамические добавки от пульсационной составляющей ветрового потока в соответствии с п. 6.7 [31] и производить расчет мачты на эти нагрузки.

В результате расчетов определяются:

– усилия (моменты, нормальные и поперечные силы) в стволе мачты (как в стержне эквивалентной жесткости) минимально в четырех точках между двумя смежными ярусами оттяжек по высоте и двух точках на консоли;

– смещения и углы поворота;

– суммы и разности усилий от статической и пульсационной динамических добавок составляющих ветрового воздействия;

– усилия в оттяжках; усилия в анкерном и лацменных узлах оттяжек, углы между касательной к оттяжке и хордой в этих узлах; проекции натяжения оттяжек в этих узлах на оси координат.

Расчет оттяжек производится с использованием программы «Нить» для ПЭВМ типа IBM PC. Эта программа позволяет определить длину и вес оттяжек, стрелку прогиба, углы наклона оттяжек в точках присоединения к анкерным фундаментам, усилия в оттяжках и изменение этих величин под влиянием температуры в диапазоне температур –40°С ÷ +40°С от среднегодовой температуры. Все эти сведения используются при проектировании антенно-мачтовых сооружений и при контроле за техническим состоянием оттяжек в процессе дальнейшей эксплуатации.

1.3.6. Конструктивные решения мачт. Конструктивное решение ствола мачты зависит от назначения сооружения, размещаемого на нем технологического оборудования, климатических нагрузок в районе расположения сооружения и целого ряда других факторов. Стволы мачт выполняют решетчатой конструкции в виде четырех- или трехгранной призмы с поясами в местах пересечения граней и с элементами решетки (распорки, раскосы) в плоскости граней, или в виде цилиндрической оболочки.

База ствола* (генеральный размер поперечного сечения) зависит, в основном, от высоты мачты. Для мачт с решетчатым стволом высотой до 150 м базовый размер принимают обычно равным 1350 мм, высотой до 350 м – 2500 мм (иногда 2200 мм), до 500 м – 3600 мм.

Для мачт со стволом в виде цилиндрической оболочки высотой до 120 м базовый размер (диаметр оболочки) обычно принимают равным 1220 мм, для мачт большей высоты – соответственно 1600 мм, 2200 мм и 2500 мм.

Ствол мачты состоит из секций, соединяемых между собой во время монтажа. Исходя из параметров кранового оборудования для монтажа мачт высота секции принимается равной 6750 мм. Применение вертолета для монтажа мачт позволяет изменять высоту секций, однако при этом необходимо учитывать возможности заводов-изготовителей по изменению технологической оснастки.

Для решетчатых мачт в настоящее время наиболее широкое применение нашли два типа секций:

– цельносварные (рис.1.28), собираемые и свариваемые на заводе с бесфасоночным соединением элементов решетки с поясами;

– секции, собираемые на монтаже (укрупнительная сборка) из плоских ферм (рис.1.29), изготавливаемых на заводе. Трудоемкость монтажа мачт из секций этого типа выше, однако при их перевозке они занимают меньший объем. Кроме того, такое конструктивное решение применяется для секций с размерами, не вписывающимися в железнодорожный габарит.

---

* Максимальный базовый размер, как правило, ограничивается железнодорожным габаритом.

Секция мачты со стволом в виде цилиндрической оболочки приведена на рис.1.30. Основу конструктивного решения секций ствола мачт составляют узлы. В решетчатых мачтах это узлы соединения элементов решетки с поясами, секций между собой и ствола мачты с оттяжками. Конструктивные решения первых двух из перечисленных узлов приведены на рис.1.29 *а,б*. В настоящее время применяются два типа конструктивного решения узлов соединения ствола мачты с оттяжками (рис.1.31).

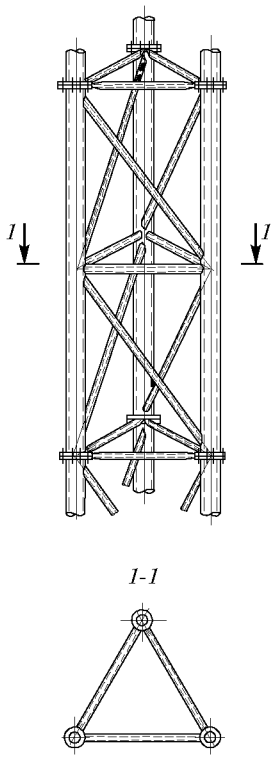


Рис.1.28. Цельносварная секция ствола мачты

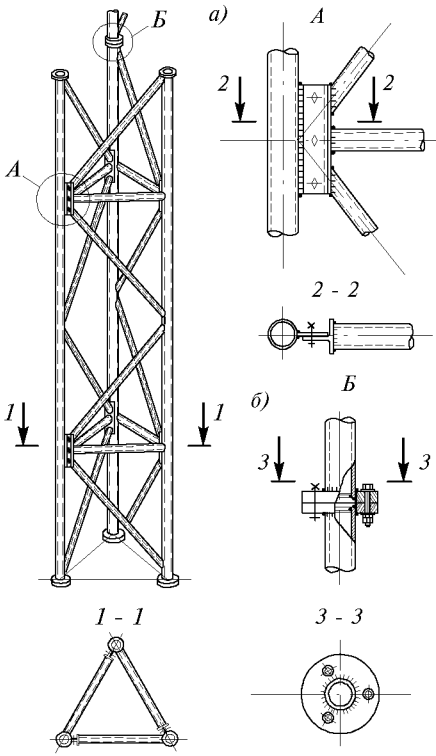


Рис.1.29. Секция ствола мачты из плоских ферм
а - узел соединения ферм; *б* - узел соединения секций

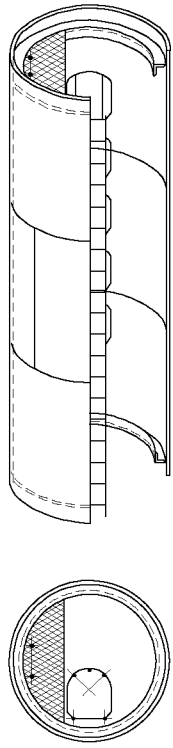


Рис.1.30. Секция ствола мачты в виде цилиндрической оболочки

В случае крепления оттяжки к стволу мачты через утолщенный фланец вводится промежуточный элемент – «серьга».

В большинстве случаев элементы решетчатых стволов мачт изготавливают из труб. Иногда их изготавливают из фасонного проката, чаще, из уголкового профиля. В этом случае соединение элементов ствола мачты осуществляется через фасонки (сваркой или болтами), а секций между собой – при помощи болтов через накладки (рис.1.32). В мачтах со стволом в виде оболочки соединение секций между собой, как правило, осуществляется на сварке, а конструктивные решения узлов соединения ствола мачты с оттяжками аналогичны решению, приведенному на рис.1.31*б*.

Оттяжки мачты, как правило, изготавливаются из стальных канатов (возможно применение канатов из синтетических материалов). Для соединения оттяжек со стволом мачты и с фундаментом, а также для регулирования их натяжения применяют механические детали оттяжек мачт (рис.1.33): втулки, стяжные муфты, натяжные приспособления. Эти детали выпускаются Нижне-Исетским заводом металлоконструкций по соответствующим техническим условиям. Перечень деталей в зависимости от диаметра канатов оттяжек приведен в табл.1.14.

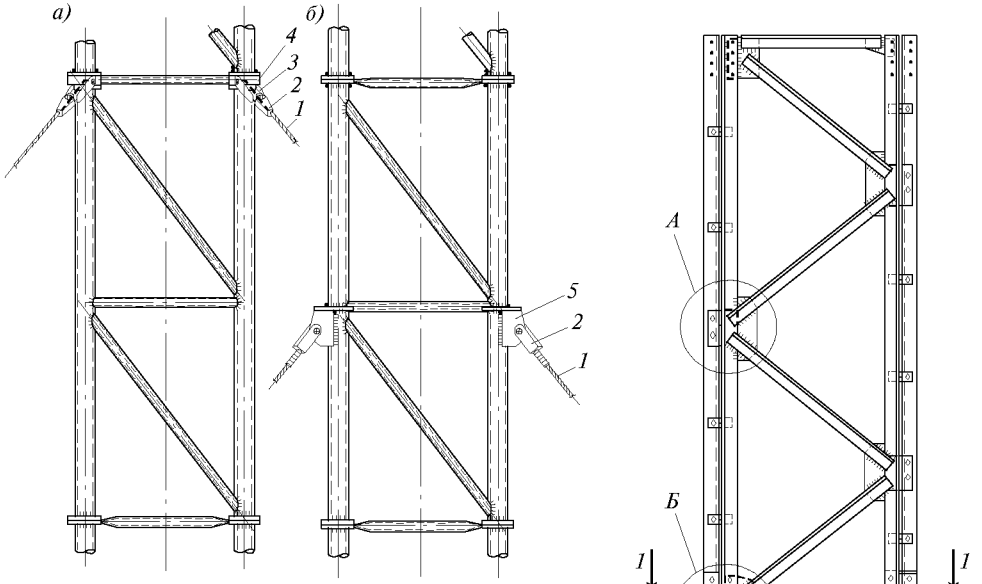


Рис.1.31. Варианты узлов соединения оттяжек со стволом
а - через уголщенный фланец; *б* - через лацменную фасонку
1 - канат оттяжки; *2* - втулка; *3* - серьга; *4* - уголщенный фланец; *5* - лацменная фасонка

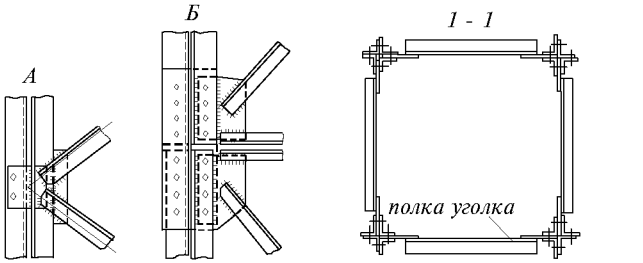


Рис.1.32. Схема секций ствола мачты из уголкового профиля

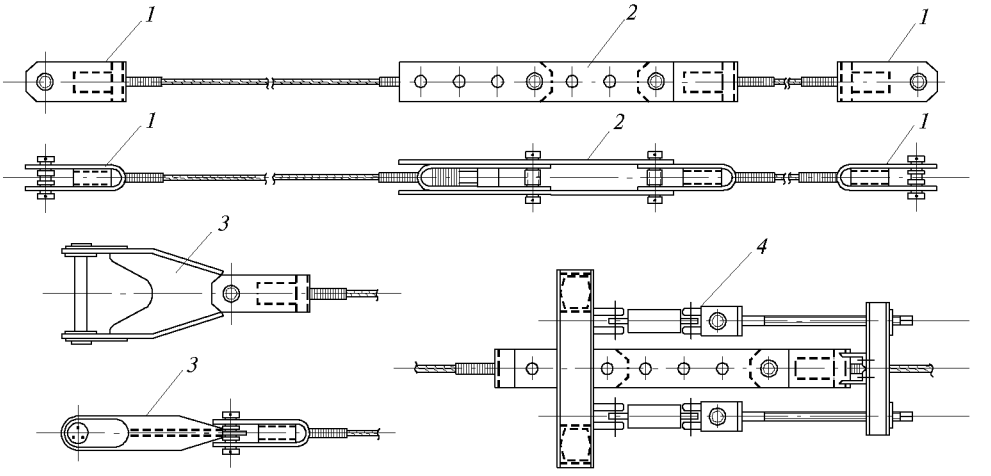


Рис.1.33. Детали оттяжек мачт
1 – втулка; *2* – стяжная муфта; *3* – серьга; *4* – натяжное приспособление

Таблица 1.14. Перечень деталей оттяжек мачт

Диаметр каната, мм	Расчетное усилие, т	Втулка ВТО								Втулка ВТУ						
		№ чертежа	№ исполнения	Наименование	Вес, кг	∅	*a*	*b*	*l*/*c*	№ чертежа	№ исполнения	Наименование	Вес, кг	∅	*a*	*L*
8...12	5,0	3.604.2–5. 3.01.00.000СБ	3.604.2-5.3.01.00.000	ВТО-5	(0,5) 3.76	35	50	26	210/74	3.604.2–5. 3.02.00.000СБ	3.604.2-5.3.02.00.000	ВТУ-5	(0,5) 9.11	35	50	350
14...18	10,0		3.604.2-5.3.01.00.000.-01	ВТО-10	(0,75) 4.20	35	50	26	210/74		3.604.2-5.3.02.00.000-01	ВТУ-10	(0.75) 10.10	35	50	360
20,5	13,0		3.604.2-5.3.01.00.000.02	ВТО-13	(1.25) 7.49	48	65	33	250/80		3.604.2-5.3.02.00.000-02	ВТУ-13	(1.25) 17.99	48	65	430
22...27	25,0		3.604.2-5.3.01.00.000.03	ВТО-25	(1.7) 10.52	55	75	39	275/109		3.604.2-5.3.02.00.000-03	ВТУ-25	(1.7) 22.19	55	75	470
30...36	35,0		3.604.2-5.3.01.00.000.04	ВТО-35	(2.4) 15.96	65	85	53	305/122		3.604.2-5.3.02.00.000-04	ВТУ-35	(2.4) 29.91	65	85	510
38	45,0		3.604.2-5.3.01.00.000.05	ВТО-45	(3.8) 19.46	65	95	51	315/115		3.604.2-5.3.02.00.000-05	ВТУ-45	(3.8) 43.20	65	95	540
40...42	55,0		3.604.2-5.3.01.00.000.06	ВТО-55	(5.7) 29.94	80	110	62	355/151		3.604.2-5.3.02.00.000-06	ВТУ-55	(5.7) 60.49	80	110	610
45	60,0		3.604.2-5.3.01.00.000.07	ВТО-60	(5.8) 37.16	80	125	61	375/153		3.604.2-5.3.02.00.000-07	ВТУ-60	(5.8) 79.74	80	125	640
48,5	75,0		3.604.2-5.3.01.00.000.08	ВТО-75	(7.7) 52.21	90	140	68	415/174		3.604.2-5.3.02.00.000-08	ВТУ-75	(7.7) 100.03	90	140	700
52	85,0		3.604.2-5.3.01.00.000.09	ВТО-85	(9.0) 73.39	115	150	82	435/180		3.604.2-5.3.02.00.000-09	ВТУ-85	(9.0) 135.49	115	150	780
61,5...64	100,0		3.604.2-5.3.01.00.000.10	ВТО-100	(10.0) 78.62	115	150	82	460/185		3.604.2-5.3.02.00.000-10	ВТУ-100	(10.0) 149.52	115	150	820
68	110,0		3.604.2-5.3.01.00.000.11	ВТО-110	(13.0) 88.28	125	150	96	470/173		3.604.2-5.3.02.00.000-11	ВТУ-110	(13.0) 164.13	125	150	880

Окончание табл.1.14

Диаметр каната, мм	Расчетное усилие, т	Муфта стяжная					Приспособление натяжное				
		№ черт.	№ исполнения	max/min	Среднее положение	Вес, кг	№ черт.	№ исполнения	Вес, кг	P_{max}, т	l_{min}
8...12	5,0	3.604.2-5. 3.03.00.000СБ	3.604.2-5. 3.03.00.000	890/290	590	17.79 (1.0)	3.601.2-5. 4.01.00.000СБ	3.604.2-5. 4.01.00.000	97,9	4,0	1210
14...18	10,0		3.604.2-5. 3.03.00.000-01	945/285	615	21.04 (1.5)		3.604.2-5. 4.01.00.000-01	98,7	6,6	1270
20,5	13,0		3.604.2-5. 3.03.00.000-02	1080/360	720	35.60 (2.5)		3.604.2-5. 4.01.00.000-02	100,0	8,2	1280
22...30	25,0		3.604.2-5. 3.03.00.000-03	1185/405	795	48.21 (3.4)	3.601.2-5. 4.02.00.000СБ	3.604.2-5 4.02.00.000	109,2	11,4	1290
33...36	35,0		3.604.2-5. 3.03.00.000-04	1280/440	860	69.77 (4.8)		3.604.2-5. 4.02.00.000-01	111,0	15,0	1380
38	45,0		3.604.2-5. 3.03.00.000-05	1350/445	897,5	92.48 (7.6)		3.604.2-5. 4.02.00.000-02	121,1	19,2	1460
40...42	55,0		3.604.2-5. 3.03.00.000-06	1580/510	1050	138.65 (11.4)	3.604.2-5. 4.04.00.000СБ	3.604.2 - 5. 4.03.00.000 * / 3.604.2 - 5. 4.04.00.000	294,0 / 293,1	23,7	1680 / 2170
45	60,0		3.604.2-5. 3.03.00.000-07	1715/515	1115	171.83 (11.6)		3.604.2 - 5. 4.03.00.000 - 01 * / 3.604.2 - 5. 4.04.00.000 - 01	301,0 / 299,7	27,4	1840 / 2310
48,5	75,0		3.604.2-5. 3.03.00.000-08	1785/585	1185	224.44 (15.4)		3.604.2 - 5. 4.03.00.000 - 02 * / 3.604.2 - 5. 4.04.00.000 - 02	338,0 / 335,2	36,8	1980 / 2510
52	85,0		3.604.2-5. 3.03.00.000-09	2125/625	1375	323.9 (18.0)	3.604.2-5. 4.03.00.000СБ	3.604.2 - 5. 4.03.00.000 - 03 * / 3.604.2 - 5. 4.04.00.000 - 03	392,0 / 344,3	43,0 / 40,0	2300 / 2830
61,5...64	100,0		3.604.2-5. 3.03.00.000-10	2495/695	1595	376.38 (20.0)		3.604.2 - 5. 4.03.00.000 - 04 * / 3.604.2 - 5. 4.04.00.000 - 04	455,0 / 362,3	52,5 / 40,0	2600 / 3180
68	110,0		3.604.2-5. 3.03.00.000-11	2445/690	1567,5	415.07 (26.0)		3.604.2 - 5. 4.03.00.000 - 05 * / 3.604.2 - 5. 4.04.00.000 - 05	475,0 / 362,3	60,0 / 40,0	2680 / 3115

1.3.7. Влияние погрешностей изготовления и монтажа. Погрешности изготовления и монтажа мачт могут оказывать существенное влияние на их работу, поэтому должны учитываться при проектировании уникальных мачт. Ошибки изготовления и монтажа являются случайными величинами, закон распределения которых принимается нормальным, а расчетные зависимости носят вероятностный характер. Одно из возможных решений излагается ниже.

В табл. 24 СНиП III-18-75 установлены допуски на изготовление конструкций мачтовых и башенных сооружений. В табл. 23 СНиП 3.03.01-87 предписаны допуски на монтаж конструкций антенных сооружений связи и башен вытяжных труб. Основные значения допусков на изготовление и монтаж конструкций мачтовых и башенных сооружений представлены в табл.1.15.

Таблица 1.15. Допуски на изготовление и монтаж мачт и башен

Вид допуска	Условное обозначение	Величина по СНиП
Отношение прогиба оси ствола мачты при общей и контрольной сборке к длине замеряемого участка (не менее расстояния между ярусами оттяжек)	ε	1/750
Отношение смещения оси ствола и поясов мачты от проектного положения к высоте выверяемой точки над фундаментом	μ	1/1500
Отношение смещения оси ствола и поясов башни от проектного положения к высоте выверяемой точки над фундаментом:		
башни объектов связи	μ	1/1000
башни вытяжных труб	μ	3/1000
Отношение величины отклонения предварительного (монтажного) натяжения оттяжек мачт к проектному значению	ρ_1	±0,08
Отношение разности величин предварительных (монтажных) значений усилий между оттяжками одного яруса к проектному значению	ρ_2	0,1

Величина смещения оси ствола и поясов мачты от проектного положения до оптимального, при котором максимальные величины смещений минимальны и нет принудительного изгиба ствола оттяжками характеризуется выражением

$$\frac{\mu}{\varepsilon} \geq \nu\sqrt{\frac{2p_0}{m}}, \qquad (1.109)$$

где p_0 – число секций в ярусе мачты; m – число секций на длине контролируемого в процессе изготовления участка; ν – коэффициент для 2-, 3- и 4-ярусных мачт, соответственно равный 1; 1,5 и 1,87.

При контроле стрелы прогиба в процессе изготовления на длине одного яруса ($m = p_0$) в соответствии с требованиями СНиП формула (1.109) примет вид

$$\mu/\varepsilon \geq \nu_1, \qquad (1.110)$$

где ν_1 – для 2-, 3- и 4-ярусных мачт соответственно составляет 1,41; 2,12 и 2,64. При установленных допусках (табл.1.15) соотношение $\mu/\varepsilon = 1/1500 : 1/750 = 0,5$. Таким образом, условие (1.110) не выполняется, необходим принудительный изгиб ствола оттяжками (корректировка).

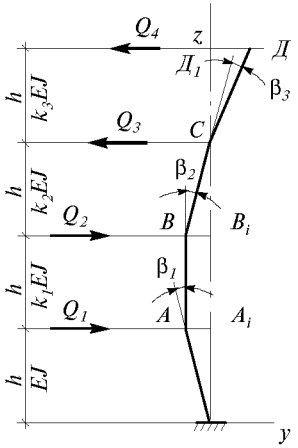


Рис.1.34. Возможное искажение ствола мачты из-за неточности изготовления и характер приложения корректирующих сил Q

Корректирующие силы. В процессе корректировки к оттяжечным узлам мачты в двух взаимно перпендикулярных плоскостях прилагают корректирующие силы, создаваемые неравномерным натяжением оттяжек (рис.1.34), при этом оттяжечные узлы смещаются так, что ствол мачты становится прямолинейным. Корректирующие силы являются случайными величинами, определяемыми по формуле

$$Q_i = \lambda_2 \overline{\sigma}(Q_i), \qquad (1.111)$$

где $\overline{\sigma}(Q_i) = \frac{1}{\lambda_1} 4\varepsilon \sqrt{2 p_o / m r_i}$ – среднеквадратичное отклонение Q_i; $r_i = \sqrt{\sum_{j=1}^{n-1} \varphi_{ij}^2}$; i и j – соответственно номер рассматриваемого и влияющего узла; n – число ярусов оттяжек мачты; φ_{ij} – коэффициенты, определяемые по табл.21.3 [34]; λ_1 и λ_2 –коэффициенты, определяемые в зависимости от принятой доверительной вероятности по табл.1.16.

Таблица 1.16. Значения коэффициентов λ_1 и λ_2

Доверительная вероятность	0,997	0,95	0,68
λ_1	3,41	2,45	1,5
λ_2	3	2	1

Для случая изменения изгибной жесткости ствола по линейному закону (рис.1.35) приведены графики (рис.1.36) зависимости $r_i = f(J_b/J)$, где J_b и J – соответственно момент инерции верхнего и нижнего ярусов мачты для различных ярусов 2-, 3- и 4-ярусных мачт.

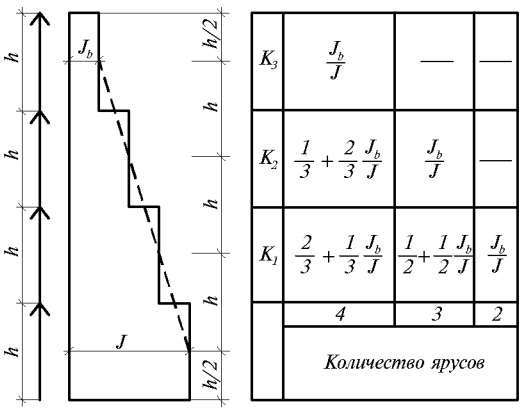


Рис.1.35. Значения коэффициентов K_i при изменении жесткости ствола мачты по линейному закону

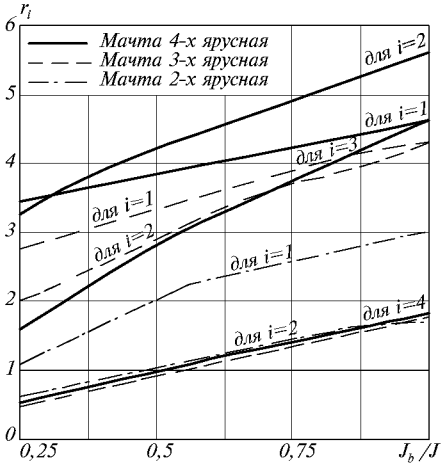


Рис.1.36. Зависимость коэффициента r_i от жесткости ствола мачты

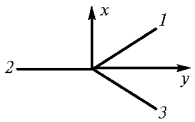
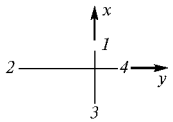
Отклонения величины предварительного натяжения оттяжек от проектных значений зависят как от реально приложенных корректирующих сил, так и от ошибок изме-

рения усилий натяжения. Результирующее отклонение натяжения с учетом корректировки в двух плоскостях и реального расположения оттяжек в пространстве составляет

$$\Delta\, T_{mi}^{xy} = \lambda_г \overline{\sigma}\left(\Delta\, T_{mi}^{xy}\right), \qquad (1.112)$$

где $\overline{\sigma}\left(\Delta T_{mi}^{xy}\right)$ – среднеквадратичное отклонение $\Delta\, T_{mi}^{xy}$ (приведено в табл.1.17).

Таблица 1.17. Среднеквадратическое значение $\overline{\sigma}\left(\Delta T_{mi}^{xy}\right)$

Расположение оттяжек в плане			
№ оттяжки	1,3	2	1 – 4
$\overline{\sigma}\left(\Delta T_{mi}^{xy}\right)$	$\sqrt{\frac{3}{8}\overline{\sigma}_{изм}^2 + \frac{7\overline{\sigma}^2(Q_i)}{12\cos^2\alpha_{0i}}}$	$\sqrt{\frac{3}{8}\overline{\sigma}_{изм}^2 + \frac{\overline{\sigma}^2(Q_i)}{4\cos^2\alpha_{0i}}}$	$\sqrt{\frac{1}{2}\overline{\sigma}_{изм}^2 + \frac{\overline{\sigma}^2(Q_i)}{4\cos^2\alpha_{0i}}}$

Взаимосвязь между допусками. Фактическое отклонение усилий в оттяжках $\overline{\sigma}\left(\Delta T_{mi}^{xy}\right)$ зависит от ошибки измерения и процесса корректировки. Требуемая точность натяжения может быть достигнута лишь при определенных соотношениях точности измерения и размеров корректирующих сил. При значениях ρ_1 и ρ_2 (см.табл.1.15) и предельных ошибках принятого метода измерения $\rho < \rho_1$ допуск ρ_2 более чувствителен к точности натяжения, нежели ρ_1. Поэтому в выражение (1.113) взаимосвязи допусков входит только ρ_2;

$$\varepsilon\sqrt{\frac{2\rho_0}{m}} \le \frac{\mu}{\nu} + \left[\xi\frac{h^2}{EJ}T_i^0\frac{\cos\alpha_{0i}}{r_i}\frac{\lambda_1}{\lambda_2}\right]\rho_2 = \frac{\mu}{\nu} + \lambda\rho_2, \qquad (1.113)$$

где ξ – для мачт с тремя и четырьмя оттяжками в плане соответственно равен 0,159 и 0,25.

На рис.1.37 приведен график зависимости $\varepsilon\sqrt{2\rho_o / m} = \psi(\mu)$ для 4-ярусной мачты при разных значениях ρ_2 и λ. Пунктирная линия на графиках соответствует значению $\varepsilon = 1/750$ и $2\rho_0/m = 1$. Как следует из графиков, при допусках $\varepsilon = 1/750$ и $\mu = 1/1500$ отклонение натяжения оттяжек значительно и должно учитываться в уникальных сооружениях.

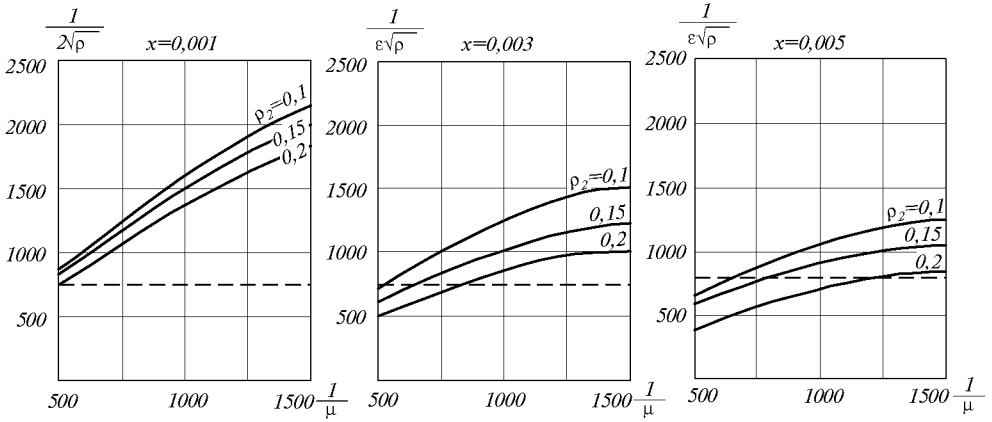


Рис.1.37. Зависимость значения $\varepsilon\sqrt{\rho}$ от μ

1.4. Конструктивные решения и методы расчета систем

1.4.1. Общие положения. Системы представляют собой совокупность несущих конструкций (опорных сооружений) и элементов технологического оборудования, объединенных для создания антенны* . Опорное сооружение служит для крепления к нему отражающей поверхности, вибраторов, трактов их питания и восприятия нагрузок от этого технологического оборудования.

Форма отражающей поверхности антенны в большинстве случаев определяет геометрическую форму опорного сооружения. Элементы отражающей поверхности антенны могут быть расположенными:

- в одной плоскости – вертикальной или наклонной, с одной или обеих сторон опорного сооружения;
- в нескольких вертикальных плоскостях под углом друг к другу в плане, причем углы между ними могут быть как одинаковыми, так и разными ;
- по цилиндрической поверхности с вертикальной образующей параболической, эллиптической, круговой или другой формы в плане с кривизной одного знака;
- по поверхности в виде высечки из параболического цилиндра одинарной кривизны с горизонтальной образующей;
- по поверхности в виде высечки из поверхности двойной кривизны;
- в горизонтальной плоскости.

Приведенные выше формы отражающей поверхности характеризуют ее монтажное состояние. При воздействии нагрузок элементы отражающей поверхности получают перемещения. Горизонтальные элементы отражающей поверхности имеют прогибы и в монтажном состоянии.

На рис.1.38 приведены схемы наиболее распространенных систем, применяемых в зависимости от назначения и волнового диапазона антенны. Несущие конструкции системы включают опоры и соединяющие их элементы. Опоры могут быть выполнены в виде башен, мачт или комбинированной мачто-башенной конструкции (рис.1.39). Соединяющие опоры элементы могут выполняться в виде жестких стержней или гибких связей из канатов. В некоторых случаях элементы отражающей поверхности используются в качестве гибких связей между опорами. Схемы систем с плоскими отражающими поверхностями приведены на рис.1.40.

Отражающие поверхности могут быть образованы горизонтально расположенными гибкими элементами (металлическими канатами, стале-алюминиевой или омедненной проволокой), горизонтальными и вертикальными гибкими элементами, расположенными на некотором расстоянии друг от друга, а также в виде сетки с ячейкой, как правило, порядка нескольких десятков сантиметров в зависимости от длины волн, на которых работает антенна. Конструктивное решение крепления горизонтальных элементов отражающей поверхности к концевым и промежуточным опорам приведены на рис.1.41.

Вибраторы обычно устанавливаются перед отражающей поверхностью. Наиболее широкое распространение получили вибраторы двух типов: гибкие, подвешиваемые на канатах и, жесткие, прикрепляемые к жестким консолям.

1.4.2. Примеры конструктивных решений. Система с антенной, работающей в диапазоне средних волн, с гибкими вибраторами приведена на рис.1.42. Отражающая поверхность расположена в двух вертикальных плоскостях с углом между ними 135°. Опорные конструкции состоят из трех анкерных опор в виде башен и промежуточных опор, связанных с анкерными опорами гибкими связями. Промежуточные опоры работают как башни в направлении, перпендикулярном плоскости отражающей поверхности, и. как мачты в направлении, параллельном плоскости рефлектора.

---

* Антенна, в общем случае, состоит из излучателей (вибраторов) и отражающей поверхности.

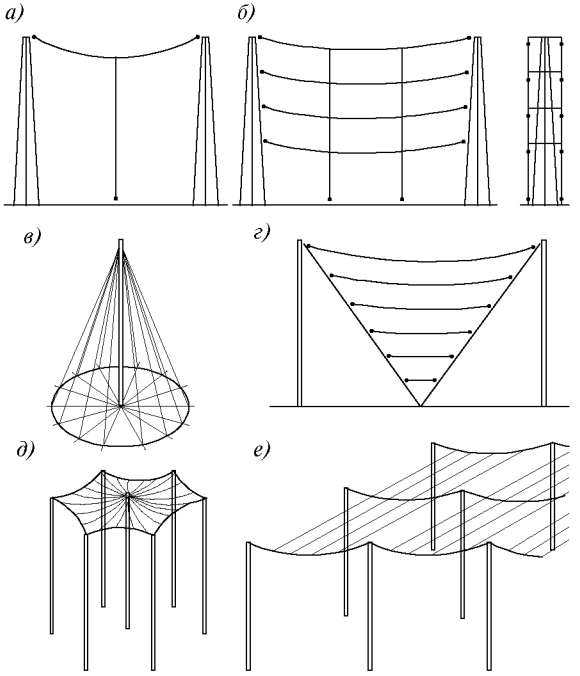


Рис.1.38. Схемы основных видов антенны из гибких нитей

а – линейные (Т-образные), *б* – синфазные горизонтальные; *в* – зонтичные; *г* – логарифмические; *д* – с радиально расположенными проводами; *е* – с параллельно расположенными проводами

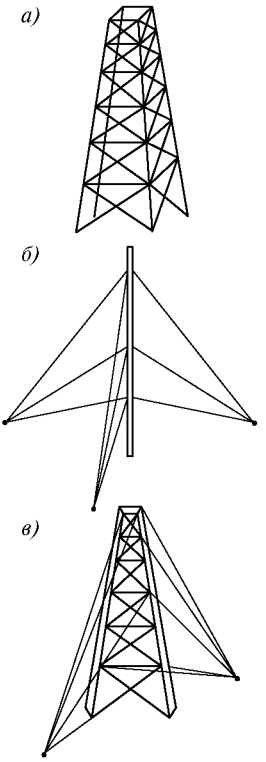


Рис.1.39. Схемы опор

а – башня; *б* – мачта; *в* – комбинированная опора

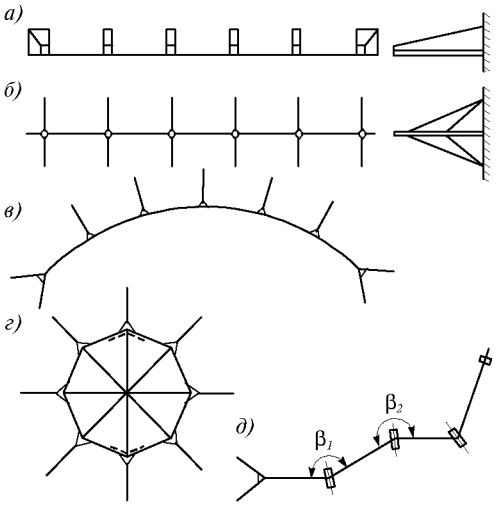


Рис.1.40. Схемы систем с плоскими отражающими поверхностями с опорными сооружениями в виде:

а – башен; *б* – мачт в незамкнутой плоской системе; *в* – мачт в незамкнутой цилиндрической системе; *г* – мачт в замкнутой системе; *д* – мачт и комбинированных опор

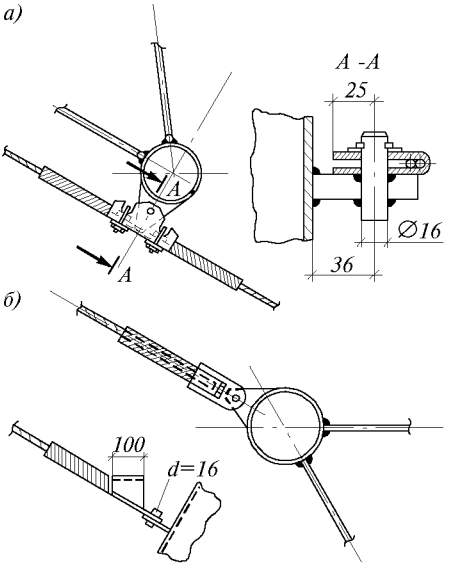


Рис.1.41. Крепление горизонтальных элементов отражающей поверхности к концевым и промежуточным опорам

а – к промежуточным опорам; *б* – к концевым опорам

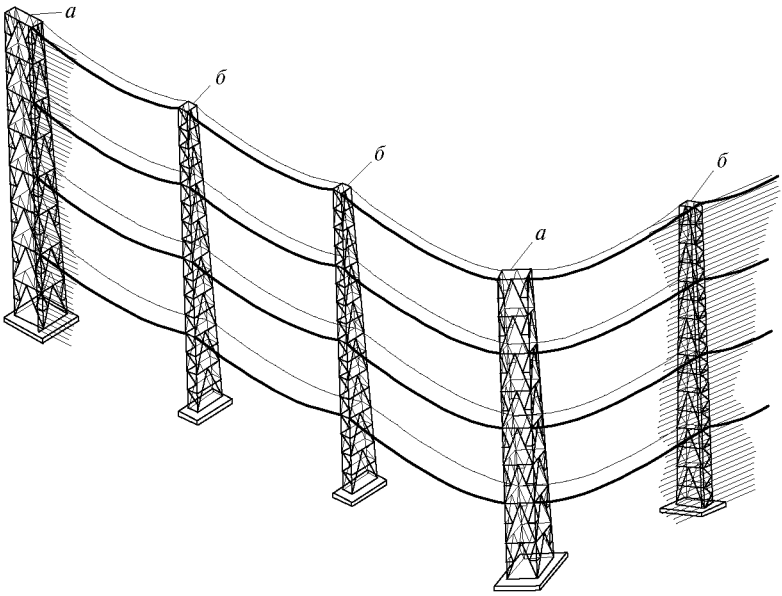


Рис.1.42. Система с опорным сооружением в виде связанных друг с другом опор
а – анкерные башенные опоры; *б* – промежуточные комбинированные опоры

Отражающая поверхность выполнена из биметаллических проводов с шагом по высоте 250 мм и расположена перед фронтом опорного сооружения. Гибкие вибраторы подвешиваются на канатах на некотором расстоянии перед отражающей поверхностью.

На рис.1.43 приведена схема опорных сооружений антенны для загоризонтальной радиолокации с отражающими поверхностями в наклонной плоскости. Отражающие поверхности расположены с двух сторон от опорного сооружения, и каждая из них состоит из вертикальных и горизонтальных биметаллических проводов с шагом около 300 мм, расположенных в двух параллельных плоскостях с расстоянием между ними также около 300 мм.

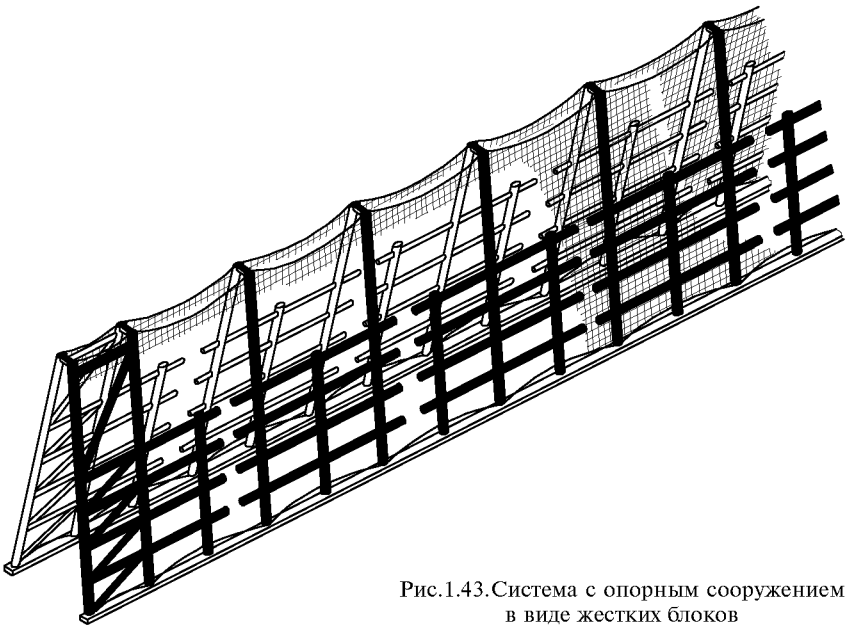


Рис.1.43.Система с опорным сооружением
в виде жестких блоков

Опорное сооружение выполнено из отдельных блоков длиной в несколько десятков метров каждый. Стойки в виде цилиндрической оболочки (более высокие диаметром 2000 мм, меньшие по высоте диаметром 1600 мм), заделанные в фундамент под углом 83° к горизонтальной поверхности, соединены трубчатыми элементами диаметром 720 мм. На этих элементах расположены рабочие площадки, на которых устанавливаются конструкции для крепления вибраторов. Тракты питания вибраторов и лестницы-стремянки для подъема на сооружение расположены внутри стоек.

На рис.1.44 приведен фрагмент системы с антенной аналогичного назначения, но с горизонтально расположенными элементами отражающей поверхности. Система состоит из опор в виде башен, перед фронтом которых размещена отражающая поверхность из горизонтальных биметаллических проводов. Перед отражающей поверхностью показаны жесткие вибраторы и тракты их питания. На рис.1.45 приведена система с антенной (в зависимости от размеров излучающей поверхности может быть средневолновая, длинноволновая и сверхдлинноволновая) из гибких элементов, играющих роль излучателей, с мачтовыми опорами.

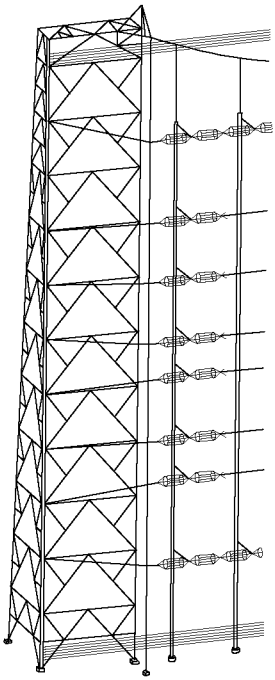


Рис.1.44. Фрагмент системы с опорным сооружением в виде отдельных башенных опор

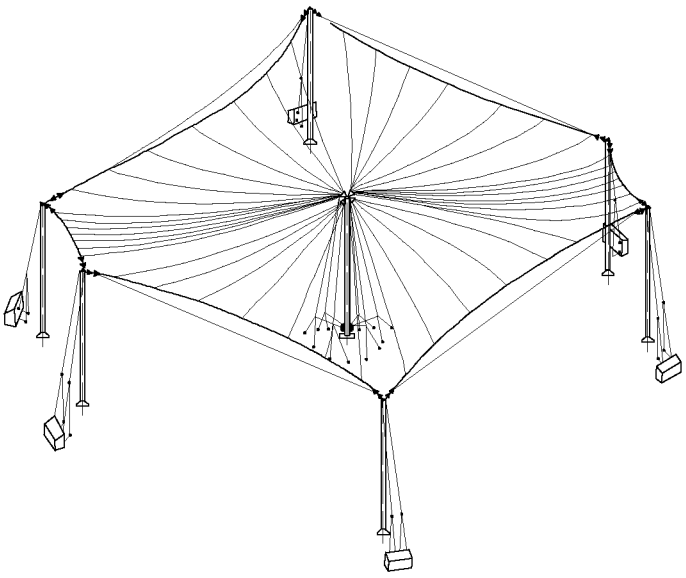


Рис.1.45. Система с антенной из гибких элементов, играющих роль излучателей с мачтовыми опорами

В данном случае антенное полотно представляет из себя разветвленную вантовую систему в плане в виде правильного пятиугольника. Антенное полотно состоит из треугольных секторов, подвешенных в центре и по углам многоугольника к мачтам. Высоты мачт варьируются от 150 до 385 м при расстоянии между ними до 2000 м.

Каждый сектор антенного полотна выполняется из радиальных проводов, расходящихся от вершины треугольника, прикрепленного к центральной мачте, и присоединяемых к несущему леерному канату, закрепляемому к периферийным мачтам. От мачт антенное полотно изолируется при помощи изоляторов. Крепле-

ние полотна к периферийным мачтам может быть как жестким, так и с помощью системы постоянного тяжения за счет противовесов или с использованием автоматической системы предельного тяжения, управляющей включением лебедок подъема-спуска.

1.4.3. Особенности расчета систем. Расчет систем в настоящее время, как правило, производится с использованием ПЭВМ. При этом для расчета опорных конструкций как с жесткими, так и с гибкими связями, а также частей антенн из гибких элементов применяются соответствующие программы.

При расчете опорных сооружений с одиночными опорами антенн с плоской отражающей поверхностью наихудшими загружениями являются:

- для промежуточных опор – действие ветра или обледенения и ветра при направлении нормально отражающей поверхности антенны;
- для концевых и анкерных опор – обледенение и ветер под некоторым углом к отражающей поверхности. Наиболее опасное направление следует установить, проведя расчеты при различных направлениях ветра. В первом приближении можно принять действие ветра перпендикулярным диагонали поперечного сечения каждой опоры.

Если система образуется из опор, работающих в двух взаимно перпендикулярных направлениях, как системы с односторонними связями, принцип суперпозиции неприменим, и необходимо составлять выражения, устанавливающие изменение усилий при одновременном действии в обоих направлениях.

Гибкие нити (вертикальные и горизонтальные) и системы из гибких нитей, представляющие собой разветвленные вантовые системы в плане, рассчитываются с использованием ПЭВМ по программам, разработанным в ЦНИИпроектстальконструкция.

Антенное полотно из гибких нитей с точки зрения строительной механики, представляет собой нелинейную вантовую систему, состоящую из участков нитей, работающих как струны или как цепные линии. При расчете таких систем рассматривают следующие типы расчетных задач:

- определение геометрических размеров элементов, при которых удовлетворяются технологические требования по прогибам элементов системы. На данной стадии фактически решается задача создания конструктивного решения системы с заданными запасами прочности в ее элементах;
- привязка системы к местности, при этом задаются конкретные отметки точек крепления системы к опорам;
- расчет подъема-спуска системы (при разработке горизонтальных антенных полотен);
- расчет на расчетное ветровое воздействие;
- расчет на гололедные отложения, ветровое воздействие и температурный перепад.

Расчет последних двух типов задач производится на различные направления ветра. Полученные в точках крепления системы реакции прикладываются с соответствующим сочетанием внешних нагрузок к опорным сооружениям или отдельным опорам при их расчете. В случае необходимости расчет с приведенной выше последовательностью повторяется с учетом прогибов мачт.

1.5. Перебазируемые антенные устройства

Конструктивные решения антенных устройств рассматриваемого типа должны обеспечивать возможность их перебазирования, а также перевода из транспортного положения в рабочее и обратно на месте дислокации. Наиболее широкое применение в качестве опор перебазируемых антенных устройств находят мачты.

Перебазируемые антенные устройства с опорами в виде мачт обычно подразделяют на перевозные и мобильные. Такое разделение определяется, в основном, требованиями ко времени их развертывания (свертывания) и работы в эксплуатационном режиме на одном месте, а также способом транспортирования. Перевозные опоры могут перевозиться любым видом транспорта, отвечающим требованиям по габаритам и грузоподъемности, при этом источники питания механизмов развертывания не связаны с транспортным средством. Мобильные опоры перевозятся на специально доработанном транспортном средстве (носителе), а источником питания механизмов их развертывания служит двигатель носителя.

Одним из наиболее существенных отличий перебазируемых мачт от стационарных при развертывании их на неподготовленных площадках является конструктивное решение опорных закреплений ствола мачты и оттяжек, в значительной степени влияющих на время развертывания мачт. При развертывании мачт на заранее подготовленных площадках конструкция фундаментов не имеет принципиальных отличий от фундаментов стационарных мачт. При развертывании мачт на неподготовленных площадках наиболее широкое применение в качестве закреплений оттяжек к грунту находят завертываемые анкерные устройства (рис.1.46). Завертывание в грунт производится вручную или специальным устройством, монтируемым на автомобиле (рис.1.47).

Конструктивное решение мачт перевозных антенных устройств, в принципе, незначительно отличается от стационарных, поскольку доминирующим фактором, влияющим на их конструктивное решение, как и для стационарных мачт, является ветровое воздействие. Однако при выборе конструкции мобильных мачтовых опор определяющими могут оказаться особенности принятого способа развертывания (свертывания), а также требования по габаритности при транспортировании.

Перевозные антенно-мачтовые устройства включают мачты различной конструкции высотой от 20–30 до 130–150 м. Расчет – в количестве 8–10 человек осуществляет развертывание или свертывание мачтовой опоры, используя имеющееся в комплекте оборудование, за время от 4–8 до 24 часов. Развертывание мачты, как правило, производится при помощи специального подъемника. путем последовательного выдвижения и соединения между собой секций ствола с удержанием их в промежуточных положениях на кулачках стопорного механизма подъемника. Устойчивость мачты во время монтажа обеспечивается оттяжками из стальных канатов, стравливаемых с барабанов лебедок, устанавливаемых на анкерных устройствах. При этом в канатах поддерживается заданное усилие.

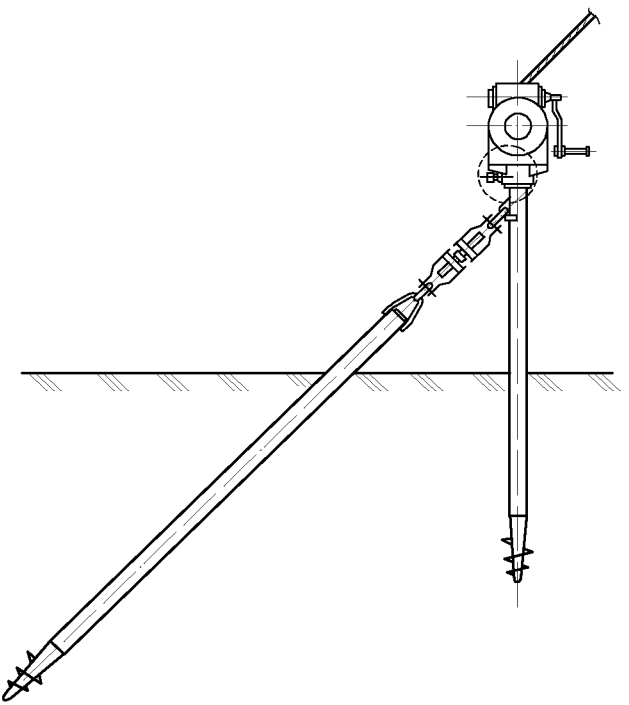


Рис.1.46. Схема анкерного устройства

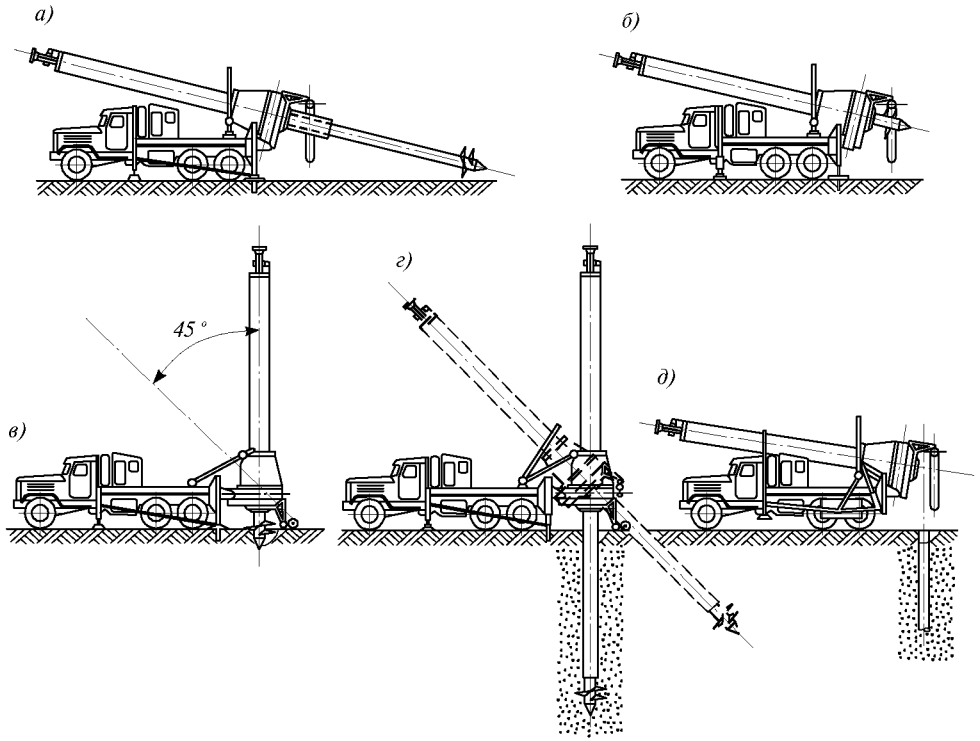


Рис.1.47. Машина для завертывания винтовых анкерных свай
а – установка анкерной сваи; *б* – свая уложена в направляющее устройство; *в* – направляющее устройство со сваей в рабочем положении; *г* – свая завернута; *д* – направляющее устройство в транспортируемом положении

Легкие перевозные мачты для размещения технологического оборудования небольшой наветренной площади и веса (например, для автоматических метеостанций) высотой примерно до 30 м могут выполняться со стволом из отдельных секций из труб (рис.1.48). Секции ствола соединяются между собой при помощи втулок, воспринимающих изгибающий момент. В качестве материала труб могут применяться как сталь, так и алюминиевые сплавы. Мачты этой конструкции, как правило, монтируются в собранном виде при помощи «падающей стрелы».

Широкое применение в нашей стране нашли перевозные опоры высотой до 52 м (промежуточно фиксируемые высотой 23,6 и 38,0 м) для технологического оборудования с наветренной площадью до 20 м^2 и весом до 2-х тонн (рис.1.49). Ствол такой опоры квадратного сечения с базой 400 мм собирается из пространственных решетчатых секций высотой 2465 мм с элементами из углового профиля. В верхнем сечении каждой секции к поясам (вертикальным элементам) прикреплены втулки, в которые при развертывании мачты входят пальцы, прикрепленные к поясам в нижнем сечении каждой секции. Пальцы фиксируются во втулках специальными винтами (рис.1.50).

В последнее время разработана конструкция секции треугольного сечения для перебазируемых мачт высотой до 130 – 150 м. Секция собирается из плоских ферм на месте развертывания (рис.1.51). Плоские фермы и другие элементы конструкции мачты при перевозке упаковываются в контейнер. В зависимости от высоты мачты, наветренной площади, веса технологического оборудования и ветрового района места дислокации, мачта может выполняться с базой 1300 мм и 1500 мм. Сечения элементов конструкций мачты определяются расчетом.

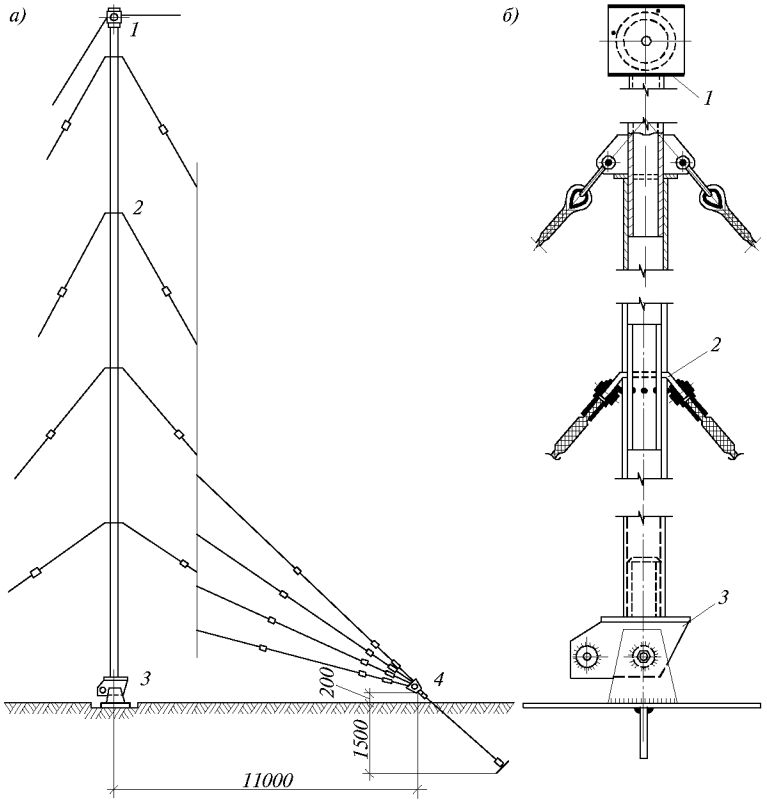


Рис.1.48. Мачта высотой 22 метра для автоматических метеостанций
1 - ствол из дюралюминиевых труб 110×5 мм и опорный шарнир; *2* - присоединение оттяжек к стволу; *3* - крепление проволочной антенны; *4* - анкерное крепление оттяжек

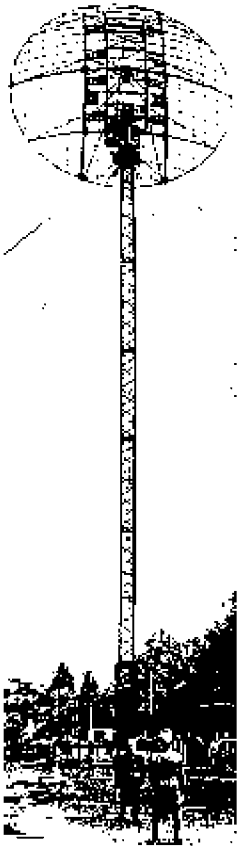


Рис.1.49. Перевозная мачта высотой 52 метра

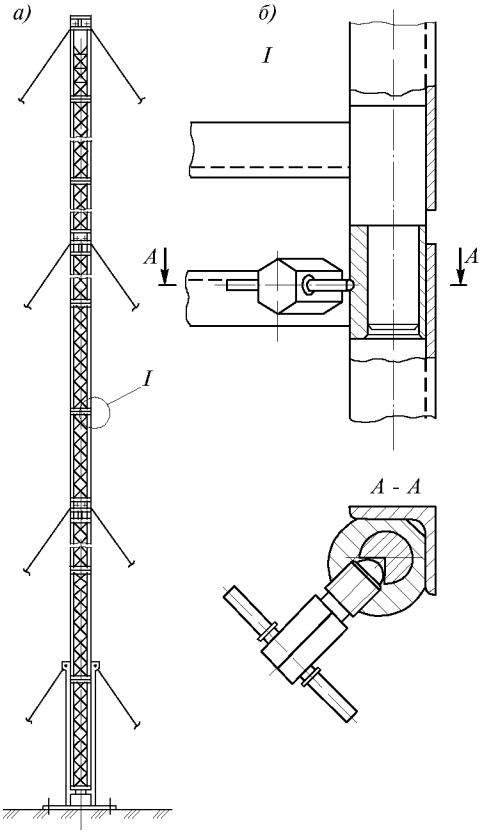


Рис.1.50. Соединение секций мачты между собой
а - общий вид мачты; *б* - узел соединения секций мачты

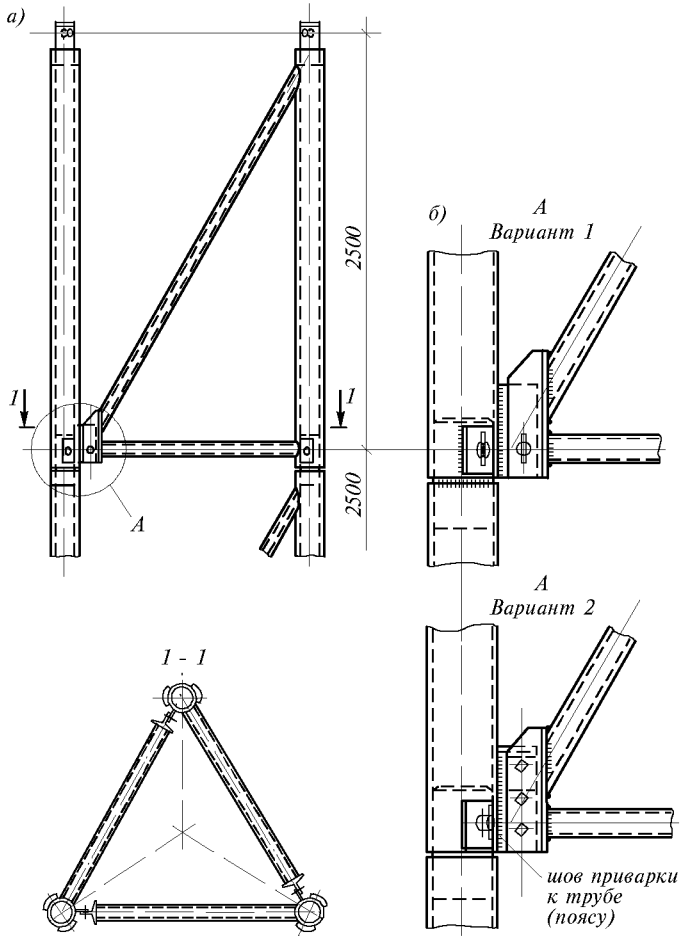


Рис.1.51. Секция мачты, собираемая из плоских ферм
а – общий вид секции; *б* – узел соединения плоских ферм

Соединение секций между собой осуществляется при помощи втулок и пальцев с фиксацией их быстросъемными элементами, аналогичное соединение применяется при сборке пространственной секции из плоских ферм (рис.1.51, вариант 1). При применении мачты описанной конструкции в качестве стационарной опоры конструкция соединения секций между собой, а также соединения плоских секций при сборке пространственной секции представлена на рис.1.51 (вариант 2). Развертывание мачты производится при помощи подъемника (рис.1.52), расположенного снаружи ствола мачты.

Мобильные антенно-мачтовые устройства – в состав этих устройств в зависимости от назначения технологического оборудования могут входить мачты высотой 40, 50 и 100 м. По результатам работ, проведенных как в нашей стране, так и за рубежом, оптимальным конструктивным решением ствола мачтовой опоры для этого типа устройств признана телескопическая конструкция, в наибольшей степени отвечающая требованиям быстроты развертывания опоры в рабочее положение и способам транспортирования.

Ствол такой мачтовой опоры состоит из пространственных секций в собранном положении телескопически входящих одна в другую с минимальным зазором. В верхней и нижней частях каждой секции расположены ролики, направленные соответственно внутрь и наружу секции. При развертывании ствола опоры ролики каждой секции передвигаются по поясам смежных секций. В проектном положении секции удерживаются кулачковым стопорным механизмом. Развертывание секций производится поочередно, начиная с верхней секции, гидроцепным подъемником, расположенным внутри ствола мачты. Устойчивость ствола мачты во время монтажа обеспечивается оттяжками, стравливаемыми с барабанов лебедок, установленных на анкерные устройства.

В транспортном положении ствол мачты размещен на транспортном средстве-носителе. Перевод в вертикальное положение ствола мачты на месте дислокации осуществляется при помощи гидроцилиндров.

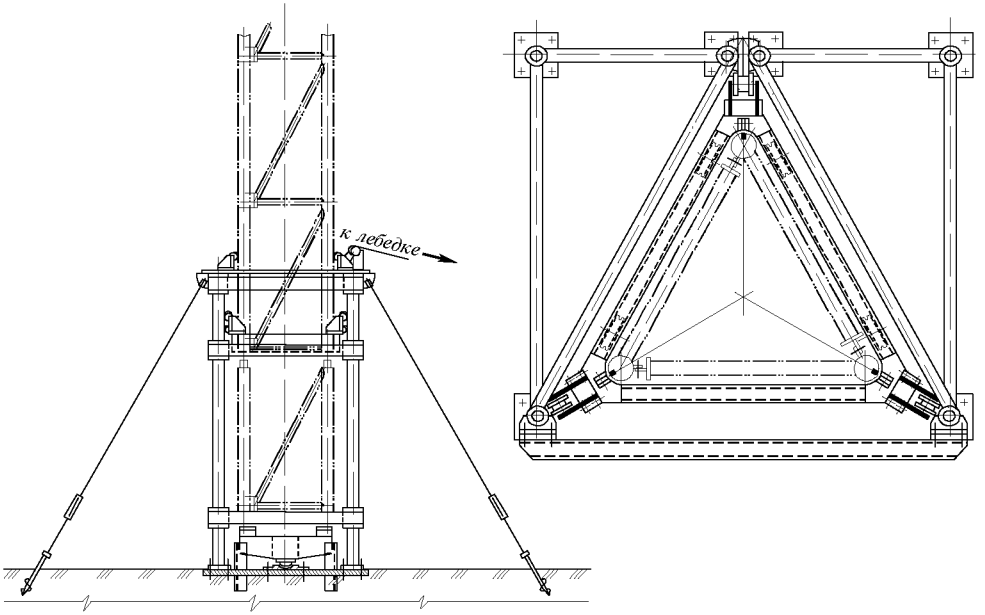


Рис.1.52. Подъемник для развертывания мачты высотой от 130 до 150 метров

В нашей стране в 60-х годах была создана мобильная телескопическая мачта высотой 40 м, на которой могли быть размещены две параболических антенны диаметром 60 см (рис.1.53). Ствол мачты состоял из пяти пространственных секций треугольного сечения с элементами из труб. В эксплуатационном режиме мачта не отсоединялась от носителя (автомобиль ЗиЛ-157), который для передачи нагрузок от ствола на грунт снабжен четырьмя аутригерами.

В конце 70-х и начале 80-х годов была создана мачта высотой 50 м для размещения антенны «Квадрат». Ствол мачты состоял из семи пространственных секций треугольного сечения. Пояса секций (вертикальные элементы) были выполнены из плоскоовальных труб, обращенных большей осью овала к центру секции. Такая конструкция обеспечивала лучшее прилегание роликов к

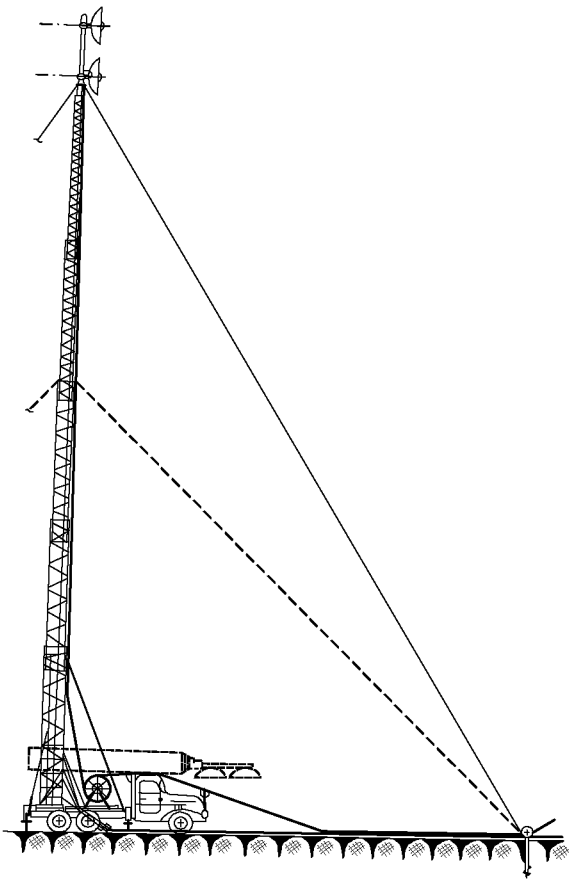


Рис.1.53. Телескопическая мачта высотой 40 метров

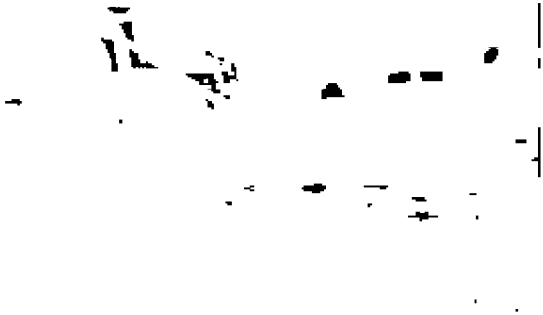


Рис.1.54. Установка ствола мачты на грунт

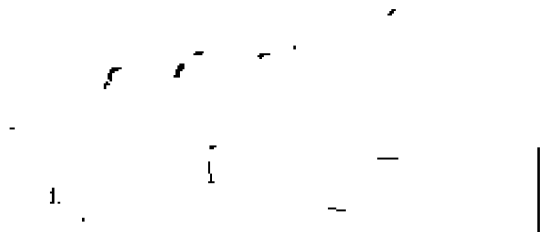


Рис.1.55. Телескопическая мачта в транспортном положении

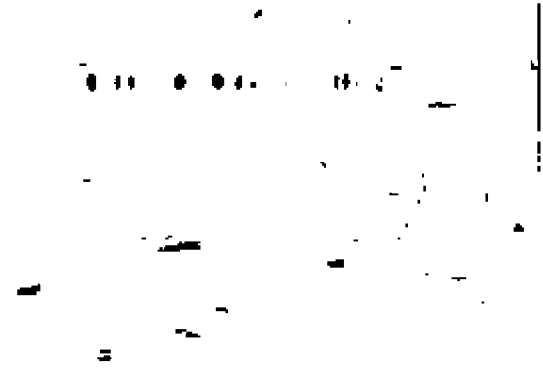


Рис.1.56. Установка ствола телескопической мачты высотой 52 метра на изолятор

поясам при развертывании и исключала «рысканье» секций при подъеме. Ствол мачты устанавливался непосредственно на грунт (рис.1.54), его конструкция позволяла, в случае необходимости, производить отсоединение от носителя. Перевод в вертикальное положение осуществлялся при помощи двух гидроцилиндров. В транспортном положении (рис.1.55) обеспечивались все требования по габаритности.

В настоящее время проводятся работы по модернизации мачты этой конструкции. Дополнительно предусматривается возможность установки мачты на опорный изолятор и установка изоляторов в оттяжки для размещения на мачте антенны зонтичного типа (рис.1.56).

К конце 80-х годов была создана мачта высотой 40 м для размещения полноповоротной антенны с наветренной площадью до 20 м^2 и весом до 2-х т. Принципиально по своей конструкции ствола эта мачта незначительно отличалась от предыдущей, однако она была смонтирована на специальной платформе, установленной на шасси прицепа типа МАЗ-Р950 и снабжена аутригерами для передачи нагрузки от ствола мачты на грунт.

В настоящее время закончена разработка мачты высотой 100 м для размещения антенны зонтичного типа (рис.1.57). Ствол мачты состоит из девяти пространственных секций треугольного сечения. В остальном конструкция этой мачты идентична модернизированному варианту мачты высотой 50 м. Транспортирование мачты осуществляется тягачом типа КрАЗ 6443 и подкатной тележкой модели 9383 или на полуприцепе МАЗ-9389.

Из зарубежных образцов можно отметить разработки фирмы Зальцгиттер АГ. Этой фирмой выпускаются мобильные мачты высотой от 22 до 40 м, на которых может размещаться оборудование до 2-х антенн диаметром 1600 мм. Пространст-

венные секции этих мачт выполнены из круглых труб и имеют квадратное сечение. В рабочем положении предусмотрено размещение мачт на носителе и на раме, отделяемой от носителя.

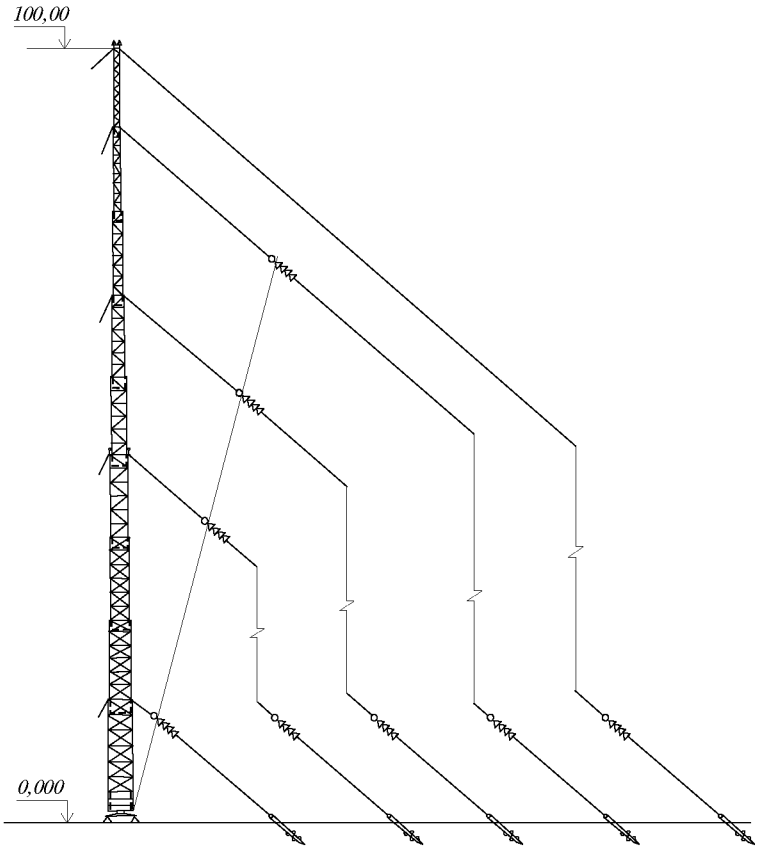


Рис.1.57. Телескопическая мачта высотой 100 метров

1.6. Зеркальные антенны

1.6.1. Состав зеркальной антенны (ЗА). В общем случае ЗА состоит (рис.1.58) из зеркальной системы (ЗС) *1*, формирующей определенным образом радиолуч, (радиосигнал) и опорно-поворотного устройства (ОПУ) *2*, обеспечивающего заданную пространственно-временную ориентацию этого радиолуча. Основная доля потерь эффективности работы ЗА приходится на рефлектор ЗС, который в тоже время доминирует по сложности решения, габаритам и массе. Поэтому рефлектор рассматривается как первичная (основная) конструктивная подсистема, в свою очередь, подразделяющаяся на две группы конструкций (рис.1.59): зеркало *1* и каркас *2*. В качестве вторичной (дополнительной) подсистемы выступает совокупность функциональных групп конструкций (ФГК), образующих радиомеханический тракт ЗА: например, контррефлектор *3* с опорой *4* для поддержания его в зоне фокуса и облучатель *5* с конструкцией его подвески *6*.

ОПУ могут иметь крайне разнообразное построение. Характерным для них является наличие таких основных ФГК как несущие конструкции, опоры и приводы вращения.

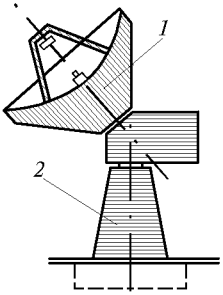


Рис.1.58. Состав зеркального радиотелескопа:
1 – зеркальная система; *2* – опорно-поворотное устройство (ОПУ)

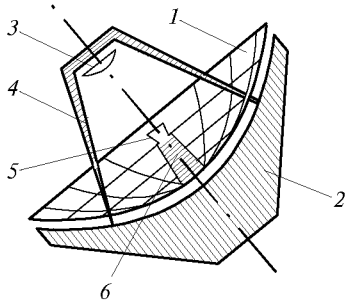


Рис.1.59. Состав зеркальной системы:
1 – зеркала рефлектора; *2* – каркас рефлектора; *3* – контррефлектор; *4* – опора контррефлектора; *5* – облучатель; *6* – опорная конструкция облучателя (стрела)

ЗС и ОПУ в совокупности образуют конструктивно-механическую систему (КМС) ЗА, которая и является предметом рассмотрения проектировщиков-строителей. Кроме того, в состав ЗА входят: антенно-фидерная система (АФС) и автоматическая система наведения (АСН).

1.6.2. Проблема прецизионности. Проблема, возникающая при создании ЗА, связана с необходимостью начальной реализации и последующего сохранения геометрической формы сооружения с отклонениями, не превышающими 1/16 длины волны, т.е. величин, измеряемых долями миллиметра. Превышение искажениями формы элементов ЗА указанного предела приводит к резкому снижению эффективности работы антенны. В строительном аспекте проблема заключается в создании металлоконструкций, обеспечивающих сохранение геометрической формы и взаимоположения элементов ЗА при вращении относительно горизонта, при действии переменного ветра, при температурной дестабилизации и т.п. с точностью $1/10^5$–$1/10^7$ от основного размера (диаметра рефлектора). Поскольку данный предел на несколько порядков жестче требований, предписываемых строительными нормативами ($1/10^3$), ограничения деформативности становятся определяющим условием проектирования металлоконструкций ЗА.

В аспекте формообразования эту проблему следует понимать как проблему прецизионности, сущность которой сводится к необходимости такого приближения конструктивной формы к условиям эксплуатации, при котором первостепенное и определяющее значение в формообразовании играют деформационные ограничения, на два – четыре порядка более жесткие, чем регламентируемые строительными нормативами. Компоненты проблемы прецизионности:

– доминирующее влияние конструктивных факторов на эффективность работы ЗА;

– необходимость обеспечения крайне высокой точности изготовления и монтажа металлоконструкций, в пределах $1/10^6$ от диаметра рефлектора, что равнозначно распространению машиностроительных допусков на инженерные сооружения, габариты которых достигают 100 м и более;

– подвижность ЗА, особенно вращение ее относительно горизонта, которое приводит к изменчивости напряженно-деформированного состояния конструкций, вызванного действием гравитационных сил;

– большая, чем у традиционных строительных конструкций, зависимость (в аспекте снижения эффективности работы ЗА) конструктивной формы от внешних воздействий и, в первую очередь, от ветра и температуры;

– необходимость учета стохастического характера исходных условий, а именно: фактического рассеяния геометрических параметров сооружения и физических характеристик материала, а также, в определенной мере, случайного характера ветровой нагрузки и температурной дестабилизации.

1.6.3. Конструктивные нарушения нормальной эксплуатации зеркальных антенн и причины, их вызывающие. ЗА относятся к антеннам оптического типа, преобразующим сферический (цилиндрический) фронт волны, излучаемый первичным источником (облучателем) в плоский. В результате получается параллельный пучок лучей (радиолуч), расходящийся вследствие дифракции с образованием главного лепестка диаграммы направленности и ряда боковых.

Данный процесс, инвариантный к режимам приема и передачи, и является для ЗА основным технологическим процессом, эффективность которого должна обеспечиваться работой металлоконструкций. В соответствии с этим под нормальной эксплуатацией ЗА подразумевается непревышение парциальным (только от конструктивных факторов) снижением эффективности предельного уровня потерь при заданной обеспеченности работы антенны по времени.

К основным конструктивным нарушениям нормальной эксплуатации ЗА, обуславливающим наступление функционального отказа, относятся: а) искажения геометрической формы и взаимоположения рабочих элементов ЗА; б) угловые смещения радиолуча; в) искажения поля в зоне радиолуча вследствие пересечения этой зоны металлоконструкциями.

Руководствуясь соображениями о некоррелируемости влияния на эффективность работы ЗА конструктивных нарушений первой и третьей групп, парциальный (долевой) коэффициент эффективности $\eta_{\Sigma}^{кон}$, характеризующий снижение эффективности вследствие влияния конструктивных факторов, представляется в виде произведения, $\eta_{\Sigma}^{кон} \; l_n \; \eta_A \, \eta_T$, где η_A характеризует снижение эффективности в результате искажений геометрии антенны, η_T – то же, но из-за наличия конструкций в зоне радиолуча.

К числу учитываемых при расчете конструкций ЗА явлений, нагрузок и воздействий, приводящих как к появлению и развитию нарушений нормальной эксплуатации, так и к полной непригодности к эксплуатации, относятся: а) начальные геометрические и физические несовершенства конструкций; б) дестабилизирующее вращение всего сооружения или его отдельных частей; в) действие переменного ветра; г) температурные климатические воздействия; д) отложения осадков (снег, гололед, дождь) на отражающих поверхностях элементов ЗА; е) расположение конструкций в зоне радиолуча.

Начальные несовершенства имеют, как правило, случайный характер. Случайными являются и эксплуатационные искажения геометрии, возникающие в результате действия переменного ветра, осадков, температуры и т.п. По существу детерминированными являются лишь весовые деформации.

Начальные геометрические искажения обусловлены погрешностями изготовления и монтажа. Для их нормирования и оценки предложена специальная система допусков [12], связанная с системами допусков в строительстве и машиностроении. Отклонения координат узлов конструкций ЗА от номинальных значений, возникающие как результат этих погрешностей, должны определяться с помощью специальных вероятностных расчетов точности конструкций, как показано далее (п.1.6.7).

Начальные искажения не только сами по себе снижают эффективность работы ЗА, но и изменяют расчетную картину деформационных (эксплуатационных) искажений, полученную на основе номинальных значений координат узлов.

Помимо отклонений координат узлов, к геометрическим несовершенствам, влияющим на расчетное напряженно-деформированное состояние конструкций, относятся: фактический разброс площадей поперечных сечений проката, погиби и эксцентриситеты.

Вероятностные характеристики рассеяния площади сечений $S_{ном}$ могут приниматься равными следующим значениям: для фасонного проката максимальные отклонения $\pm 0{,}04\,S_{ном}$, среднеквадратическое значение $\sigma_s = 0{,}0133\,S_{ном}$; для труб максимальные отклонения $\pm 0{,}10\,S_{ном}$, среднеквадратическое значение $\sigma_s = 0{,}0333\,S_{ном}$. Погиби стержней каркасов ЗА следует принимать равными 1/750 длины стержня, а эксцентриситеты – согласно СНиП II-23-81* с округлением до 5 мм.

К физическим несовершенствам, также меняющим расчетную картину напряженно-деформированного состояния конструкций, относятся несовершенства материала, а именно: разброс модуля нормальной упругости $E_{факт}$, разброс предела упругости $(R_y)_{факт}$ и температурного коэффициента линейного расширения $\overline{\alpha}_{факт}$.

При расчетах можно пользоваться следующими вероятностными характеристиками разброса: для модуля упругости максимальные отклонения $\pm 0{,}10\ E_{ном}$, среднеквадратическое значение $\sigma_E = 0{,}033\ E_{ном}$; для предела упругости максимальные отклонения $\pm 0{,}10\ R_{0{,}05}$, среднеквадратическое значение $\sigma_R = 0{,}0333\ R_{0{,}05}$, и, наконец, для коэффициента температурного расширения максимальные отклонения $\pm 10\overline{\alpha}_{0^\circ C}$, среднеквадратическое значение $\sigma_{\overline{\alpha}} = 0{,}033\overline{\alpha}_{0^\circ C}$.

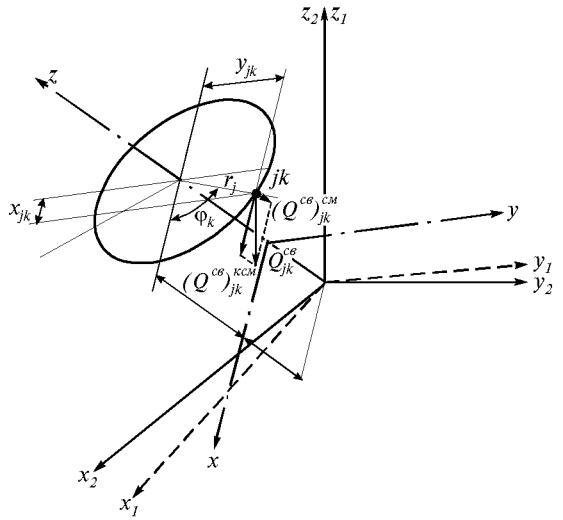


Рис.1.60. Принятое разложение парциальной массы в *jK* узле рефлектора

Сущность дестабилизирующего влияния вращения заключается прежде всего в изменении ориентации металлоконструкций при наклонах ЗА к горизонту относительно поля гравитационных сил, постоянно ориентированного по отношению к земле. Кроме того, дестабилизирующее влияние при вращении оказывают и инерционные силы (формула (1.118)).

Пространственное положение ЗА (рис.1.60) определяется положением ее фокальной оси (ФО). При азимутально-угломестной монтировке ЗА положение ФО в неподвижной системе координат определяется углом α_F наклона ФО к горизонту (углом места) и углом β поворота по азимуту. В этом случае парциальная масса $Q_{jk}^{св}$ в *jk*-ом узле ЗА всегда может быть представлена двумя компонентами:

– симметричной

$$\left(Q_{jk}^{св}\right)^{см} = -Q_{jk}^{св} \cdot \sin\alpha_F\,, \qquad (1.114)$$

– кососимметричной

$$\left(Q_{jk}^{св}\right)^{ксм} = -Q_{jk}^{св} \cdot \cos\alpha_F\,, \qquad (1.115)$$

Симметричная $\left(Q_{jk}^{св}\right)^{см}$ действует всегда параллельно оси ФО, кососимметричная $\left(Q_{jk}^{св}\right)^{ксм}$ – расположена в плоскости, параллельной плоскости раскрыва рефлектора (перпендикулярной ФО).

В аспекте дестабилизации геометрической формы должно быть учтено юстировочное состояние, при котором на монтаже обеспечивается начальная форма. Оно характеризуется отсутствием весовых искажений и соответствует угловому положению рефлектора $\alpha_F = \alpha_{F_0}$, при котором осуществляется юстировка его зеркала. Реальные весовые искажения возникают лишь в момент углового отклонения рефлектора от юстировочного угла α_{F_0} в ту или другую сторону. Условные силы, дестабилизирующие начальную форму, определяются по формулам:

– симметричные

$$\left(Q_{jk}^{св}\right)_{ус}^{см} = -Q_{jk}^{св} \cdot \left(\sin\alpha_F - \sin\alpha_{F_0}\right), \qquad (1.116)$$

– кососимметричные

$$\left(Q_{jk}^{св}\right)_{ус}^{ксм} = -Q_{jk}^{св} \cdot \left(\cos\alpha_F - \cos\alpha_{F_0}\right), \qquad (1.117)$$

Эти возмущающие силы в зависимости от отношения между углами α_F (текущим) и α_{F_0} (юстировочным) могут как совпадать по направлению с истинными силами $Q_{jk}^{св}$, так и быть направлены в противоположную сторону.

Дестабилизирующее влияние инерционных сил может быть оценено путем сопоставления их с весовой нагрузкой. Применительно к парциальной массе в *jk*-м узле $Q_{jk}^{св}$ их соотношение имеет вид:

$$Q_{jk}^{ин} \big/ Q_{jk}^{св} = \frac{1}{10\overline{\omega} a_{jk}}, \qquad (1.118)$$

где a_{jk} – расстояние от точки *jk* до оси вращения; $\overline{\omega}$ – угловое ускорение.

Поскольку в большинстве случаев ЗА эксплуатируются на открытом воздухе без укрытий, ветровая нагрузка представляет собой второй по значению после вращения фактор, дестабилизирующий напряженно-деформированное состояние конструкций ЗА (рис.1.61).

Особенности ветровой нагрузки обусловлены спецификой взаимодействия ветра и конструкций ЗА в части как статической, так и динамической ее компонент.

В целом ветровая нагрузка имеет случайный характер. Однако ввиду стабильности аэродинамических свойств конкретных конструкций можно рассматривать распределение статической компоненты ветрового давления по элементам ЗА как квазисистематическое, зависящее от аэродинамических свойств ЗА, а также от взаимной ориентации ЗА (углы α_F и β_F) и

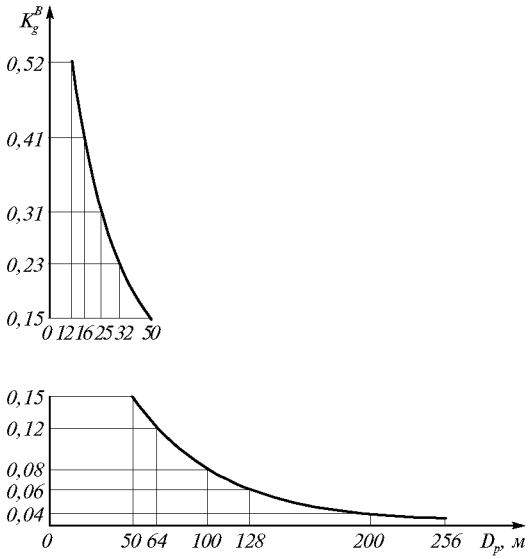


Рис.1.61. Зависимость соотношения равнодействующих сил ветровой и весовой нагрузок $\left(K_g^B = Q_{зс}^{в} / Q_{зс}^{св}\right)$ на рефлектор от его диаметра при башенной подвеске и скорости ветра 15 м/с на уровне угломестной оси

направления ветрового потока (угол β^B). Случайными остаются в такой постановке лишь масштаб и момент появления ветровой нагрузки.

Аэродинамические свойства ЗА характеризуются двумя группами параметров. Первая группа содержит шесть коэффициентов суммарных сил c_i и моментов m_i, характеризующих ветровое воздействие интегрально, относительно осей выбранной системы координат. Ко второй группе относятся коэффициенты $\overline{q}^B_{PN}$, характеризующие распределение ветрового давления по поверхности зеркала рефлектора и других элементов ЗА.

Суммарные силы Q_i^B и моменты m_i^B определяются на основе экспериментальных данных по формулам:

$$Q_i^B = \frac{1}{64}\pi D_p^2 \cdot \left(V^B\right)^2 \cdot c_i; \quad m_i^B = \frac{1}{64}\pi D_p^3 \cdot \left(V^B\right)^2 \cdot m_i; \tag{1.119}$$

а давление q^B_{PN} в точке зеркала рефлектора – по формуле

$$q^B_{PN} = \frac{1}{16}\left(V^B\right)^2 \cdot \overline{q}^B_{PN}, \tag{1.120}$$

где V^B – скорость ветра, соответствующая рассматриваемой расчетной ситуации; D_p – диаметр рефлектора.

В тех случаях, когда создаваемая ЗА имеет оригинальную форму, ее аэродинамические параметры должны устанавливаться путем отдельных исследований в аэродинамической трубе. Если же геометрическая форма и компоновка ЗА не сильно отличаются от известных решений, то с достаточной степенью точности значения аэродинамических параметров могут быть приняты по опубликованным экспериментальным данным. Например, в [12] приведены такие данные для ЗА нового поколения типа РТФ, подобные результаты имеются также и в других источниках. Причем, если отношение отстояния e_1 вершины зеркала рефлектора вдоль ФО от угломестной оси к диаметру рефлектора e_1/D_{p_1} у проектируемой ЗА отличается от его же значения e_0/D_{p_0}, но имевшего место у продуваемой модели (прототипа), то в принятые величины параметров необходимо ввести поправки:

$$m_{z_1} = m_{z_0}; \quad m_{y_1} = m_{y_0} + c_x\left(\frac{e_0}{D_{p_0}} - \frac{e_1}{D_{p_1}}\right); \quad m_{x_1} = m_{x_0} + c_y\left(\frac{e_0}{D_{p_0}} - \frac{e_1}{D_{p_1}}\right),$$

где m_z, m_y, m_x, c_x, c_y – значения коэффициентов в подвижной системе координат, связанной с рефлектором, у которой ось OZ совпадает с ФО, ось OY всегда параллельна оси угломестного вращения, а начало координат совмещено с вершиной зеркала рефлектора.

Динамическое воздействие ветра проявляется как действие неуравновешенных турбулентных вихрей, создающих крутящие моменты относительно осей вращения ЗА. Вихри с периодом воздействия большим периода собственных колебаний вращаемой части ЗА, оказывают квазистатическое воздействие с малым коэффициентом динамичности, а вихри, находящиеся в резонансе с ЗА, приводят к угловым колебаниям радиолуча.

Определение динамических ветровых моментов относительно угломестной и азимутальной осей ЗА в предположении, что рефлектор направлен на горизонт, направление ветра перпендикулярно плоскости его раскрыва (вдоль ФО), а неуравновешенное динамическое воздействие (вихрь) приложено на краю рефлектора (рис.1.62), проводится по формулам

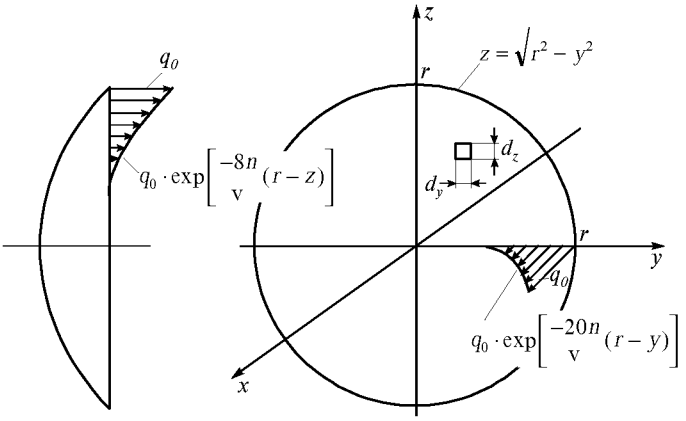


Рис.1.62. Модель динамического ветрового воздействия на рефлектор

$$(m_y^B)^{Д} = 2g_0\int_0^r\int_{-\sqrt{r^2-y^2}}^{\sqrt{r^2-y^2}} \exp\left[-\frac{8n}{\overline{V}^B}(r-z)\right]\cdot\exp\left[-\frac{20n}{\overline{V}^B}y\right]\cdot z\,dz\,dy\,; \qquad (1.121)$$

$$(m_z^B)^{Д} = 2g_0\int_0^r\int_{-\sqrt{r^2-y^2}}^{\sqrt{r^2-y^2}} \exp\left[-\frac{8n}{\overline{V}^B}(r-z)\right]\cdot\exp\left[-\frac{20n}{\overline{V}^B}(r-y)\right]\cdot y\,dy\,dz\,, \qquad (1.122)$$

где n – частота воздействий ($n = 0{,}05-10$ Гц); $\overline{V}^B$ – средняя скорость ветра; $g_0 = \rho c_x \overline{V}^B A_v$ – нагрузка на вершине рефлектора (рис.1.62), ρ – массовая плотность воздуха (ρ = 0,125 кг/с^{2}м^3), A_v – амплитуда пульсации скорости ветра на данной частоте:

$$A_v(n) = \left[S_v(n)\kappa_m\left(\overline{V}^B\right)^2\frac{\Delta n}{n}\right]^{1/2}, \qquad (1.123)$$

где κ_m – коэффициент торможения земной поверхности: на воде $\kappa_m = 0{,}01-0{,}02$, на открытой местности $\kappa_m = 0{,}003-0{,}005$, в лесах, в пригородной местности $\kappa_m = 0{,}03-0{,}05$ (если точно местность не известна, рекомендуется принимать $\kappa_m = 0{,}01$); Δn – ширина полосы турбулентности; $S_v(n)$ – ординаты спектра пульсаций Давенпорта.

Количественное определение стандартов крутящих моментов

$$\sigma m = \left(\sum_1^{20} m_i^2\right)^{1/2} \qquad (1.124)$$

рекомендуется проводить с помощью графиков, реализующих формулы (1.121) и (1.122), а также данных по средней скорости ветра, приведенных в [12, § 1.2 и § 6.5].

Подход, использованный при анализе ветровой нагрузки, позволяет установить определенную квазисистематическую закономерность в распределении температуры по конструкции ЗА, зависящую, в основном, от конструктивной формы ЗА и взаимной ориентации ЗА и Солнца. Случайными будут только величина средней температуры, масштаб температурного градиента и момент появления температуры. Все это позволяет разделить температурное воздействие на два вида: равномерное, при котором средняя температура во всех элементах одинакова и равна $T_{ср}$ – средней температуре воздуха; и неравномерное, когда имеет место градиент температуры ΔT между элементами, носящий случайный характер.

Как показали натурные исследования, при хорошей лакокрасочной защите градиент не превышает 5°С по каркасу рефлектора и 8°С по зеркальной системе в целом. Для расчетных оценок температурных искажений при градиенте можно воспользоваться данными натурных исследований 64-метрового и 70-метрового радиотелескопов [12].

1.6.4. Основные положения формообразования конструкций зеркальных антенн как прецизионных сооружений. Однозначная приоритетность условий деформативности при поиске конструктивных форм ЗА определила главное направление этого пути как синтезирование формостабилизированных систем с заданным законом деформирования. При этом формостабилизация обеспечивается в динамике процесса эксплуатационных изменений напряженно-деформированного состояния конструкций, а задачи синтезирования формулируются как задачи оптимизации прецизионных конструкций ЗА по функциональной эффективности.

Предельное условие перехода металлоконструкций в категорию прецизионных, получившее название «порога прецизионности», выражается следующим неравенством:

$$\left[\chi_\Delta = \overline{D}_p^{-1} \cdot \sum\nolimits_i \left(\overline{N}_i \cdot l_i\right)\right] \le E \cdot \kappa \left(R^н \cdot \nu_н \cdot \overline{D}_p \cdot m \cdot 16\right)^{-1}, \qquad (1.125)$$

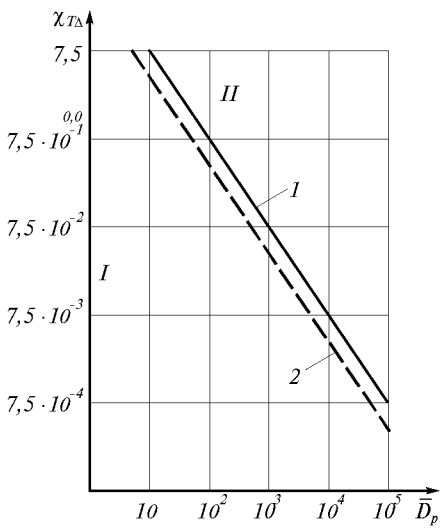


Рис.1.63. Графическая интерпретация областей прецизионных (I) и традиционных (II) конструкций
1 – из стали; *2* – из алюминия

где $\overline{D}_p = D_p/\lambda$ – относительный диаметр раскрыва, λ – минимальная длина рабочей волны; χ_Δ – теоретическая характеристика прогиба; m и κ – коэффициенты условий работы и безопасности по материалу; $R^н$ – нормативное сопротивление материала и $\nu_н$ – коэффициент, характеризующий снижение суммарных напряжений в случае действия только нормативных нагрузок без учета коэффициентов перегрузки.

Графическая интерпретация формулы (1.125) представлена на рис.1.63.

В качестве критерия выбора направления формообразования (системы конструктивных решений), адекватных по уровню эффективности, используется максимальный относительный диаметр раскрыва $\overline{D}_{p,\max}$ (МОДР), который может быть достигнут при известном суммарном среднеквадратичном искажении σ_Σ и заданном уровне потерь t (в %) эффективности [12]. Соответственно этому критерию имеют место три характерные системы конструктивного решения, адекватные по эффективности, как рефлекторов ЗА (конструктивно совмещенная, конструктивно-автономная и конструктивно-автономная с заданным законом деформирования), так и ОПУ ЗА. На рис.1.64 приведены области рационального применения вышеуказанных систем рефлекторов в зависимости от λ и D_p, на рис.1.65 – то же, но применительно к ОПУ.

Для конструктивно совмещенной системы рефлектора характерно совмещение конструкции зеркала с каркасом рефлектора и ее включение в работу последнего. Этим достигается выигрыш по несущей способности, но усложняется процесс производства из-за ужесточения требований к изготовлению и сборке каркаса до

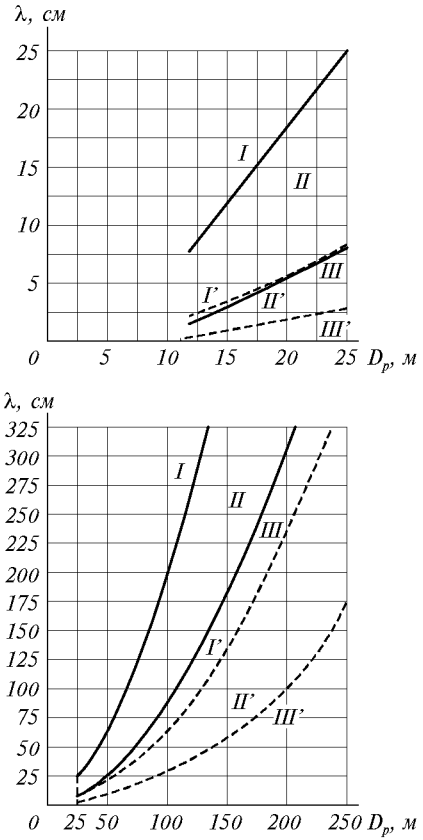


Рис.1.64. Области рационального применения адекватных систем конструктивного решения рефлекторов:

I, I′ – конструктивно совмещенная система; II, II′ – конструктивно-автономная система; III, III′ – конструктивно-автономная система с заданным законом деформирования; – – – – границы между областями I′ и II′, II′ и III′ ($\lambda_{min}=4\pi\sigma$); —— границы между областями I и II, II и III ($\lambda_{опт}=40\sigma$)

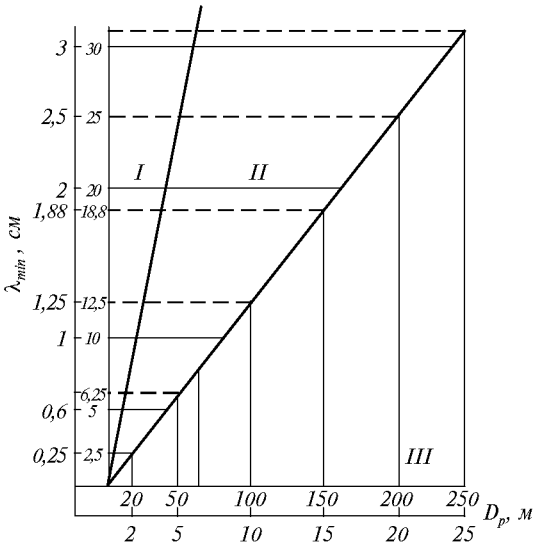


Рис.1.65. Области рационального применения адекватных систем конструктивного решения ОПУ:

I – без ограничения угловых ошибок; II – с выборкой кинематических люфтов в механизмах и опорах; III – с выполнением несущих конструкций, стабилизирующих направление радиолуча

уровня точности поверхности зеркала. Обязательным являются аутентичность материалов зеркала и каркаса рефлектора. Применять такую систему целесообразно для ЗА дециметрового диапазона диаметром 30 м и более.

Для конструктивно-автономных систем допустимую точность формы зеркала рефлектора можно обеспечить при выделении зеркала в автономную конструкцию, выполненную в виде отдельных элементов (отражательных щитов), регулируемых относительно каркаса рефлектора. Но специальных мер по эксплуатационной стабилизации геометрической формы не требуется, так как весовой деформационный предел у этих систем не превышает допустимой точности. Допускается и рекомендуется выполнение зеркала и каркаса из материалов, имеющих различные характеристики температурного расширения и модуля упругости.

На рис.1.66 приведен весовой деформационный предел для полноповоротных ЗА (с подвеской башенного типа), представляющий собой минимальное значение весовых перемещений $\min \Delta^{ce}$, которое может быть достигнуто при заданных габаритах и материале конструкции.

Конструктивно-автономная система с заданным законом деформирования применяется тогда, когда весовой деформационный предел превышает допустимую точность. Выполняется рефлектор в этом случае как формостабилизированная система, состоящая из совокупности функционально различных групп конструкций, взаимосвязь между которыми и выбор схемы и распределения материалов в каждой группе

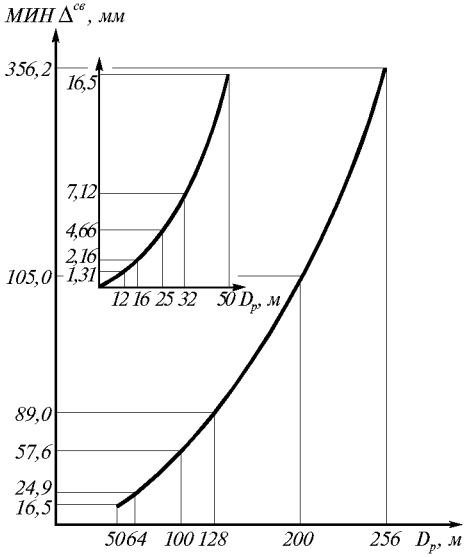


Рис.1.66. Весовой, деформационный предел для полноповоротных радиотелескопов с подвеской башенного типа

осуществляются оптимизированием из условия обеспечения заданного закона деформирования отражающей поверхности зеркала рефлектора.

Адекватные системы решения ОПУ ЗА разделяются соответственно предельному значению угловой ошибки

$$\Delta\theta_{пр} \le 0{,}025 \cdot 10^6 \overline{D}_p^{-1} \ (''); \qquad (1.126)$$

а) ЗА, у которых МОДР ≤ 200, без какого-либо ограничения угловых ошибок ФО, так как их предельные значения

$$\Delta\theta_{пр} \ge 125'' \qquad (1.127)$$

превышают деформационные угловые перемещения радиолуча, обусловленные работой конструкций ОПУ;

б) ЗА, у которых 200 < МОДР ≤ 800, когда еще нет необходимости в образовании ОПУ со стабилизацией углового положения радиолуча

$$30'' \le \Delta\theta_{пр} < 130'', \qquad (1.128)$$

но уже требуются мероприятия по выборке кинематических люфтов в механизмах и опорах вращения;

в) ЗА, у которых МОДР > 800, когда предельная ошибка уже так мала,

$$\Delta\theta_{пр} \le 30'', \qquad (1.129)$$

что ОПУ должно компоноваться по принципу конструкции, обладающей свойством стабилизации под нагрузкой углового положения радиолуча. Далее дается краткое изложение типовой структурной схемы ЗА и основных директивных методов формообразования, реализующих эти принципы.

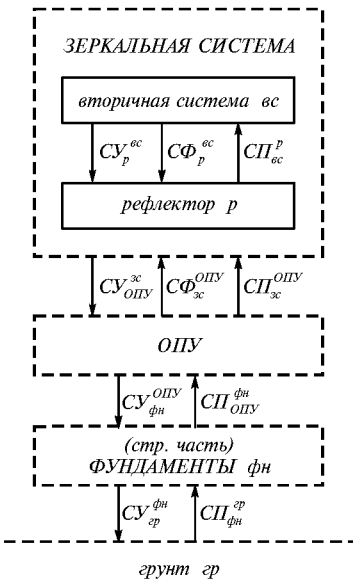


Рис.1.67. Типовая структурная схема зеркального радиотелескопа

Для установления механизма возникновения искажений формы рефлектора или угловых отклонений радиолуча разработана типовая структурная схема ЗА (рис.1.67). Спектр функциональных связей между отдельными функциональными группами конструкций (ФГК), в совокупности образующими ЗА, исчерпывающе описывается тремя типами связей: а) связями, передающими усилия (СУ); б) связями, вызывающими искажения геометрической формы (СФ), в) связями, приводящими к изменению положения (СП).

Имеют место следующие закономерности:

– СУ «направлены» всегда к ФГК, выполняющей роль опорной, и являются необходимым признаком существования конструкции;

– СП «направлены» всегда обратно СУ и также являются необходимым признаком существования конструкции;

– СФ могут иметь любое «направление» или отсутствовать вообще;

– СУ и СП образуют две разнозвенные ветви замкнутой связевой цепи, изменение звена $СУ_1$ влечет за собой соответствующее изменение звена $СП_1$, и наоборот;

– СФ не образуют сплошной связевой цепи и могут быть дискретизированы и локализованы;

– существуют две разновидности СП: типа СПЛ, приводящие только к линейным (поступательным) смещениям ФГК, и типа СПУ, вызывающие лишь угловые смещения.

Термин «направление» характеризует исключительно причинно-следственное отношение между смежными ФГК, но никак не направление фактических усилий или перемещений.

По существу, механизм явления состоит во взаимодействии межгрупповых связей, присущих той или иной структурной схеме ЗА. Изменяя структурную схему путем повышения порядка многозвенности и назначения для каждой входящей ФГК связей определенного типа и «направленности», можно управлять процессом возникновения конструктивных нарушений. При этом в качестве критериальных условий используются уравнения связевых цепей [12]. Первый из далее перечисленных методов формостабилизации позволяет снизить эффект ухудшения нормальной эксплуатации ЗА, возникающий вследствие искажений геометрической формы и взаимоположения рабочих элементов зеркальной системы, во-первых, за счет уменьшения количества звеньев типа СФ и, во-вторых, в результате обеспечения разнонаправленности влияния звеньев и типа СФ, и типа СП. Первого можно достичь введением в звено СФ промежуточной ФГК, трансформирующей это звено в двухзвенник СФ-СП, а также конструктивным преобразованием звена типа СФ в звено типа СП. Реализовать второе можно посредством задания звеньям СП определенных направленных свойств компенсации негативного влияния звеньев типа СФ.

Второй формостабилизирующий метод имеет целью ослабить отрицательное влияние углового смещения радиолуча в первую очередь за счет сокращения звеньев СПУ, и, во-вторых, за счет обеспечения разнонаправленности их влияния. Первое реализуется конструктивным преобразованием звена СП в звено СПЛ и исключением проявления угловых смещений. Второго можно достичь приданием звеньям СПУ, расположенным в пределах ОПУ, направленных свойств, обеспечивающих взаимопогашение угловых смещений, возникающих на всех звеньях связевой цепи ЗА.

Третий метод формостабилизации заключается в создании автономных ФГК во всех тех звеньях, где функции совмещены: формирования энергии (радиолуча) и восприятия воздействий; восприятия воздействий и обеспечения заданного закона деформирования; восприятия распределенных усилий от зеркала и местных возмущений от сосредоточенных усилий; обеспечения заданного закона деформирования от различных компонент воздействий и т.п.

Четвертый метод формостабилизации можно рассматривать как расчленение конструктивной системы на подсистемы, обладающие требуемой степенью локализации, и разработку необходимых узлов их соединений, гарантирующих заданный тип связей. Причем максимальный эффект может быть достигнут при исполнении отдельных подсистем в виде агрегатных устройств, облегчающих раздельную оптимизацию по эффективности и по массе. И, наконец, пятый метод стабилизации формы состоит в применении конструкций с высокой степенью дискретности, например, сквозных (решетчатых), позволяющих размещать несколько ФГК в одном пространственном объеме.

1.6.5. Зеркальные системы, сохраняющие форму под нагрузкой. Рациональное проектирование формостабилизированной зеркальной системы, включает решение следующих двух задач:

– проектирование формостабилизированного рефлектора;

– проектирование адекватных ему (по перемещениям) несущих конструкций вторичной системы.

Исходными (неуправляемыми) параметрами при проектировании, помимо размеров (D_p) и профиля зеркал, их взаимоположения, условий вращения, являются: минимальная длина рабочей волны λ, заданный уровень t % снижения эффективности и функционально зависимые от них ограничения на искажения формы зеркальной системы. В качестве интегральных параметров искажений выступают либо среднеквадратическое значение искажений (СКИ) σ_Σ, либо относительное его значение (ОСКИ) $\xi_\Sigma = \sigma_\Sigma / D_p$. Причем, предел ОСКИ устанавливается либо по формуле

$$\left(\xi_\Sigma\right) = -\left(4\pi\overline{D}_p\right)^{-2} \cdot \ln(2 - \eta_m - 0{,}01t), \qquad (1.130)$$

либо по графикам на рис.1.99 соответственно величинам λ, D_p, σ и $\eta_A = (\eta - \eta_m - 0{,}01t)$, где F – фокус рефлектора, $\overline{F} = F \cdot D_p^{-1}$ – относительный фокус.

Для вычисления деформационной (эксплуатационной) составляющей предела ОСКИ вначале выполняется количественное прогнозирование начального ОСКИ $\xi_{н\Sigma}$, интегрально характеризующего начальные искажения геометрии зеркал с учетом погрешностей изготовления и монтажа, способа и точности юстировки, конструкции зеркала (см. п.1.6.7). Затем устанавливается эксплуатационный предел

$$\left(\xi_э\right)_{пр} = \left[\left(\xi_\Sigma\right)_{пр}^2 - \left(\xi_{н\Sigma}\right)^2\right]^{1/2}. \qquad (1.131)$$

На основании $(\xi_э)_{пр}$ формируется структурная схема, устанавливающая оптимальное количество и вид ФГК, в совокупности образующих зеркальную систему, а также тип связей между ними. Далее назначается рациональная сеть характерных узловых точек зеркальной системы, к которым предъявляются требования следования определенному закону деформирования (обеспечения заданных соотношений деформационных перемещений) и которые получили название П-узлов. Обычно указанная сеть включает, во-первых, узлы каркаса рефлектора, предназначенные для крепления зеркала, и, во-вторых, опорные узлы подвески контррефлектора и облучателя. И в завершение устанавливаются топология и геометрия каждой ФГК. Причем, у формостабилизированных каркасов рефлекторов основными ФГК, требующими установления адаптированной к оптимизации топологии, являются: формообразующая конструкция (ФОК) и промежуточная конструкция (ПОК). Для ФОК точками нагружения являются ее П-узлы, а опорными точками – узлы контакта ФОК и ПОК. У ПОК соответственно точками нагружения являются указанные выше узлы контакта ФОК и ПОК, а в роли опорных точек выступают узлы закрепления ПОК на ОПУ. На этом завершается первая стадия рационального проектирования – поиск осевой схемы зеркальной системы.

На второй стадии проектирования производится оптимизированный выбор распределения жесткостей на закрепленных осевых схемах каждой ФГК.. Причем используются несколько вариантов решения этой задачи, из которых наиболее важными являются следующие два. Первый – оптимизация на закрепленной осевой схеме распределения жесткостей по критерию минимума массы. Второй – оптимизация на закрепленной осевой схеме распределения жесткостей по критерию минимума потерь эффективности либо минимума СКИ. Наиболее успешной реализацией решения этих задач является использование метода полного напряжен-

ного анализа [12], в соответствии с которым при решении первой подзадачи вначале задают некоторое распределение площадей стержней S_{0i} и после расчета на все нагружения, включая экстремальный режим эксплуатации и определение усилий, подбирают сечения стержней S_{1i}. Полученная конструкция является полностью напряженной и близка к оптимальной по критерию минимума массы при обеспечении условий прочности и устойчивости. Однако ее деформативность никак не согласуется с требуемым законом деформирования. Поэтому этот результат принимается исходным при решении второй подзадачи – оптимизации конструкций по функциональной эффективности. При ее решении требования удовлетворения конструкции двум условиям (максимальной эффективности и минимальной металлоемкости) сводятся к одному:

$$\Phi = V_{кон}/\eta_{A_э} \cong V_{кон}\left[1+\left(2\pi\sigma_{э\Sigma}\lambda^{-1}\right)^2\right] = \min\,, \qquad (1.132)$$

где $V_{кон}$ – объем металла конструкции.

Сформулированная задача нелинейного программирования решается с помощью метода локальных вариаций, при котором учитываются только приращения сечений стержней ΔS_{2i}, приводящие к уменьшению функции (1.132).

Возможности формостабилизации обусловлены наличием двух принципиальных моделей формообразования стабилизированных систем с заданным законом деформирования. Первую модель отличает гомологическое сохранение под нагрузкой (в связанной системе координат) геометрической формы без ограничения деформационных перемещений П-узлов по величине, но при выдерживании определенных их соотношений. Она получила название гибкой модели. Для второй модели характерно обеспечение такого закона деформирования, при котором (в связанной системе координат) практически исключаются какие-либо деформационные перемещения П-узлов. Эта модель называется жесткой моделью формостабилизации.

Рассматривая формообразование каркаса рефлектора, следует отметить, что ПОК в том или ином виде практически всегда применялась для закрепления рефлектора на ОПУ. Для ЗА первого поколения, работающих в диапазоне волн до 5–6 см, этого было достаточно. Однако с расширением рабочего диапазона до 1 см, требующего повышения степени сохранения формы соответственно в 5–6 раз, и развитием идей конструкций с заданным законом деформирования было выявлено место ПОК в общей системе формостабилизации и сформулированы требования к ее работе, что нашло отражение при создании ЗА второго поколения. В принципе, преобразование непосредственно каркаса рефлектора, являющегося звеном со связями типа СФ, в звено со связями типа СП за счет подобного сохранения формы возможно, но практически затруднено тем, что локальные возмущения под действием реактивных сил (в местах закрепления рефлектора на ОПУ, в узлах крепления к рефлектору конструкций вторичной системы) не позволяют обеспечить оптимальные граничные условия. Расчленение каркаса рефлектора на две ФГК (ФОК и ПОК) дает возможность разрешить это противоречие. ФОК предписывается в этом случае обеспечение заданного закона деформирования, реализующее гибкую модель, но уже в оптимальных граничных условиях, которые обеспечивает ПОК. ФОК контактирует только с ПОК, выполняющей роль промежуточного звена между ФОК, конструкциями вторичной системы и ОПУ, которое замыкает на себя весь эффект локальных воздействий. Причем соединение ФОК и ПОК между собой должно обеспечиваться таким образом, чтобы любое деформирование ПОК приводило лишь к изменению положения ФОК, но без искажения ее формы.

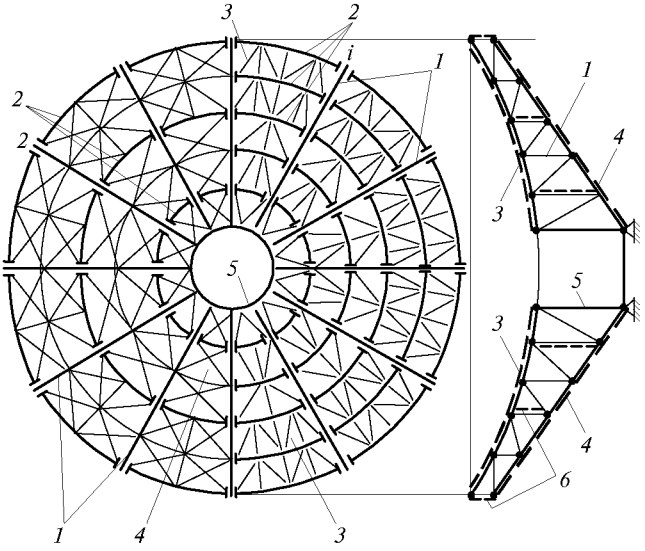


Рис.1.68. Типичное построение несущего каркаса вращаемых зеркал

1 – радиальные фермы; *2* – кольцевые пояса; *3* – связи по верхним поясам; *4* – связи по нижним поясам; *5* – центральный барабан; *6* – диафрагмы

Рефлекторам с наиболее распространенным круговым раскрывом ближе всего полярно-кольцевое ориентирование несущих элементов каркаса. В связи с этим и ФОК, и ПОК выполняются в виде полярно-симметричных циклических стержневых систем. Причем, как правило, решаются они как единые пространственные конструкции, состоящие из радиальных ферм, кольцевых ферм или кольцевых поясов, а также объединяющих их систем связей по поясам радиальных ферм, кольцевых связей и диафрагм (рис.1.68).

Влияние симметричных искажений на эффективность идентично изменению фокусного расстояния, а влияние кососимметричных – повороту радиолуча. Поразному происходит и изменение обеих компонент при угломестном вращении рефлектора, что наглядно видно из формул (1.165) и (1.166). Поэтому рекомендуется рассматривать ФОК как совокупность двух групп: а) стержней радиальных ферм (РФ), обеспечивающих при действии кососимметричных сил линейный в радиальном направлении и косинусоидальный в кольцевом направлении закон перемещений П-узлов; б) кольцевых элементов (КЭ), обеспечивающих при действии симметричных сил квадратичный вдоль радиуса закон перемещений П-узлов.

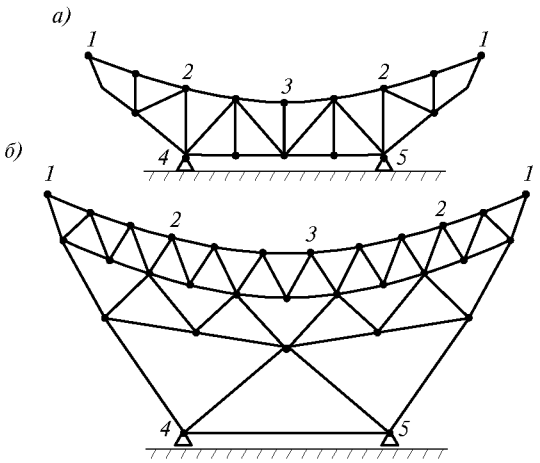


Рис.1.69. Топологическая схема каркаса:

а – с неадекватными связями между П-узлами (*1*, *2*, *3*)и опорами (*4*, *5*); *б* – адаптированного к задаче управления податливостью П-узлов

При формообразовании ФОК по гибкой модели гомологическое изменение формы зеркала достигается исключительно за счет оптимизированного выбора топологии и распределения жесткостей по критерию функциональной эффективности. Однако традиционные топологии, используемые в строительных конструкциях, не обладают свойством управления (на стадии проектирования) локальной податливостью П-узлов. Из рис.1.69*а* видно, что П-узлы *1*–*3* имеют существенно различную податливость вследствие неадекватности их связей с опорными узлами *4* и *5*. Преодолеть это техническое противоречие воз-

можно за счет повышения локальной податливости П-узлов *2* и *3* в результате применения многопоясных топологий (рис.1.69*б*). Это только путь решения, в каждом отдельном случае в зависимости от диаметра рефлектора D_p, экономичного размера отражательного щита зеркала и т.п. требуется индивидуальный поиск рациональной топологии. Примеры возможных многоярусных топологий показаны на рис.1.70. Причем количество ярусов $m_{яр}$ в зависимости от относительного размера отражательного щита $\overline{L}_{щ} = L_{щ} \cdot D_p^{-1}$, относительной высоты ФОК $\overline{H} = H \cdot D_p^{-1}$ (H – высота в центральной части) может быть определено по формуле

$$m_{яр} = \overline{H}\left(\overline{L}_{щ}\right)^{-1}. \qquad (1.133)$$

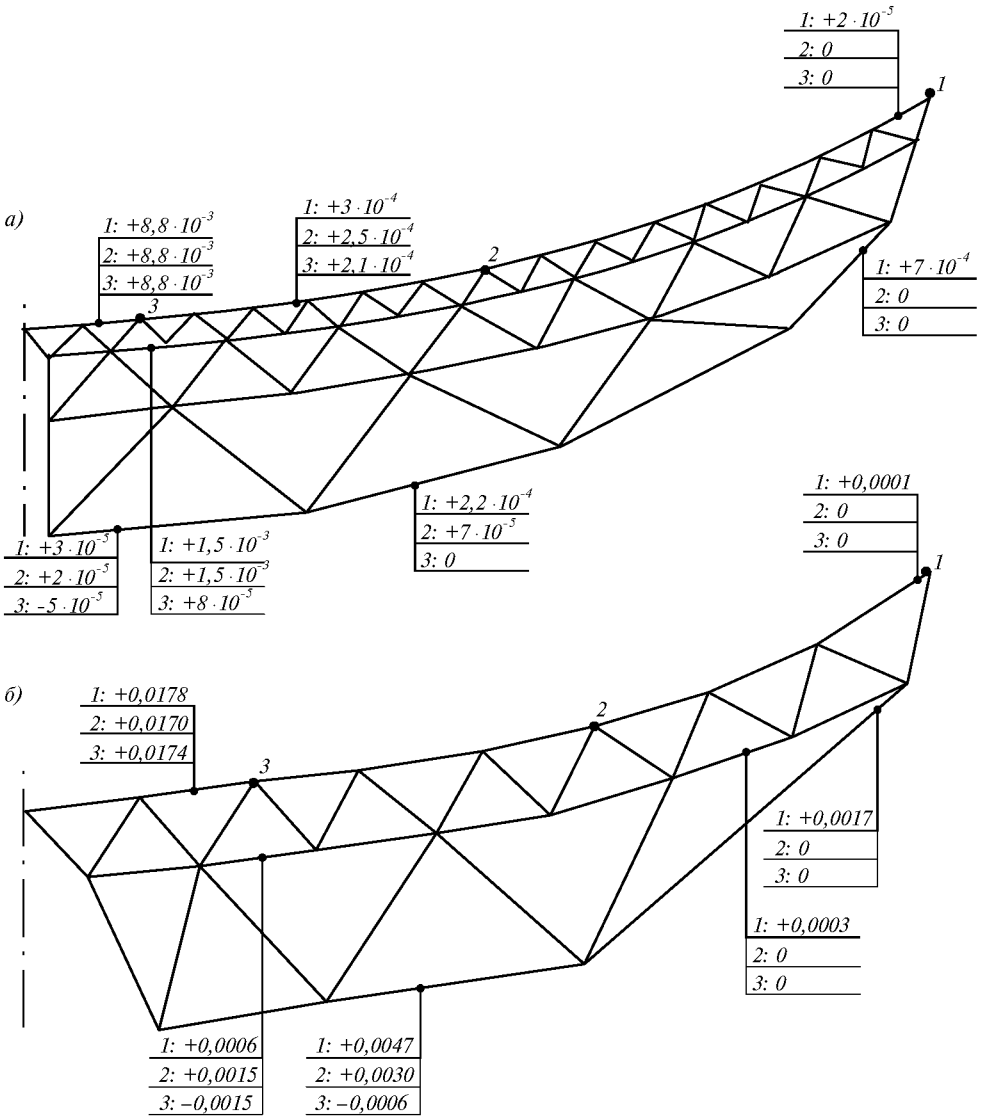


Рис.1.70. Варианты топологии многоярусных радиальных четырехпоясной (*а*) и трехпоясной (*б*) ферм каркаса рефлектора с указанием значений V_{ji}, характеризующих влияние изменения площади сечении ряда стержней фермы на перемещения П-узлов *1*, *2* и *3*

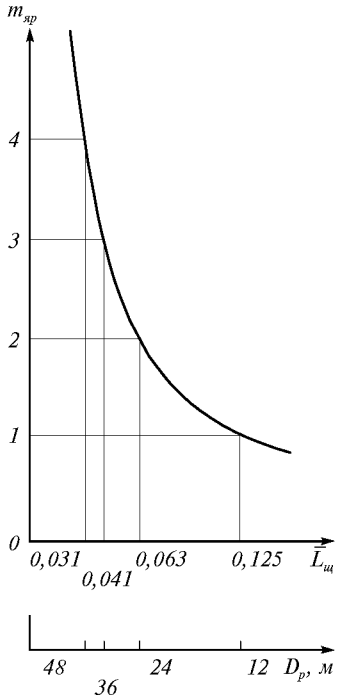


Рис.1.71. Зависимость максимально возможного количества ярусов от относительной длины щита

На рис.1.71 показан график $m_{яр}$ при $\overline{H} = 0{,}125$, из которого следует, что при размере щита $L_{щ} = 1{,}5$ м возможность создания многоярусной РФ появляется только при $D_p \geq 20$ м.

При выборе конкретной топологии рекомендуется вариационный метод, базирующийся на теореме Мажида [7] о том, что изменение величины перемещения любого j-го узла конструкции при изменении площади поперечного сечения i-го элемента равно произведению коэффициента изменения i-го элемента $\rho_{\alpha i}$ и отклонения $\overline{\Delta}_{ji}$ узла j под действием пары единичных сил, приложенных к концам i-го элемента и соосных ему

$$\partial\Delta_{ji} = \rho_{\alpha i}\overline{\Delta}_{ji}, \quad \rho_{\alpha i} = -\alpha N_i\left(1 + \alpha_i \overline{N}_{ji}\right)^{-1}, \quad (1.134)$$

где α_i – отношение приращения площади ΔS_i к его исходной площади S_i; N_i – усилие в i-ом элементе от внешней нагрузки; $\overline{N}_{ji}$ – усилие в i-ом элементе под действием пары единичных сил, приложенных по его концам.

До $D_p = 20$–25 м ФОК, как правило, выполняется из габаритных пространственных секториальных блоков (рис.1.72) заводского изготовления. В этом случае боковые грани каждого блока являются полуфермами (РФ) и их элементы выполняются, например, из швеллеров или уголков, обращенных стенкой к плоскости стыка (рис.1.73). Чтобы обеспечить замыкание ФОК при сборке все сектора в кольцевом направлении делаются с минусовым допуском, а для компенсации все же возможного накопления положительной ошибки один-два сектора выполняются компенсирующими. Для этого закрепление кольцевых и связевых элементов реализуется так, например, как показано на рис.1.74.

При увеличении диаметра $D_p \geq 25$ м помимо пространственных блоков появляются и плоские фермы и элементы, идущие россыпью.

Закрепление ФОК на ПОК может производиться как по одному кругу опирания (диаметр круга выбирается при оптимизационном расчете, обычно близок – значению $0{,}4D_p$), так и по двум или более.

ПОК объединяет также несколько ФГК. Обычно (рис.1.75) их две: так называемый ПОК-К (ПОК-конус) и ПОК-П (ПОК-пирамида). Первая (*2*) обеспечивает равноподатливость опирания ФОК и, чаще всего, выполняется как конструкция с характерной топологией – стержневой конус. Вторая ФГК (*3*), выполняющая роль опорной для первой, построена в виде стержневой пирамиды, которая одновременно является своеобразным угломестным валом и, с функциональной точки зрения, относится к ОПУ (*4*). Связь между ПОК-К и ПОК-П осуществляется только в двух «точках»: в вершине и центре основания ПОК-К, что сводит до минимума влияние деформаций ПОК-П на работу ПОК-К и соответственно на закон деформирования П-узлов ФОК.

Могут быть и другие варианты исполнения обеих групп, например (рис.1.76), первая ФГК (*2*) является силовой без каких-либо деформационных ограничений, а вторая ФГК (*3*) образована совокупностью специальных пружинных компенсаторов (*3*), встроенных в каждый узел контакта с ФОК и позволяющих изменять до требуемого значения упругую податливость ПОК в зоне ее контакта с ФОК.

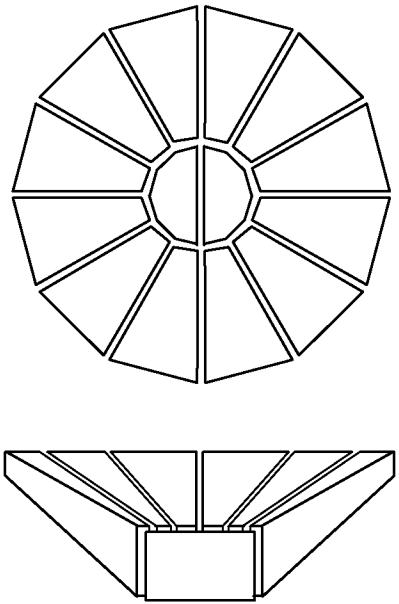


Рис.1.72. Схема сборки каркасов зеркал до D_p=25 м из пространственных габаритных блоков

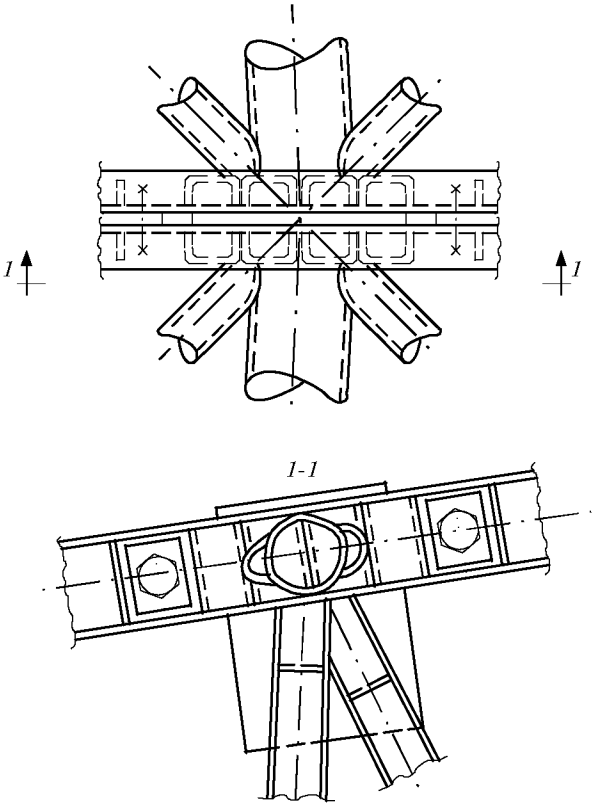


Рис.1.73. Узел соединения граней пространственных секторов каркаса зеркала

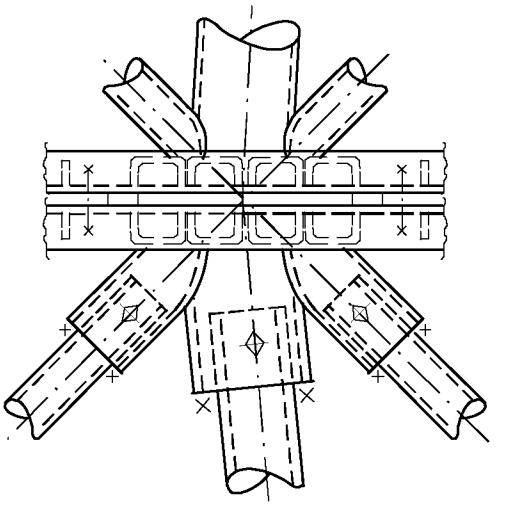


Рис.1.74. Узел примыкания кольцевых и связевых элементов к радиальному поясу (грани) в компенсирующем секторе каркаса зеркала

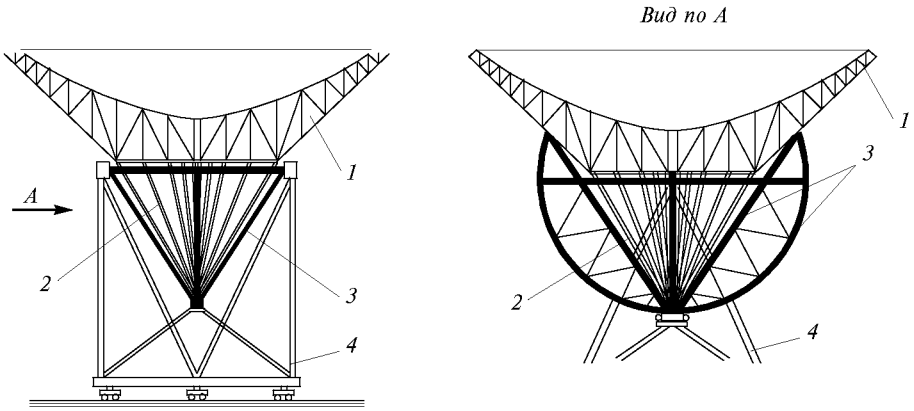


Рис.1.75. Вторая модель формообразования ПОК, где требуемая податливость опорных точек ФОК обеспечивается выполнением ПОК в виде конструкции с характерной топологией (ПОК-конус и ПОК-пирамида):
1 – ФОК; *2* – ПОК-конус; *3* – ПОК-пирамида; *4* – ОПУ

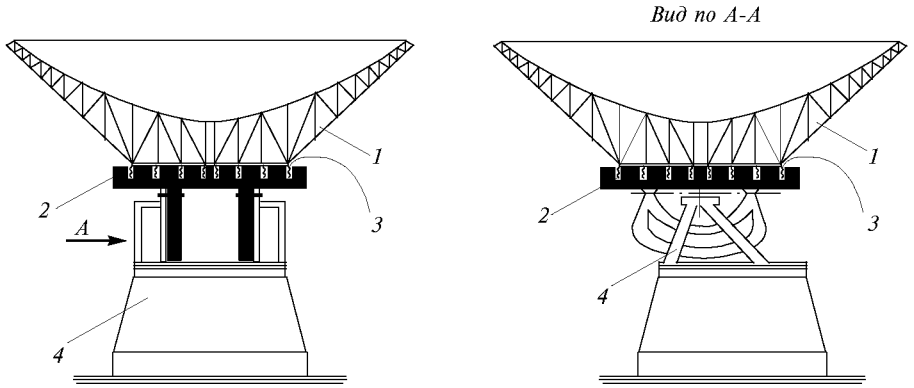


Рис.1.76. Первая модель формообразования ПОК, где требуемая податливость опорных точек ФОК обеспечивается введением в каждый опорный узел специального жесткостного компенсатора:
1 – ФОК; *2* – ПОК; *3* – компенсатор; *4* – ОПУ

Исследования свойства модели формообразования ПОК с разделением на ПОК-К и ПОК-П показали ее высокую перспективность при соответствующем совершенствовании. Первым таким усовершенствованием является размещение стержневого конуса *2* не вне ФОК с тыльной ее стороны, как на рис.1.75, а внутри ФОК (рис.1.77) вершиной к отражающей поверхности рефлектора с соответствующим преобразованием пирамиды *3* в усеченную, размещаемую также в пределах объема ФОК. Это позволяет, сохранив достоинства модели в части формостабилизации, расположить угломестную ось вращения в центре тяжести зеркальной системы и тем самым существенно снизить массу ЗА и нагрузки на механизмы.

Второе усовершенствование касается собственно ПОК-К. В строгой постановке при размещении ПОК-К внутри ФОК в ее центральной части должно быть организовано свободное пространство, естественно, за счет исключения центральной части ФОК, что резко ухудшит условия ее формостабилизации. Преодолеть это техническое противоречие позволяют два альтернативных усовершенствования ПОК-К. На рис.1.78 показаны варианты усовершенствования первого типа, заключающегося в преобразовании одного конуса в систему конусов.

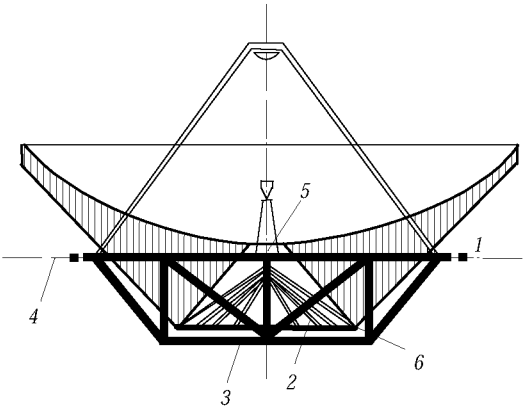


Рис.1.77. Третья модель формообразования ПОК, где вторая модель усовершенствована расположением угломестной оси вращения в центре тяжести рефлектора: *1* – ФОК; *2* – ПОК-конус; *3* – ПОК-пирамида; *4* – угломестная ось; *5* – центр тяжести зеркальной системы; *6* – узлы закрепления ФОК на конусе

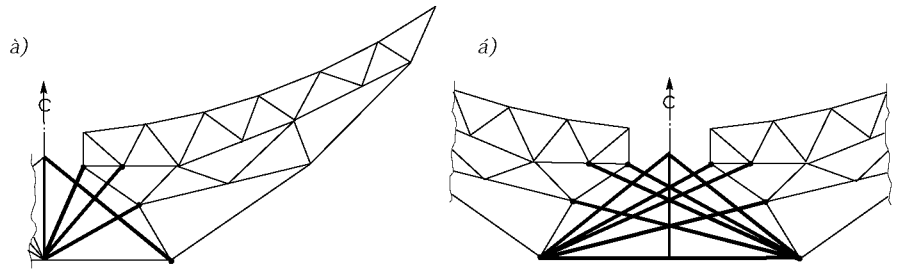


Рис.1.78. Модификация третьей модели, формообразования ПОК в части ПОК-конуса: *а* – при разноподатливости центральной и периферийных опорных точек ПОК-конуса; *б* – при разноподатливости всех опорных точек

Усовершенствование второго типа (рис.1.79) состоит в выполнении стержней конуса двойными, охватывающими каждую радиальную ферму ФОК при сохранении контакта только в узлах по периметру основания конуса (рис.1.79*а*). Поскольку конус работает хорошо только при определенном соотношении высоты к диаметру основания, предложено достроить каждую пару образующих стержней конуса до пары ферм (рис.1.79*б*). На рис.1.79*в* показан вариант этой модели, но с двумя кругами опирания.

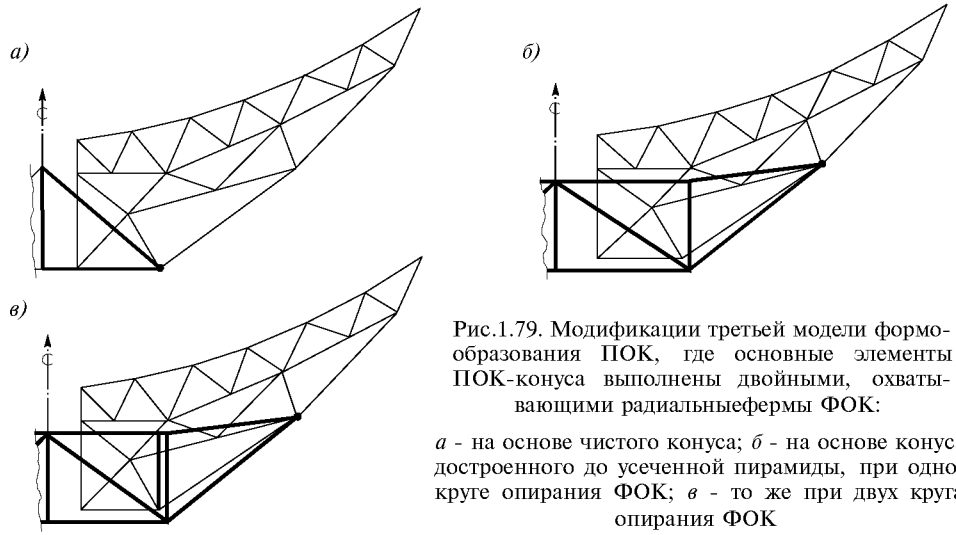


Рис.1.79. Модификации третьей модели формообразования ПОК, где основные элементы ПОК-конуса выполнены двойными, охватывающими радиальныефермы ФОК:

а - на основе чистого конуса; *б* - на основе конуса, достроенного до усеченной пирамиды, при одном круге опирания ФОК; *в* - то же при двух кругах опирания ФОК

Для оценки уровня формостабилизации рефлектора используются два безразмерных параметра: во-первых, описанное выше ОСКИ ξ, характеризующее потенциальные возможности конструктивного решения, и, во-вторых, коэффициент формостабилизации

$$K_{фст} = (\min \Delta^{св}) \cdot \sigma^{-1}, \qquad (1.135)$$

в наилучшей мере отражающий достигнутый уровень безотносительно к принятой модели, так как весовой деформационный предел можно рассматривать как некоторую константу, соответствующую конструкции, у которой заданы тип, габариты и материал.

Задача проектирования адекватных формостабилизированному рефлектору несущих конструкций вторичной системы состоит в конструктивном обеспечении принципа фокусно-угловой компенсации, согласно которому контррефлектор (в отдельных случаях и облучатель) выводится относительно рефлектора в положение, строго соответствующее как гомологическому изменению отражающей поверхности его зеркала, так и фактическому положению этой поверхности-гомолога в системе координат рефлектора. Достигается это исполнением узла подвески контррефлектора в виде устройства, оснащенного сервоприводами и обеспечивающего выведение контррефлектора в заданное положение с учетом фактических деформаций опоры и перемещений узлов ее закрепления на каркасе рефлектора. Опора контррефлектора, как правило, представляет собой жесткую четырехногую раму, центральный узел которой располагается вблизи фокуса зеркала рефлектора и к которому с помощью указанного выше узла подвешивается контррефлектор (рис.1.80). Сечения и положение ног опоры оптимизируется по минимуму рассеяния ими части мощности радиолуча [12, §2.5]. Закрепляется опора на ПОК-П. На рис.1.81 показаны примеры решения узла подвески.

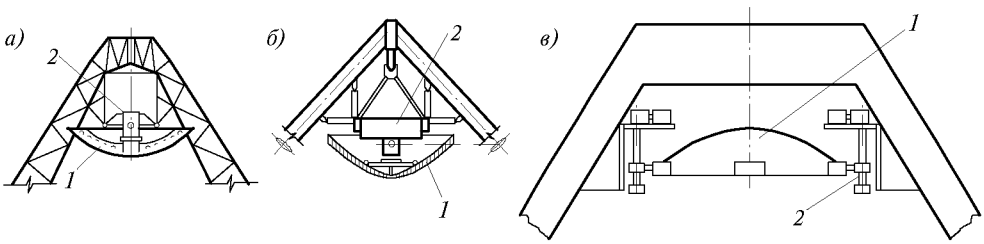


Рис.1.80. Варианты реализации компенсационной подвески контррефлектора:
а – 34-метровый радиотелескоп в Вертхофене; *б* – радиотелескоп Раистинг-1; *в* – радиотелескоп РТ-64; *1* – контррефлектор; *2* – компенсационная подвеска контррефлектора

В том случае, когда необходимо отрабатывать не только весовые деформации, но и ветровые, и температурные, используется система эксплуатационного контроля деформаций (СЭКД), принцип построения которой применительно к зеркальной системе показан на рис.1.82.

Помимо создания формостабилизированного каркаса рефлектора, сохраняющего под нагрузкой начальную форму с высокой точностью, при проектировании и строительстве зеркальных систем приходится решать и такую проблему, как изготовление отражательных щитов зеркала рефлектора с точностью поверхности (СКИ) от 0,25 до 0,02 мм, и проблему установки отражательных щитов на П-узлах ФОК для образования зеркала рефлектора с точностью (СКИ) от 0,2 до 0,02 мм. При этом собственные искажения формы щита под совокупным действием весовых, ветровых и температурных нагрузок также не должны превышать (СКИ) 0,1–0,01 мм.

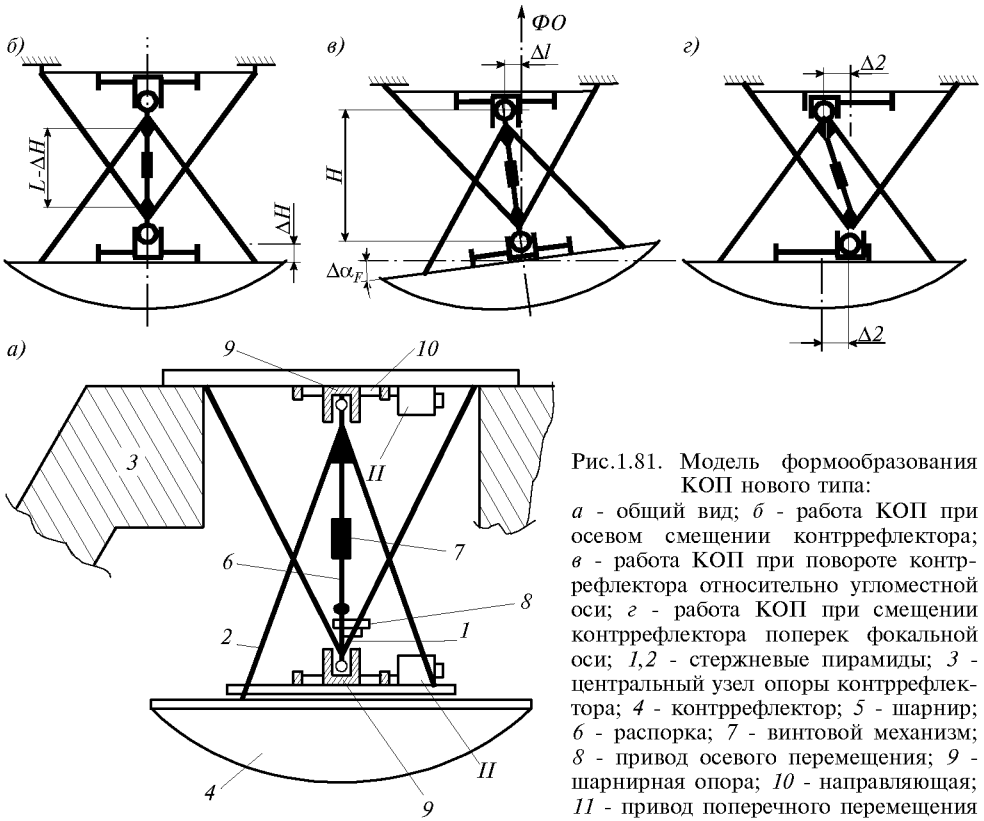


Рис.1.81. Модель формообразования КОП нового типа:
а - общий вид; *б* - работа КОП при осевом смещении контррефлектора; *в* - работа КОП при повороте контррефлектора относительно угломестной оси; *г* - работа КОП при смещении контррефлектора поперек фокальной оси; *1,2* - стержневые пирамиды; *3* - центральный узел опоры контррефлектора; *4* - контррефлектор; *5* - шарнир; *6* - распорка; *7* - винтовой механизм; *8* - привод осевого перемещения; *9* - шарнирная опора; *10* - направляющая; *11* - привод поперечного перемещения

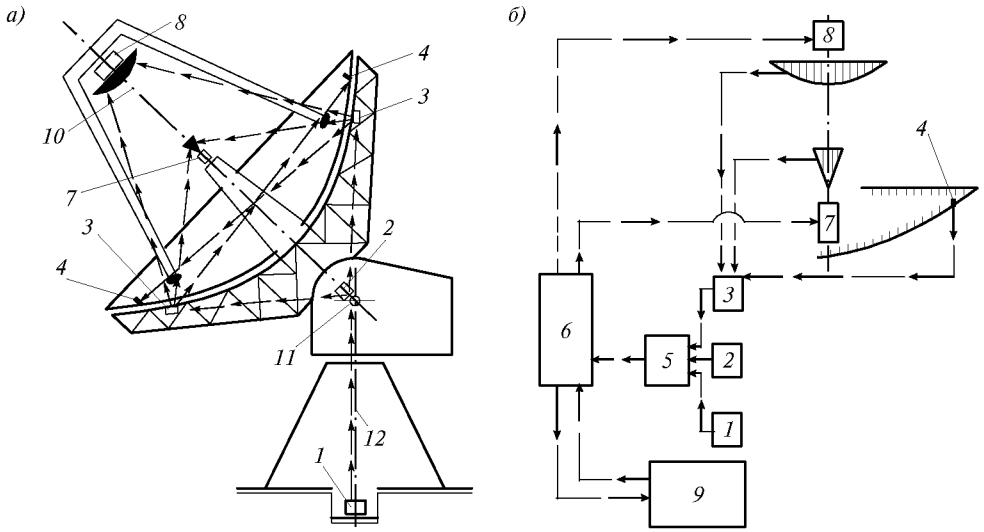


Рис.1.82. Модель комбинированной системы фокусной и угловой компенсации:
а – расположение датчиков перемещений; *б* – блок-схема системы; *1* – датчик перемещений азимутальной оси; *2* – датчик перемещений угломестной оси; *3* – датчик перемещений; *4* – репер на зеркале; *5* – блок контроля деформаций; *6* – устройства поправок и управления положением контррефлектора и облучателя; *7* – следящий привод облучателя; *8* – следящий привод контррефлектора; *9* – следящий привод угломестного и азимутального вращения; *10* – фокальная (электрическая) ось; *11* – угломестная ось; *12* – азимутальная ось

Сквозную отражающую поверхность применяют, когда $\xi_\Sigma > 10^{-4}$, при работе на длинах волн на порядок больше размера ячеек. Изготавливается она из сеток или перфорированных листов. Для образования сетчатых поверхностей при диапазоне волн $\lambda \geq 20$ см требуется специальный формирующий каркас. Перфорированные листы проще в образовании поверхности, но также требуют формирующего каркаса. Для перфорированных поверхностей $\lambda \geq 10$ см, однако при этом наветренная площадь существенно больше, чем у сетчатых.

Сплошная отражающая поверхность обеспечивает работу на всех длинах волн, вплоть до миллиметрового диапазона. Существуют два направления формообразования отражательных щитов со сплошной отражающей поверхностью: а) напряженно-деформируемое и б) ненапряженное. При первом необходимая форма поверхности, представляющая собой высечку из поверхности двоякой кривизны, достигается соответствующим принудительным деформированием заготовки. Это деформирование может производиться как в пластической стадии работы материала, так и в упругой стадии. Наибольшее распространение получили жесткие щиты, поверхность которых выполнена из штампованного на оправке листа, подкрепленного с тыльной стороны системой ребер (рис.1.83). Точность таких щитов (СКИ): освоенная – 0,50 мм, предельная – 0,15 мм.



Рис.1.83. Жесткий профилированный отражательный щит, применяющийся в американских радиотелескопах и реализующий модель формообразования щита напряженно деформируемым методом с доведением материала конструкции щита до пластики

Более высокая точность изготовления достигается изменением конструктивно-технологической основы формообразования щита переходом на ненапряженные методы формообразования. Первым вариантом такого решения является выполнение жестких щитов литыми, с последующей механической обработкой отражающей поверхности. Предельная точность (СКИ) 0,01 мм. Вторым вариантом такого формообразования является создание щитов многослойно-композитного типа, у которых отражающая поверхность формируется в виде металлического слоя на сплошной матрице с последующим образованием на его тыльной стороне фиксирующего и несущего слоя. Наибольшее распространение получили щиты этого типа с сотовым несущим слоем (рис.1.84). Окончательно собранный и склеенный щит равномерно нагружается и выдерживается под давлением при заданной температуре (около 150°С) до отверждения клея. Последнее время стали применять и другую реализацию этого типа, у которой отражающий металлический слой образуется электроформированием, например, гальванопластическим осаждением. Силовой слой образуется у него из армированного металлическим каркасом жесткого пенополиуретана (рис.1.85). Достигнутая точность (СКИ) – 0,05 мм.

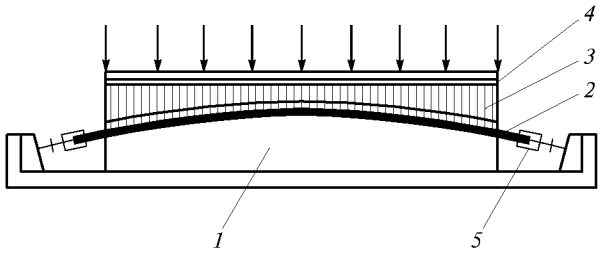


Рис.1.84. Модель формообразования отражательного щита многослойно-композитного типа с фиксацией профиля металлического листа на сплошной матрице и наполнителем сотового типа: *1* – матрица; *2* – металлический отражающий лист; *3* – сотовый наполнитель; *4* – клеевая пленка; *5* – натяжное приспособление

Применяются и другие конструктивно-технологические системы решения отражательных щитов.

Регулировка положения щита относительно ФОК (каркаса) обеспечивается специальными опорными устройствами, расположенными, как правило, по углам щита. Они имеют весьма разнообразное исполнение. На рис.1.86 показан пример широко используемого подобного устройства.

Формирование зеркала рефлектора путем установки отражательных щитов в заданное положение является важнейшим этапом юстировки зеркальной системы. Используются обычно различные системы юстировки, отличающиеся в основном тем, что принято в качестве носителя заданной геометрии, и делятся на механические, оптико-геодезические, оптические и радиотехнические. Юстировка включает как активные операции (установочные и регулировочные), так и пассивные (контроль геометрии). В механических системах операции объединены. На рабочем элементе – шаблоне закреплены кондуктора для установки опорных устройств щитов и индикаторы для контроля геометрии. В оптико-геодезических системах и других им подобным эти операции разделены. Опорные устройства щитов устанавливаются обычно с помощью переносных шаблонов, геометрическое положение которых, также как затем и отражательных щитов, контролируется оптическими устройствами.

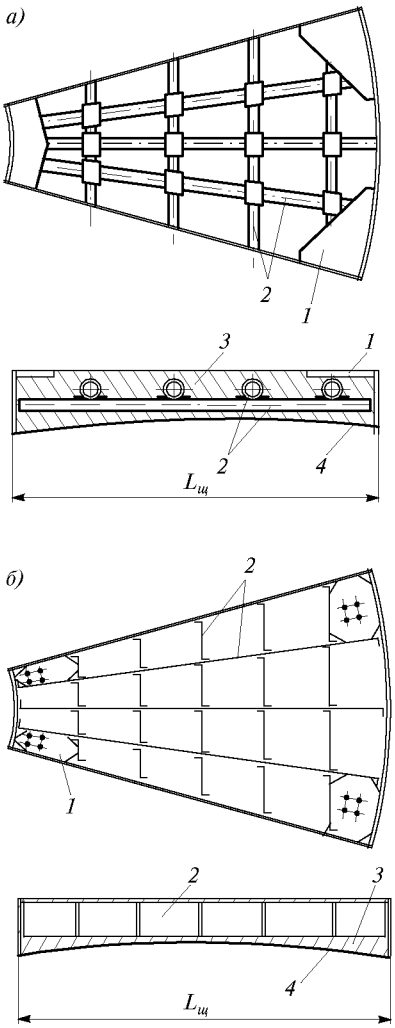


Рис.1.85. Варианты выполнения и расположения металлической арматуры наполнителя отражательного щита многослойно-композитного типа:
а – опытный образец; *б* – серийный образец; *1* – опорная площадка; *2* – металлическая арматура; *3* – пенополиуретан; *4* – металлический отражающий слой

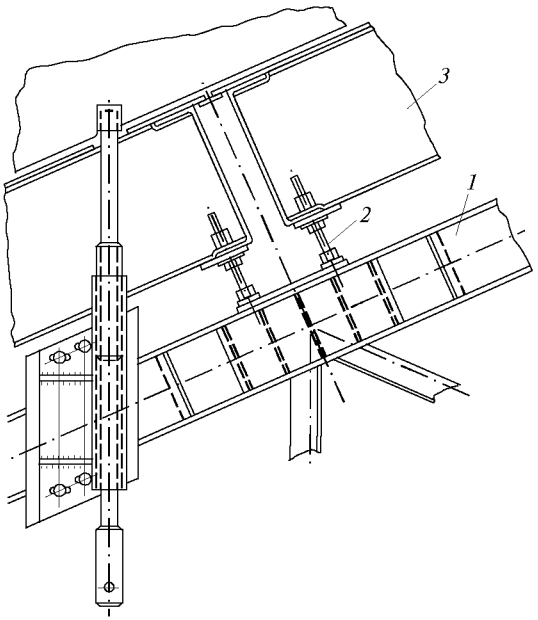


Рис.1.86. Опорное устройство отражательного щита при регулировке снизу (винт домкрата закреплен неподвижно на каркасе рефлектора с линейной и угловой компенсацией в зоне опирания щита за счет зазора в отверстии):
1 – каркас рефлектора; *2* – винт; *3* – отражательный щит

1.6.6. Конструкции опорно-поворотных устройств, обеспечивающие угловую стабилизацию радиолуча под нагрузкой. К исходным (неуправляемым) параметрам ОПУ при проектировании относятся: а) предельно допустимая угловая ошибка $\Delta\theta_{пр}$, функционально связанная с λ и D_p и определяемая по формуле (1.126); б) условия подвижности ФО, описывающие диапазоны углов, скорости и ускорения вращения; в) монтировка – принятая система осей вращения; г) схема облучения, т.е. условия размещения облучающего тракта.

Начинается проектирование ОПУ с установления соответственно $\Delta\theta_{пр}$ адекватной системы его конструктивного решения (рис.1.65) по критериям (1.127), (1.128) или (1.129). В случае попадания ОПУ в область (1.129), когда оно должно компоноваться по принципу стабилизации под нагрузкой углового положения радиолуча, метод формообразования ОПУ, так же как и в случае зеркальной системы, состоит в преобразовании с помощью повышения порядка многозвенности тех межгрупповых связей, присущих ОПУ, которые обуславливают угловые смещения радиолуча с целью минимизации их угловой ошибки.

Гибкая модель стабилизации ОПУ по аналогии с формостабилизированной зеркальной системой базируется на более широком понимании понятия «стабилизация», чем просто удержание радиолуча в заданных углах. В этом случае под угловой стабилизацией ОПУ, что в конструктивном аспекте означает угловую стабилизацию фокальной оси (ФО), понимается обеспечение заданного уровня эффективности за счет компенсации большей части угловых перемещении ФО работой приводов зеркальной антенны, в первую очередь приводов ОПУ.

Разделение угловых перемещений ФО на их компенсируемую и некомпенсируемую компоненты зависит от быстродействия системы контроля-отработки следящих приводов. С достаточной степенью точности весовые, инерционные и температурные перемещения могут рассматриваться как квазистатические, то есть как полностью компенсируемые. Это означает, что основным источником ошибок будут являться угловые перемещения ФО, вызванные ветровыми деформациями конструкций. При этом большая часть ветровых перемещений (более 80 %), скорость проявления которых меньше быстродействия системы контроля-отработки, может быть также скомпенсирована работой следящих приводов. Практически, нескомпенсированной оказывается лишь «динамическая» компонента ветровых перемещений $\left(\Delta\theta_F^B\right)^Д$, которая у стабилизированного ОПУ и выступает в роли учитываемой угловой ошибки.

Предельное состояние конструкций ОПУ описывается, при этом, условием

$$\left(\Delta\theta_F^B\right)^Д \le \left[\left(\Delta\theta_{пр}\right)^2 - \left(\Delta\theta_F^{лфт}\right)^2\right]^{1/2}, \qquad (1.136)$$

где $\Delta\theta_F^{лфт}$ – компонента угловой ошибки, обусловленная наличием люфтов в механизмах и опорах ОПУ.

Необходимость в применении при построении ОПУ жесткой модели стабилизации возникает тогда, когда описанная выше гибкая модель не обеспечивает выполнения условия (1.136). Практически это имеет место в двух случаях: во-первых, при расширении диапазона рабочих радиоволн в область миллиметровых волн и, во-вторых, когда экономически невыгодно создание следящего комплекса для компенсации квазистатических угловых перемещений ФО работой приводов. Сущность жесткой модели заключается в выполнении несущей конструкции ОПУ как сооружения с заданными свойствами, в первую очередь с заданным законом деформирования. Согласно второму методу формостабилизации

(п.1.6.4) под таким формообразованием понимается придание угломестной и азимутальной частям несущей конструкции ОПУ свойств преобразования деформаций ОПУ таким образом, чтобы при этом происходили лишь линейные смещения фокальной оси.

В соответствии с этим рациональное проектирование стабилизированного ОПУ включает решение следующих трех задач:

– проектирование стабилизированной (по углу) несущей конструкции ОПУ;

– проектирование системы приводов вращения и корректирующих устройств, обеспечивающих компенсацию квазистатической компоненты угловых смещений ФО и обладающих собственными минимальными угловыми ошибками;

– проектирование люфтовыбирания в опорах и механизмах.

На первом этапе проектирования ОПУ устанавливаются составляющие предельной угловой ошибки, обусловленные: люфтами в механизмах и опорах $\left(\Delta\theta_F^{афт.ОПУ}\right)_{пр}$, деформациями механизмов приводов $\left(\Delta\theta_F^{прв.ОПУ}\right)_{пр}$, деформациями несущей конструкции $\left(\Delta\theta_F^{кон.ОПУ}\right)_{пр}$. На основании $\left(\Delta\theta_F^{кон.ОПУ}\right)_{пр}$ формируется структурная схема ОПУ и устанавливается оптимальное количество и вид ФГК, в совокупности образующих ОПУ, со связями требуемого типа, сводящими число приносимых ими компонент угловых перемещений ФО и их величины до минимума.

Далее, на втором этапе, на базе сформированной структурной схемы ОПУ устанавливаются, во-первых, топология и геометрия тех ФГК, которые представлены металлоконструкциями, и, во-вторых, принципиальные кинематические схемы ФГК, выполняемые в виде механизмов.

Для программной компенсации квазистатической компоненты угловых перемещений ФО требуется введение дополнительных ФГК. Первой из них является система контроля деформаций, включающая две функциональные подсистемы: контроля угловых перемещений ФО, вызванных деформациями зеркальной системы, конструкции ПОК-П, выполняющей роль угломестного вала, и угломестного привода, а также контроля положения угломестной и азимутальной осей относительно некоторой стабилизированной базы, размещаемой, как правило, вне вращаемых конструкций и выполняющей роль неподвижной системы координат. Целесообразно эту систему контроля объединить с системой контроля деформаций зеркальной системы в единую систему эксплуатационного контроля деформации (СЭКД), о которой упоминалось в предыдущем параграфе и пример построения которой показан на рис.1.82.

Вторая дополнительная ФГК выполняется в виде «устройства» поправок, формирующего сигнал о компенсационных поворотах зеркальной системы для учета в программе наведения (системе управления ОПУ) на основе информации об угловых перемещениях ФО и о пространственном положении ФО поверхности-гомолога, поставляемой СЭКД, включая данные системы фокусно-угловой компенсации деформаций зеркальной системы.

Исключение люфтов в механизмах, также приводящее к возникновению угловых ошибок ФОК, достигается введением таких специальных ФГК, как люфтовыбирающие устройства в приводах вращения ОПУ и его опорах.

Эффективность стабилизации ОПУ во многом зависит от принятой модели его построения (компоновки). Например, ОПУ так называемого «монолитного» типа, отличающиеся большой массой, функциональной и физической неразделенностью несущих конструкций и механизмов, отсутствием возможности управления дефор-

мациями конструкций, мало пригодны для решения подобной задачи. Принципы формообразования ОПУ, адаптированных к угловой стабилизации, формулируются следующим образом:

– замена тяжелых «монолитных» несущих элементов ОПУ традиционного типа на легкие дискретные стержневые конструкции, позволяющая как минимум снизить массу ОПУ;

– четкое функциональное разделение ОПУ на несущие элементы, близкие по своему решению к традиционным строительным конструкциям, и на собственно механизмы и опоры вращения, что дает возможность существенно упростить изготовление ОПУ и размещение заказов на заводах-изготовителях, так как основная (по массе) часть конструкции может быть изготовлена на заводах типа заводов обычных строительных металлоконструкций, и тем самым снизить стоимость строительства;

– возможность теоретического (на стадии проектирования) управления напряженно-деформированным состоянием несущих конструкций, без которого немыслимо создание ОПУ с угловой стабилизацией;

– хорошая сходимость расчетных моделей поведения дискретных конструкций под нагрузкой с их действительной работой в натуре, гарантирующая надежность работы реализуемых идей формообразования.

На этой основе устанавливаются определяющие особенности модели построения ОПУ с экономичными несущими конструкциями, адаптированными к угловой стабилизации.

Первой из них является отказ от традиционно исполненного горизонтального вала угломестного вращения, вместо которого используется такая функциональная группа, как промежуточная конструкция (ПОК), или, точнее, ее часть – ПОК-П (ПОК-пирамида). Применение переходных элементов от каркаса рефлектора к узлам ОПУ известно. Введение же ПОК как приоритетного начала построения ОПУ с приданием ПОК определенных деформационных свойств и типов функциональных связей присуще только упомянутой новой модели формообразования ОПУ.

Имеется ряд решений ПОК, обладающих возможностями оптимизации условий опирания каркаса рефлектора и включающих две ФГК: ПОК-К и ПОК-П. Поэтому особенности работы ПОК-П рассмотрим на примере одной из возможных вариаций, приведенной на рис.1.77, которая обеспечивает возможность размещения угломестной оси вращения в центре тяжести зеркальной системы, чем достигается снижение массы, вращаемой по углу места за счет исключения весовых балансиров, а также снижение ветровых моментов в результате большей компактности расположения конструкций относительно угломестной оси вращения.

У этой модели ПОК-К *3*, выполняющий роль опорной части рефлектора, крепится к ПОК-П *4*, выполняющей роль угломестного вала, условно в двух точках (рис.1.87): в вершине *5* и в центре *6* осевого основания. Главное основание ПОК-П *7* размещено в центре тяжести зеркальной системы (с учетом массы ПОК) вблизи от вершины *5* ПОК-К и соединенной с ним в центре *8*. Второе основание ПОК-П *10* размещено вне каркаса рефлектора *2* непосредственно за его тыльной поверхностью. Таким образом, все нагрузки от зеркальной системы (а они являются определяющими) передаются на ПОК-П только в двух точках *5* и *6*. При этом любые деформации ПОК-П приводят лишь к перемещениям зеркальной системы в пространстве как жесткого тела без искажений ее формы. Естественно, что топология и геометрия ПОК-П могут при конкретизации данной модели формообразования иметь и определенные различия, но при выполнении общей идеи. Например,

на рис.1.88 представлен вариант построения ПОК-П с двумя колесами, а на рис.1.89 – вариант ПОК-П в случае выполнения ПОК-К в виде осесимметричной структуры, образованной достройкой образующих стержней конуса до радиальных ферм (рис.1.79), объединенных кольцевыми элементами.

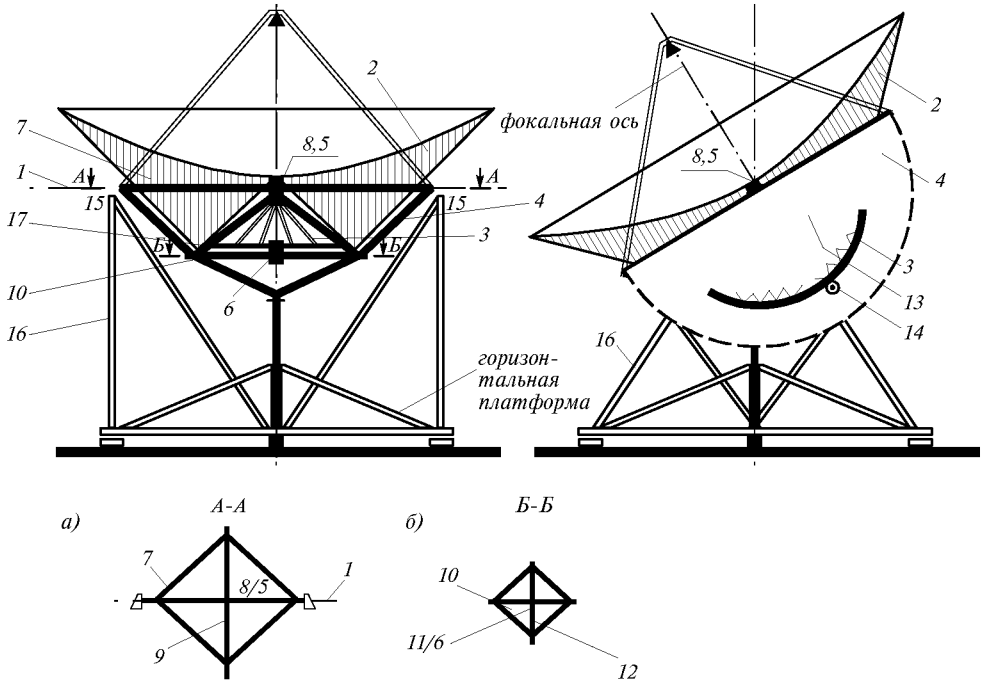


Рис.1.87. Модель формообразования ОПУ с двухзвенным построением ПОК при расположении угломестной оси в центре тяжести зеркальной системы:
1 – угломестная ось; *2* – каркас рефлектора; 3 – ПОК-конус; *4* – ПОК-пирамида; *5* – вершина ПОК-конуса; *6* – центр основания ПОК-конуса; *7* – рама (верхнее основание) ПОК-пирамиды; *8* – центр пересечения диагональных элементов; *9* – диагональный элемент; *10* – рама (нижнее основание) ПОК-пирамиды; *11* – центр пересечения диагональных элементов; *12* – диагональный элемент; *13* – ведомое колесо; *14* – угломестный привод; *15* – угломестная опора; *16* – башня; *17* – узел крепления ФОК к ПОК-конусу

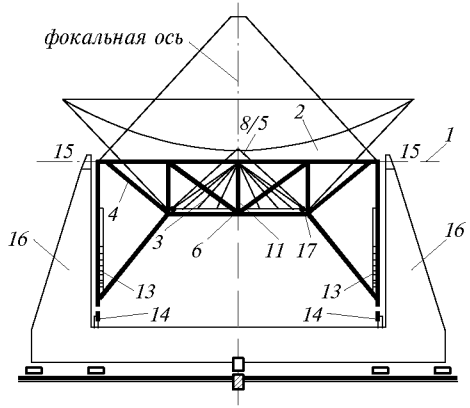


Рис.1.88. Модель формообразования ОПУ с двумя ведомыми колесами при расположении угломестной оси в центре тяжести зеркальной системы (обозначение деталей по рис.1.87)

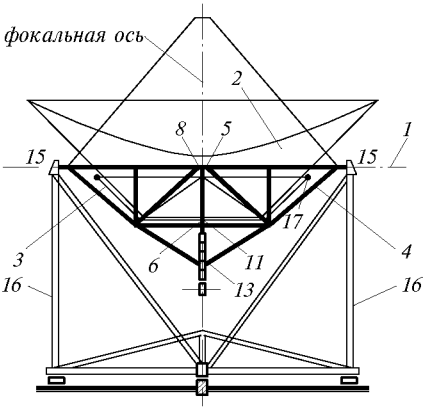


Рис.1.89. Вариант модели по рис.1.87 при преобразовании ПОК-конуса в стержневую пирамиду (обозначение деталей по рис.1.87)

Второй определяющей особенностью рекомендуемой модели ОПУ является выполнение несущих конструкций опорной системы азимутального вращения в виде пространственных ферм (боковые башни, горизонтальная платформа), что позволяет, во-первых, получить максимальную жесткость при минимизации массы, т.е. использовать известные преимущества дискретных систем, и, во-вторых, снизить ветровую нагрузку на ОПУ. На рис.1.90 представлена рекомендуемая базовая модель несущих конструкций опорной системы азимутального вращения. Вершины *А* и *Б* обеих башен *3* связаны между собой ПОК-П, которая закреплена в этих вершинах с помощью радиальноупорных подшипников в сферических опорах, жестко зажатых в осевом направлении как на валу, так и на корпусе. Следует подчеркнуть, что запирание угломестного вала, роль которого выполняет ПОК-П, с обоих его концов, позволяющее существенно увеличить жесткость ОПУ и распределять нагрузку равномерно между всеми элементами, является характерной особенностью данной модели, обусловленной ее приспособленностью к прохождению температурных расширений без появления больших напряжений, как, например, это имеет место в ОПУ «монолитного» типа.

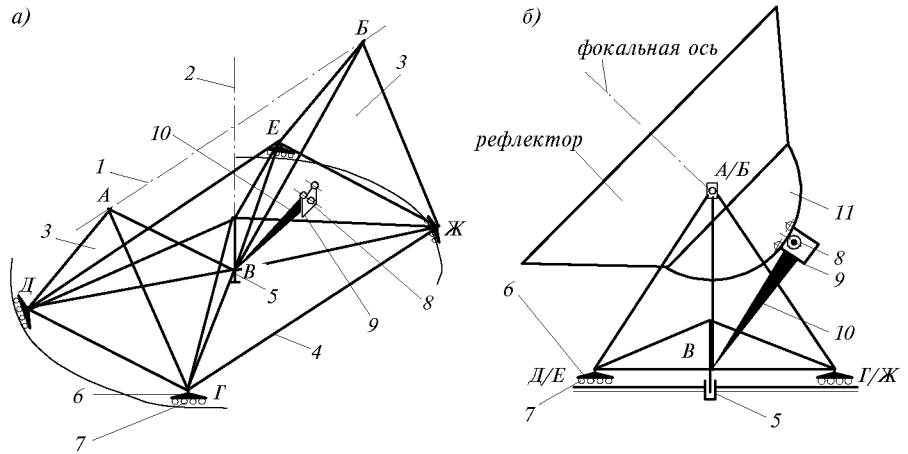


Рис.1.90. Базовая модель формообразования ОПУ нового поколения:
а – опорная система ОПУ; *б* – ОПУ в сборе с зеркальной системой; *1* – угломестная ось; *2* – азимутальная ось; *3* – башня; *4* – платформа; *5* – центральная цапфа; *6* – распределительная конструкция; *7* – азимутальная тележка; *8* – угломестный привод; *9* – металлоконструкция; *10* – качающаяся стойка; *11* – ведомое колесо

Следующая особенность рекомендуемой модели заключается в отказе при конструировании азимутальных опорных устройств от шаровых и катковых погонов и переходе на дискретно-фрикционную многоприводную систему в виде ходовых тележек *7* (рис.1.90), совмещающих функции опорного и приводного элементов. Такая система обладает очень высокой горизонтальной жесткостью и практическим отсутствием люфтов. Поскольку использовать ходовые тележки для восприятия горизонтальной компоненты ветрового давления нерационально, оно производится центральной опорой *5*, располагаемой на оси *2* азимутального вращения. Одновременно эта опора *5* обеспечивает центрирование азимутального вращения зеркальной антенны и съем угловых координат. Для исключения неравномерности деформирования фундаментов и кольцевых путей, а также непомерного роста размеров и сложности тележек, особенно значимых для большеразмерных антенн, между ходовыми тележками *7* и платформой *4* вводится промежуточная опорная конструкция в виде балансирной системы, в которой равенство реактивных сил на колесах ходовых тележек

обеспечивается автоматически за счет кинематики системы. Это делает ее независимой от напряженного состояния фундамента и грунта основания и, до известной степени, от качества обеспечения плоскостности кольцевого пути. Кроме того, она позволяет образовать необходимое количество колес с равными усилиями на них при минимальном количестве точек контакта с платформой.

На рис.1.91 приведен пример построения подобной балансирной системы в виде трех размещенных в одном пространственном объеме групп стержневых тетраэдров: четырех квазитетраэдров *2* (рис.1.91*а*) первой группы, двенадцати тетраэдров *4* (рис.1.91*б*) второй группы и тридцати шести тетраэдров *7* и *8* (рис.1.91*в*) третьей группы. Тетраэдры всех групп, кроме последней, содержат вертикальный стержень, соединяющий их вершины с точкой пересечения медиан основания. Возникающий при этом наклон зеркальной антенны вследствие просадки оси, например двухосевой тележки на $\Delta_{оси}$ равен

$$\Delta\theta_F = \Delta_{плф} \cdot r_{тел} - 1 = \Delta_{оси} \cdot 3^{-n_{яр}} \cdot (2r_{тел})^{-1}, \qquad (1.137)$$

где $n_{яр}$ – количество ярусов (групп тетраэдров) балансирной системы; $r_{тел}$ – средний радиус круга катания.

В рассмотренном примере при двухколейной двухосной тележке реакция от массы зеркальной антенны, приходящейся на одно колесо, составляет 1/432 $Q_{3A}^{св}$, реакция от ветрового момента – 1/216 $m_y^B \cdot r_{тел}^{-1}$, а вертикальное перемещение угла горизонтальной платформы ОПУ вследствие работы балансирной системы не превысит 1/54 просадки $\Delta_{оси}$ оси тележки.

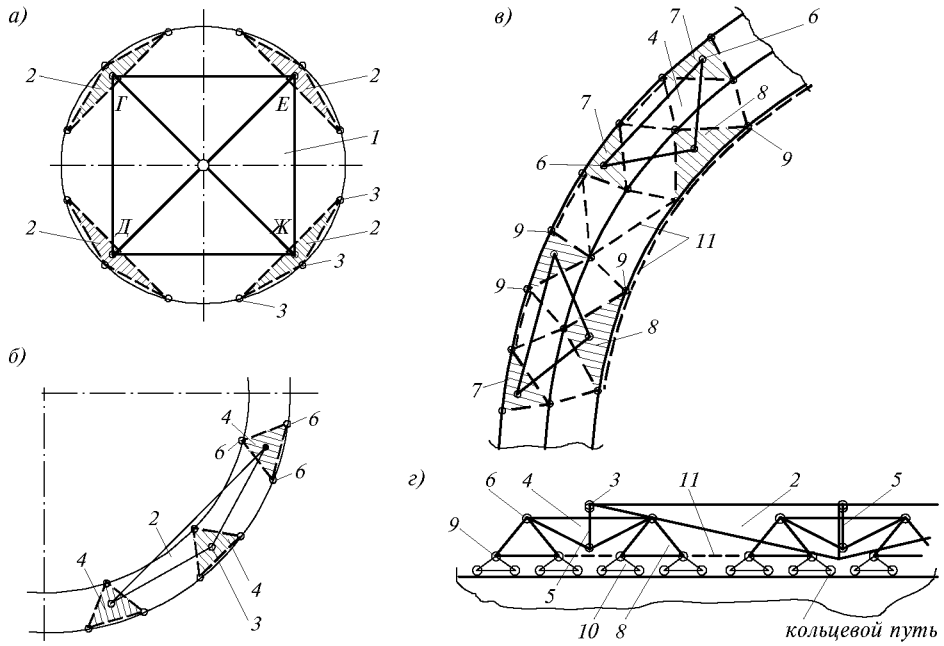


Рис.1.91. Базовая модель формообразования азимутальной части ОПУ нового поколения в виде балансирной системы: *а* – план балансирной системы; *б* – фрагмент плана с изображением контакта тетраэдров первой и второй групп; *в* – фрагмент плана с изображением контакта тетраэдров второй и третьей групп; *г* – вид сбоку; *1* – платформа; *2* – тетраэдр первой группы; *3* – узлы основания тетраэдра второй группы; *5* – стержень; *6* – вершина тетраэдра; *4, 7, 8* – тетраэдры третьей группы; *9* – узлы основания тетраэдров; *7, 8, 10* – азимутальная тележка; *11* – связевая ферма

Четвертой особенностью базовой модели ОПУ, адаптированного к угловой стабилизации, является особое решение угломестного зацепления привода. При конструировании угломестных приводов больших зеркальных антенн, когда диаметр большого зубчатого или цевочного колеса достигает 20 м и более, возникают крайне большие трудности в изготовлении и сборке таких колес на монтаже в части обеспечения точности их формы. Эти трудности могут быть исключены при использовании висячего зацепления привода угломестного вращения (рис.1.90) к большому ведомому колесу, позволяющего резко упростить изготовление и монтаж последнего, сняв ограничения на точность его конфигурации, а также обеспечить независимость зацепления от деформирования конструкций. В этом случае двигатели и редукторы угломестного привода *8* смонтированы в металлоконструкции *9* на качающейся стойке *10*, шарнирно закрепленной в точке В платформы и расположенной в плоскости большого ведомого колеса *11* касательно к его окружности. За счет поворотов стойки *10* относительно точки В обеспечивается компенсация отклонений очертания колеса *11* от окружности и взаимных смещений (в результате деформирования) центров большого ведомого колеса и ведущей шестерни угломестного привода *8*. Таким образом, решение задачи компенсации некруглости колеса *11* угломестного привода получено разделением привода на две группы: собственно привод и качающуюся стойку, которая является звеном-компенсатором, преобразующим связи типа СПУ в связи типа СПЛ.

Последней главной особенностью стабилизированного ОПУ является применение в приводах вращения многоприводных систем, мощности всех приводов которых суммируются многопоточным редуктором сумматором. В азимутальном приводе, представленном на рис.1.90 и 1.91 и использующем фрикционное зацепление, роль единичных приводов выполняют ходовые тележки, а роль колеса – сумматора – кольцевой путь. В угломестном приводе с висячим зацеплением, единичные приводы размещены в металлоконструкции *9* на качающейся стойке *10*. Каждый привод содержит электродвигатель с редуктором, на выходном валу которого смонтирована шестерня, находящаяся в зацеплении с зубчатым (или цевочным) венцом большого ведомого колеса *11*, выполняющего в данном случае роль колеса-сумматора, собирающего мощности всех единичных приводов.

На сегодня стабилизированные ОПУ получили достаточно широкое распространение как у нас в стране, так и за рубежом. Например, в ЦНИИпроектстальконструкция им. Мельникова на основе реализации моделей формостабилизированной зеркальной системы и стабилизированного ОПУ разработаны (часть которых построена) зеркальные антенны нового поколения типа РТФ с размерами рефлектора от 12 до 128 м. На рис.1.92 и 1.93 приведены фотографии макетов строящихся зеркальных антенн этого типа, соответственно 32-метровой РТФ-32 и 80-метровой РТД-80.



Рис.1.92. Модель строящейся отечественной 32-метровой зеркальной антенны РТФ-32



Рис.1.93. Модель строящейся 80-метровой зеркальной антенны РТД-80

Особенности формообразования ОПУ зеркальных антенн для спутниковой связи, особенно для связи с ИСЗ на геостационарных орбитах, определяются, во-первых, относительно меньшими размерами, от 2 до 32 м, во-вторых, использованием вместо волноводного тракта лучевода, и, в третьих, ограничением диапазона углов в режиме слежения в пределах 10 – 20° при обеспечении возможности перестановки антенны в полном диапазоне углов небесной полусферы. Соответствующие модели построения экономичных ОПУ с ограниченным сектором наведения и лучеводной схемой облучения, охватывающие достаточно широкий диапазон возможных реализаций, приведены в [12]. На рис.1.94 и 1.95 приведены фотографии макетов и схемы построенных зеркальных антенн этого типа серийного исполнения, соответственно 16-метровой и 12-метровой. ОПУ этих антенн в полной мере реализуют рассмотренные выше модели формообразования стабилизированного ОПУ с учетом: специфики разделения приводов на следящие с диапазоном наведения в пределах 10 – 15° и на переустановочные; широкого использования приводов толкающего типа, канатных и цепных; необходимости размещения перископических (поворотных) зеркал лучевода вдоль основных осей вращения зеркальной антенны.

а) *б)*



Рис.1.94. 16-метровый отечественный радиотелескоп нового поколения типа РТФ в исполнении РТФ-16-С с ограниченным сектором наведения и разделением приводов на следящие и переустановочные, с самоподъемом конструкции в заданное положение:
а – вид спереди; *б* - вид сзади

1.6.7. Расчет конструкций зеркальных антенн. При формообразовании зеркальных антенн, представляющих собой класс прецизионных конструкций, на первое место, в отличие от традиционных металлоконструкций, выходит условие сохранения геометрической формы и положения элементов антенны, когда локальные максимумы напряжений не имеют определяющего значения. При расчете должна быть выявлена степень сохранения формы и положения рабочих элементов антенны, которая является интегральной (усредненной) характеристикой напряженного состояния конструкций. Блок-схема полного расчета приведена на рис.1.96.

Расчет геометрии включает: определение координат узлов при заданной топологии, расчет длин элементов, определение центра тяжести сооружения и его частей, расчет моментов инерции относительно исполнительных осей, определение массы сооружения, сил инерции и центробежных сил. Все эти расчетные операции выполняет программа САУНА.

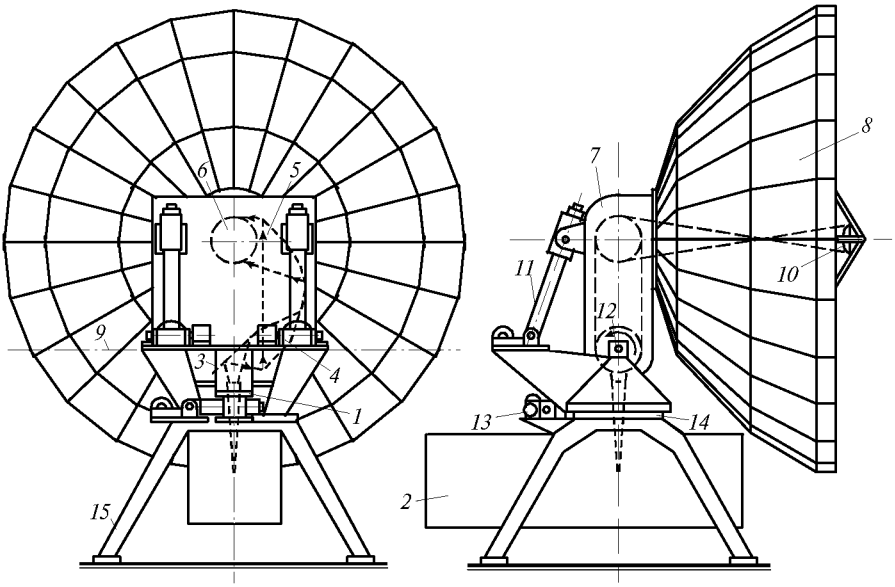


Рис.1.95. Схема 12-метрового отечественного радиотелескопа нового поколения типа РТФ-12 с ограниченным сектором наведения, оборудованного четырехзеркальным лучеводом

1 – рупорный облучатель; *2* – аппаратурный контейнер; *3,4,5,6* – поворотное зеркало; *7* – лучеводная кабина; *8* – зеркальная система; *9* – угломестная ось; *10* – контррефлектор; *11* – угломестные приводы; *12* – угломестная опора; *13* – азимутальный привод; *14* – азимутальная опора; *15* – опорная конструкция

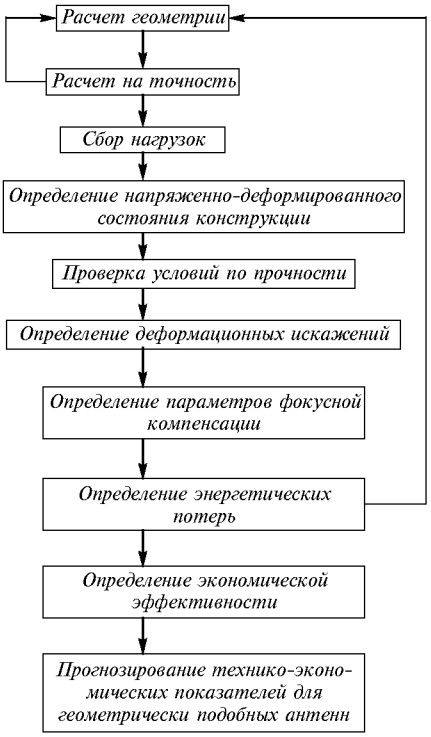


Рис.1.96. Блок-схема полного расчета прецизионных конструкций зеркальных радиотелескопов

Под начальными искажениями (начальной точностью) понимается совокупность начальных погрешностей формы и положения, возникающих при изготовлении, монтаже и юстировке конструкций. При этом при расчете на точность решаются две задачи:

– по известным допускам (отклонениям) составляющих звеньев рассчитывается отклонение замыкающего звена;

– по заданному допуску (отклонению) замыкающего звена рассчитываются рациональные отклонения составляющих звеньев.

Связь между замыкающими отклонениями любой точки и составляющими погрешностями звеньев размерной цепи, накапливаемыми при изготовлении, монтаже и юстировке, устанавливаются формулой

$$\sigma_{н\Sigma} = \frac{1}{3}\left[\sum_i \left(A_i^2 \cdot K_i^2 \cdot \Delta_{нi}^2\right)\right]^{1/2} = \left[\sum_i \left(A_i^2 \cdot \sigma_{нi}^2\right)\right]^{1/2}, \qquad (1.138)$$

где A_i – передаточное отношение; K_i – коэффициент относительного рассеяния i-го звена размерной цепи; $\Delta_{нi}$ – отклонение фактического размера i-го звена от номинального; $\sigma_{нi}$ – то же, но среднеквадратическое значение отклонений $\Delta_{нi}$.

Применительно к отражающей поверхности зеркала рефлектора соответствующее значение ОСКИ $\xi_{н\Sigma}$ определяется уравнением

$$\xi_{н\Sigma} = D_p^{-1}\left[\left(\sigma N_{н\Sigma}^{кк}\right)^2 + \sum\nolimits_{j=1}^{t}\left(\sigma N_{нj}^{юс}\right)^2 + \sum\nolimits_{j=t+1}^{l}\left(\sigma N_{нj}^{юс}\right)^2 + \left(\sigma N_{щ}^{из}\right)^2\right]^{1/2}, \qquad (1.139)$$

где $\sigma N_{н\Sigma}^{кк}$ – среднеквадратическое начальное отклонение по нормали к поверхности от теоретического положения П-узлов каркаса рефлектора, учитываемое только в случае отсутствия юстировки при сборке на монтаже; $\sum_j \left(\sigma N_{нj}^{юс}\right)$ – суммарная среднеквадратическая погрешность юстировки, причем $\sum_{j=1}^{t}$ – вследствие ошибок, меняющихся с изменением местоположения юстируемой точки, а $\sum_{j=t+1}^{l}$ – вследствие независимых ошибок; $\sigma N_{щ}^{из}$ – среднеквадратическое начальное отклонение формы отражательного щита от теоретического профиля. Последовательность расчета на точность, формулы расчета для различных случаев сборки рефлектора, а также соответствующие номограммы для определения точности приведены в [12].

Сбор нагрузок для расчета эксплуатационных состояний конструкций зеркальных антенн производится в соответствии со СНиП 2.01.07-85, но с учетом специфики их предельных состояний.

Это относится прежде всего к ветровому воздействию. Расчет конструктивно-механической системы (КМС) зеркальной антенны ведется на действие нормативного эксплуатационного ветрового давления (скоростного напора) $q_{нэ}^{B}$, при определении которого должно учитываться различие его расчетных значений применительно к трем основным режимам эксплуатации:

I режим – режим нормальной эксплуатации (точностной режим) $q_{нэ}^{B1}$, при котором искажение геометрической формы и положения рабочих элементов зеркальной антенны, вызванные упругими деформациями КМС, не должны превышать значений, гарантирующих определенный уровень эффективности работы антенны;

II режим – кинематический режим $q_{нэ}^{B2}$, при котором должна быть гарантирована работоспособность всех приводов, но допускается снижение точности при ее контроле, а именно, превышение ограничений I-го режима на деформационные искажения;

III режим – экстремальный режим $q_{нэ}^{B3}$, при котором в нерабочий период должна быть обеспечена в упругой стадии работы материала несущая способность элементов и узлов КМС. При этом ЗА может быть переведена в положение, обеспечивающее минимальные ветровые силы; приводы выключены; включены устройства заштыревания и торможения.

Нормативное эксплуатационное ветровое давление $q^B_{нэ}$ следует определять на основе нормативного значения скорости ветра $V^B_{нэ}$ по формуле

$$q^B_{нэ} = 0{,}0625\left(V^B_{нэ}\right)^2 (\text{кгс} / \text{м}^2), \qquad (1.140)$$

где $V^B_{нэ}$, м/с – скорость ветра на уровне 10 м над поверхностью земли. Определение $V^B_{нэ}$ зависит от режима эксплуатации и требований ТЗ:

а) при I режиме $V^{B1}_{нэ}$ устанавливается в ТЗ, как правило, соответственно предусмотренному СНиП 2.01.07-85 районированию,. но на основе скорости ветра с заданной (в ТЗ) обеспеченностью работы ЗА по времени ω, либо с помощью метода статистической интерполяции по кривым распределения ветра [13], либо по усредненным графикам распределения ветра (рис.1.97);

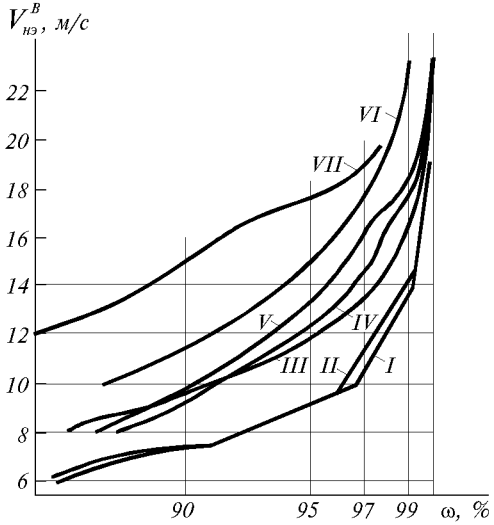


Рис.1.97. Зависимость нормативной эксплуатационной скорости ветра $V^B_{нэ}$ от заданной обеспеченности работы ω применительно к ветровым районам по СНиП:
I–VII – ветровые районы

б) при II режиме $V^{B2}_{нэ}$ устанавливается в ТЗ либо как «...ветер $V^{B1}_{нэ}$ плюс порывы...», либо как «...ветер с порывами до $V^{B2}_{нэ}$...», либо как «...ветер $V^{B2}_{нэ}$ плюс порывы...»;

в) при III режиме $V^{B3}_{нэ}$ устанавливается в ТЗ, как правило, соответственно предусмотренному СНиП районированию, но на основе скорости ветра, превышаемой один раз за заданный (в ТЗ) гарантийный срок службы [12, табл.6.1].

Как исключение, если $V^{B3}_{нэ}$ больше 37 м/с (скорости, рекомендуемой СНиП для VII ветрового района), она устанавливается непосредственно в ТЗ как «...ветер с порывами до $V^{B3}_{нэ}$...», причем $V^{B3}_{нэ} \geq 50$ м/с.

Расчетное значение ветровой нагрузки q^B_{Σ} следует определять как сумму средней q^B_m и пульсационной q^B_p составляющих [31].

$$q^B_{\Sigma} = \gamma_f (q^B_m + q^B_p), \qquad (1.141)$$

где γ_f – коэффициент надежности по ветровой нагрузке [31, п.6.11].

Значение средней составляющей ветровой нагрузки q^B_m на высоте z над поверхностью земли следует определять по формуле

$$q^B_m = q^B_{нэ} \cdot \kappa_н \cdot c, \qquad (1.142)$$

где $\kappa_н$ – коэффициент, учитывающий изменение ветрового давления по высоте z и определяемый соответственно типу местности по принятой в СНиП классифика-

ции [31, табл.6]; c – аэродинамический коэффициент, см.п.1.6.3; тип местности (А, В или С) должен быть указан в ТЗ.

Значение пульсационной составляющей ветровой нагрузки q_{p}^{B} на высоте z над поверхностью земли следует определять по формуле

$$q_p^B = q_m^B \cdot \xi \cdot \varsigma \cdot \nu, \tag{1.143}$$

где ξ – коэффициент динамичности; ζ – коэффициент пульсации (порывов) давления ветра на высоте z; ν – коэффициент пространственной корреляции пульсаций ветра.

Коэффициент ξ следует определять соответственно значению параметра ε применительно к логарифмическому декременту колебаний $\delta = 0{,}1$, характерному для КМС зеркальных антенн, по черт 2 [31] на основе линейной интерполяции приведенных там кривых ξ, построенных для $\delta = 0{,}3$ и $\delta = 0{,}15$ по формуле

$$\xi_{0,1} = \xi_{0,3} + 1{,}33\left(\xi_{0,3} - \xi_{0,15}\right). \tag{1.144}$$

Причем ε, при этом, вычисляется как

$$\varepsilon = \frac{1}{940 f_1}\left(\gamma_f \cdot q_{нэ}^{B}\right)^{1/2}, \tag{1.145}$$

где f_1 – первая частота собственных колебаний.

Диапазон частот первых форм собственных колебаний КМС лежит в пределах от 0,5 до 5 Гц. В связи с тем, что предельные значения частоты собственных колебаний f_l зеркальных антенн при декременте колебаний $\delta = 0{,}1$ превышают 4 – 5 Гц, силы инерции, возникающие при колебаниях по соответствующей собственной форме, могут при динамическом расчете не учитываться [31, п.6.8]. Коэффициент ζ следует принимать по СНиП соответственно заданному типу местности [31, табл.7]. Коэффициент ν также следует принимать по СНиП в зависимости от размеров и конфигурации расчетной поверхности КМС, на которой учитывается корреляция пульсаций [31, табл. 9].

Поскольку ряд коэффициентов и $q_{нэ}^{B}$ зависят от режима эксплуатации, определение q_{Σ}^{B} следует производить соответственно типу расчета.

При расчете деформационных искажений КМС:

I режим (обеспечение точности), $\gamma_f = 1{,}0$, $\xi = 0$, $\zeta = 0$

$$q_{\Sigma}^{B1} = q_{нэ}^{B1} \cdot \kappa_{н} \cdot c; \tag{1.146}$$

II режим (контроль искажений), $\gamma_f = 1{,}0$.

Случай: $V_{нэ}^{B2}$ как «ветер... $V_{нэ}^{B1}$ плюс порывы...»

$$q_{\Sigma}^{B2} = (q_{нэ}^{B1} \cdot \kappa_{н} \cdot c)(1 + \zeta); \tag{1.147}$$

Случай: $V_{нэ}^{B2}$ как «...ветер с порывами до $V_{нэ}^{B2}$ ...»

$$q_{\Sigma}^{B2} = q_{нэ}^{B2}\, \kappa_{н} \cdot c. \tag{1.148}$$

Случаи: $V_{нэ}^{B2}$ как «...ветер $V_{нэ}^{B2}$ плюс порывы...»:

$$q_{\Sigma}^{B2} = (q_{нэ}^{B2} \cdot \kappa_{н} \cdot c)(1 + \zeta); \tag{1.149}$$

При расчете мощности приводов:

II режим (кинематический), $\gamma_f = 1{,}0$.

Случай: $V_{нэ}^{B2}$ как «...ветер $V_{нэ}^{B1}$ плюс порывы...»:

– без учета порывов

$$\left(q_{\Sigma}^{B2}\right)^{1} = q_{нэ}^{B1} \cdot \kappa_{н} \cdot c; \tag{1.150}$$

– с учетом порывов по (1.147).

Случаи: $V_{нэ}^{B2}$ как «... ветер с порывами до $V_{нэ}^{B2}$ ...»:

– без учета порывов

$$\left(q_{\Sigma}^{B2}\right)^{1} = (q_{нэ}^{B2} \cdot \kappa_{н} \cdot c) \cdot (1+\varsigma)^{-1}; \tag{1.151}$$

– с учетом порывов по (1.148).

Случай: $V_{нэ}^{B2}$ как «... ветер $V_{нэ}^{B2}$ плюс порывы...»

– без учета порывов

$$\left(q_{\Sigma}^{B2}\right)^{1} = q_{нэ}^{B2} \cdot \kappa_{н} \cdot c; \tag{1.152}$$

– с учетом порывов по (1.149).

При расчете сцепления во фрикционных приводах и прочности приводов:

II режим (кинематический), $\gamma_f = 1{,}4$.

Случай: $V_{нэ}^{B2}$ как «...ветер $V_{нэ}^{B1}$ плюс порывы...»:

$$q_{\Sigma}^{B2} = \gamma_f \left(q_{нэ}^{B1} \cdot \kappa_{н} \cdot c\right) \cdot \left(1 + \xi \cdot \varsigma \cdot \nu\right), \tag{1.153}$$

где при определении ε принимать $q_{нэ}^{B} = q_{нэ}^{B1}$.

Случай: $V_{нэ}^{B2}$ как «...ветер с порывами до $V_{нэ}^{B2}$ ...»

$$q_{\Sigma}^{B2} = \gamma_f \left(q_{нэ}^{B2} \cdot \kappa_{н} \cdot c\right) \cdot \left(1 + \xi \cdot \varsigma \cdot \nu\right) \cdot \left(1+\varsigma\right)^{-1}, \tag{1.154}$$

где при определении ε принимать $q_{нэ}^{B} = q_{нэ}^{B2}(1+\varsigma)^{-1}$.

Случай: $V_{нэ}^{B2}$ как «...ветер $V_{нэ}^{B2}$ плюс порывы...»

$$q_{\Sigma}^{B2} = \gamma_f \left(q_{нэ}^{B2} \cdot \kappa_{н} \cdot c\right) \cdot \left(1 + \xi \cdot \varsigma \cdot \nu\right), \tag{1.155}$$

где при определении ε принимать $q_{нэ}^{B} = q_{нэ}^{B2}$.

При расчете несущей способности (прочности и устойчивости) металлоконструкций, устройств стопорения и торможения:

III режим (экстремальный), $\gamma_f = 1{,}4$.

Случай: $V_{нэ}^{B3}$ по СНиП с учетом гарантийного срока службы ЗА

$$q_{\Sigma}^{B3} = \gamma_f \left(q_{нэ}^{B3} \cdot \kappa_{н} \cdot c\right) \cdot \left(1 + \xi \cdot \varsigma \cdot \nu\right), \tag{1.156}$$

где при определении ε принимать $q_{нэ}^{B} = q_{нэ}^{B3}$.

Случай: $V_{нэ}^{B3}$ как «...ветер с порывами до $V_{нэ}^{B3}$...» при $V_{нэ}^{B3} \geq 50$ м/с

$$q_{\Sigma}^{B3} = \gamma_f \left(q_{нэ}^{B3} \cdot \kappa_{н} \cdot c\right) \cdot \left(1 + \xi \cdot \varsigma \cdot \nu\right) \cdot \left(1+\varsigma\right)^{-1}, \tag{1.157}$$

где при определении ε принимать $q_{нэ}^{B} = q_{нэ}^{B3}(1+\varsigma)^{-1}$.

Для сбора статической ветровой нагрузки в узлы каркаса рефлектора можно пользоваться с точностью 15–20% приближенной моделью [12, § 6.5], позволяющей представить ветровое давление как сумму воздействий симметричного и кососимметричного вида:

– симметричная нагрузка, нормальная раскрыву, равномерно распределенная по нему и адекватная по действию компоненте суммарной ветровой силы $\left(Q_p\right)_{\Sigma}^{B}$ вдоль оси OZ

$$\left(q_{\Sigma z}^{B}\right)_{jк}^{см} = c_z\left(q_{\Sigma}^{B}\right)_0; \tag{1.158}$$

– кососимметричная нагрузка первого рода, нормальная раскрыву и адекватная по действию компонентам $\left(m_p\right)_y^B$ и $\left(m_p\right)_x^B$ суммарного ветрового момента относительно осей OY и OX (OY – параллельна угломестной оси)

$$\left(q_{\Sigma z}^{B}\right)_{jк}^{ксм} = \left(8m_y - 0{,}5c_x \cdot r_p \cdot F^{-1}\right) r_i r_p^{-1} \cos\varphi_к \left(q_{\Sigma}^{B}\right)_0; \tag{1.159}$$

$$\left(q_{\Sigma z}^{B}\right)_{jк}^{ксм} = \left(8m_x + 0{,}5c_y \cdot r_p \cdot F^{-1}\right) r_i r_p^{-1} \sin\varphi_к \left(q_{\Sigma}^{B}\right)_0; \tag{1.160}$$

– кососимметричная нагрузка второго рода, параллельная раскрыву, равномерно распределенная по нему и адекватная по действию компонентам $\left(Q_p\right)_x^B$ и $\left(Q_p\right)_y^B$ суммарной ветровой силы вдоль осей OX и OY

$$\left(q_{\Sigma x}^{B}\right)_{jк}^{ксм} = c_x\left(q_{\Sigma}^{B}\right)_0; \tag{1.161}$$

$$\left(q_{\Sigma y}^{B}\right)_{jк}^{ксм} = c_y\left(q_{\Sigma}^{B}\right)_0; \tag{1.162}$$

где $\left(q_{\Sigma}^{B}\right)_0$ – значение q_{Σ}^{B} на уровне угломестной оси ЗА, а аэродинамические коэффициенты *c* и *m* приведены к центру раскрыва рефлектора (рис.1.98).

В случае, когда при большом диаметре раскрыва рефлектора перепад напора по высоте имеет существенное значение, он учитывается введением в формулу (1.159) дополнительного члена

$$\left(q_{\Sigma z}^{B}\right)_{jк}^{ксм} = [\left(8m_y - 0{,}5c_x \cdot r_p \cdot F^{-1}\right) + \left(q_{\Sigma}^{B}\right)_0^{II} \cdot \left(q_{\Sigma}^{B}\right)_0^{-1}] \cdot r_i r_p^{-1} \cos\varphi_к \left(q_{\Sigma}^{B}\right)_0^{I}; \tag{1.163}$$

где $\left(q_{\Sigma}^{B}\right)_0^{I} = 0{,}5\left[\left(q_{\Sigma}^{B}\right)_{02} + \left(q_{\Sigma}^{B}\right)_{01}\right]$, $\left(q_{\Sigma}^{B}\right)_0^{II} = 0{,}5\left[\left(q_{\Sigma}^{B}\right)_{02} - \left(q_{\Sigma}^{B}\right)_{01}\right]$, а $\left(q_{\Sigma}^{B}\right)_{01}$ и $\left(q_{\Sigma}^{B}\right)_{02}$ – значения q_{Σ}^{B} соответственно в самой низкой и самой высокой точках рефлектора.

В уточненной модели, обобщающей экспериментальные данные продувок, задается непрерывным в виде графиков лишь изменение относительного давления $\left(\overline{q}_{pN}^{B} = q_{pN}^{B} / q_{N\Theta}^{B}\right)$ вдоль восьми радиальных сечений через 45° по $\varphi_к$, а в промежуточных радиальных сечениях определение $\overline{q}_{pN}^{B}$ производится интерполяционным путем

$$\left(\overline{q}_{pN}^{B}\right)_{jк} = \frac{4}{\pi}\left(\varphi_к - \varphi_{\dot{к}}\right) \cdot \left[\left(\overline{q}_{pN}^{B}\right)_{j\ddot{к}} - \left(\overline{q}_{pN}^{B}\right)_{j\dot{к}}\right] + \left(\overline{q}_{pN}^{B}\right)_{j\dot{к}}, \tag{1.164}$$

где $\varphi_{\dot{к}}$ и $\varphi_{\ddot{к}}$ – радиальные сечения с известными $\left(\overline{q}_{pN}^{B}\right)_j$, а отсчет $\varphi_к$ ведется от оси OX в пределах 0 – 360°, причем $\varphi_{\dot{к}} \le \varphi_к \le \varphi_{\ddot{к}}$.

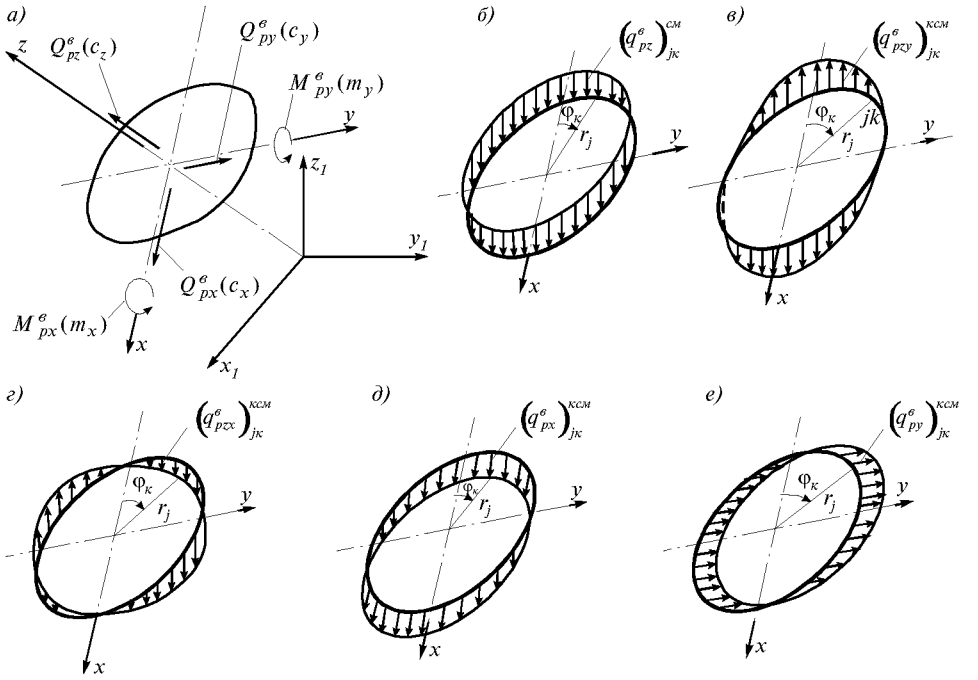


Рис.1.98. Модель ветрового воздействия на рефлектор:

а – принятое разложение сил и моментов; *б* – симметричное воздействие (адекват Q^{e}_{pz});

в, *г* – кососимметричные воздействия первого рода (адекват $M^{e}_{py} \square M^{e}_{px}$);

д, *е* – кососимметричные воздействия второго рода (адекват $Q^{e}_{px} \square Q^{e}_{py}$)

Нормативная динамическая ветровая нагрузка определяется на основе средней скорости ветра по формулам (1.121) и (1.122) соответственно указаниям п.1.6.3. В первом приближении можно принимать динамическую ветровую нагрузку равной 20% от статической ветровой нагрузки.

При расчете по первому предельному состоянию (по прочности и устойчивости) парциальные весовые силы определяются по формулам (1.114) и (1.115). При расчете по второму предельному состоянию (по деформативности) парциальные весовые силы определяются по (1.116) и (1.117), учитывающим отсутствие весовых искажений зеркала рефлектора в его угловом положении $\alpha_F = \alpha_{F0}$, при котором осуществляется юстировка отражающей поверхности зеркала.

Определение напряженно-деформированного состояния конструкции ЗА (усилий, перемещений и т.п.) при действии различного вида статических, динамических нагрузок и температуры производится по стандартным программам расчета пространственных конструкций РАСК, ПАРАДОКС, ПАРСЕК, ДИАНА и др.

Наиболее важным этапом этого блока расчета является определение деформационных искажений поверхности зеркала рефлектора и взаимоположения рабочих элементов зеркальной системы (рефлектора, контррефлектора, облучателя и т.п.). В частности, искажения формы зеркала рефлектора обусловлены деформационными перемещениями П-узлов, в которых производится опирание отражательных щитов, и собственными деформациями щитов [12, рис.6.28]. При размере щита, меньшем или равном 2 м, решающее значение имеют деформации каркаса.

Для сокращения исходной информации и понижения порядка решаемых систем уравнений расчетная схема, как и действующие нагрузки, раскладывается на

составляющие симметричного и кососимметричного вида. Окончательный результат достигается суммированием определенным образом симметричных и кососимметричных деформаций.

Зависимости нормальных составляющих относительных весовых перемещений $\Delta\overline{N}^{св}_{jк} = \Delta N^{св}_{jк} / D_p$ от углов α_F и α_{F0} имеют следующий вид:

– симметричные

$$(\Delta\overline{N}^{св}_{jк})^{см}_{\alpha_F} = (\sin\alpha_F - \sin\alpha_{F0})\cdot\left(\Delta\overline{N}^{св}_{jк}\right)^{см}_{90^\circ} = \\ = (\sin\alpha_F - \sin\alpha_{F0})\cdot\left(\Phi^{св}_{jк}\right)^{см}\cdot\left(\Delta\overline{N}^{св}_{0}\right)^{см}_{90^\circ}; \tag{1.165}$$

– кососимметричные

$$(\Delta\overline{N}^{св}_{jк})^{ксм}_{\alpha_F} = (\cos\alpha_F - \cos\alpha_{F0})\cdot\left(\Delta\overline{N}^{св}_{jк}\right)^{ксм}_{0^\circ} = \\ = (\cos\alpha_F - \cos\alpha_{F0})\cdot\left(\Phi^{св}_{jк}\right)^{ксм}\cdot\left(\Delta\overline{N}^{св}_{0}\right)^{ксм}_{0^\circ}; \tag{1.166}$$

где $\Phi^{св}(\bar{r}_j, \varphi_к)$ – нормированная функция весовых перемещений П-узлов каркаса, зависящая от его конструктивной схемы

$$\Delta\overline{N}_{jк} = \left(1 + \frac{1}{16}\bar{r}_j^2\cdot\overline{F}^{-2}\right)^{-1/2}\cdot\left(\Delta\overline{A}_{jк} - \frac{1}{4}\Delta\overline{R}_{jк}\cdot\bar{r}_j\cdot\overline{F}^{-1}\right). \tag{1.167}$$

Аналогично для весовых перемещений фокуса (контррефлектора и облучателя):

– линейные (вдоль OX, OY, OZ)

$$(\Delta\overline{F}^{св}_{y})_{\alpha_F} = 0; \quad (\Delta\overline{F}^{св}_{x})_{\alpha_F} = (\cos\alpha_F - \cos\alpha_{F0})\cdot\left(\Delta\overline{F}^{св}_{x}\right)_{0^\circ}; \\ (\Delta\overline{F}^{св}_{z})_{\alpha_F} = (\sin\alpha_F - \sin\alpha_{F0})\cdot\left(\Delta\overline{F}^{св}_{z}\right)_{90^\circ}; \tag{1.168}$$

– угловые (вокруг OX, OY, OZ)

$$\left(\Delta\theta^{св}_{y}\right)_{\alpha F} = (\cos\alpha_F - \cos\alpha_{F0})\cdot\left(\Delta\theta^{св}_{y}\right)_{0^\circ}; \ \left(\Delta\theta^{св}_{x}\right)_{\alpha F} = \left(\Delta\theta^{св}_{z}\right)_{\alpha F} = 0. \tag{1.169}$$

Графическая интерпретация весовых перемещений (1.165) и (1.166) и коэффициента эффективности $\eta_{АЭ}$ для некоторых характерных значений α_F = 90 (зенит), 60, 45 и 30° представлена на рис.3.88 [12].

Вводя обозначение функции распределения ветровых перемещений П-узлов $\Phi^{в}(\bar{r}_j, \varphi_к)$, имеем

$$\left(\Delta\overline{N}^{B}_{jк}\right)^{см}_{\alpha_F} = \left(\Delta\overline{N}^{B}_{0}\right)^{см}_{90^\circ}\cdot\left(\Phi^{B}_{jк}\right)^{см}; \quad \left(\Delta\overline{N}^{B}_{jк}\right)^{ксм}_{\alpha_F} = \left(\Delta\overline{N}^{B}_{0}\right)^{ксм}_{0^\circ}\cdot\left(\Phi^{B}_{jк}\right)^{ксм}. \tag{1.170}$$

Отметим, что возникающее в результате деформирования конструкций отклонение фактической поверхности зеркала рефлектора от теоретического профиля вызывает разность фаз ψ в раскрыве между волной, излучаемой элементом теоретической поверхности, и волной, излучаемой элементом фактической поверхности. Суммируясь по всему зеркалу, эти фазовые сдвиги приводят к существенному снижению эффективной поверхности и усиления, которые и характеризуются парциальными коэффициентами эффективности η_i, причем $\eta_\Sigma^{кон} = \eta_{АН}\cdot\eta_{АЭ}\cdot\eta_T$.

Выражение для определения

$$\eta_{AH} = \left(4\overline{F}\right)^{-2}\left\{\left(4\overline{F}\right)^{-2} + \left[e^{\left(4\pi\varepsilon_{H\Sigma}\overline{D}_p\right)^2} - 1\right]\cdot \ln\left[1+\left(4\overline{F}\right)^2\right]\right\}^{-1} \qquad (1.171)$$

предусматривает, что неравномерности полей распределения начальных ошибок учитываются предварительно при вычислении.

Парциальный коэффициент $\eta_{A\Theta}$, учитывающий потери вследствие деформационных искажений, определяется с учетом связи искажений с амплитудно-фазовым распределением в раскрыве рефлектора:

$$\eta_{A\Theta} = \left\{\left[\sum_j \sum_\kappa \left(f_j \cdot \cos\psi_{j\kappa}\cdot \Delta P_{j\kappa}\right)\right]^2 + \left[\sum_j \sum_\kappa \left(f_j \sin\psi_{j\kappa}\Delta\overline{P}_{j\kappa}\right)^2\right]\right\}\times$$
$$\times\left[2\int_0^1 f(\overline{r})\cdot\overline{r}\cdot d\overline{r}\right]^{-2}, \qquad (1.172)$$

где $f(\overline{r}) = 1 + c\overline{r}^2$ и f_j – функция амплитудного распределения поля (мощности) в раскрыве и ее значение в точке $\overline{r} = \overline{r}_j$ соответственно; $\psi_{j\kappa}$ – искажение плоского фронта волны в раскрыве (фазовый сдвиг) вследствие деформирования зеркала в точке с координатами $\overline{r} = \overline{r}_j$ и $\varphi = \varphi_\kappa$

$$\psi_{j\kappa} = \pi\overline{D}_p\left\{c_{nx}\overline{r}_j\left|\sin\varphi_\kappa\right| + c_{ny}\overline{r}_j\left|\cos\varphi_\kappa\right| + \left[\overline{r}_j\,\overline{F}^{-1}(\Delta\overline{R}_{j\kappa} + \Delta\overline{F}_x\overline{F}\left|\sin\varphi_\kappa\right| + \right.\right.$$
$$\left.\left. + \Delta\overline{F}_y\overline{F}\left|\cos\varphi_\kappa\right| - 4\left(\Delta\overline{A}_{j\kappa} - \frac{1}{16}\Delta\overline{F}_z\cdot\overline{r}_j^2\cdot\overline{F}^{-1}\right)\right]\left(1+\frac{1}{16}\overline{r}_j^2\overline{F}^{-2}\right)^{-1}\right\}; \qquad (1.173)$$

$\Delta\overline{P}_{j\kappa} = 4\Delta P/(\pi D_p^2)$ – удельная площадка в раскрыве, в пределах которой корректно считать f_j и $\psi_{j\kappa}$ постоянными (в пределах сдвига фазы $\Delta\psi \le \pi/4$); $\Delta\overline{A}_{j\kappa}$ и $\Delta\overline{R}_{j\kappa}$ аксиальная и радиальная составляющие относительного перемещения в точке j_κ в цилиндрической системе координат; $\Delta\overline{F}_x = \Delta F_x/F$; $\Delta\overline{F}_y = \Delta F_y/F$; $\Delta\overline{F}_z = \Delta F_z/F$ – то же фокуса (контррефлектора, облучателя) в декартовой системе координат; C_{nx} и C_{ny} – направляющие косинусы (в декартовой системе) поворота плоского фронта волны в раскрыве.

Когда определение $\eta_{A\Theta}$ по формуле (1.172) может встретить затруднение, его следует вычислять через ОСКИ ($\xi_{\Theta\Sigma}$) по (1.173) при подстановке туда вместо $\xi_{H\Sigma}$ значения $\xi_{\Theta\Sigma}$. Для этих же целей может быть использована и более простая формула

$$\eta_{A\Theta} = 1 - \left(2\pi\xi_{\Theta\Sigma}\cdot\overline{D}_p\right), \qquad (1.174)$$

дающая несколько завышенные значения $\eta_{A\Theta}$ по сравнению с формулой (1.171).

Подбор характеристик поверхности-гомолога (Δ_{y0}, Δ_{z0}, ∂F_z, c_{ny}) на основе использования метода фокусно-угловой компенсации позволяет перейти от перемещений $\Delta_{j\kappa}$ к собственно искажениям $\delta_{j\kappa}$ и, подставив искажения в выражения (1.173) и (1.172), снизить потери эффективности.

Определение искажений, их среднеквадратического значения $\sigma_{\Theta\Sigma}$, а также параметров фокусно-угловой компенсации и соответствующего коэффициента эффективности может быть произведено по программе ПОЗА.

Связь между искажениями фактической поверхности зеркала рефлектора $\delta_{jк}$ относительно поверхности-гомолога и фактическими перемещениями $\Delta_{jк}$ описывается следующими формулами:

$$\left.\begin{aligned}
\delta T_{jк} &= \Delta T_{jк} - \Delta y_0 \sin\varphi_к + c_{ny}\cdot z_{jк}\cdot \sin\varphi_к;\\
\delta R_{jк} &= \Delta R_{jк} + \Delta y_0 \cdot \cos\varphi_к - c_{ny}\cdot z_{jк}\cdot \cos\varphi_к;\\
\delta A_{jк} &= \Delta A_{jк} + \Delta z_0 + c_{ny}\cdot r_{jк}\cdot cos\varphi_к - \frac{z_{jк}}{F}\cdot \partial F_z.
\end{aligned}\right\} \qquad (1.175)$$

Формулы для определения коррекции положения контррефлектора и облучателя с учетом деформирования конструкций их подвески и перемещений узлов подвески на каркасе рефлектора приведены в [12, §3.8].

Поскольку к снижению эффективности приводят не перемещения, а искажения, оказывается возможным рассматривать искажения, вызванные симметричной и кососимметричной компонентами перемещений, как некоррелируемые случайные величины:

$$\xi_э^2 = \left(\xi_э^{см}\right)^2 + \left(\xi_э^{ксм}\right)^2. \qquad (1.176)$$

В этом случае величина ОСКИ $\xi_э$ определяется по формуле

$$\xi_э = \left(2\pi\sqrt{2}\cdot \overline{D}_p\right)^{-1}\left[\int_0^1 f(\bar r)\cdot \bar r\cdot d\bar r\right]^{-1/2}\cdot\left\{\sum\nolimits_j\cdot\sum\nolimits_к\left[f_j\left(\psi_{jк}^{см}\right)^2\cdot\Delta\overline{P}_{jк}\right]+\right.$$
$$\left.+\sum\nolimits_j\cdot\sum\nolimits_к\left[f_j\left(\psi_{jк}^{ксм}\right)^2\Delta\overline{P}_{jк}\right]\right\}^{1/2}, \qquad (1.177)$$

где

$$\psi_{jк}^{см} = \pi\overline{D}_p\left[\bar r_j\cdot\overline{F}^{-1}\cdot\Delta\overline{R}_{jк}^{см} - 4\left(\Delta\overline{A}_{jк}^{см} - \frac{1}{16}\Delta\overline{F}_z\cdot\bar r_j^2\cdot\overline{F}^{-1}\right)\right]\times$$
$$\times\left(1+\frac{1}{16}\bar r_j^2\cdot\overline{F}^{-2}\right)^{-1}; \qquad (1.178)$$

$$\psi_{jк}^{ксм} = \pi\overline{D}_p\left\{c_{nx}\cdot\bar r_j\cdot\left|\sin\varphi_к\right| + c_{ny}\cdot\bar r_j\left|\cos\varphi_к\right| + \left[\bar r_j\cdot\overline{F}^{-1}\cdot\left(\Delta\overline{R}_{jк}^{ксм}+\right.\right.\right.$$
$$\left.\left.\left.+\Delta\overline{F}_z\left|\sin\varphi_к\right| + \Delta\overline{F}_y\left|cos\varphi_к\right|\right) - 4\Delta A_{jк}^{ксм}\right]\cdot\left(1+1/16\,\bar r_j^2\,\overline{F}^{-2}\right)\right\}. \qquad (1.179)$$

Ввиду вероятностного характера совпадения во времени максимальных значений весовых и квазистатических ветровых деформаций учет их одновременного появления производится по формуле

$$\left(\xi_э^{св+в}\right)^2 = \left(\xi_э^{св}\right)^2 + \left(\xi_э^{в}\right)^2. \qquad (1.180)$$

Суммарные эксплуатационные деформации, учитывающие помимо деформаций каркаса рефлектора также и деформации отражательных щитов для различных комбинаций: действия только весовых сил, с учетом и без начальных деформаций щитов при юстировке зеркала, при действии ветра, могут быть определены по формулам, приведенным в [12].

При представлении сдвигов фаз $\psi_{jк}$ по формулам (1.178) и (1.179) коэффициент эффективности в пределах корректности условия $\eta_{АЭ} = \eta_{АЭ}^{см}\cdot\eta_{АЭ}^{ксм}$ следует определять по формуле

$$\eta_{A\Theta} = 1 + \left[2\int_0^1 f(\bar{r}) \cdot \bar{r} \cdot d\bar{r} \right]^{-2} \times$$

$$\times \left[\sum_j \sum_\kappa \left(f_j \psi_j^{cм} \Delta\bar{P}_{j\kappa} \right) \right]^2 - \left[2\int_0^1 f(\bar{r}) \cdot \bar{r} \cdot d\bar{r} \right]^{-1} \times \qquad (1.181)$$

$$\times \left\{ \sum_j \sum_\kappa \left[f_j \left(\psi_j^{cм} \right)^2 \cdot \Delta\bar{P}_{j\kappa} \right] + \sum_j \sum_\kappa \left[f_j \left(\psi_j^{\kappa cм} \right)^2 \Delta\bar{P}_{j\kappa} \right] \right\}.$$

Оценку $\eta_{A\Theta}$ в функции от $\left(\xi_{\Theta\Sigma} \cdot \bar{D}_p \right)$ и $\bar{F}$ можно выполнить по графикам на рис.1.99, а количественное прогнозирование достижимых D_p, минимальной λ, а также требуемого ОСКИ $\xi_{\Theta\Sigma}$ в зависимости от заданного уровня снижения эффективности t по графикам на рис.1.100.

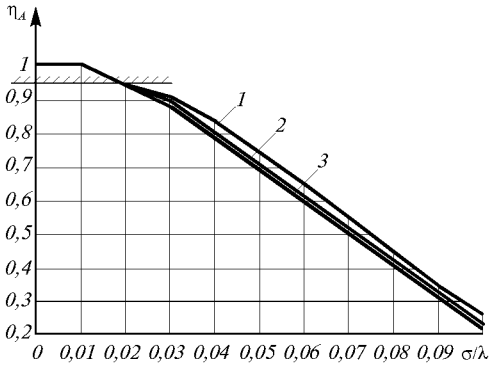


Рис.1.99. Зависимость коэффициента эффективности η_A от соотношения σ/λ :
$\bar{F} = 0{,}25$ (*1*); 0,35 (*2*); 0,45 (*3*)

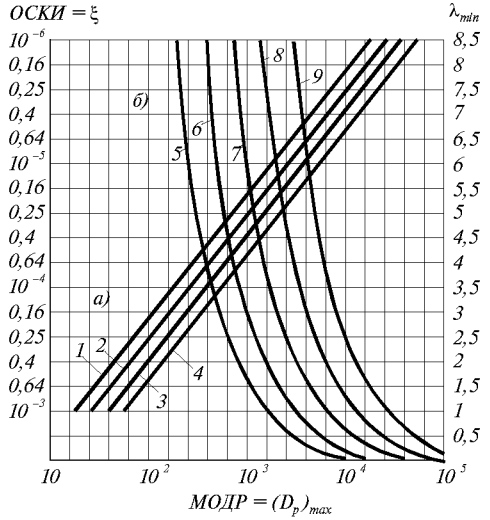


Рис.1.100. Зависимости ОСКИ и длины волны от МОДР и *t*-уровня потерь эффективности: *а* – для ОСКИ в функции от МОДР и *t*; *б* – для волны λ в функции от МОДР D_p; *t*=5% (*1*), 10 (*2*), 25 (*3*), 40% (*4*); D_p=16м (*5*); 32 (*6*), 64 (*7*), 128 (*8*), 256м (*9*)

В определенных случаях существует необходимость оценки искажений зеркала рефлектора без учета изменения взаимоположения рефлектора и контррефлектора. Провести ее можно с помощью формул (1.177) и (1.181) при занулении в них значений c_{nx}, c_{ny}, $\Delta\bar{F}_x$, $\Delta\bar{F}_y$ и $\Delta\bar{F}_z$. При этом предельно допустимые перемещения фокуса (облучателя, контррефлектора) описываются уравнениями:

$$\left(\Delta\bar{F}_z\right)_{np} = \frac{1}{8}\left(\bar{D}_p \cdot \bar{F}\right)^{-1} \cdot \left[1 - \left(4\bar{F}\right)^{-2} + \left(4\bar{F}\right)^{-4} \right]^{1/2} \times$$

$$\times \left\{ \left[1 - \left(4\bar{F}\right)^{-2} + \left(4\bar{F}\right)^{-4} \right]^{1/2} - \left[1 - \left(4\bar{F}\right)^{-2} \right] \right\}; \qquad (1.182)$$

$$\left(\Delta\bar{F}_y\right)_{np} = \left(\Delta\bar{F}_x\right)_{np} = 0{,}55\bar{D}_p^{-1}; \ \left(\Delta\alpha_{py}\right)_{np} = \left(\Delta\alpha_{Fx}\right)_{np} = 2{,}75\bar{D}_p^{-1}. \qquad (1.183)$$

Приближенную оценку деформационного (по минимуму) предела весовых деформаций $(\min \Delta N_{э\Sigma}^{св})$ в функции от диаметра рефлектора D_p, характерную для случая подвески зеркальной системы башенного типа, можно проводить по графику на рис.1.66. Спрогнозировать соответствующие этому случаю ветровые деформации при скорости ветра $V^{в} = 15$ м/с можно, установив долю ветровой нагрузки $\left(\kappa_{g}^{15} = Q_{\Sigma}^{g}/Q_{\Sigma}^{св}\right)$ по графику на рис.1.61. При других скоростях ветра следует пользоваться переходным коэффициентом $(V^{в}/15)^2$.

Зависимости между максимальными и среднеквадратическими весовыми деформациями приближенно описываются выражениями:

$$\left(\xi_{э}^{св}\right)^{см} = \left(\Delta N_{э\Sigma}^{св}\right)_{\max}^{см} \cdot \left(3D_p\right)^{-1}; \quad \left(\xi_{э}^{св}\right)^{ксм} = \left(\Delta N_{э\Sigma}^{св}\right)_{\max}^{ксм} \cdot \left(4D_p\right)^{-1} \qquad (1.184)$$

или, при использовании графика на рис.1.66:

$$\left.\begin{aligned} \left(\xi_{э}^{св}\right)^{см} &= \left(\sin\alpha_F - \sin\alpha_{F0}\right) \cdot \left(\min \Delta N_{э\Sigma}^{св}\right) \cdot \left(15D_p\right)^{-1}; \\ \left(\xi_{э}^{св}\right)^{ксм} &= \left(\cos\alpha_F - \cos\alpha_{F0}\right) \cdot \left(\min \Delta N_{э\Sigma}^{св}\right) \cdot \left(3{,}75D_p\right)^{-1}. \end{aligned}\right\} \qquad (1.185)$$

Ввиду того, что расхождение численных значений $\Phi^{св}$ и $\Phi^{в}$ не превышает 15–20%, приближенную оценку ветровых деформаций можно также проводить по формулам (1.184) и (1.185) при введении в них коэффициента $\kappa_{g} = \kappa_{g}^{15}\left(V_{нэ}^{в}/15\right)^2$.

Коэффициент эффективности η_m, отражающий снижение эффективности работы антенны вследствие рассеяния мощности конструкциями, расположенными перед раскрывом, определяется по формуле

$$\eta_m = 1 - \frac{2\nu\kappa_{ск}\bar{a}}{\pi} - \left\{\frac{\pi\bar{e}^2}{\nu\bar{a}} + 2\left(\bar{r}_{но} - \frac{\bar{b}}{\cos\beta}\right) - 2\bar{e} + \right.$$

$$+ \frac{\bar{a}^2}{2}\left[\frac{1 - \left(2\bar{F} - \bar{z}_p\right)tg\beta}{\bar{c}_1 tg\beta + \left(\bar{r}_{во} - \bar{b}\,/\,\cos\beta\right)}\right]^3 + 2\left(1 - \bar{r}_{но} + \frac{\bar{b}}{\cos\beta}\right) \times$$

$$\times \frac{-2\bar{F}tg\beta + 0{,}5\left(1 + r_{но} - \bar{b}\,/\,\cos\beta\right)}{\bar{c}_1 tg\beta + \left(\bar{r}_{во} - \bar{b}\,/\,\cos\beta\right)} + \qquad (1.186)$$

$$\left. + \frac{\left(tg\beta\,/\,24\bar{F}\right) \cdot \left[1 + \bar{r}_{но} - \bar{b}\,/\,\cos\beta + \left(\bar{r}_{во} - \bar{b}\,/\,\cos\beta\right)^2\right]}{\bar{c}_1 tg\beta + \left(\bar{r}_{во} - \bar{b}\,/\,\cos\beta\right)}\right\},$$

где ν – число ног опоры (обозначения см. на рис.1.101); $\kappa_{ск}$ – коэффициент, учитывающий радиосквозность ноги опоры, принимаемый по результатам испытаний;

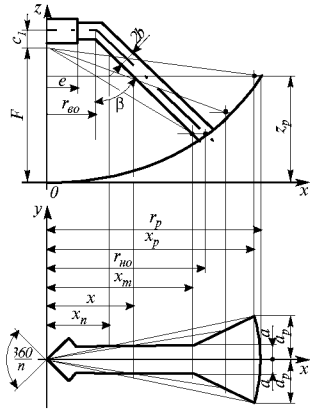


Рис.1.101. Схема образования тени в раскрыве рефлектора при «освещении» опоры контррефлектора плоским и сферическим волновыми фронтами

$$\bar{a} = 2a/D_p; \quad \bar{b} = 2b/D_p; \quad \bar{c}_1 = 2c_1/D_p; \quad \bar{e} = 2\bar{e}/D_p;$$
$$\bar{r}_{но} = 2r_{но}/D_p; \quad \bar{r}_{во} = 2r_{во}/D_p; \quad \bar{z}_p = 2z_p/D_p.$$

Место и задачи блоков оптимизации в процессе рационального проектирования каркаса формостабилизированного рефлектора и стабилизированной (по углу) несущей конструкции ОПУ описаны в [12].

Иногда бывает удобным непосредственное определение СКИ зеркала рефлектора приближенно по формуле

$$\sigma_{\Sigma} = \left(\sum_j \sum_к W_{jк}\right)^{-1/2} \left[\sum_j \sum_к \left(\delta_{jк}^2 \cdot W_{jк}\right)(n-1)^{-1}\right]^{1/2}, \qquad (1.187)$$

где $\delta_{jк}$, $W_{jк}$ – соответственно искажение и весовая функция СКИ $jк$-ой точки поверхности зеркала:

$$W_{jк} = \Delta\overline{P}_{jк} \cdot f_j\left(1 + z_j / F\right)^{-1/2}. \qquad (1.188)$$

Вероятность наступления предельных состояний (вероятность функционального отказа), например достижения потерь в эффективности значения t или достижения суммарного ОСКИ его предельного значения, идентична вероятности ν_{Σ} совместного появления учтенных некоррелирующих случайных явлений и нагрузок и равна произведению вероятностей ν_i превышения каждой из парциальных компонент рассмотренных величин:

$$\nu_{\Sigma} = \prod_i (\nu_i). \qquad (1.189)$$

Функциональная надежность прецизионных металлоконструкций, соответствующая указанной вероятности функционального отказа и равная $H_{\Sigma} = 1 - \nu_{\Sigma}$, не должна быть меньше заданной обеспеченности работы ЗА по времени:

$$H_{\Sigma} > \omega. \qquad (1.190)$$

Ввиду линейной зависимости между деформациями и нагрузкой вероятности $\nu_{iэ}$ превышения парциальными эксплуатационными искажениями рассмотренных величин можно принимать равным вероятностям превышения соответствующей нагрузкой принятых значений.

Полученные выше формулы для определения эксплуатационных искажений выведены при условии обеспечения номинальной геометрии и постоянства физических параметров конструкций. Для учета влияния физических и геометрических несовершенств конструкций (см.п.1.6.3) на эксплуатационные искажения можно прогнозировать суммарные искажения на основе рассмотрения всех компонент искажений как независимых случайных величин путем введения дополнительной компоненты $\sigma_э^н$, характеризующей как бы «дополнительные» эксплуатационные искажения, возникающие вследствие начальных несовершенств при действии основных видов нагружений:

$$\sigma_{\Sigma\Sigma} = \left[\sigma_{н\Sigma}^2 + \sigma_{э\Sigma}^2 + \left(\sigma_э^н\right)^2\right]^{1/2}. \qquad (1.191)$$

В соответствии с этим компонента $\sigma_э^н$ определяется как функция разброса всех тех параметров конструкций ЗА, которые влияют на их деформированное состояние в процессе эксплуатации:

$$(\sigma_э^н)^2 = \Sigma_i (\sigma_э^н)_i^2 = \left(\sigma_э^н\right)_E^2 + \left(\sigma_э^н\right)_S^2 + \left(\sigma_э^н\right)_{xy}^2 + \left(\sigma_э^н\right)_{пг}^2 + \left(\sigma_э^н\right)_{эц}^2, \qquad (1.192)$$

где i – индекс несовершенства; $(\sigma_э^н)_E$ – СКИ вследствие рассеяния модуля нормальной упругости E; $(\sigma_э^н)_S$ – то же вследствие рассеяния площади сечений S; $(\sigma_э^н)_{эц}$ – то же вследствие случайных эксцентриситетов; $(\sigma_э^н)_{пг}$ – то же вследствие погибей стержней; $(\sigma_э^н)_{xy}$ – то же вследствие начальных отклонений координат узлов конструкций.

Расчет $(\sigma_э^н)_i$ производится статистическим методом, исходя из предпосылки о нормальном законе распределения отклонений параметра от номинального значения и о доверительном интервале в следующей последовательности: 1) для каждой вариации случайных значений рассматриваемого i-го параметра (несовершенства) рассчитывается детерминированная схема конструкций и определяются перемещения каждого $j\kappa$-го П-узла; 2) осуществляется обработка результатов с вычислением вначале отклонений случайных перемещений $j\kappa$-го узла от его перемещения при номинальных значениях варьируемого параметра, а затем соответствующего СКИ по формуле

$$(\sigma_э^н)_i = \left[4\pi F^2 \cdot m \cdot \ln\left(1+\frac{r_p^2}{4F^2}\right)\right]^{-1/2} \times \times \left\{\Sigma_i \Sigma_\kappa \left[\left(1+\frac{r_p^2}{4F^2}\right)^{-1} \Delta\overline{P}_\kappa \Sigma_\tau \left(\delta\overline{N}_{j\kappa}\right)_{i\tau}^2\right]\right\}^{1/2}, \quad (1.193)$$

учитывающей неравнозначность влияния узлов на снижение эффективности, связанную с их расположением на поверхности, введением весовой функции. Здесь τ – счетчик вариантов случайных переборов варьируемого параметра; $\left(\sigma\overline{N}_{j\kappa}\right)_{i\tau} = \left(\Delta\overline{N}_{j\kappa}\right)_{i\tau} - \Delta\overline{N}_{j\kappa}$; m – количество переборов.

Случайные значения рассматриваемых параметров определяются с помощью программы СЛУЧАЙ, при этом пределы разброса, их математические ожидания и среднеквадратические значения принимаются согласно информации, изложенной в [12].Детерминированный расчет каждой закрепленной вариации случайных значений осуществляется с помощью стандартных программ РАСК, ПАРСЕК, ПАРАДОКС и т.д.

Результаты проведенных исследований свидетельствуют о том, что за исключением отклонений координат узлов, для всех прочих несовершенств СКИ не зависит от размеров конструкций. Это позволяет прогнозировать значение $\sigma_э^н$ при подобном изменении геометрии, приняв за эталонный образец какую-либо ЗА с известными параметрами, по формуле

$$\left(\sigma_э^н\right)_n = \left\{\kappa_\sigma^2\left[\left(\sigma_э^н\right)_{E,0}^2 + \left(\sigma_э^н\right)_{S,0}^2 + \left(\sigma_э^н\right)_{ШГ,0}^2 + \left(\sigma_э^н\right)_{ЭД,0}^2\right] + \kappa_L^2 \cdot \left(\sigma_э^н\right)_{xy,0}^2\right\}^{1/2} \quad (1.194)$$

причем

$$\kappa_\sigma = \kappa_n^2\left[1+\left(\kappa_Д^B\right)_0^2\right]^{1/2}\left[\kappa_n^{0,3} + \kappa_n^{-2} \cdot \left(\kappa_Д^B\right)_0^2 \cdot \left(\kappa_н\right)_n^2 \cdot \left(\kappa_н\right)_0^{-2}\right]^{1/2}; \quad (1.195)$$

$$\kappa_L = \left(0{,}45L_0^{-1/2} \cdot \kappa_n^{-1/2} + 0{,}01\right) \cdot \left(0{,}45L_0^{-1/2} + 0{,}01\right)^{-1}, \quad (1.196)$$

где все обозначения даны согласно [12, §6.9], а индексы «0» и «n» соответствуют эталонному и подобному образцам ЗА.

Важнейшими критериями качества вновь разрабатываемых ЗА являются масса и стоимость их конструктивно-механических систем. В связи с этим существует необходимость предварительной их оценки на стадии проектирования. Методики оценки экономической эффективности и прогнозирования технико-экономических характеристик, создаваемых ЗА по эталонному образцу, приведены в [12, §6.9].

На рис.1.102, 1.103, 1.104 даны некоторые числовые зависимости массы и стоимости зеркальных систем и ОПУ от диаметра рефлектора, установленные на базе данных по построенным ЗА.

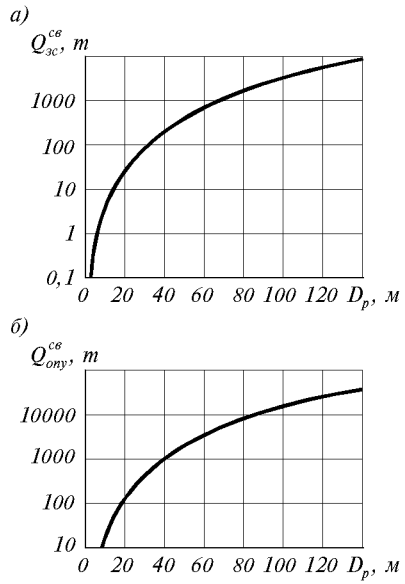


Рис.1.102. Зависимость массы зеркальной антенны типа РТ от диаметра рефлектора: *а* – зеркальной системы; *б* – ОПУ

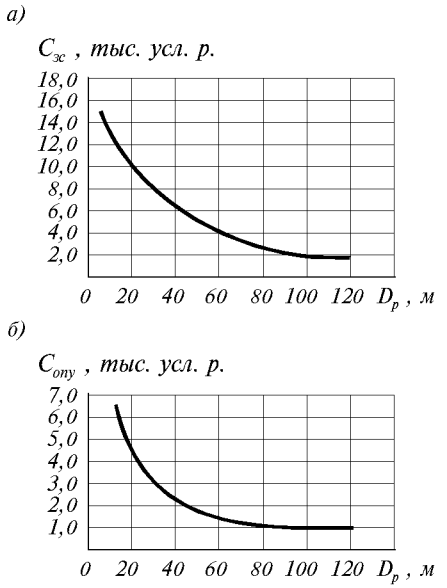


Рис.1.103. Зависимость удельной (за 1 т конструкции) стоимости в условных рублях зеркальной антенны типа РТ от диаметра рефлектора: *а* – зеркальной системы; *б* – ОПУ

Сравнительную оценку качества ЗА, предназначенную для работы в одинаковом диапазоне радиоволн, но имеющих различные конструктивные решения и размеры, можно производить по такому критерию экономической эффективности, как эффективный вес:

$$ЭВ = Q^{св}_{ксм} \cdot \left(\eta^{кон}_{\Sigma} \cdot D_p^{2,85}\right)^{-1} \left(\text{т} / \text{м}^3\right). \qquad (1.197)$$

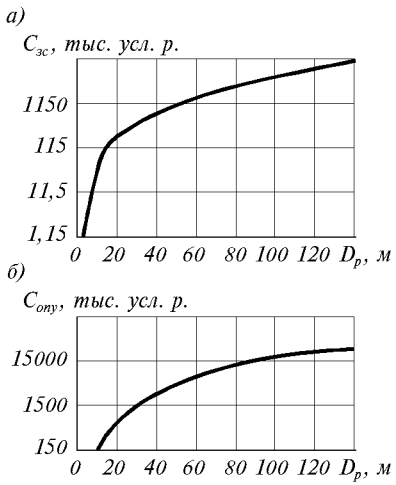


Рис.1.104. Зависимость стоимости в условных рублях зеркальной антенны типа РТ от диаметра рефлектора: *а* – зеркальной системы; *б* – ОПУ

Эффективный вес эталонного образца ЗА может быть при этом определен как функция от диаметра D_p и длины волны λ по графику на рис.1.105.

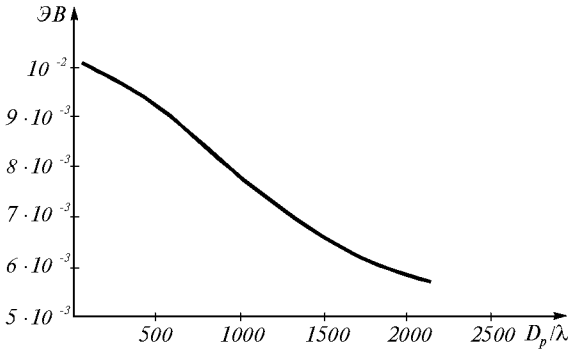


Рис.1.105. Зависимость эффективного веса от соотношения D_p/λ

Динамическая компонента угловых перемещений ФО определяется по формуле

$$\left(\Delta\theta_F^B\right)^Д = \left(m^B\right)^Д \cdot \left[J_{ум,аз}\sqrt{\left(n_0^2 - n^2\right) + 4\beta_з^2 \cdot n^2}\right]^{-1}, \qquad (1.198)$$

где $(m^B)^Д$ – динамические ветровые моменты, определяемые по формулам (1.121) – (1.124); $J_{ум,аз}$ – момент инерции системы относительно угломестной (азимутальной) оси; n_0 – частота собственных колебаний (качания) ЗА относительно исполнительных осей; $\beta_з$ – коэффициент затухания (демпфирования).

Причем $J_{ум,аз}$ может определяться как по программе САУНА, так и приближенно по формуле

$$J_i = J_0\left(\frac{D_{pi}}{D_{po}}\right)^{4,85} = J_0\kappa_n^{4,85}, \qquad (1.199)$$

то же и с частотой собственных колебаний ЗА n_0, которая определяется с помощью стандартных программ расчета типа РАСК, ПАРАДОКС, либо приближенно по формуле

$$n_0 = \left(\kappa_{привв} / J\right)^{1/2} = \kappa_n^{-0,925}, \qquad (1.199)$$

где $\kappa_{привв}$ – эквивалентная жесткость привода.

Коэффициент $\beta_з$ принимается равным 0,25% от критического затухания ЗА, т.е. затухания, при котором свободные колебания отсутствуют:

$$\beta_з = \frac{2\pi\, n_0}{400}, \qquad (1.201)$$

а количественное определение стандарта

$$\sigma\theta_{ум,аз} = \sum_{i=1}^{20}\left(\theta_{ум,аз}\right)_i^{1/2} \qquad (1.202)$$

удобно проводить с помощью указанных выше номограмм.

Для узловых соединений конструкций ЗА, подвергающихся в процессе эксплуатации циклическому нагружению, необходимо производить поверочные расчеты на усталость. При этом предполагается наличие в конструкции технологических дефектов, размеры которых не превышают допускаемые по СНиП III-18-75 и другим нормативным документам.

1.7. Динамические гасители колебаний

За последние 25 лет в нашей стране для уменьшения амплитуды колебаний высоких сооружений нашли широкое применение динамические гасители колебаний. Динамическим гасителем колебаний называется устройство, состоящее из инерционной массы, присоединяемой с помощью упругой связи или связи, соединенной параллельно с демпфирующим элементом, к защищаемой конструкции. Параметры гасителя колебаний – инерционная масса, декремент колебаний и частота настройки (парциальная частота) определяются расчетом.

При реализации подобранных параметров в конструкциях элементов гасителя колебаний с допустимыми отклонениями, инерционная масса гасителя совершает колебания, амплитуды которых, как правило, превышают амплитуду колебаний сооружения. Возникающие при этом упругие и диссипативные силы в элементах гасителя, воздействуя на защищаемое сооружение, уменьшают амплитуду его колебаний.

Динамические гасители колебаний в зависимости от диапазона частот, в котором находится частота настройки гасителя, делятся на три группы:

– высокочастотные, с диапазоном частот от 0,6 до 2 Гц;

– среднечастотные, с диапазоном частот от 0,2 до 0,6 Гц;

– низкочастотные, с диапазоном частот до 0,2 Гц.

Конструктивные решения гасителей колебаний, в основном, определяются частотой их настройки.

Среднечастотные гасители колебаний представляют собой, как правило, маятниковые гасители (рис.1.106).

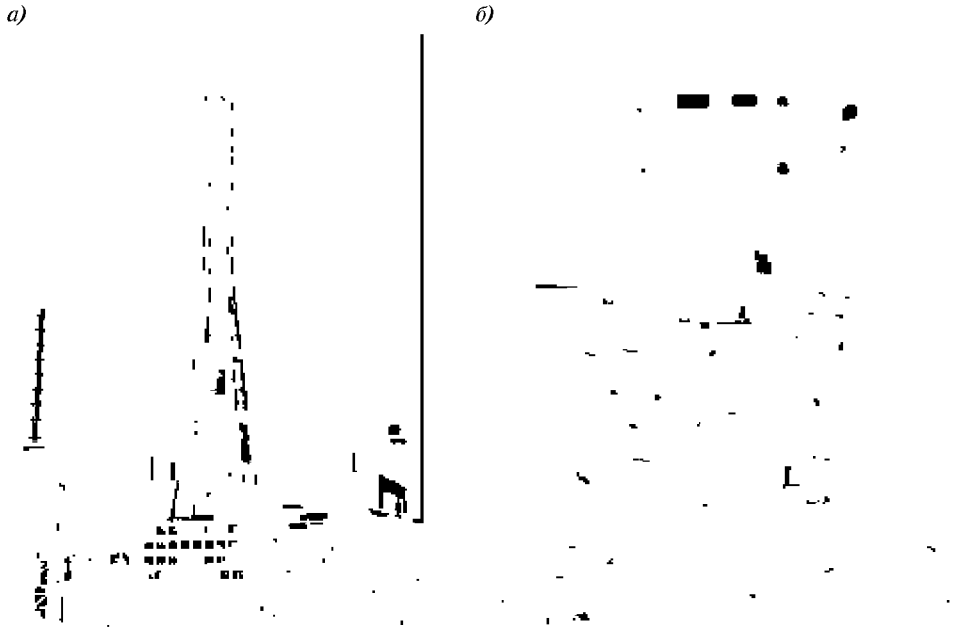


Рис.1.106. Маятниковый гаситель колебаний
а – вытяжная башня, на которой установлен динамический гаситель колебаний;
б – общий вид маятникового динамического гасителя колебаний

Для *высокочастотных гасителей колебаний* кроме маятникового устройства необходима установка дополнительных упругих элементов, например, пружины.

В *гасителях колебаний низкочастотного спектра* в качестве конструктивного решения используют комбинированные системы, позволяющие значительно уменьшить габариты гасителя колебаний по высоте.

При разработке конструкций гасителей колебаний такие их параметры, как парциальная частота, инерционная масса, затухание, принимаются в соответствии с динамическими параметрами сооружения, полученными в результате его расчета. Поскольку параметры натурного сооружения могут отличаться от расчетных, то требуется настройка гасителей колебаний, т.е. изменение его парциальной частоты до совпадения с частотой собственных колебаний сооружения, определенной экспериментальным путем на натурном сооружении. Для этой цели в конструкциях гасителей предусматриваются соответствующие устройства.

Условия эксплуатации гасителей колебаний отличаются тем, что их конструкции не могут находиться под постоянным наблюдением. В связи с этим они должны быть просты по устройству и нечувствительны к атмосферным воздействиям, являясь по существу строительной металлоконструкцией.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Богомолов А.Ф., Соколов А.Г., Попереченко Б.А., Поляк В.С.** О проблеме создания комплекса современных экономичных радиотелескопов. /Под ред. А.А. Пистелькорса. //Антенны. Вып.24. М., Связь, 1976.
2. Большие управляемые радиоантенны – климатология и аэродинамика (сборник докладов) Тр. Нью-Йоркской академии наук. Т.116, ч. 1.июнь, 1964.
3. **Кондра М.П., Остроумов Б.В.** Опыт применения динамических гасителей колебаний для виброзащиты башен. //Виброзащита в строительстве. Международный симпозиум. Доклады и сообщения. Т.2. Л., Промстройпроект,1984.
4. **Коренев Б.Г., Резников Л.М.** Динамические гасители колебаний: Теория и технические приложения. М., Наука, 1988.
5. **Лилеев А.Ф., Селезнева Е.Н.** Методы расчета пространственных вантовых систем. М., Стройиздат, 1964.
6. **Малаеб Валид.** Разработка метода расчета сооружений башенного типа на нагрузку от порывов ветра. Университет Дружбы народов им.Лумумбы. Дисс. на соискание ученой степени к.т.н. М., 1991.
7. **Межид К.П.** Оптимальное проектирование конструкций. М., Высшая школа, 1979.
8. **Мельников Н.П.** Антенные сооружения. М., Знание, 1969.
9. **Морозов Е.П., Шофлер Л.В.** Особенности проектирования антенно-мачтовых сооружений длинноволновых радиостанций. //Материалы по металлическим конструкциям: Сб. Вып.15. М., Стройиздат, 1970.
10. **Поляк В.С.** Начальные апертурные искажения полноповоротных параболических антенн. //Проектирование металлических конструкций: Инф.-рефер.сб. Сер.VII, вып.10 (18). М., ЦИНИС Госстроя, 1969.
11. **Поляк В.С.** Рекомендации по специальной системе допусков в антенном строительстве. //Проектирование металлических конструкций: Инф.-рефер.сб. Сер. VII, вып. 1(62), 1976.
12. **Поляк В.С., Бервалдс Э.Я.** Прецизионные конструкции вертикальных радиотелескопов: опыт создания, проблемы анализа и синтеза. Рига, Зинатне, 1990.
13. Руководство по расчету зданий и сооружений на действие ветра. М., Стройиздат, 1978.
14. Руководство по расчету элементов мачт на выносливость. М.,1976.
15. **Савицкий Г.А.** Основы расчета радиомачт. М., Связьиздат, 1953.
16. **Савицкий Г.А.** Антенные устройства. М., Связьиздат, 1972.
17. **Савицкий Г.А.** Ветровая нагрузка на сооружение. М., Стройиздат, 1972.
18. **Соколов А.Г.** Радиобашни обтекаемого типа. //Бюллетень строительной техники. № 5-6. 1944.
19. **Соколов А.Г.** Выбор оптимального решения телевизионных опор большой высоты. //Материалы по стальным конструкциям: Сб. №1. 1957.
20. **Соколов А.Г.** Действительная работа фланцевых соединений. //Материалы по стальным конструкциям: Сб. №2, 1958.
21. **Соколов А.Г.** Расчет мачт методом заданных эпюр моментов. //Строительная механика и расчет сооружений. №2. 1959.
22. **Соколов А.Г.** Об определении относительного угла наклона оттяжек в мачтах. //Материалы по стальным конструкциям. Сб. №4, 1959.
23. **Соколов А.Г.** Опоры линий передачи. М., Госстройиздат, 1961.
24. **Соколов А.Г.** Современное состояние и перспективы развития металлических конструкций антенных устройств. //Материалы совещания по металлоконструкциям. М., Стройиздат, 1967.
25. **Соколов А.Г.** Металлические конструкции антенных устройств. М., Стройиздат, 1971.
26. **Соколов А.Г., Поляк В.С.** Развитие конструктивных способов увеличения эффективности полноповоротных параболических антенн. //Изв.вузов. Сер. «Радиофизика», Т.XVI, №5, 1973.
27. **Соколов А.Г., Поляк В.С.** Технико-экономические характеристики современных больших радиотелескопов. //Антенны. /Под ред. А-А.Пистелькорса. Вып.25. М., Связь, 1977.
28. Справочник по динамике сооружений. Под ред. Б.Г. Коренева и И.М. Рабиновича. М., Стройиздат, 1972.
29. Справочник проектировщика, Динамический расчет сооружений на специальные воздействия. М., Стройиздат, 1981.
30. **Стрелецкий Н.С., Стрелецкий Д.Н.** Проектирование и изготовление экономичных металлических конструкций. М., Стройиздат, 1964.
31. Строительные нормы и правила. СНиП 2.01.07-85. Нагрузки и воздействия. М., 1996.

32. Строительные нормы и правила. СНиП II-23-81*. Стальные конструкции. М., 1995.
33. **Тимошенко С.П.** Устойчивость упругих систем. М., Гостеориздат, 1955.
34. Указания по проектированию металлических конструкций антенных сооружений объектов связи. СН 376-67.
35. **Цейтлин А.И., Кусаинов А.А.** Методы учета внутреннего трения в динамических расчетах конструкций. Алма-Ата, Наука, 1987.

ГЛАВА 2

ТРАНСПОРТЕРНЫЕ ГАЛЕРЕИ

2.1. Общие положения

Галерея – протяженная, полая строительная конструкция, предназначенная для размещения и укрытия технологических коммуникаций. В настоящей главе рассмотрены основные положения проектирования конвейерных галерей, предназначенных для размещения внутри них ленточных конвейеров, транспортирующих сыпучие материалы. При проектировании транспортерных галерей необходимо соблюдать требования СНиП 2.09.03-85 «Сооружения промышленных предприятий», целесообразно также использовать «Пособие по проектированию конвейерных галерей» (ГПИ Ленпроектстальконструкция Госстроя СССР, Москва, Стройиздат 1989 г.), распространяющееся на проектирование галерей для предприятий черной и цветной металлургии, химической и угольной промышленности и промышленности строительных материалов. В дальнейшем наименование «конвейерные галереи» заменено термином «галереи». Основные положения проектирования галерей, представленные в настоящей главе, относятся к галереям:

- возводимым в районах с расчетными температурами не ниже -50°С и сейсмичностью не более 6-ти баллов,
- отапливаемым,
- с конвейерами, опирающимися на пол,
- с сухим способом удаления пыли и просыпи.

При необходимости проектирования галерей другого назначения или при других условиях эксплуатации должны учитываться дополнительные специальные требования. Схема трассы галерей, уклоны, внутренние габаритные размеры поперечных сечений, размещение опор конвейеров и нагрузки устанавливаются технологической организацией и являются основным содержанием задания на проектирование металлоконструкций, форма которого представлена в таблице 2.1.

Приведенная форма задания на проектирование металлоконструкций галереи предполагает получение от заказчика сведений, необходимых не только для расчета конструкций в соответствии с указаниями справочника, но и для возможности проверки пролетного строения на резонанс. Работа пролетных строений галерей при резонансных колебаниях не допускается по условиям эксплуатации конструкций и оборудования. Анализ результатов динамических расчетов показывает, что в условиях резонанса напряжения в элементах конструкции возрастают не более, чем на 15–20%. Наличие при расчете по предельным состояниям ряда дифференцированных коэффициентов запаса, учитываемых одновременно, а также специфика назначения расчетных сочетаний нагрузок обеспечивает конструкциям пролетного строения в большинстве случаев определенный запас прочности. Уточнение величины динамической добавки может быть выполнено в соответствии с приложением 3 «Пособия по проектированию конвейерных галерей». Из многолетнего опыта эксплуатации галерей известно, что резонансные колебания – ред-

кое явление и их появление не приводит к возникновению аварийной ситуации, реализующейся в относительно короткий срок.

В случае же возникновения резонансных колебаний в процессе эксплуатации галереи следует производить отстройку от резонанса с помощью специальных конструктивных мероприятий или установки гасителей.

Таблица 2.1. Задание технологической организации на проектирование строительной части галереи №____ ленточного конвейера №_____ объекта_____ предприятия №_____

Характеристика галереи и конвейера	
Схема трассы конвейера	
Угол наклона галереи α	
Число конвейеров	
Условия отопления и вентиляции	
Способ уборки пыли и просыпи	
Степень огнестойкости	
Ширина ленты конвейера, мм	
Расстояние между осями стоек станины l_1, мм	
Диаметр роликов роликоопоры верхней ветви d_p, мм	
Шаг роликоопор верхней ветви l_p, мм	
Скорость ленты v, м/с	
Коэффициент сопротивления движению ленты	
Расположение приводных и натяжных устройств: соосное или несоосное (указывается для двухконвейерных галерей)	
Специальные требования	
Характеристика транспортируемого груза	
Насыпная плотность γ, т/м^3	
Влажность, %	
Температура, °С	
Пылящий, непылящий	
Агрессивность к строительным конструкциям	
Сгораемый – несгораемый	
Взрывоопасный – невзрывоопасный	
Нормативные технологические нагрузки на одну опору стойки конвейера	
Вертикальная $Q_в$, кН	
Продольная $Q_п$, кН	

2.2. Основные компоновочные схемы и типы конструктивных решений

Галереи состоят из пролетных строений и опор. По типу конструктивных решений пролетные строения галереи принадлежат к одной из трех групп:

- несущие конструкции пролетных строений из стальных ферм с параллельными поясами, с ограждающими конструкциями панельного типа из различных материалов (рис.2.1);

- несущие конструкции пролетных строений из сварных двутавровых балок, в том числе – с гибкими стенками, с ограждающими конструкциями покрытия и перекрытия различного типа (рис.2.2);
- несущие конструкции пролетных строений из металлических оболочек прямоугольного или круглого сечения, совмещающих несущие и ограждающие функции (рис.2.3, 2.4).

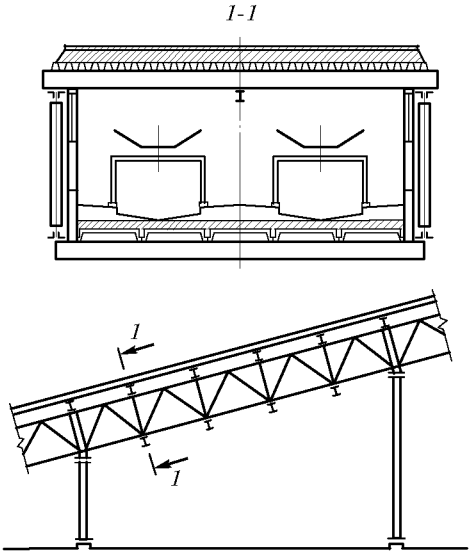


Рис.2.1. Пролетное строение конвейерной галереи с несущими конструкциями из ферм с параллельными поясами

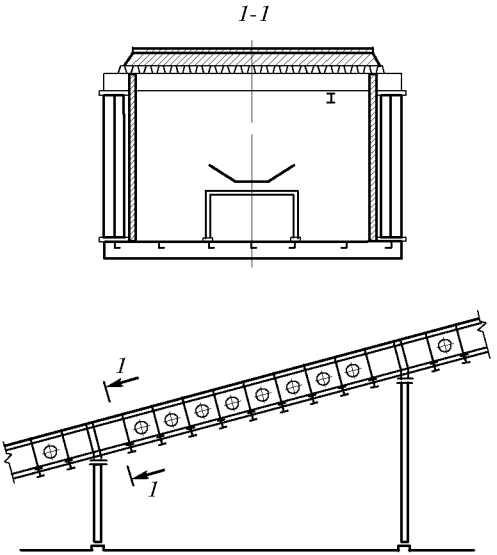


Рис.2.2. Пролетное строение конвейерной галереи с несущими конструкциями из сварных двутавровых балок

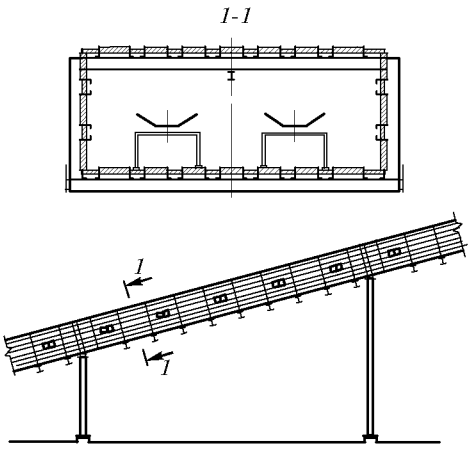


Рис.2.3. Пролетное строение конвейерной галереи с несущими конструкциями из оболочки прямоугольного сечения

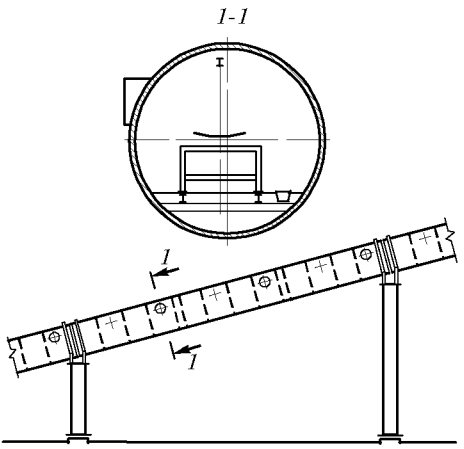


Рис.2.4. Пролетное строение конвейерной галереи из круглой цилиндрической оболочки

Стальные опоры галерей выполняются двух типов: плоские (качающиеся) и пространственные (неподвижные). Длины пролетных строений галереи следует принимать, как правило, равными 18, 24, 30, 36, 42 и 48 м. Допускается, при обосновании, назначать пролеты менее 18 и более 48 м, по возможности кратными 3 м. Конструктивные решения этих пролетов должны приниматься индивидуальными. При назна-

чении длин пролетов, в соответствии с генпланом, следует иметь в виду, что чем выше опоры, тем эффективнее применение увеличенной длины пролетного строения.

В галереях большой протяженности необходимо предусматривать температурные швы. Зазор в температурном шве принимается не менее 100 – 200 мм. В температурном блоке галерей следует предусматривать одну неподвижную опору, обеспечивающую устойчивость конструкции в продольном направлении. В качестве такой опоры допускается использовать перегрузочные узлы. Наибольшая длина температурного блока неотапливаемых и отапливаемых пролетных строений с расположением несущих конструкций снаружи, определяемая как расстояние от неподвижной опоры до температурного шва, не должна превышать 130 м в районах с расчетной температурой воздуха выше или равной минус 40°С и 100 м – при расчетной температуре ниже минус 40°С. В необходимых случаях возможно принимать бóльшую длину температурного блока, допустимость которой должна быть подтверждена расчетом.

При проектировании галерей возможны три принципиальные схемы их продольной компоновки.

Схема *1* предусматривает неподвижное закрепление галереи в нижней части температурного блока (рис.2.5 *а*).

Схема *2* предусматривает устройство неподвижной опоры в середине галереи (рис.2.5 *б*). Во избежание дополнительных воздействий от галереи на каркас здания примыкание пролетных строений в схемах *1* и *2* осуществляется консольно. В целях уменьшения длины консоли плоскую опору рекомендуется устанавливать в непосредственной близости от здания. Примыкание к зданию следует решать по аналогии с температурным швом.

Схема *3* (рис.2.5 *в*) используется, если необходимо осуществить опирание верхней части пролетного строения непосредственно на здание (невозможность установки вблизи здания плоской опоры из-за наличия пониженного пролета здания, подземных коммуникаций, железнодорожных путей и др.). Возможность температурных перемещений в этом случае обеспечивается введением дополнительного температурного шва на парных плоских опорах, независимо от длины

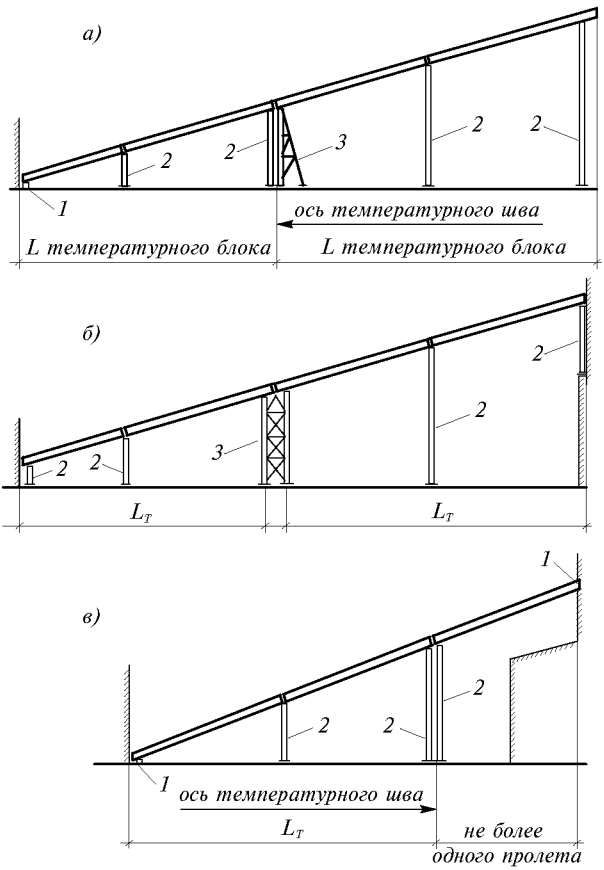


Рис.2.5. Принципиальные схемы продольной компоновки галерей

а – схема *1*; *б* – схема *2*; *в* – схема *3*; *1* – неподвижное закрепление; *2* – плоская (качающаяся) опора; *3* – пространственная (неподвижная) опора

галереи. В зависимости от общей длины галереи, каждая из трех схем, приведенных выше, допускает возможность устройства промежуточных температурных швов с соответствующим размещением плоских и пространственных опор.

2.3. Расчет строительных металлоконструкций галерей

2.3.1. Общие положения расчета. При проектировании галерей выполняются расчеты пролетных строений, опор и фундаментов. Все пролетные строения, различные по конструктивным решениям и типам поперечных сечений, работают по балочной схеме. Расчеты различных типов пролетных строений имеют общие принципы, характерные для балочных конструкций и специфические особенности, характерные для работы конструкций каждого типа. Для рассматриваемых типов пролетных строений расчеты на прочность, устойчивость, деформативность и динамические воздействия аналогичны по структуре и последовательности и состоят из следующих этапов:

- сбор местных нагрузок на элементы покрытия и перекрытия и определение расчетных схем;
- расчет элементов покрытия и перекрытия на местные нагрузки, подбор сечений элементов по условиям прочности, устойчивости и деформативности;
- определение нагрузок на несущие конструкции пролетных строений;
- расчет несущих конструкций пролетных строений и подбор их сечений по условиям прочности, устойчивости и деформативности;
- расчет узлов и соединений пролетного строения;
- определение нагрузок на опоры и расчет опор;
- определение нагрузок на фундаменты.

Анализ результатов проверки выносливости продольных конструкций и балок перекрытия пролетных строений, выполненной по указаниям гл.9 СНиП II.23-81*, показал, что в связи с относительно незначительной величиной динамических добавок коэффициент асимметрии цикла даже в условиях резонансных колебаний близок к единице.

2.3.2. Расчет пролетных строений с несущими конструкциями из ферм. Стальные конструкции пролетных строений этого типа при расчете расчленяются на плоские системы:

- две вертикальные плоские фермы, воспринимающие всю нагрузку в пролете и передающие ее на опоры;
- система связей и поперечных балок покрытия;
- система связей и балок перекрытия, несущих основные технологические нагрузки.

В пролетных строениях с фермами расчету на прочность, устойчивость и деформативность, в зависимости от характера их работы, подлежат следующие элементы в указанной ниже последовательности

- поперечные балки покрытия – на вертикальные нагрузки от массы снега, пыли, строительных конструкций, промпроводок а также на воздействие продольных нагрузок и скатных составляющих с учетом эксцентриситета их приложения по отношению к осям балок;
- поперечные балки перекрытия – на вертикальные нагрузки от массы строительных конструкций и технологических нагрузок, а также на продольные технологические нагрузки и скатные составляющие с учетом их эксцентриситетов;
- вертикальные фермы – на узловые нагрузки, передаваемые на них балками и связями покрытия и перекрытия;
- связевые системы по покрытию и перекрытию – на восприятие ветровых нагрузок, а также на скатные составляющие в зависимости от наличия и схемы расположения тяжей;

– тяжи (при их наличии) связевых систем – на передаваемые на них с поперечных балок продольные усилия от технологического оборудования и скатных составляющих;
– опорные рамы пролетных строений, состоящие из крайних балок покрытия и опорных стоек и обеспечивающие геометрическую неизменяемость и поперечную жесткость пролетного строения, – на восприятие ветровой нагрузки;
– опорные узлы ферм – на восприятие и передачу реакций с пролетного строения на подвижные и неподвижные опоры, причем для последних также на дополнительные узловые моменты за счет эксцентричной передачи продольных усилий.

2.3.3. Расчет пролетных строений с несущими конструкциями из сварных двутавровых балок. Расчет пролетных строений галерей с несущими конструкциями из сварных двутавровых балок выполняется в соответствии со СНиП II.23-81*.

Применение балок с гибкой стенкой, в соответствии с п.18.2 СНиП II.23-81*, разрешается при действии на них статической нагрузки. Учитывая, что динамические воздействия от ленточных конвейеров общего назначения невелики, балки с гибкой стенкой могут быть допущены к применению в качестве основных несущих конструкций пролетных строений. Для повышения надежности балок с гибкой стенкой, в отличие от СНиП, предельное состояние расчетных поперечных сечений балки определяется фибровой текучестью верхней кромки стенки в сжатой зоне. Такое предельное состояние обеспечивает надежность работы балки в условиях динамических воздействий.

В связи с этим методика расчета, приведенная ниже несколько усложнена по сравнению со СНиП II.23-81*.

Применение в качестве несущих конструкций пролетных строений балок с гибкой стенкой при возможности появления резонансных колебаний, т.е. при

$$\theta_1' \le \omega \le \theta_1'' \qquad (2.1)$$

не допускается.

В формуле (2.1) θ_1', θ_1'' – область значений первой частоты θ_1 свободных колебаний пролетного строения;

$$\omega = 2v/d_p \qquad (2.2)$$

– среднее значение частоты динамического возмущения от конвейера, где v – скорость движения ленты, d_p – диаметр роликов конвейера.

В качестве несущих конструкций пролетных строений галерей допускается применение стальных разрезных балок симметричного двутаврового сечения с условной гибкостью стенки $6 \le \bar{\lambda}_w \le 13$. Допускается применять стали с пределом текучести до 430 МПа.

Условная гибкость стенки

$$\bar{\lambda}_w = \frac{h}{t}\sqrt{R_y/E} \qquad (2.3)$$

где: t, h – толщина и высота стенки балки; R_y – расчетное сопротивление стали по пределу текучести; E – модуль упругости стали.

Пролетное строение рассчитывается на горизонтальные (продольную и поперечную) и вертикальную нагрузки. Горизонтальная поперечная нагрузка воспринимается верхней и нижней горизонтальными связевыми фермами, которые образованы поясами балок и соединительными решетками. Предельное допустимое напряжение σ_u в сжатом поясе, обусловленное изгибом балки в плоскости стенки, устанавливается из условия обеспечения устойчивости внецентренно-сжатого стержня таврового сечения, состоящего из пояса и примыкающего к нему участка стенки высотой $0{,}85t\sqrt{E/R_y}$

$$\sigma_u \psi_0 \le c\varphi_y R_y \gamma_c - \sigma_c . \qquad (2.4)$$

Здесь σ_c – напряжение в сжатом поясе балки, обусловленное действием горизонтальных продольных и поперечных нагрузок и определяемое в результате расчета

горизонтальной связевой фермы; γ_c – коэффициент условий работы; φ_y – коэффициент продольного изгиба стержня в направлении, параллельном полке балки.

Коэффициент c следует определять в соответствии с п. 5.31 СНиП II-23-81* по формуле

$$c = \beta_0/(1+0{,}7m_x). \tag{2.5}$$

Здесь $\beta_0 = 1$, если $\lambda_y \le \lambda_c$, и $\beta_0 = \sqrt{\varphi_c/\varphi_y}$, если $\lambda_y > \lambda_c$, где λ_y – гибкость стержня из плоскости стенки; $\lambda_c = 3{,}14\sqrt{E/R_y}$ – граничное значение гибкости λ_y; φ_c – значение коэффициента φ_y при $\lambda_y = \lambda_c$.

За расчетную длину стержня при вычислении гибкости принимается расстояние между смежными узлами решетки.

Относительный эксцентриситет m_x:

$$m_x = \frac{y_1(1-\psi_c)}{y_1\psi_c + y_2}, \tag{2.6}$$

где y_1 и y_2 – расстояние от нейтральной оси таврового сечения до крайних волокон; ψ_c – коэффициент, вычисляемый по формуле

$$\psi_c = 1 - \frac{0{,}85}{\bar{\lambda}_w}(1+\psi). \tag{2.7}$$

Коэффициент ψ определяется с помощью формул:

$$\psi = \frac{v}{2u} + \left[\left(\frac{v}{2u}\right)^2 + \frac{w}{u}\right]^{1/2} \tag{2.8}$$

$$u = \frac{A_f}{th} + \frac{1}{2}\left(1 + \frac{0{,}72}{\bar{\lambda}_w^2}\right); \quad v = \frac{0{,}85}{\bar{\lambda}_w}\left(1 - \frac{0{,}85}{\bar{\lambda}_w}\right) \tag{2.9}$$

$$w = \frac{A_f}{th} + \frac{0{,}85}{\bar{\lambda}_w}\left(1 - \frac{0{,}425}{\bar{\lambda}_w}\right) \tag{2.10}$$

где A_f – площадь сечения полки балки.

Коэффициент ψ_0, входящий в определяющее неравенство:

$$\psi_0 = \frac{y_1\psi_c + y_2}{y_1 + y_2} \tag{2.11}$$

Прочность балок пролетного строения при изгибе в плоскости стенки проверяется в соответствии с п.18.2* СНиП II-23-81* по формуле

$$(M/M_u)^4 + (Q/Q_u)^4 \le 1 \tag{2.12}$$

где M и Q – значения изгибающего момента и поперечной силы в рассматриваемом сечении, определяемые в результате статического расчета балки; M_u и Q_u – предельные значения момента и поперечной силы, воспринимаемые балкой при изгибе в плоскости стенки.

Предельное значение изгибающего момента определяется формулой

$$M_u = \sigma_u th^2\left\{\frac{A_f}{th} + \frac{0{,}85}{\bar{\lambda}_w}\left[1 - \frac{0{,}425}{\bar{\lambda}_w}(1+\psi)\right]\left(1 - \frac{0{,}425}{\bar{\lambda}_w}\right) - \frac{1}{6}\frac{\psi^3}{(1+\psi)^2}\right\} \tag{2.13}$$

соответствующей закритической стадии работы стенки в упругой области.

Предельное значение поперечной силы

$$Q_u = 0{,}9R_s th\left[\frac{\tau_{cr}}{R_s} + 3{,}3\left(1-\frac{\tau_{cr}}{R_s}\right)\frac{\beta\mu}{1+\mu^2}\right] \qquad (2.14)$$

где R_s – расчетное сопротивление стали сдвигу; τ_{cr}, μ – критическое касательное напряжение и отношение размеров отсека стенки, определяемые в соответствии с п.7.4* СНиП II-23-81; β – коэффициент, вычисляемый по формулам:

при $\alpha \le 0{,}03$ $\quad \beta = 0{,}05 + 5\alpha \ge 0{,}15$;

при $0{,}03 < \alpha \le 0{,}1$ $\quad \beta = 0{,}11 + 3\alpha \le 0{,}40$.

Здесь $\alpha = 8W_{\min}(h^2 + a^2)/(th^2a^2)$; $W_{\min}$ – минимальный момент сопротивления таврового сечения, состоящего из сжатого пояса балки и примыкающего к нему участка стенки высотой $0{,}5t\sqrt{E/R_y}$ (относительно собственной оси тавра, параллельной поясу балки); a – шаг ребер жесткости.

Жесткостные характеристики соединительной решетки должны обеспечивать общую устойчивость балки. Площадь поперечного сечения раскоса A_d должна удовлетворять условию:

$$\frac{A_d}{I_f}\cdot\frac{b^2d^3}{l^3} > 120 \qquad (2.15)$$

где: I_f – момент инерции полки балки в своей плоскости; l – длина раскоса; d – длина проекции раскоса на ось галереи; b – расстояние между осями балок.

Поперечные промежуточные ребра жесткости, сечения которых следует принимать не менее указанных в п.7.10 СНиП II-23-81*, должны быть рассчитаны на устойчивость как стержни, сжатые силой N, определяемой по формуле:

$$N = 3{,}3R_s th\left(1-\frac{\tau_{cr}}{R_s}\right)\frac{\beta\mu}{1+\mu^2}, \qquad (2.16)$$

где все обозначения формулы (2.16) смотри выше.

Значение N следует принимать не менее сосредоточенной нагрузки, расположенной над ребром.

Расчетную длину стержня следует принимать равной $l_{ef} = h(1-\beta)$ но не менее $0{,}7h$.

Симметричное двухстороннее ребро следует рассчитывать на центральное сжатие, одностороннее - на внецентренное сжатие с эксцентриситетом, равным расстоянию от оси стенки до центра тяжести расчетного сечения стержня. В расчетное сечение стержня следует включать сечение ребра жесткости и полосы стенки шириной $0{,}65t\sqrt{E/R_y}$ с каждой стороны ребра. Участок стенки балки пролетного строения над опорой следует укреплять двухсторонним опорным ребром жесткости, которое конструктивно представляет собой стойку опорной рамы, обеспечивающей пространственную жесткость блока пролетного строения. На расстоянии не более $1{,}3t\sqrt{E/R_y}$ от опорного ребра следует устанавливать промежуточное двухстороннее ребро жесткости. Все ребра жесткости должны быть приварены к верхнему поясу. При определении прогиба балок момент инерции поперечного сечения брутто балки следует уменьшать умножением на коэффициент $\alpha = 1{,}2 - 0{,}033\bar{\lambda}_w$. Отношение ширины свеса сжатого пояса к его толщине должно быть не более $0{,}38\sqrt{E/R_y}$.

В целях упрощения расчета взамен формулы (2.13) для определения предельного значения изгибающего момента M_u может быть применена более простая методика, приведенная в п.18.2* СНиП II.23-81* с введением поправочного коэффициента 0,9:

$$M_u = 0{,}9R_y th^2\left[\frac{A_f}{th} + \frac{0{,}85}{\bar{\lambda}_w}\left(1 - \frac{1}{\bar{\lambda}_w}\right)\right] \qquad (2.17)$$

В целях дальнейшего снижения расхода стали балки с гибкой стенкой возможно проектировать несимметричного двутаврового сечения с облегченным нижним поясом. Расчет в этом случае должен выполняться по специально разработанной методике.

2.3.4. Расчет пролетных строений с несущими конструкциями из ребристых оболочек прямоугольного сечения. Расчетной схемой для пролетных строений в виде протяженной ребристой оболочки прямоугольного поперечного сечения является однопролетная коробчатая балка, обшивка которой совмещает несущие и ограждающие функции. По периметру поперечное сечение обшивки балки набирается из С-образных профилей, чередующихся с тонкими плоскими листами. В стенах коробки предусмотрены подкрепленные вырезы под оконные проемы. Расчетная схема шпангоута представлена, на рис.2.6. Расчет общей прочности пролетного строения как изгибаемого стержня, нагруженного поперечной нагрузкой и внецентренными продольными усилиями, состоит в определении изгибающих моментов, поперечных и продольных сил в его расчетных сечениях и в проверке прочности по главным, нормальным и касательным напряжениям в соответствии с главой СНиП II-23-81*.

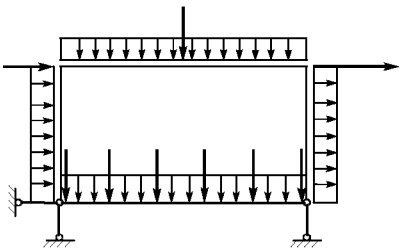


Рис.2.6. Схема нагрузок на поперечную раму шпангоута

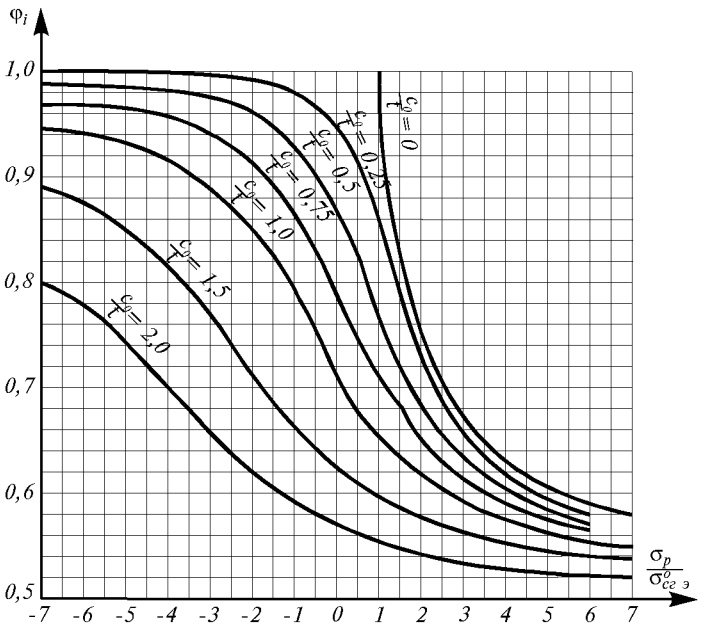


Рис.2.7. График для определения редукционных коэффициентов пластин

Характеристики жесткости расчетных поперечных сечений коробчатой балки пролетного строения – площади и моменты инерции – определяются с учетом неполного включения в работу на изгиб обшивки путем введения в характеристики жесткости обшивки редукционных коэффициентов $\varphi_i < 1$, переменных по высоте балки. Определение их величин производится по графику рис.2.7 или по более точным данным таблицы 2.2.

Таблица 2.2. Редукционные коэффициенты φ_i для ребристых пластин с погибью c_0 и поперечной нагрузкой q

q кПа	$\frac{h_1}{t}$	Сжатие					Растяжение				
		$n=\frac{\sigma_p}{\sigma_{cr\text{э}}}$	$\bar{c}=\frac{c_0}{t}$				$n=\frac{\sigma_p}{\sigma_{cr\text{э}}}$	$\bar{c}=\frac{c_0}{t}$			
			0,5	1,0	1,5	2,0		0,5	1,0	1,5	2,0
0	–	1	740	645	593	563	–1	897	772	655	593
		2	663	610	576	554	–2	919	827	708	617
		3	621	588	564	548	–3	923	850	756	650
		4	596	573	555	542	–4	934	879	794	691
							–5	937	893	821	722
2,5	100	1	701	624	581	556	–1	860	728	630	579
		2	642	597	568	549	–2	893	787	669	598
		3	609	579	558	543	–3	910	827	719	613
		4	588	566	551	539	–4	919	854	760	650
							–5	925	871	791	695
	133	1	640	590	562	544	–1	763	650	589	558
		2	607	574	553	539	–2	813	700	613	568
		3	586	563	547	535	–3	853	740	658	583
		4	572	554	542	532	–4	874	787	684	602
							–5	889	815	721	630
	166	1	573	551	537	528	–1	613	570	547	534
		2	562	545	534	526	–2	647	585	554	537
		3	553	540	531	524	–3	690	606	563	542
		4	547	536	528	523	–4	731	633	576	547
							–5	766	669	593	555
	200	1	530	523	518	515	–1	536	526	520	516
		2	527	521	517	514	–2	540	529	522	517
		3	525	520	516	513	–3	545	531	523	518
		4	524	519	516	513	–4	552	535	525	519
							–5	560	539	527	520
5,0	100	1	669	607	571	550	–1	816	688	609	562
		2	624	585	560	544	–2	861	746	629	582
		3	597	571	552	539	–3	886	792	683	602
		4	580	560	546	536	–4	901	824	724	631
							–5	910	847	759	663
	133	1	588	560	543	532	–1	640	536	556	539
		2	572	552	538	529	–2	692	609	566	544
		3	561	546	535	527	–3	741	643	580	550
		4	553	541	532	525	–4	780	677	598	558
							–5	809	714	622	569
	166	1	531	524	519	515	–1	538	528	521	517
		2	529	522	518	515	–2	543	530	523	518
		3	527	521	517	514	–3	548	533	525	519
		4	525	520	516	513	–4	556	537	527	520
							–5	566	542	529	521
	200	1	509	508	507	506	–1	510	509	507	506
		2	509	508	507	506	–2	510	509	507	506
		3	509	508	507	506	–3	511	509	508	506
		4	509	507	506	506	–4	511	509	508	507
							–5	512	509	508	507

Примечание: Значения коэффициентов φ_i увеличены в 1000 раз.

Условные обозначения: σ_p – напряжение в контурных продольных ребрах листа обшивки; $\sigma_{cr\text{э}}$ – критическое напряжение сжатия в том же листе; t – толщина листа; h_1 – ширина листа.

Редукционные коэффициенты приведены в таблице 2.2 для ряда значений относительной начальной погиби $\bar{c}_0 = c_0/t$ (где c_0 – допустимая погибь по СНиП III-18-75, t – толщина обшивки) и поперечных нагрузок q – фактической на покрытие и условной $q = 1{,}5$ кП на перекрытие – в зависимости от отношения n продольных напряжений в стрингерах σ_p к критическому Эйлерову напряжению $\sigma_{cr\text{э}}$ шарнирно опертых по контуру прямоугольных листов обшивки $n = \sigma_p / \sigma_{cr\text{э}}$.

По опыту изготовления прямоугольных оболочек, как правило, величина $\bar{c}_0 = 1 \div 1{,}5$. Рекомендуемое значение величины n принимается для сжатой зоны не более 4, для растянутой зоны ограничений не имеет. Расчет прочности стрингеров при действии местной поперечной нагрузки заключается в определении изгибающих моментов и поперечных сил, возникающих в ребре от нагрузки, собранной с прилегающей к нему грузовой площади обшивки. Эти усилия допускается определять в стрингерах как в разрезных или неразрезных балках на жестких или упругих опорах в зависимости от крепления стрингеров на поперечных ребрах и соотношения жесткостей ребер обоих направлений. При расчете на местную нагрузку в сечение стрингера вводится примыкающий к ребру участок обшивки шириной b_1. Эта ширина определяется величиной редукционного коэффициента, которая уточняется при расчете коробчатой балки пролетного строения.

Ориентировочные значения редукционных коэффициентов составляют: в сжатой зоне $\varphi_c = 0{,}55 \div 0{,}60$; в растянутой зоне $\varphi_p = 0{,}85 \div 0{,}90$. Проверку прочности стрингеров следует выполнять в соответствии со СНиП II-23-81* на суммарные напряжения от местного изгиба и продольные напряжения, возникающие при их работе в составе коробчатой балки пролетного строения. Поперечные рамы шпангоутов допускается рассчитывать путем расчленения их на отдельные шарнирно соединенные элементы с учетом горизонтального опирания рамы на диски покрытия и перекрытия. Передающиеся на шпангоут сосредоточенные опорные реакции от стрингеров допускается заменять распределенной нагрузкой.

Опорные П-образные рамы пролетного строения рассчитываются с учетом жесткого соединения стоек с ригелем. При расчете с использованием ПЭВМ рама шпангоута рассчитывается на местную нагрузку как замкнутая стержневая конструкция, поддерживаемая распределенной опорной реакцией обшивки стен при вертикальном нагружении, а также покрытия и перекрытия – при горизонтальном. При этом необходимо учесть эксцентриситеты крепления обшивки к шпангоуту. Проверки устойчивости должны быть выполнены для следующих элементов пролетного строения:

- сжатой пластины всего покрытия, подкрепленной ребрами двух направлений (рис.2.8);

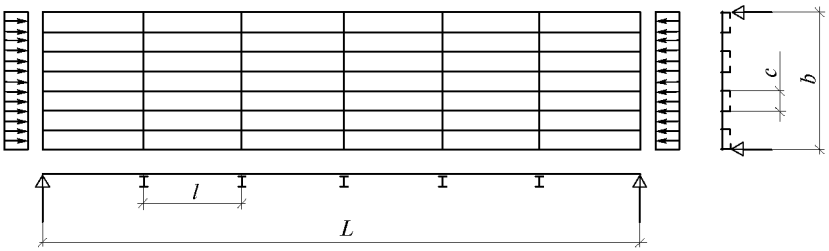


Рис.2.8. Схема покрытия галереи и напряжения в нем

- секции ребристой пластины покрытия между верхними ригелями шпангоутов (рис.2.9);
- стрингеров в сжатой зоне пролетного строения и стоек опорных рам порталов;
- сжатого листа обшивки между стрингерами (рис.2.10);
- секции стенки коробчатой балки пролетного строения в условиях комбинированного воздействия неравномерного по высоте сжатия и сдвига (рис.2.11).

Для последних двух элементов пролетных строений допускается их закритическая работа. Ограничения по местной устойчивости для элементов коробчатых балок являются определяющими – от них зависят основные конструктивные решения, поиск оптимальных соотношений размеров, металлоемкость и экономичность пролетных строений галерей. Проверку устойчивости всего покрытия галереи и отсека между шпангоутами допускается производить по упрощенной расчетной схеме:

- обшивка имеет одинаковую толщину t по всему покрытию;
- покрытие равномерно сжато по длине l и ширине b напряжениями, равными максимальным напряжениям сжатия в нем при изгибе пролетного строения с учетом дополнительного сжатия обшивки от местного нагружения;
- покрытие шарнирно оперто по контуру;
- стрингеры имеют одинаковую изгибную жесткость и отстоят друг от друга и от краев покрытия на равных расстояниях.

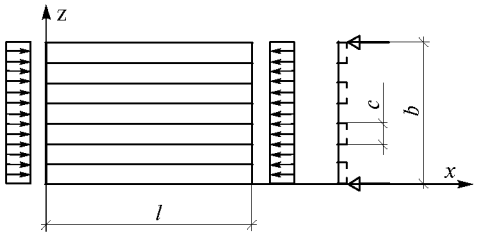


Рис.2.9. Схема стрингерного отсека покрытия и напряжения в нем

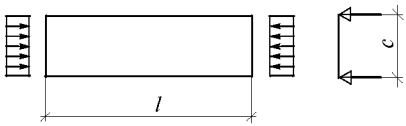


Рис.2.10. Схема листа обшивки покрытия и напряжения в нем

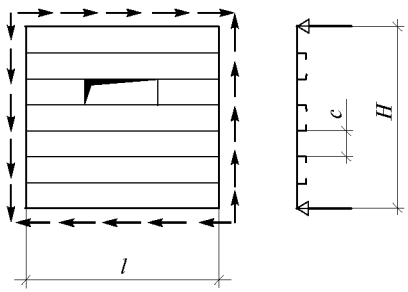


Рис.2.11. Схема отсека стенки с проемом

Покрытие в галереях, как правило, не удовлетворяет перечисленным упрощениям идеализированной расчетной схемы. Для возможности его использования при расчете реальной конструкции по ширине покрытия производится осреднение толщины обшивки и расстояний между стрингерами.

Устойчивость пластины покрытия обеспечена, если удовлетворено условие

$$\sigma_{cr(1)} \geq \sigma_p \tag{2.18}$$

Здесь $\sigma_{cr(1)}$ – критическое напряжение в покрытии; σ_p – действующее напряжение в ребрах покрытия.

$$\sigma_{cr(1)} = \frac{\pi^2 D}{b^2 t_{np}} \cdot k_1 \gamma_1 \sqrt{z} \left[2 + \frac{1}{k_1 \gamma_1} \left(1 + \frac{1}{\sqrt{z}} \right)^2 \right] \tag{2.19}$$

где: $D = \dfrac{Et^3}{12(1-\nu^2)}$ – цилиндрическая жесткость обшивки;

$$t_{np} = t\left(1 + k_1\delta\right),\ \delta = A_1/(bt) \tag{2.20}$$

A_1 – площадь поперечного сечения продольного ребра без учета присоединенного участка обшивки.

$$z = \frac{k_2\gamma_2}{k_1\gamma_1},\ \gamma_i = \frac{EI_i}{l_i D},\ l_i = \begin{cases} b(i=1) \\ L(i=2) \end{cases} \tag{2.21}$$

I_i – момент инерции сечения продольного ребра без учета присоединенного участка обшивки относительно нейтральной оси ребра, определяемой с учетом присоединенного участка обшивки, площадь сечения которого вводится с коэффициентом редукции обшивки φ_i; I_2 – момент инерции сечения верхнего ригеля шпангоута относительно собственной оси; $k_i\,(i=1,2)$ – количество продольных и поперечных ребер (без учета стрингеров, расположенных над стенами, и крайних шпангоутов).

Устойчивость стрингерного отсека покрытия обеспечена при выполнении условия:

$$\sigma_{cr(2)} \geq \sigma_p \tag{2.22}$$

Здесь $\sigma_{cr(2)}$ – критическое напряжение в ребристой прямоугольной пластине стрингерного отсека (между шпангоутами):

$$\sigma_{cr(2)} = \frac{\pi^2 D}{b^2 t_{np}} \cdot k_1\gamma_1 \frac{1}{\alpha^2}\left[1 + \frac{1}{k_1\gamma_1}\left(1+\alpha^2\right)^2\right] \tag{2.23}$$

где $\alpha = l/b$; l – шаг шпангоутов.

Устойчивость стрингеров при воздействии осевой силы с изгибом должна быть проверена также по СНиП II.23-81. Предельная гибкость продольных ребер как внецентренно сжатых стержней определяется по формуле

$$\lambda_{cr} = R\sqrt{E/\sigma_p} \tag{2.24}$$

Фактическая гибкость стрингера как стержня, шарнирно опертого на верхний ригель шпангоута, должна быть меньше предельной гибкости λ_{cr}.

Степень участия панелей обшивки в работе на изгиб различна для сжатой и растянутой зон пролетного строения. Это находит свое выражение в различии величины редукционных коэффициентов, вводимых при расчете эффективной площади сечения листов обшивки в этих зонах. Превышение действующими в обшивке напряжениями их критических значений по разному влияет на участие обшивки в работе при сжатии и растяжении. По мере развития закритических деформаций в сжатой обшивке редукционные коэффициенты уменьшаются и все большая часть ее выключается из работы. В растянутой зоне увеличение напряжений сопровождается их выравниванием. Это приводит к возрастанию редукционных коэффициентов и увеличению степени участия растянутой обшивки в работе. Поскольку напряжения σ_p в стрингерах зависят от характеристик жесткости пролетного строения, на величины которых, как указано ранее, влияют редукционные коэффициенты обшивки φ_i, определение напряжений и редукционных коэффициентов осуществляется методом последовательных приближений. Два-три шага приводят к приемлемой для инженерных расчетов точности. Критерием этого является совпадение значений редукционных коэффициентов двух последовательных шагов, вычисленных с точностью до 10%.

В предварительных расчетах при компоновке пролетного строения с распределением материала между несущими элементами коробчатой балки – ребрами обоих направлений, обшивкой, покрытием, перекрытием и стенами, – как правило, достаточно первого приближения. Проверка устойчивости стенок балки пролет-

ного строения производится в соответствии с теоретической основой раздела 7 СНиП II-23-81*. Проверке подлежат крайний, средний и один из промежуточных отсеков стенки между шпангоутами при загружении их нормальными и касательными напряжениями изгиба. Определение критических нормальных и касательных напряжений и проверка устойчивости выполняется для участков стенки, расположенных между стрингерами, по формулам раздела 7 СНиП II-23-81*, откорректированным с учетом разбиения обшивки стенки по ее высоте на отдельные прямоугольные отсеки горизонтальными ребрами.

Допустима закритическая работа обшивки на верхнем участке стенки при соотношении действующих напряжений к критическим $n \le 2$.

Влияние ослабления оконным проемом отсека стенки при проверке его устойчивости допускается не учитывать, если суммарная площадь поперечного сечения верхнего и нижнего ребер, окаймляющих проем, компенсирует ослабление (рис.2.11). Крайние отсеки стенки пролетного строения рекомендуется не ослаблять оконными проемами. Высота проема не должна превышать $0{,}2H$, где H – высота стенки галереи. Проем желательно располагать на минимально возможном расстоянии от нейтральной оси балки пролетного строения. Определение прогиба пролетного строения, а также балок покрытия и перекрытия производится в соответствии с положениями раздела 13 СНиП II-23-81*. При этом момент инерции коробчатой балки пролетного строения определяется с учетом редуцирования площади сечения обшивки. Расчет выполняется по нормативным нагрузкам.

2.3.5. Расчет пролетных строений с несущими конструкциями из круглых цилиндрических оболочек. Пролетное строение из круглых цилиндрических оболочек рассматривается как разрезной стержень кольцевого поперечного сечения (рис.2.12) в условиях изгиба и внецентренного сжатия. Неизменяемость контура поперечного сечения и отсутствие связанных с этим дополнительных напряжений обеспечивается шпангоутами. В соответствии со СНиП II-23-81* напряжения определяются по формулам:

$$\sigma = \frac{M_x}{I_x}\left(r\cos\beta - y_0\right) + \frac{N}{A} \le \gamma_c R_y \qquad (2.25)$$

$$\tau = \frac{Q_y}{\pi r t}\sin\beta \le \gamma_c R_s \qquad (2.26)$$

где r – радиус срединной поверхности оболочки; y_0 – координата геометрического центра сечения (центра окружности); t – толщина оболочки, соответствующая угловой координате; N – сжимающая сила.

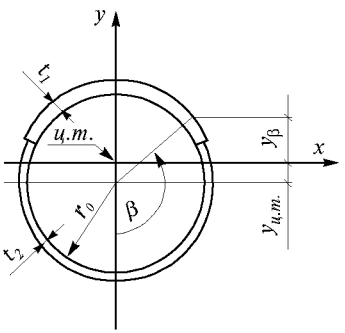


Рис.2.12. Поперечное сечение несущей оболочки галереи

Расчет местной устойчивости оболочки производится как замкнутой круговой цилиндрической оболочки. При этом проверки выполняются в сечении в пролете с наибольшим изгибающим моментом и наибольшими нормальными напряжениями и в сечении на опоре с наибольшей поперечной силой и наибольшими касательными напряжениями, а также с соответствующим изгибающим моментом и нормальными напряжениями в случае наличия консоли.

В пролете проверка на устойчивость выполняется по формуле

$$\sigma_1 \le \gamma_c \sigma_{cr1}\left(1{,}1 - 0{,}1\,\sigma_1'/\sigma_1\right) \qquad (2.27)$$

где σ_1 – расчетное напряжение в оболочке; σ_{cr1} – критическое напряжение равное меньшему из значений φR_y или cEt/r; σ_1' – наименьшее напряжение (растягивающие напряжения считать отрицательными).

Значения коэффициента φ при $0 < \frac{r}{t} \le 300$ определяются по формуле

$$\varphi = 0{,}97 - \left(0{,}25 \times 10^{-3} + 0{,}95\frac{R_y}{E}\right)\frac{r}{t} \qquad (2.28)$$

Значения коэффициентов c следует определять по таблице 2.3.

Таблица 2.3

r/t	100	200	300	400	600	800	1000	1500	2500
c	0,22	0,18	0,16	0,14	0,11	0,09	0,08	0,07	0,06

Проверка устойчивости на опоре производится раздельно для зон нормальных и касательных напряжений.

Для зоны наибольших нормальных напряжений

$$\sigma_1 \le \gamma_1 \sigma_{cr1} \qquad (2.29)$$

Для зоны наибольших касательных напряжений

$$\tau_1 \le \gamma_c \tau_{cr1} \qquad (2.30)$$

где τ_1 – наибольшее касательное напряжение в оболочке; τ_{cr1} – критическое напряжение, определяемое по формуле

$$\tau_{cr1} = 0{,}78k\frac{Et}{r}\left(\frac{rt}{l}\right)^{0{,}25} \qquad (2.31)$$

где l – расстояние между шпангоутами.

Значения коэффициентов k следует определять по таблице2.4.

Таблица 2.4

r/t	250	500	1000	1500
k	0,8	0,7	0,6	0,5

При совместном действии в сечении нормальных σ и касательных τ напряжений устойчивость оболочки проверяется по формуле

$$\frac{\sigma}{\sigma_{cr1}} + \left(\frac{\tau}{\tau_{cr1}}\right)^2 \le 1 \qquad (2.32)$$

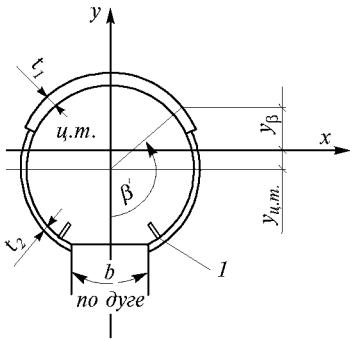


Рис.2.13. Поперечное сечение несущей оболочки галереи, ослабленной вырезом
1 – продольное ребро (стрингер)

При наличии прямоугольного проема, симметрично расположенного относительно вертикальной оси поперечного сечения оболочки y и усиленного стрингерами, проверка прочности поперечного сечения (рис.2.13) с проемом производится по следующим формулам

$$\sigma = \frac{M_x}{I_x}y + \frac{N}{A} \le \gamma_c R_y \qquad (2.33)$$

Минимальная площадь сечения стрингера принимается $A_p = 0{,}25bt$. Стрингеры заводятся за край проема в сторону ненарушенного сечения на расстояние, достаточное для закрепления ребра к оболочке на усилие $N = 0{,}25A_pR_y$. Кольцевые ребра –

шпангоуты рассчитываются по расчетной схеме, представляющей кольцевую раму радиусом r_k (рис.2.14) с затяжкой, с нагрузками в виде активных сил p и q, расположенными в плоскости кольца. Эта сложная статически неопределимая схема раскладывается на две простейшие:

- замкнутое кольцо, нагруженное опорными реакциями и уравновешенное потоком касательных сил, заменяющих действие оболочки по шпангоуту;
- замкнутое кольцо, нагруженное внешними силами.

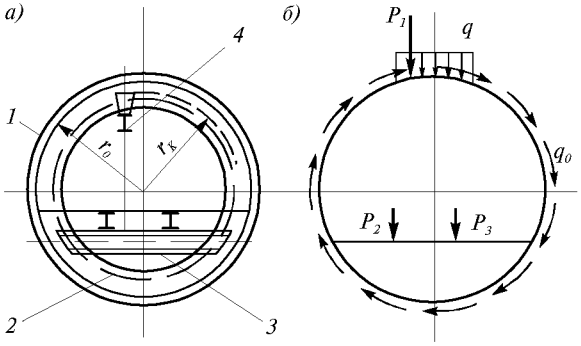


Рис.2.14. Конструктивная и расчетная схема промежуточного шпангоута

а - конструктивная схема; *б* - расчетная схема; *1* - оболочка; *2* - шпангоут; *3* - поперечная балка перекрытия; *4* - монорельс

Прикрепление затяжки в зависимости от конструкции узла принимается жестким или шарнирным. Расчет шпангоутов в виду его сложности должен выполняться на ПЭВМ. При этом рама, очерченная по окружности r_k заменяется правильным многоугольником с центральным углом 6 – 10°, вписанным в эту окружность. Аналогично ведется расчет и опорных шпангоутов по схеме рис.2.15.

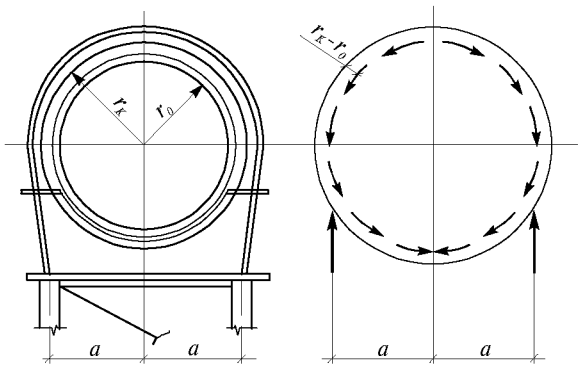


Рис.2.15. Конструктивная и расчетная схема опорного шпангоута

При расчете шпангоутов в их собственный момент инерции и площадь включается присоединенная часть оболочки, ширина которой $S = b + 1{,}3t\sqrt{E/R_y}$, где b – расстояние между стенками двухстенчатого шпангоута (при одностенчатом шпангоуте $b = 0$), t – толщина оболочки.

2.4. Конструктивные решения галерей

Традиционными решениями несущих конструкций пролетных строений галерей на протяжении многих лет являлись фермы с сечениями из парных уголков. Требования индустриализации строительства привели к необходимости создания пролетных строений более совершенных конструктивных форм, из которых в настоящее время получили распространение пролетные строения из сварных двутавровых балок, а также из круглых цилиндрических и прямоугольных оболочек. В зависимости от производственных возможностей завода-изготовителя, монтажной организации и условий строительства проектная организация производит выбор типа конструкций для конкретного объекта. При разработке проекта галереи рекомендуется, в зависимости от типа несущих конструкций, следующая номенклатура величин пролетов, приведенная в таблице 2.5.

Таблица 2.5

Тип несущей конструкции	Величина пролета, м					
	18	24	30	36	42	48
Фермы	+	+	+	+		
Балки	+	+	+	(+)		
Прямоугольные оболочки	–	(+)	+	+	+	+
Круглые цилиндрические оболочки	–	(+)	+	+	+	+

В скобках указаны величины пролетов, которые могут применяться в порядке исключения.

Марки стали для конструкций галерей принимаются в соответствии со СНиП II-23-81*.

2.4.1. Пролетные строения с несущими конструкциями из ферм. К первой группе относятся пролетные строения с несущими конструкциями из ферм с параллельными поясами, имеющими горизонтальное сопряжение с опорой, независимо от продольного уклона галереи (рис.2.16). При конструировании галерей рекомендуется принимать разрезную схему пролетного строения. Пролетное строение состоит из несущих ферм, поперечных балок покрытия и перекрытия, горизонтальных связей по нижним и верхним поясам ферм и опорных рам по торцам.

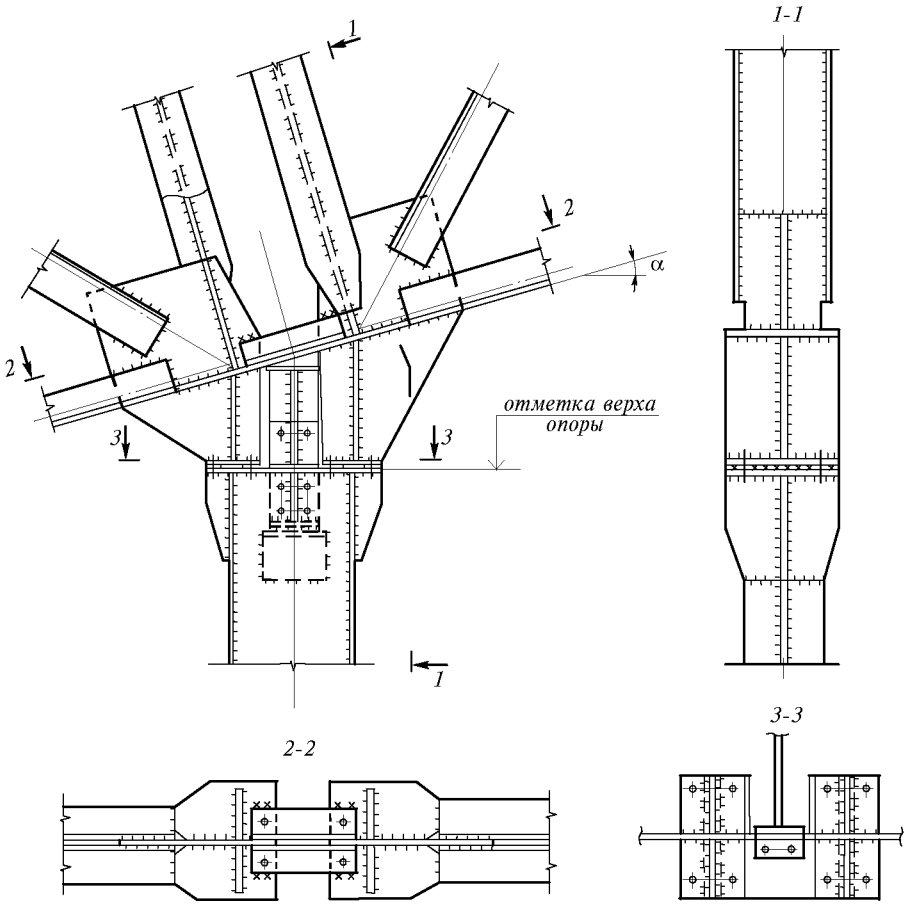


Рис.2.16. Узел сопряжения фермы с опорой

Для ферм с пролетами не более 36 м их высота с учетом опорных узлов и узлов крепления балок перекрытия (в случае наличия выступающих фасонок) не должна превышать транспортного габарита. В отдельных случаях допускается применение ферм для пролетов более 36 м. При этом фермы проектируются индивидуальными и, как правило, негабаритной высоты. При проектировании отапливаемых пролетных строений фермы, преимущественно, располагаются снаружи. При внутреннем расположении ферм нижние пояса и решетка должны находиться в одинаковых температурных условиях. В обоих случаях следует принимать конструктивные решения, обеспечивающие удобство антикоррозионной защиты элементов ферм от атмосферных воздействий или мокрых способов уборки.

Традиционные решения ферм с сечениями элементов из парных уголков являются устаревшими, в наименьшей степени отвечающими требованиям экономичности, снижения трудоемкости изготовления и коррозионной стойкости. При необходимости использовать прокатные уголки, в целях увеличения коррозионной стойкости, все элементы целесообразно проектировать крестового сечения. Для поясов ферм вместо прокатных уголков возможно применение прокатного таврового сечения.

В наибольшей степени современным требованиям отвечают фермы с сечениями элементов из замкнутых гнутосварных профилей. При этом возможно применение этих профилей также и для других элементов пролетного строения (балки перекрытия, покрытия, элементы связей). При значительных усилиях в поясах ферм рационально использовать сечения из прокатных двутавров с параллельными гранями полок, расположенных вертикально или горизонтально.

При применении для поясов ферм вертикально расположенных двутавров, сечения элементов решетки могут выполняться из замкнутых гнутосварных профилей (рис.2.17), примыкающих непосредственно к полке двутавра, или прокатных уголков крестового сечения с узловыми фасонками (рис.2.17).

При применении для поясов ферм горизонтально расположенных двутавров раскосы выполняются из одиночных прокатных уголков или предварительно напряженных полос высокопрочной стали, стойки – из замкнутых гнутосварных профилей. Примыкание элементов решетки к поясам бесфасоночное (рис.2.18).

Фермы с поясами из горизонтально расположенных двутавров имеют лучшие технико-экономические показатели по сравнению с фермами из вертикально расположенных двутавров, однако их применение снаружи пролетного строения требует дополнительных мероприятий для защиты поясов ферм от коррозии. Для ферм с поясами из горизонтально расположенных двутавров применяется только раскосная решетка (растянутые раскосы и сжатые стойки). В многопролетных галереях необходимо обеспечить непрерывную передачу продольных сил от технологических нагрузок в уровне нижних поясов ферм на неподвижную опору с помощью специальных деталей, устанавливаемых на монтаже (рис.2.19).

При конструировании узлов ферм, устанавливаемых на неподвижные опоры, необходимо учитывать изгибающий момент, возникающий от эксцентриситета продольных сил относительно верха неподвижной опоры.

Так, например, для восприятия указанного изгибающего момента в фермах из парных уголков или тавров используются конструктивные мероприятия в виде установки дополнительного жесткого элемента вдоль опорной панели нижнего пояса (вертикально расположенный двутавр или швеллер).

Балки покрытия и перекрытия, имеющие, как правило, сечение из прокатных двутавров, крепятся шарнирно к несущим фермам в уровне верхних и нижних поясов и имеют шаг 3 или 6м в зависимости от типа ограждающих конструкций.

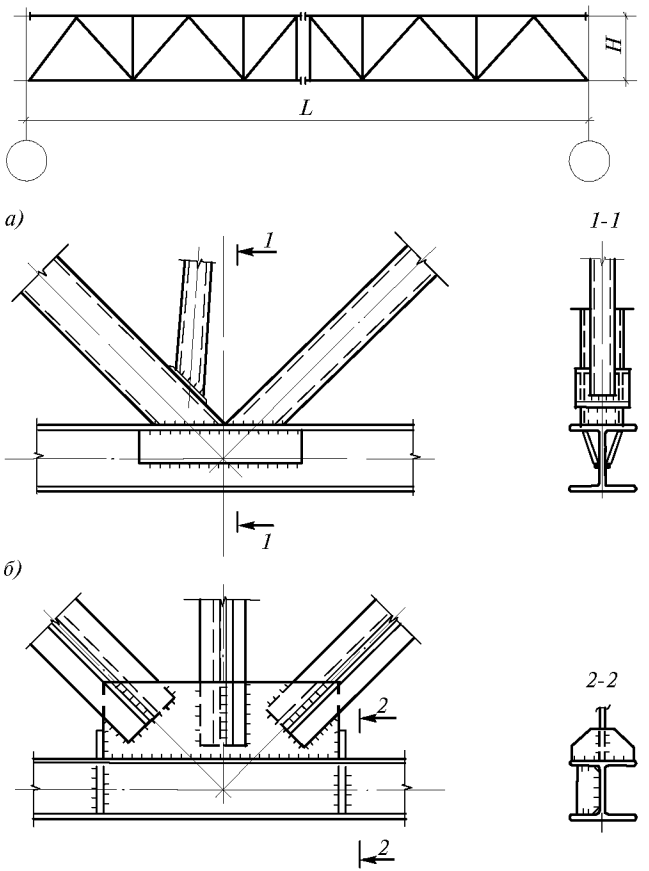


Рис.2.17. Узел фермы с поясами из вертикально расположенных двутавров

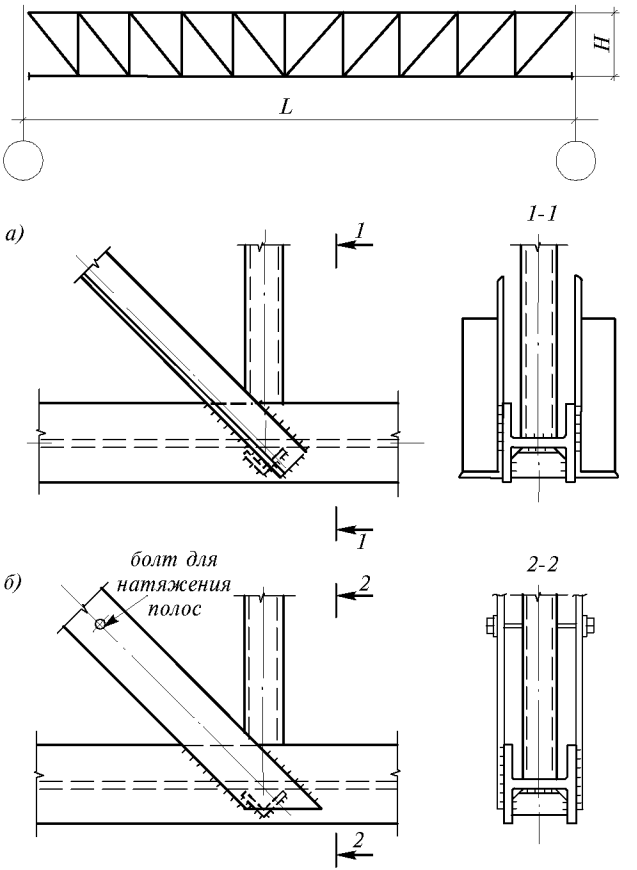


Рис.2.18. Узел фермы с поясами из горизонтально расположенных двутавров с бесфасоночным примыканием элементов решетки с раскосами

а – из одиночных уголков; *б* – их предварительно напряженных полос

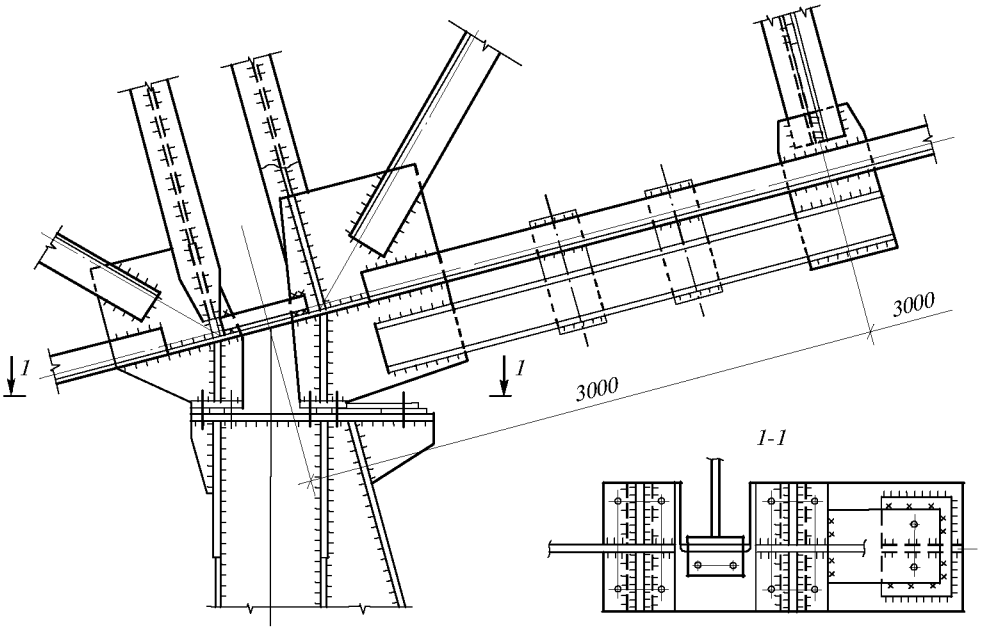


Рис.2.19. Узел соединения фермы с неподвижной опорой

В галереях с наклоном свыше 5° необходимо обеспечить восприятие скатной составляющей вертикальных нагрузок либо верхними поясами балок, либо установкой продольных тяжей, уменьшающих пролеты балок в плоскости покрытия и перекрытия с передачей этих усилий на пояса ферм (рис.2.20).

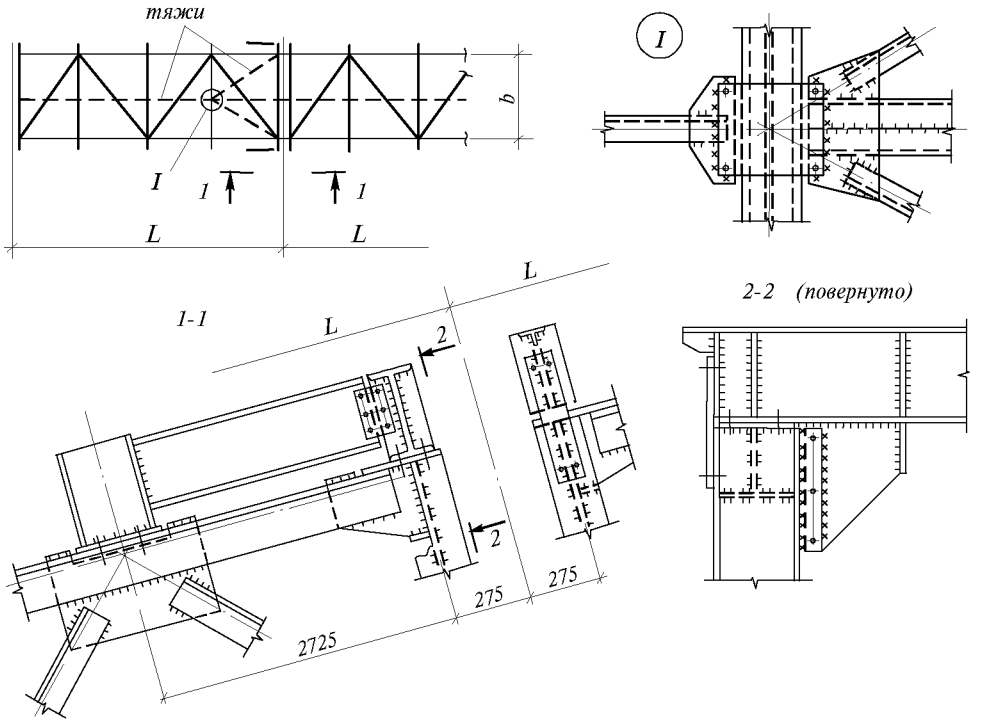


Рис.2.20. Узлы элементов покрытия

Передача усилий от тяжей на верхние пояса ферм обычно происходит с эксцентриситетом. Для восприятия возникающего изгибающего момента в этом случае необходимо в верхней по уклону панели каждого пролетного строения выполнить специальные конструктивные мероприятия.

Пространственная жесткость пролетного строения обеспечивается горизонтальными связями по верхним и нижним поясам ферм и опорными рамами, имеющими жесткое соединение ригеля с опорными стойками несущих ферм (рис.2.20).

В зависимости от типа ограждающих конструкций кровли, балки покрытия пролетного строения могут быть прямолинейными или двускатными.

2.4.2. Пролетные строения с несущими конструкциями из сварных двутавровых балок. Ко второй группе относятся пролетные строения с несущими конструкциями из сварных двутавровых балок, преимущественно с гибкими стенками, совмещающих несущие и ограждающие функции.

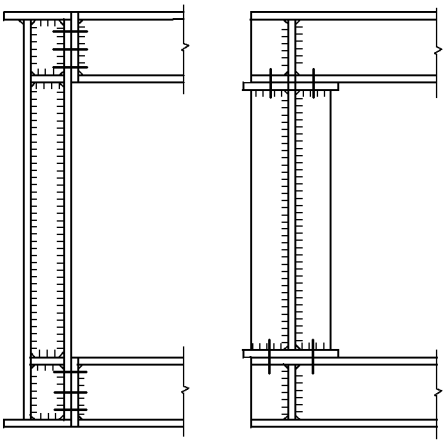


Рис.2.21. Узлы сопряжения балок перекрытия и перекрытия с продольной балкой

При конструировании галерей с несущими конструкциями из сварных двутавровых балок может приниматься как разрезная, так и неразрезная схема пролетного строения; при использовании балок с гибкими стенками рекомендуется принимать разрезную схему пролетного строения. Конструкция пролетного строения образуется двумя продольными несущими балками, поперечными балками по нижним и верхним поясам, горизонтальными связями по верхним поясам продольных балок и опорными рамами по торцам. Покрытие выполняется плоским из профилированного настила, перекрытие, как правило, – из металлического листа, усиленного приваренными ребрами.

По предварительному согласованию с заводами-изготовителями, в зависимости от мощности гибочного оборудования, возможно отказаться от поперечных балок с металлическим настилом, заменив их металлическими щитами с отгибами швеллерного типа. Щиты укладываются поперек пролетного строения. Несущая способность щитов обеспечивается отгибами и приваркой поперечных ребер. Возможно также устройство металлического перекрытия по второстепенным продольным балкам, которые устанавливаются под опорами конвейера и этажно крепятся к поперечным балкам.

При соответствующем обосновании возможна конструкция перекрытия из железобетонных плит; в этом случае необходимы дополнительно горизонтальные связи по нижним поясам продольных балок.

Участок стенки балки в месте опирания следует укреплять двухсторонними ребрами, фактически являющимися стойками опорной рамы, обеспечивающей пространственную жесткость пролетного строения.

Ребра жесткости в пролете балки должны быть приварены к верхнему поясу. Для естественного освещения и аэрации в стенке балки устраиваются окна-иллюминаторы в виде патрубков с установленными внутри поворотными форточками. Вырезы для патрубков выполняются круглыми, с соответствующим усилением, компенсирующим вырезанное сечение стенки. В целях упрощения изготовления балок с гибкими стенками естественное освещение пролетного строения можно выполнять путем установки специальных зенитных фонарей на кровле, а не с помощью оконных проемов. Сварные двутавровые балки поставляются на монтаж двенадцатиметровыми секциями. Укрупнительный стык балок выполняется на высокопрочных болтах или на сварке.

2.4.3. Пролетные строения с несущими конструкциями из оболочек прямоугольного сечения. Пролетные строения из оболочек прямоугольного сечения, совмещающих несущие и ограждающие функции, являются новой конструктивной формой, которая в наибольшей степени обеспечивает возможность комплектной поставки конструкций совместно с теплоизоляцией. При проектировании пролетных строений с несущими конструкциями из оболочек прямоугольного сечения принимается разрезная схема. Размеры и форма поперечного сечения пролетного строения этого типа максимально приближены к технологическому габариту. Оболочка, совмещающая несущие и ограждающие функции, состоит из обшивки, поперечных рам – шпангоутов, расположенных с шагом 3 м, образованных балками покрытия, перекрытия и стойками стен, и продольных ребер – стрингеров (рис.2.22). Обшивка представляет собой плоские панели, состоящие из набора чередующихся между собой плоских листов и гнутых С-образных профилей, отгибы которых являются продольными ребрами – стрингерами. Длина панели принимается равной 12 м, ширина не должна превышать транспортный габарит. Конструкция из оболочек прямоугольного сечения позволяет устанавливать пролетное строение в проектное положение как в полностью собранном на земле виде, так и поэлементно, в зависимости от грузоподъемных механизмов, имеющихся на строительной площадке. Одним из компоновочных решений пролетного строения, допускающего поэлементную сборку, является использование вместо плоской панели – стеновой панели швеллерного сечения, включающей участки оболочки покрытия и перекрытия (рис.2.22). При использовании в панелях гнутого С-образного профиля необходимая площадь поперечного сечения обшивки, в соответствии с напряженно-деформированным состоянием оболочки обеспечивается за счет варьирования ширины и толщины плоских листов. Отношение ширины листа к его толщине не должно превышать 120 в сжатой зоне и 180 – в растянутой. При этом толщина листа должна приниматься не менее 4 мм, исходя из соображений существующей технологии изготовления и монтажа конструкций.

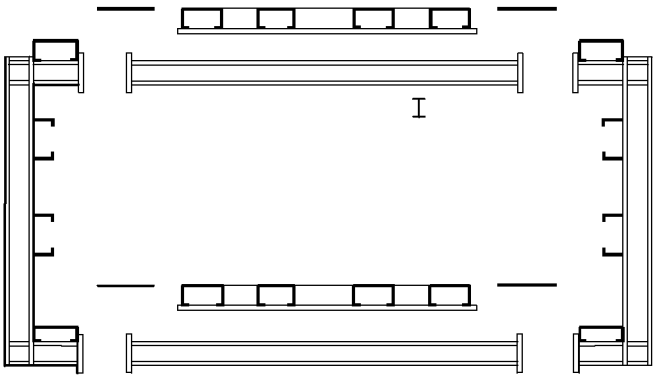


Рис.2.22. Поперечное сечение пролетного строения из прямоугольной оболочки со стеновыми панелями швеллерного сечения

Перспективным решением для значительного сокращения объема сварки в панелях покрытия является применение специального типа профилированного настила, а для снижения расхода металла – применение листа толщиной 3 мм, при условии совершенствования технологии изготовления и монтажа и соответствующем расчетном обосновании. Элементы шпангоута расположены по разному по отношению к обшивке: балки покрытия – внутри пролетного строения, стойки стен и балки перекрытия – снаружи. В целях уменьшения количества стыков, влияющего на трудоемкость изготовления и монтажа и надежность конструкции пролетного строения, а также в целях лучшего использования транспортных средств, балки покрытия и перекрытия из прокатного двутавра при изготовлении и транспортировке отделены от обшивки и поставляются на площадку строительства проектной длины. При укрупнительной сборке пролетного строения балки покры-

тия и перекрытия соединяются с панелями обшивки с помощью сварки. При сборке 12-метровых пространственных секций продольные и укрупнительные стыки панелей обшивки выполняются аналогично заводским – односторонним сплошным швом автоматической сваркой с полным проваром.

Пролетные строения с одним конвейером с шириной ленты до 1000 мм, поперечные сечения которых являются габаритными для транспортировки, необходимо поставлять на площадку строительства в полностью собранном виде секциями длиной 12 м. Поперечный сварной укрупнительный стык отдельных 12-ти метровых секций пролетного строения выполняется на накладках, равнопрочных основному сечению. При этом отгибы С-образных профилей стыкуются с помощью приварки накладок швеллерного профиля. При наличии соответствующих производственных условий, особенно при изготовлении конструкций, в перспективе целесообразно произвести замену сварного стыка отдельных секций пролетного строения на болтовой. В торцах пролетного строения устанавливаются опорные рамы, перпендикулярные продольной оси галереи. При этом опирание пролетного строения на нижележащие конструкции осуществляется через горизонтальные плоскости (рис.2.23). В шпангоутах узлы соединения балок покрытия и перекрытия со стойками стен должны обеспечить передачу вертикальных опорных реакций (рис.2.24).

В опорных П-образных рамах узлы соединения балок покрытия со стойками должны быть жесткими, обеспечивать геометрическую неизменяемость поперечного сечения пролетного строения и передачу горизонтальных ветровых нагрузок с пролетного строения на опоры (рис.2.23). Все элементы шпангоутов и опорных рам выполняются, как правило, двутаврового сечения.

Опирание стоек конвейера на пол производится через специальные подставки. Оболочка пола в местах расположения подставок укрепляется с помощью ребер (рис.2.25). Оконные проемы в пролетных строениях следует располагать через шаг шпангоутов. Не рекомендуется делать оконные проемы в шагах шпангоутов, примыкающих к опоре.

2.4.4. Пролетные строения с несущими конструкциями из круглых цилиндрических оболочек. Пролетные строения из круглоцилиндрических оболочек, как правило, применяются при габаритах поперечного сечения, обеспечивающих транспортировку их в собранном виде, т.е. при диаметре оболочки до 3200 мм. Такой габарит охватывает диапазон галерей для одного конвейера с шириной ленты до 1000 мм. Галереи с двумя конвейерами или одним конвейером шириной свыше 1000 мм требуют поперечных сечений оболочек большего размера, что делает их негабаритными для транспортировки и предполагает поставку их в виде рулонных заготовок. Высокая трудоемкость монтажа таких оболочек делает эффективным их применение лишь в отдельных случаях при вынужденных больших пролетах, переходах через здания, препятствия и т.п.

Пролетные строения с несущими конструкциями из круглых цилиндрических оболочек, как правило, проектируются разрезными. Круговая цилиндрическая оболочка совмещает функции несущих и ограждающих конструкций, а система подкрепляющих кольцевых ребер (шпангоутов) обеспечивает неизменяемость контура поперечного сечения и общую устойчивость оболочки. Эти же шпангоуты служат для передачи местных сосредоточенных и распределенных вдоль дуги нагрузок, в том числе – опорных реакций конвейера и перекрытия на оболочки пролетного строения.

Шпангоуты могут иметь различный шаг, располагаются внутри оболочки, на них опираются поперечные балки, на которые устанавливаются стойки конвейера и листовой настил пола (рис.2.26). Опорные ребра размещаются снаружи оболочки. Промежуточные и опорные шпангоуты выполняются перпендикулярными к оси оболочки (рис.2.27).

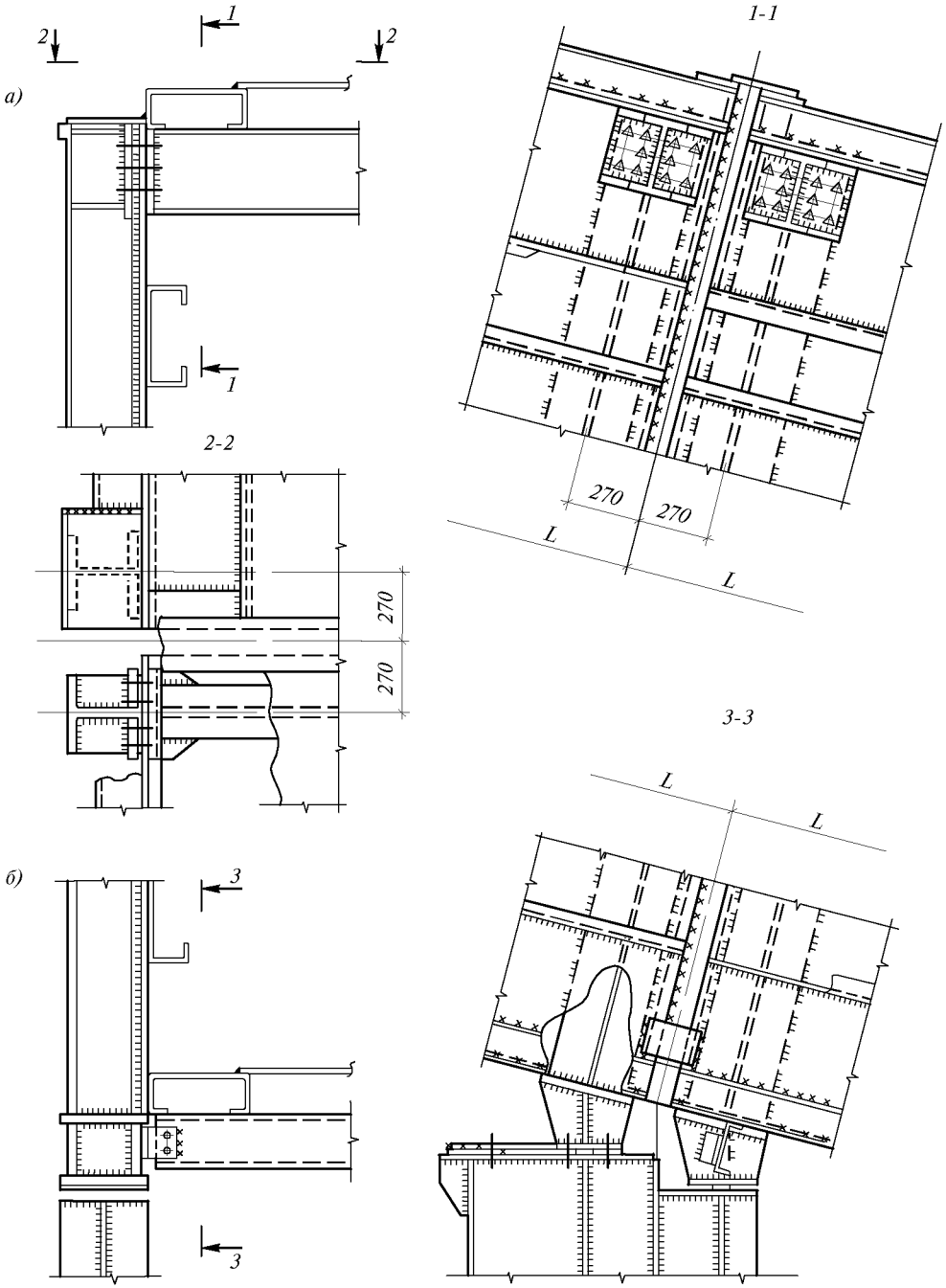


Рис.2.23. Узлы опорной рамы
а – верхний узел; *б* – нижний узел

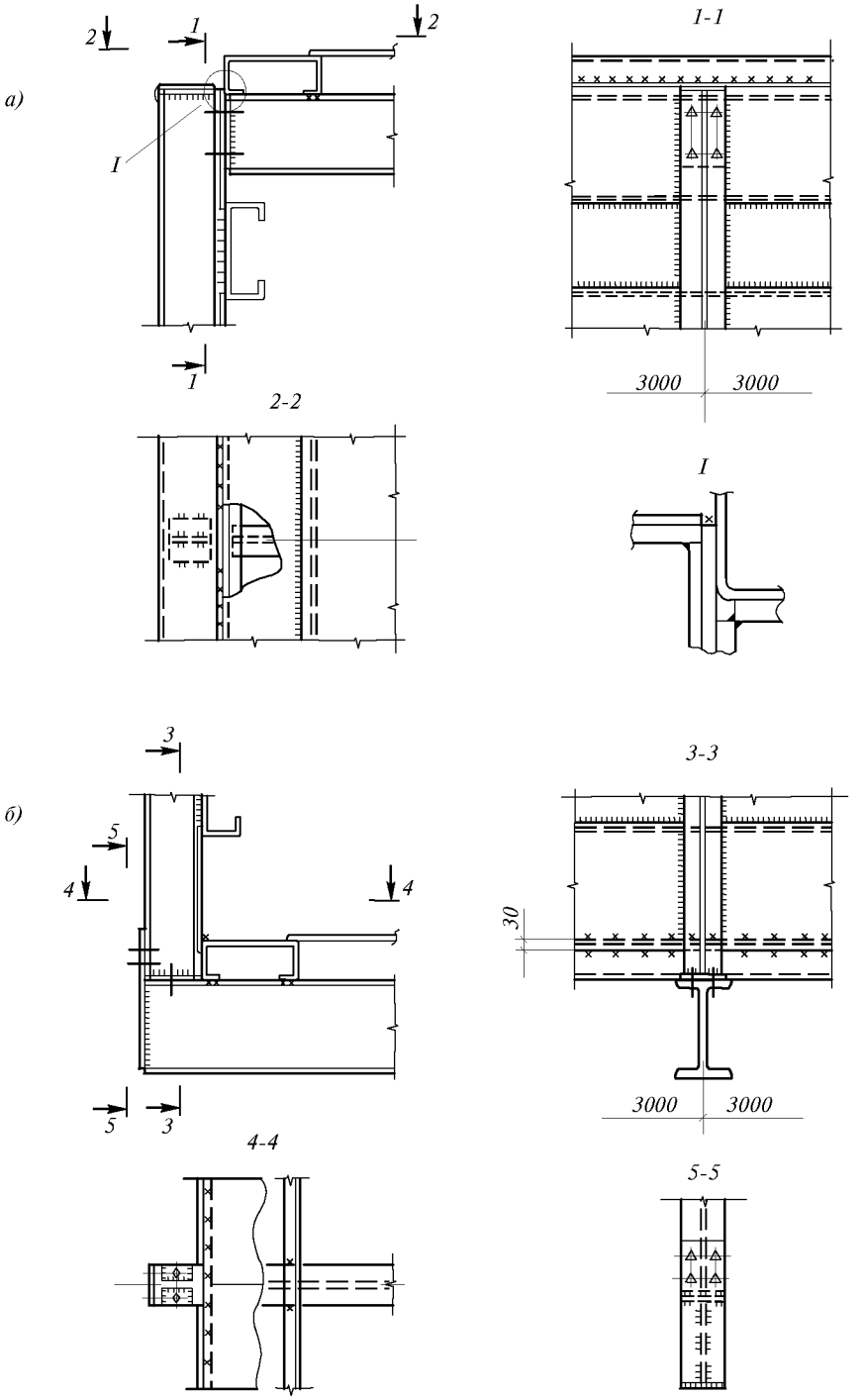


Рис.2.24. Узел шпангоута
а – верхний узел; *б* – нижний узел

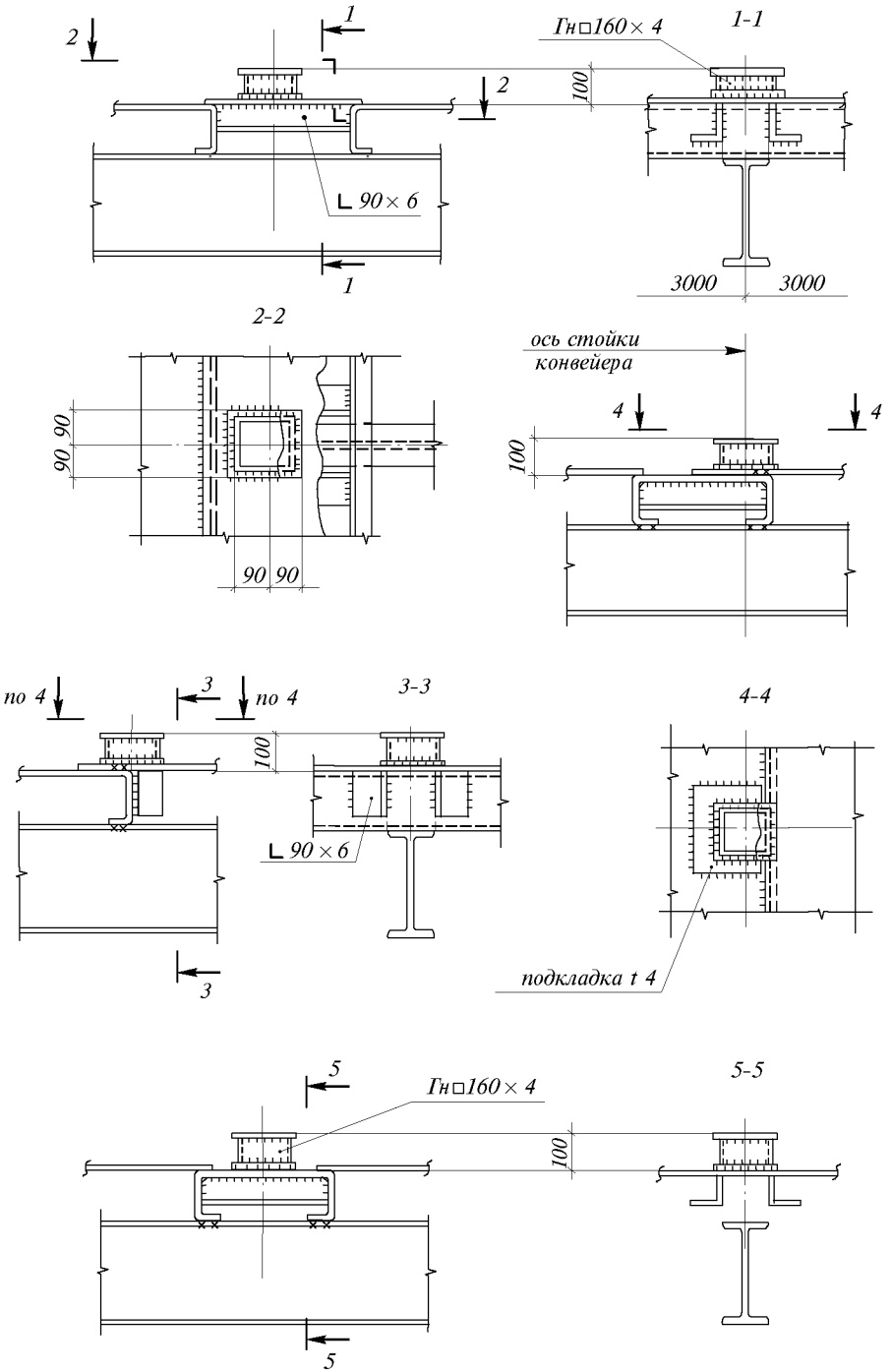


Рис.2.25. Узлы опирания стоек конвейера

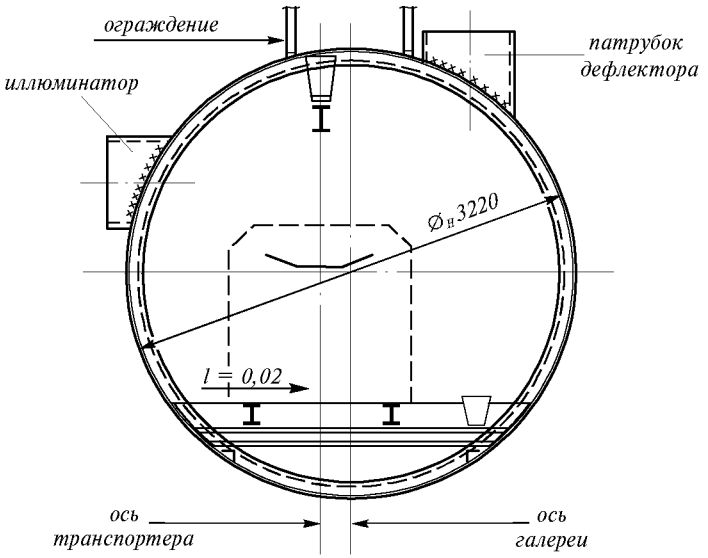


Рис.2.26. Поперечное сечение пролетного строения из круглой цилиндрической оболочки

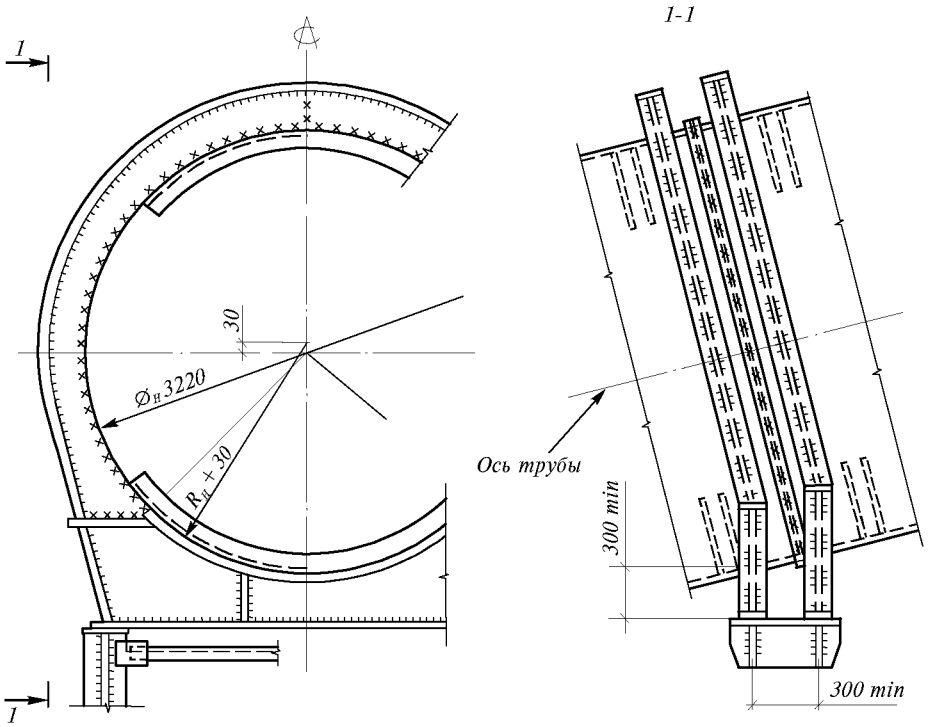


Рис.2.27. Опорный узел

Габаритные пролетные строения состоят из отдельных секций длиной 12 м (рис.2.28), полностью собираемых на заводе, где устанавливаются промежуточные шпангоуты, поперечные балки, перекрытие, а в случае необходимости при мокрых способах уборки пыли, лоток для сбора воды и шлама. В последних случаях должна быть обеспечена герметичность швов настила перекрытия.

На площадке строительства секции собираются в монтажные блоки и соединяются как правило на бандажах или в отдельных случаях встык на сварке. Толщина листов оболочки по ее периметру может быть различна с учетом возможной потери устойчивости в сжатой зоне. Минимальная толщина оболочки принимается 4 мм.

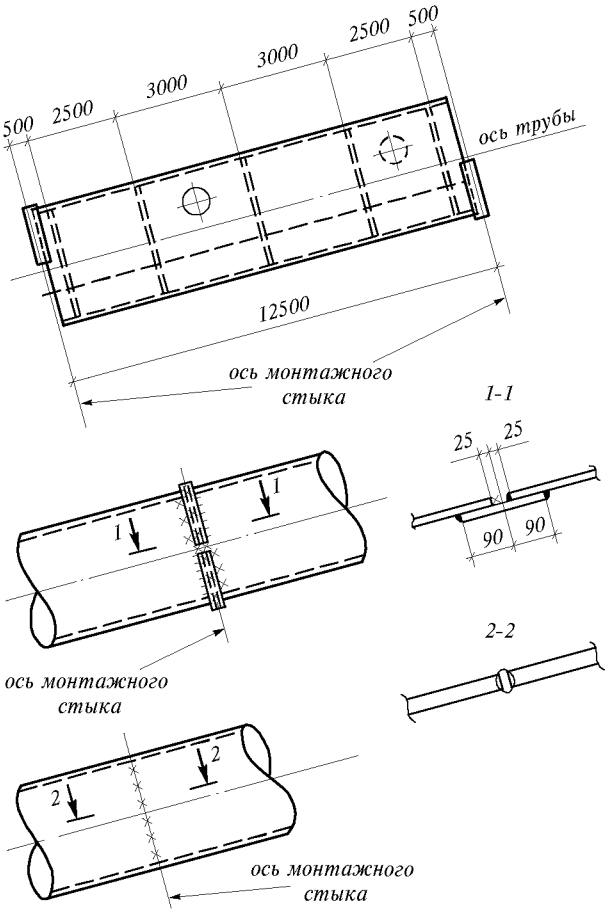


Рис.2.28. Секция пролетного строения из круглой цилиндрической оболочки и укрупнительные стыки

Естественное освещение и аэрация обеспечивается установкой окон-иллюминаторов, а в случае необходимости дополнительной вентиляции предусматривается установка дефлекторов. Иллюминаторы, как правило, выполняются в виде цилиндрических патрубков, установленных в оболочке. В отдельных случаях при сложностях в изготовлении круглых оконных переплетов иллюминаторов, переплеты выполняются квадратными и устанавливаются в цилиндрическом патрубке. В обоих случаях в оболочке делаются овальные вырезы с соответствующим усилением. При необходимости в оболочке пролетного строения устраиваются проемы – прямоугольные вырезы – для контргрузов, разгрузочных целей и т.п. Эти проемы располагаются в растянутой зоне оболочки и усиляются продольными ребрами-стрингерами – в соответствии с расчетом.

2.5. Опоры галерей

Как уже показано ранее, опоры, на которые устанавливаются пролетные строения, проектируются двух типов: плоские (качающиеся) и пространственные (неподвижные). Плоские опоры допускают смещение в продольном направлении при температурных перемещениях пролетного строения. Плоские опоры, как правило, состоят из вертикальных ветвей и соединительной решетки. Схема решетки может быть любой и принимается в зависимости от типа сечений элементов решетки, соотношения геометрических размеров опоры и требований по экономному расходу металла. Наиболее распро-

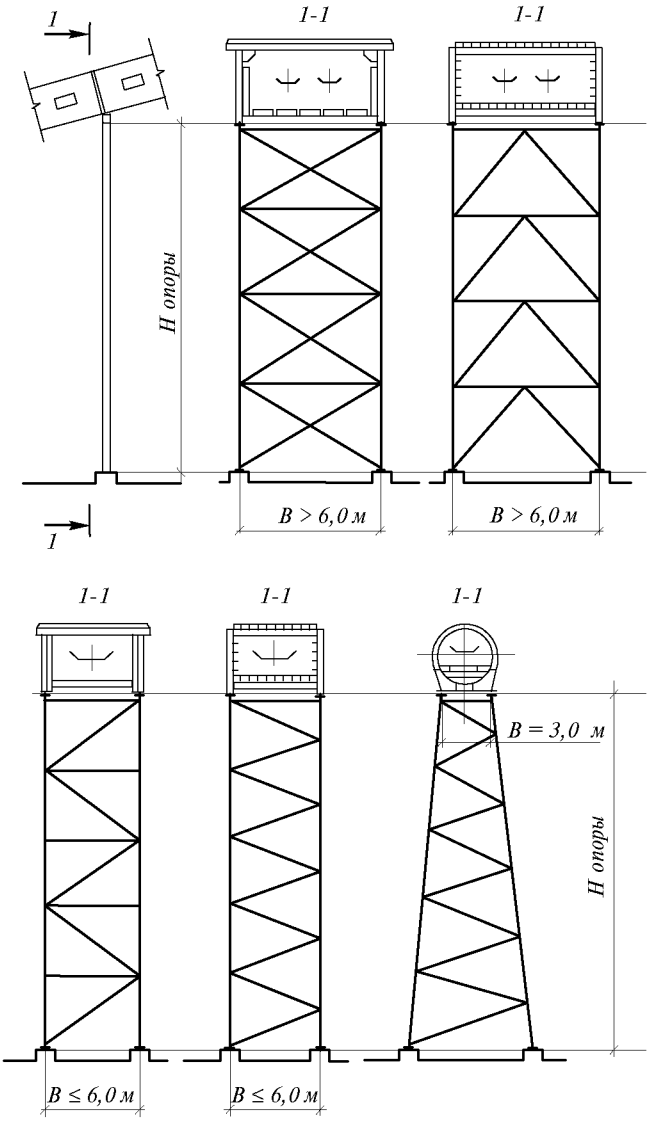


Рис.2.29. Схема решетки опор

страненные схемы решетки приведены на рис.2.29. Ширина опоры в уровне фундамента равна обычно расстоянию между осями несущих конструкций пролетного строения. Если отношение ширины опоры основания к ее высоте получается меньше 1/8, необходимо увеличить ширину опоры. В этом случае ветви опоры проектируются наклонными прямолинейными (рис.2.29).

Ветви плоских опор выполняются, как правило, из прокатных двутавровых профилей. Минимальная высота профиля зависит от расстояния между осями опорных рам и принимается обычно не менее 500 мм из условия удобства размещения опорных узлов двух пролетных строений. Максимальная высота профиля определяется действующим сортаментом. При этом значении гибкости ветви находится в пределах 70–120. При гибкости ветви менее 70 опирание на фундамент следует производить через центрирующую планку (рис.2.30*а*). Решетка опоры может располагаться в одной плоскости – по оси ветвей – или в двух плоскостях – по наружным граням полок двутавров. Распорки должны препятствовать повороту сечения ветви при крутильной форме потери устойчивости. Для этой цели распорки должны иметь достаточную жесткость в горизонтальном направлении. В одноплоскостной решетке распорки крепятся либо к горизонтальному ребру (рис.2.31*а*), либо, как и в двухплоскостной решетке, – непосредственно к полкам двутавра ветви (рис.2.31*б*).

Наиболее распространенным типом сечения для элементов решетки являются прокатные уголки. Применение тавровых сечений из парных уголков не рекомендуется по условиям коррозионной стойкости. В одноплоскостной решетке эффективно применение замкнутых гнутосварных и гнутых С-образных профилей.

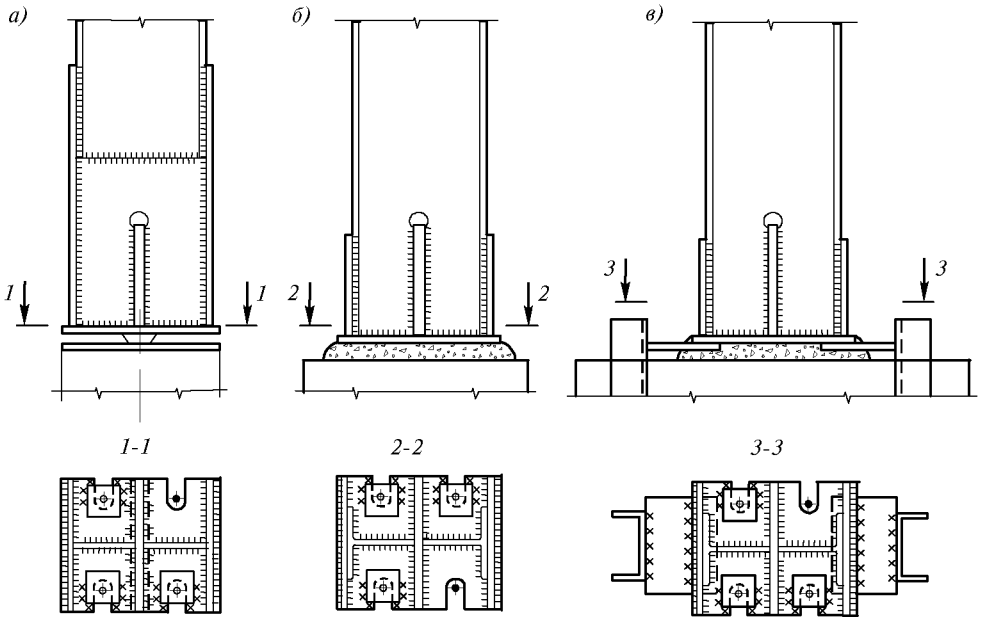


Рис.2.30. Узел соединения ветви опоры с фундаментом

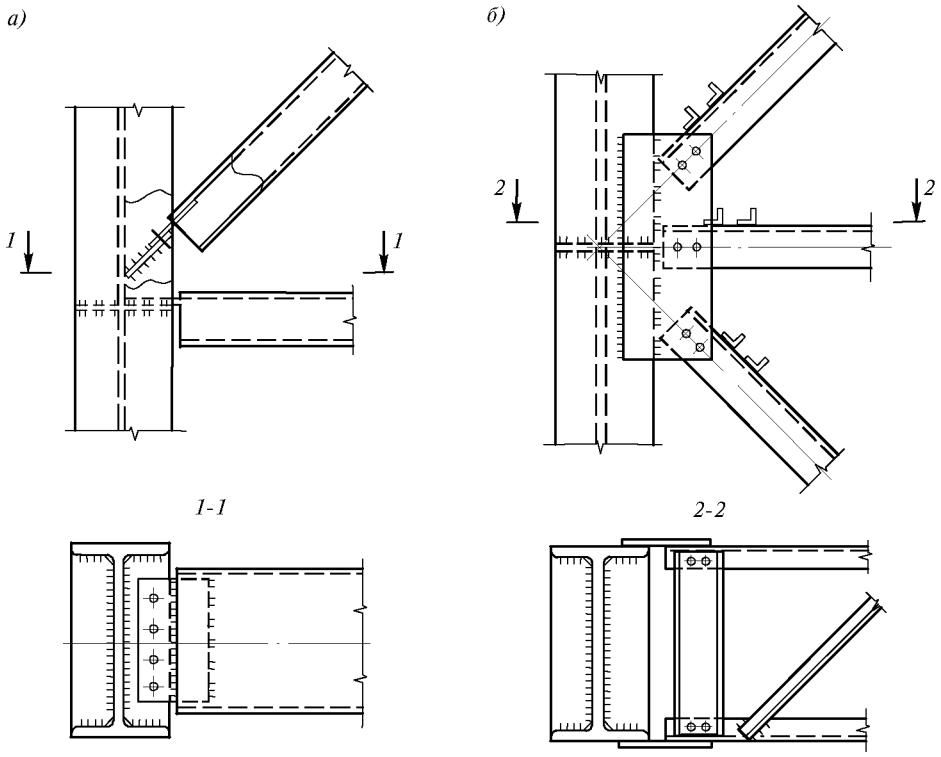


Рис.2.31. Узлы крепления распорок

Базой ветви является опорная плита, толщина которой определяется расчетом. Закрепление ветви на фундаменте осуществляется с помощью анкерных болтов; расстояние между анкерными болтами вдоль галереи не должно превышать 250 мм. Базы опор устанавливаются непосредственно на фундамент с последующей подливкой (рис.2.30*б*). При гибкости ветвей менее 70 рекомендуется передачу вертикального опорного давления производить на специальный лист, предусмотренный в фундаменте, через центрирующую планку, приваренную к опорной плите. Лист устанавливается на фундамент в проектное положение строго горизонтально (рис.2.30*а*).

Пространственные опоры должны обеспечивать устойчивость галереи в продольном направлении и передачу горизонтальных сил на фундаменты. Пространственные опоры выполняются обычно двух типов: плоская опора с подкосами или связевая опора башенного типа (рис.2.32). Опора должна быть ориентирована таким образом, чтобы подкос работал на сжатие. Применяемые для пространственных опор типы сечений и конструктивные решения аналогичны плоским опорам. В пространственных опорах базы ветвей, передающие на фундаменты горизонтальные силы, должны прикрепляться к специальным закладным деталям фундаментов (рис.2.32). Опоры галерей имеют, как правило, негабаритные для транспортировки размеры, поэтому поставляются на монтаж в виде отдельных элементов. Монтажные укрупнительные стыки рекомендуется выполнять на болтах. В целях снижения трудоемкости изготовления и монтажа для плоских опор перспективным решением в ряде случаев является применение опор А-образной формы с ветвями из трубчатых профилей без соединительной решетки. При соответствующих геометрических размерах опоры и наличии изгибающих моментов, возникающих от расцентровки ветвей в верхнем узле опоры, возможна постановка распорок в средней части (рис.2.33). Наличие в А-образной опоре расцентровки ветвей и двухконсольной балки коробчатого сечения для установки пролетного строения сужает область рационального применения таких опор. А-образные опоры рекомендуется применять преимущественно для одноконвейерных галерей или двухконвейерных галерей ограниченной ширины.

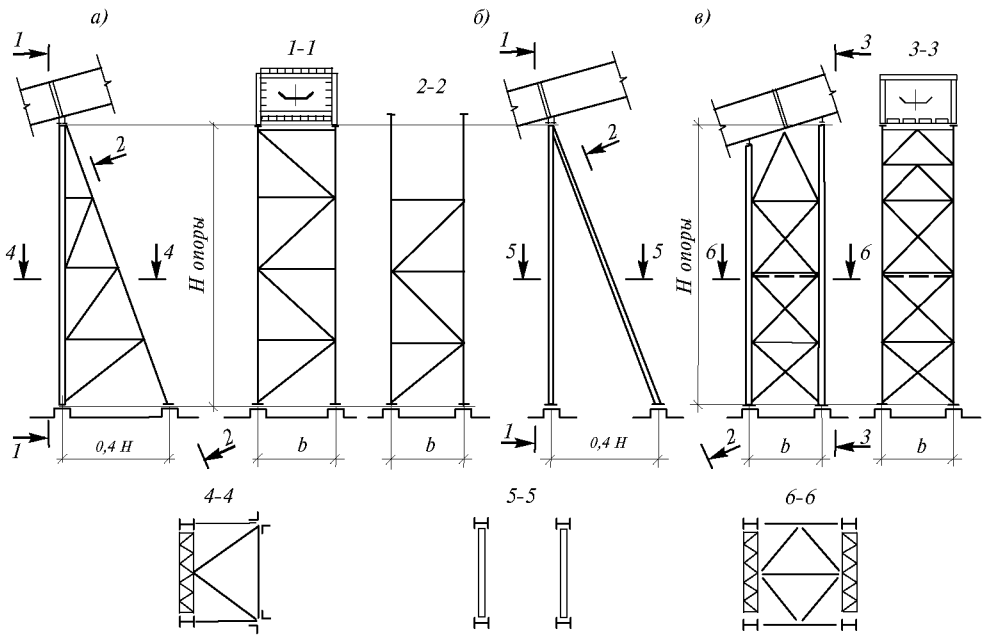


Рис.2.32. Пространственные опоры

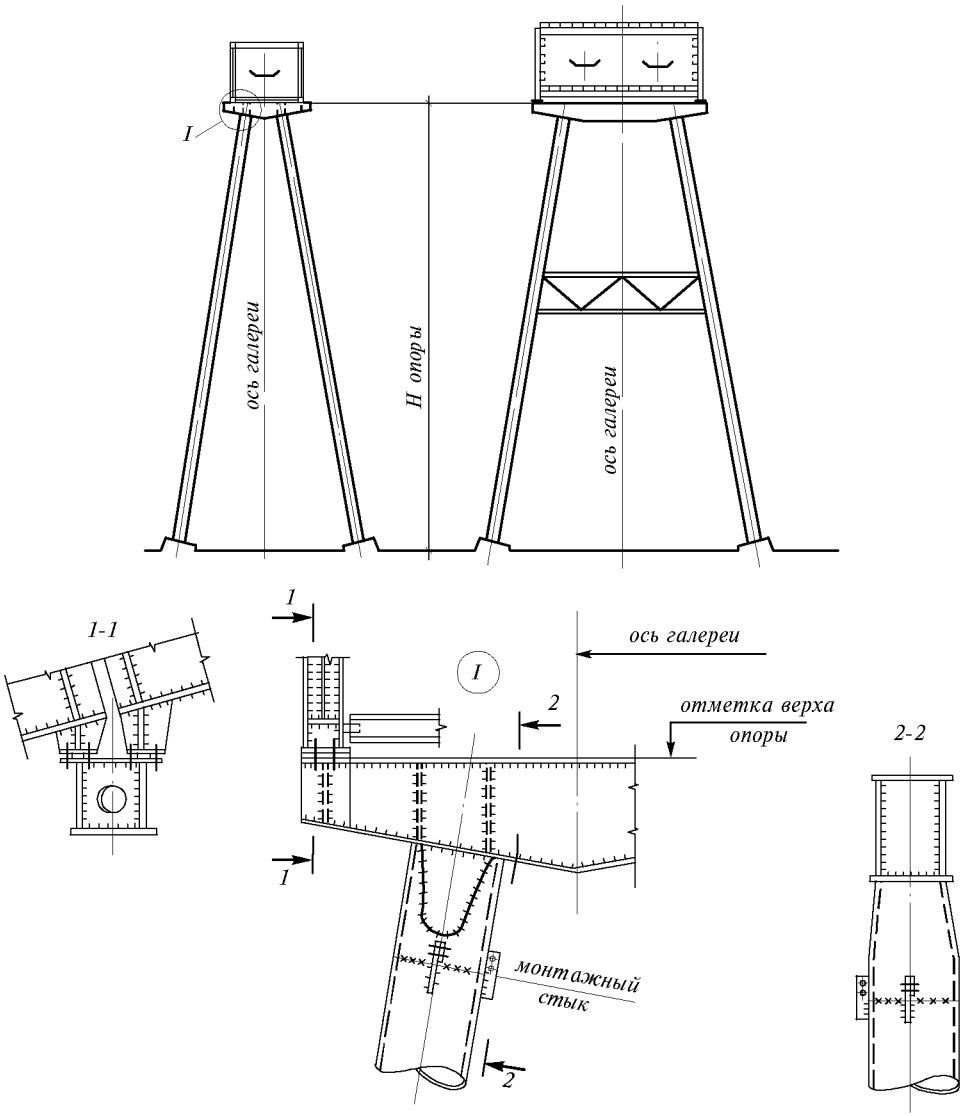


Рис.2.33. Опора с ветвями из трубчатых профилей без соединительной решетки

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 12.2.022-80 «Конвейеры. Общие требования безопасности».
2. Единые правила безопасности при дроблении, сортировке, обогащении полезных ископаемых и окусковании руд и концентратов. М., «Недра», 1978.
3. **Зеленский О.В., Петров А.С.** Справочник по проектированию ленточных конвейеров. М., «Недра», 1986.
4. **Тверье И.Х., Козлов А.А.** Отраслевой каталог. «Конвейеры ленточные, стационарные катучие». М., 1986 (НИИ экономики).
5. **Шиманский Ю.Л.** Справочник по строительной механике корабля. т.II. Л., Судпром, 1958.
6. Пособие по проектированию конвейерных галерей (к СНиП 2.09.03-85). М., Стройиздат, 1989.

ГЛАВА 3

ГРАДИРНИ

3.1. Общие сведения

Градирни – сооружения для охлаждения циркулярной воды оборотных систем энергетических и других промышленных предприятий, включающие основные узлы: вытяжную башню, водоохладительное устройство, подземные конструкции и водосборный бассейн.

По способу передачи тепла атмосферному воздуху можно классифицировать градирни на:

- **испарительные**, в которых передача тепла от воды воздуху осуществляется в основном за счет испарения;
- **радиаторные**, в которых передача тепла от воды воздуху осуществляется через стенку радиаторов за счет теплопроводности и конвекции,
- **смешанные**, в которых используется передача тепла за счет испарения, теплопроводности и конвекции.

По способу создания тяги воздуха градирни могут быть:

- **вентиляторные**, в которых воздух прокачивается нагнетательными или отсасывающими вентиляторами;
- **башенные**, в которых тяга воздуха создается высокой вытяжной башней;
- **открытые** или **атмосферные**, в которых для протока воздуха через них используются естественные токи воздуха – ветер и отчасти естественная конвекция.

Возможны и комбинированные решения с естественной и принудительной тягой.

В зависимости от конструкции оросительного устройства и способа, которым достигается увеличение поверхности соприкосновения воды с воздухом, градирни подразделяются на **пленочные**, **капельно-пленочные** и **брызгальные**.

Каждый из указанных видов градирен может иметь разнообразные конструкции водоохладительного устройства, отличающиеся размерами элементов, которые могут быть выполнены из различных материалов.

Башенные градирни выполняются отдельностоящими – круглыми или многоугольными в плане, а также секционными. Вентиляторные градирни могут быть секционными или отдельностоящими, а в плане иметь форму квадрата, прямоугольника, многоугольника или круга.

Выбор типа и параметров градирен следует производить по технологическим расчетам с учетом в проекте расходов воды и количества тепла, отнимаемого от охлаждаемого оборудования, температур охлаждаемой воды и требований к устойчивости охладительного эффекта от метеорологических параметров, инженерно-геологических и гидрогеологических условий строительной площадки, условий размещения охладителя на территории предприятия, характера ее застройки и организации транспортных путей, от химического состава добавочной и оборотной воды, и санитарно-гигиенических требований к воде, а также от технико-экономических показателей возведения градирен.

Башенные градирни с металлическим каркасом, применяемые наряду с железобетонными оболочками, по конструктивной форме могут быть разбиты на ребристо-кольцевые, сетчатые и подвесные. Подвесные градирни, в свою очередь, разделяются на подвесные одиночные башни и подвесные системы градирен. В отдельную подгруппу подвесных одиночных градирен могут быть выделены градирни с мембранной, вантовой и напряженной оболочкой.

Башенные градирни с металлическим каркасом могут конкурировать с железобетонными при их возведении в сейсмоактивных зонах и в регионах с суровыми климатическими условиями. А с увеличением высоты градирни от 120 до 200 м металлические башни вполне конкурентноспособны по отношению к железобетонным при их возведении в регионах с различными климатическими условиями и показателями сейсмичности.

В нашей стране башенные градирни с металлическим каркасом, введенные в эксплуатацию за последние 15 – 20 лет, составляют до 75% от общего количества градирен. Их широкое распространение обусловлено, кроме перечисленных выше факторов, высокой степенью индустриальности и технологичности изготовления металлоконструкций, а также возможностью монтажа оболочки круглогодично укрупненными марками без применения дорогостоящей специальной монтажной оснастки, с меньшими трудозатратами и сроками возведения по сравнению с железобетонными оболочками [1].

Существует серия башенных градирен с металлическим каркасом площадью орошения 1100, 1620, 2300 и 3200 м^2 (рис.3.1). Проекты разработаны для районов с сейсмичностью до 6 баллов включительно для I – II и III – IV ветровых районов (разработчик институт «Атомэнергопроект» г. С.-Петербург на основе научно-исследовательских и конструктивных работ ЦНИИПСК им. Мельникова).

Производительность градирен новой серии позволила обеспечить диапазон расходов воды от 6000 до 35000 м^3.

Указанная разработка привела к сокращению типоразмеров с 7 до 4, позволила повысить унификацию и индустриализацию конструкций и усовершенствовать технологию монтажа. На рис.3.1 представлен общий вид новой серии высокопроизводительных башенных градирен с металлическим каркасом и их основные размеры. Как видно из рисунка вытяжные башни новой серии выполнены в форме тороида вращения и имеют в плане вид правильного многоугольника (12 – 20 граней), а по высоте разбиты на 5 – 8 ярусов.

Количество граней и ярусов назначалось исходя из геометрических размеров башни, с учетом технологии ее монтажа укрупненными блоками каркаса, постоянными по высоте (10,85 м для всех ярусов, кроме первого) и переменными по ширине (от 6,0 до 12,0 м).

Пространственная жесткость каркаса обеспечивается угловыми стойками, горизонтальными кольцами жесткости и диагональными связями, выполненными из ферм с параллельными поясами одной высоты 1,0 м для башен всех типоразмеров.

Каркасы вытяжных башен изготавливают из углеродистой и низколегированной сталей. Для обшивки башни применяют гофрированные алюминиевые листы толщиной 1 мм и более, изготовляемые по нормам СПА-1500. Для заделки стыков между марками применяют плоские алюминиевые листы по ГОСТ 21631-76*.

Применение однотипных конструкций позволило унифицировать оснастку для монтажа конструкции и выработать единую технологию строительства. Опирание башни осуществляется на отдельностоящие монолитные железобетонные фундаменты, состоящие из плит толщиной от 0,6 до 1,0 м и подколонников, служащих для заделки опорных стоек каркаса. Основные объемы работ в строительстве градирен новой серии приведены в таблице 3.1.

Основной показатель, характеризующий качество проектирования башенных градирен с металлическим каркасом, является удельный расход металла на каркас в расчете на 1 м^2 площади орошения. В рассмотренных проектах удельный расход металла составил в среднем 0,24 т/м^2 для I – II ветрового района и 0,27 т/м^2 для III – IV ветрового района.

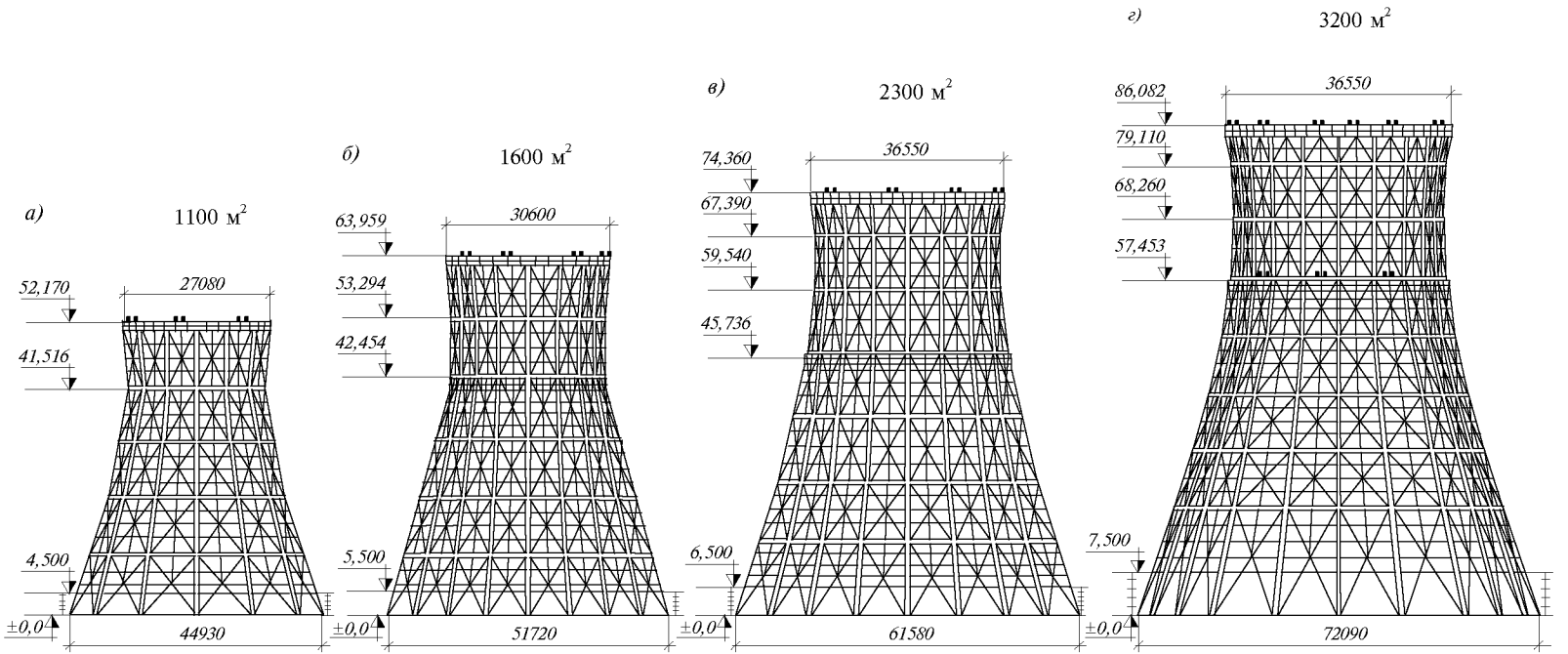


Рис.3.1. Серия башенных градирен с металлическим каркасом площадью орошения 1100, 1600, 2300, 3200 м^2

Таблица 3.1. Основные объемы работ при возведении серийных башенных градирен с металлической башней

№ п/п	Наименование работ	Ед. изм.	Серия градирен площадью орошения, м²							
			1100		1600		2300		3200	
			ветровые районы							
			I–II	III–IV	I–II	III–IV	I–II	III–IV	I–II	III–IV
1	Земляные работы	м³	9500	10500	12000	13000	18500	21000	25500	31000
2	Бетонные работы	—//—	330	350	420	450	620	670	900	950
3	Монолитные железобетонные конструкции	—//—	810	840	1130	1410	1660	1940	2380	3250
4	Сборные железобетонные конструкции	—//—	340	340	430	430	735	735	1085	1085
5	Стальные конструкции в т.ч.	тн	385	400	582	644	743	808	1100	1240
	– каркас башни	—//—	270	285	400	460	500	565	770	910
	– воздухорегулирующее устройство	—//—	64	64	94	94	123	123	170	170
	– затворы	—//—	5	5	5	5	9	9	10	10
	– трубопроводы водораспределения	—//—	46	46	83	83	111	111	150	150
6	Алюминиевые конструкции	тн	22	22	32	32	43	43	60	60
7	Асбестоцементные конструкции	тыс. м²	83,8	83,8	124	124	176,4	176,4	251,8	251,8
8	Деревянные конструкции	м³	112	112	146	146	213	213	296	296
9	Разбрызгивающие устройства	шт.	1120	1120	1640	1640	2350	2350	3270	3270

В таблице 3.2 приведены основные технико-экономические показатели башенных градирен с металлическим каркасом. Как видно из таблицы, удельные показатели по сметной стоимости вытяжной башни составляют 0,252 руб/м² (в ценах 1984 г.), а по трудоемкости 2,87 ч-д/м².

Таблица 3.2. Технико-экономические показатели башенных градирен с металлическим каркасом

Площадь орошения, м²	Сметная стоимость, тыс.руб. (в ценах 1984 г.)				Продолжительность строительства, мес.				Трудозатраты, чел.-дн.			
	Всего на 1 м²	в т.ч.			Всего на 1 м²	в т.ч.			Всего на 1 м²	в т.ч.		
		ПК	ВБ	ВУ		ПК	ВБ	ВУ		ПК	ВБ	ВУ
1100	$\frac{688}{0{,}625}$	104	291	293	11,8	2,0	4,3	5,5	$\frac{10285}{9{,}35}$	1270	2831	6184
1600	$\frac{970}{0{,}60}$	141	418	411	15,0	2,5	5,5	7,0	$\frac{14995}{14{,}9}$	1756	4371	8868
2300	$\frac{1369}{0{,}865}$	205	543	621	20,0	3,5	7,0	9,5	$\frac{19824}{8{,}62}$	2561	6365	10898
3200	$\frac{1984}{0{,}62}$	288	809	887	24,4	4,0	8,8	11,6	$\frac{28122}{8{,}79}$	3637	9869	14616

Примечание: ПК – подземные конструкции; ВБ – вытяжная башня; ВУ – водоохладительное устройство.

Разработаны также вытяжные башни с металлическим каркасом и обшивкой из алюминиевых гофрированных листов площадью орошения 4000, 5400 и 6400 м^2, высотой 90 – 110 м.

В таблице 3.3 приведены технико-экономические показатели наибольших по производительности башенных градирен с металлическим каркасом высотой до 110 м, возведенных в б. СССР в 1973 – 1975 годах.

Таблица 3.3. Технико-экономические показатели некоторых башенных градирен постройки 1973 – 1975 гг.

Наименование объекта	Кол-во градирен	Геометрические характеристики			Период возведения, года	Расход материалов	
		высота, м	диаметр, м			стали	алюминия
			основания	горловины			
Нововоронежская АЭС	7	91,5	76,5	43	1973 – 1974	947,5	79,6
Каширская ГРЭС	4	101	80	43,5	1974 – 1975	982	82
Армянская АЭС	4	110	96,5	54,7	1973 – 1975	1465	123

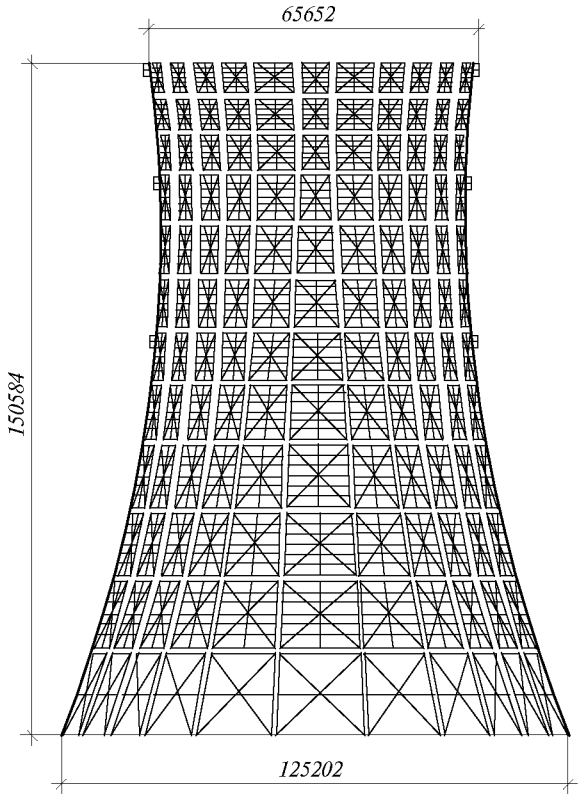


Рис.3.2 *а*. Башенная градирня ребристо-кольцевой структуры площадью орошения 9400 м^2. Общий вид

Упомянутыми ранее организациями разработан проект башенной градирни высотой 150 м площадью орошения 9400 м^2 с металлическим каркасом ребристо-кольцевой структуры (рис.3.2).

Расход стали по проекту, выполненному в традиционных решениях, составил 3207 т, а алюминия 155 т.

Пространственная жесткость башни обеспечивается угловым стойками, горизонтальными кольцами, вертикальными и диагональными связями, расположенными в каждой укрупнительной марке. Стойки, кольца и связи состоят из двух поясов, соединенных решеткой. К внутренним поясам стоек крепятся горизонтальные ригели. Для уменьшения пролета ригелей предусматриваются промежуточные опоры – вертикальные фермы. К горизонтальным ригелям через паронитовые прокладки на оцинкованных

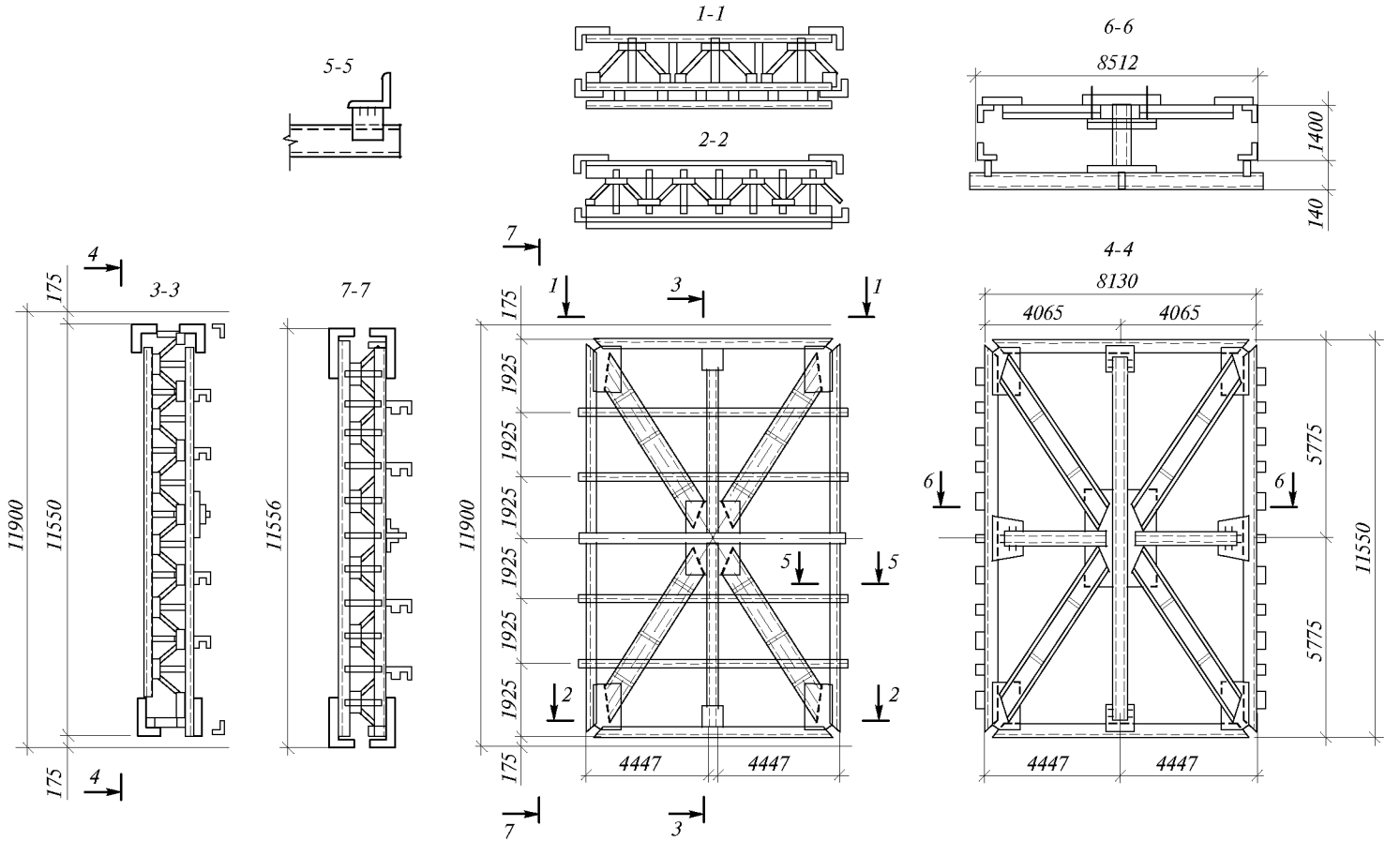


Рис.3.2 *б*. Башенная градирня ребристо-кольцевой структуры площадью орошения 9400 м^2. Монтажные марки

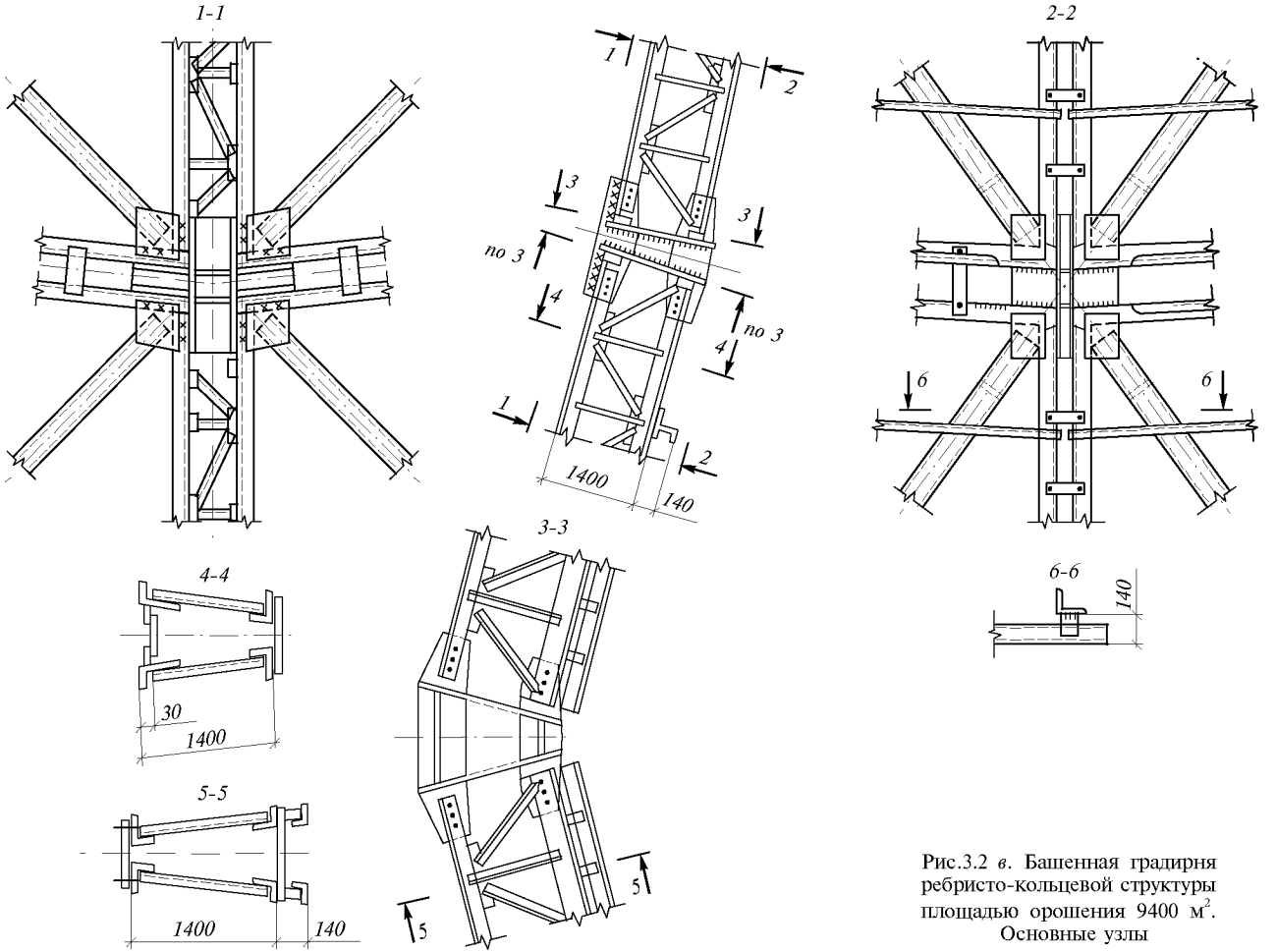


Рис.3.2 *в*. Башенная градирня ребристо-кольцевой структуры площадью орошения 9400 м^2. Основные узлы

болтах крепится алюминиевая обшивка. Монтажные марки соединяются друг с другом через крестовые узловые вставки. Пояса колец и внутренние пояса стоек соединяются планками, наружные пояса стоек – соединительной решеткой. Все монтажные соединения – на сварке.

Монтаж металлических башен градирен площадью орошения до 3200 м^2 осуществляется гусеничными или башенными кранами (рис.3.3). В таблице 3.4 приведены основные параметры металлических башен градирен площадью орошения от 1100 м^2 до 3200 м^2 и типы монтажных кранов для возведения. При монтаже используют блочный метод. На строительный объект доставляют элементы башни заводского изготовления россыпью (плоские фермы кольцевых и меридианальных элементов, отдельные элементы раскосов, косынки и т.д.). На площадке укрупнительной сборки производят укрупнительную сборку монтажных марок из элементов заводского изготовления. Элементы выкладывают на площадке внутренней стороной вверх, сборку осуществляют в специальных кондукторах. Собранные укрупненные марки обшивают алюминиевыми гофрированными листами. Транспортировку их в монтажную зону осуществляют на специальной тележке. Обшивку углов башни производят с подвесных люлек по ходу монтажа или после полного окончания монтажа башни. Установку укрупненных монтажных марок ведут поярусно с навешенными монтажными лестницами, подмостями и расчалками. Каждый последующий ярус монтируют после полного окончания работ по предыдущему ярусу. Монтаж каждого яруса начинают с установки марки, имеющей постоянную лестницу. Наружные расчалки крепят к якорям, внутренние – к анкерным болтам цокольной части градирни. После установки и выверки первой марки, устанавливают смежную марку с приваренной в верхнем углу крестовой узловой вставкой. При установке монтажных марок до замыкания яруса все марки между собой крепят только на сборочных болтах. Обварку узлов сопряжения марок производят после выверки всего яруса. Для заведения последней марки каждого яруса осуществляют оттяжку свободных углов первой и последней установленных марок с помощью рычажных лебедок. Последнюю марку каждого яруса устанавливают с двумя крестовыми узловыми вставками.

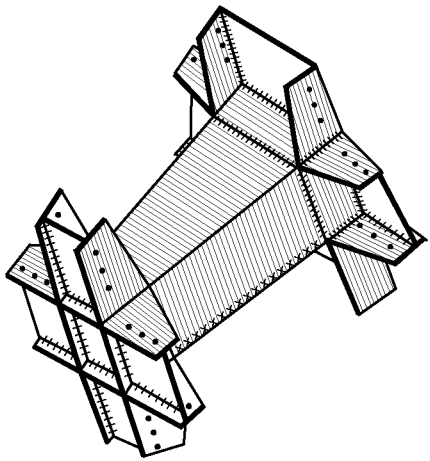


Рис.3.2*г*. Башенная градирня ребристо-кольцевой структуры площадью орошения 9400 м^2. Узловая вставка (MI-MI5)

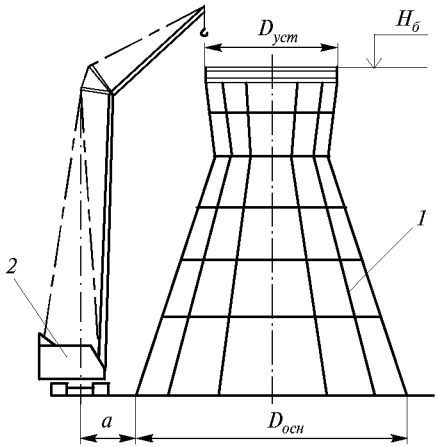


Рис.3.3. Схема монтажа башенных градирен с металлическим каркасом площадью орошения от 1100 до 3200 м^2. *1* – вытяжная башня; *2* – монтажный гусеничный кран; $D_{осн}$ – диаметр основания; $D_{уст}$ – диаметр выходного отверстия; $H_б$ – высота башни; *a* – размер привязки крана

Таблица 3.4. Основные параметры металлических башен градирен площадью орошения от 1100 до 3200 м^2

Параметры	Показатели для градирен площадью орошения, м^2			
	1100	1600	2300	3200
Производительность, м^3/час	11000	16000	23000	32000
Высота башни, м	52,3	64,1	74,4	86,1
Диаметр основания, м	43,4	50,7	60,4	71,2
Диаметр устья, м	26,2	30,0	35,8	41,2
Масса стальных конструкций для III–IV ветровых районов, т	285	460	565	910
Масса алюминиевой обшивки, т	22,0	33,0	42,7	59,5
Тип монтажного гусеничного крана	ДЭК-631	КС-8165	КС-8165	МКГС-100

3.2. Новые технические решения оболочек башенных градирен

Наряду с конструктивной формой ребристо-кольцевого каркаса разработаны подвесные преднапряженные оболочки градирен с подвеской к вертикальным пилонам, схематически представленные на рис.3.4 при опирании на один пилон и на рис.3.5 при опирании – на несколько пилонов [2,3].

Схема (*а*), рис.3.4, где подвеска вантовой оболочки осуществляется на наклонных растянутых элементах за верхнее сжатое кольцо жесткости, предложена в нашей стране и Германии в начале 70-х годов.

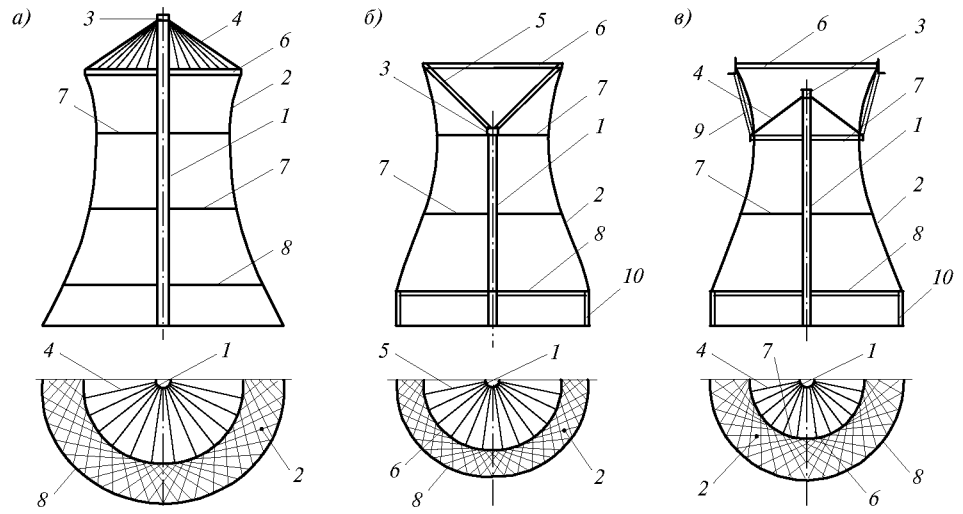


Рис.3.4. Схемы вантовых оболочек башенных градирен с одним пилоном
а – с растянутыми элементами крепления сжатого верхнего кольца жесткости к пилону; *б* – со сжатыми элементами крепления растянутого верхнего кольца жесткости к пилону; *в* – с растянутыми элементами крепления промежуточного сжатого кольца жесткости и с нейтральным верхним кольцом жесткости; *1* – пилон; *2* – сетчатая оболочка; *3* – оголовок пилона; *4* – тяги подвески; *5* – подкосы; *6* – верхнее кольцо жесткости; *7* – промежуточное кольцо жесткости; *8* – нижнее кольцо жесткости; *9* – дополнительные стойки верхней зоны башни; *10* – колонны-направляющие нижнего кольца жесткости

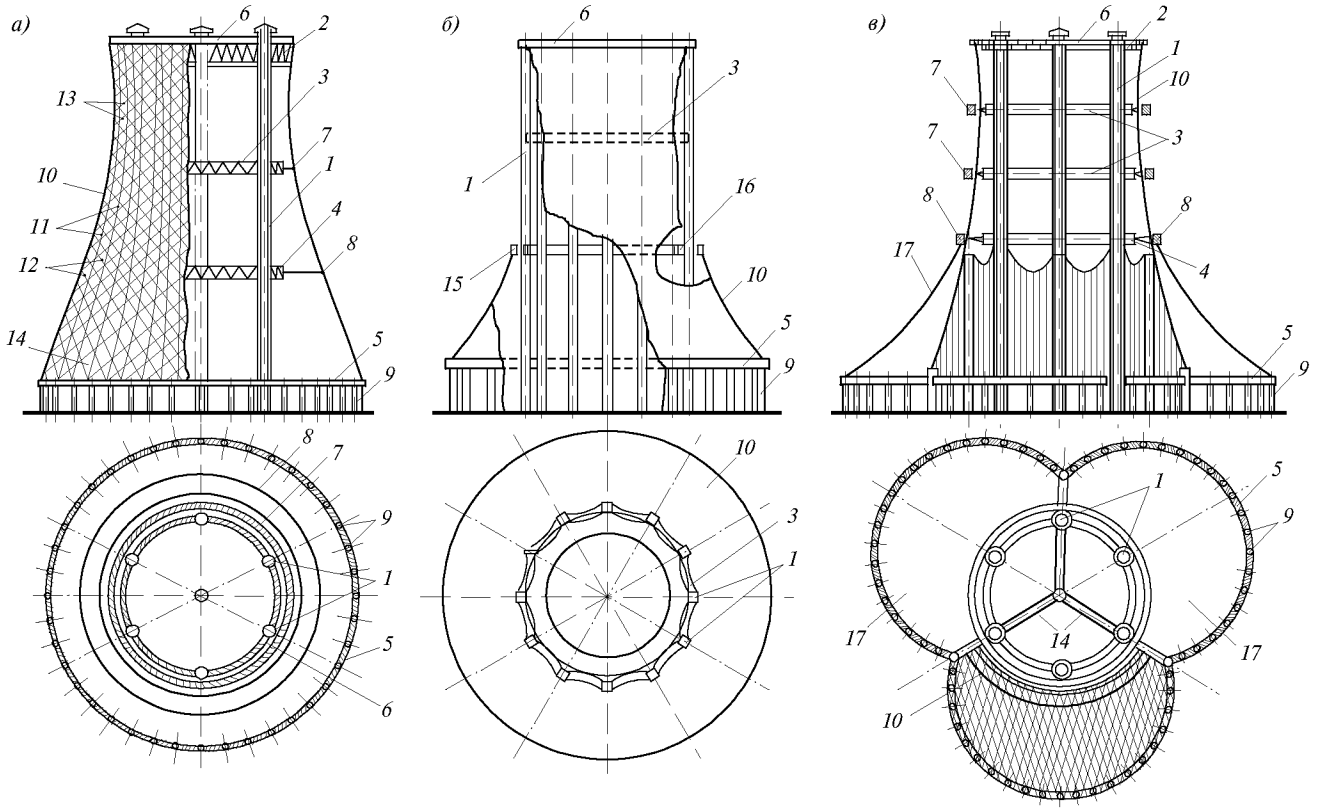


Рис.3.5. Схемы многопилонных оболочек (вантовых) башенных градирен большой производительности

а - с пилонами внутри оболочки; *б* - с пилонами, проходящими сквозь поверхность; *в* - трехсекционная оболочка; *1* - колонны; *2* - верхняя ферма жесткости; *3* - первое промежуточное кольцо жесткости; *4* - второе промежуточное кольцо жесткости; *5* - нижнее кольцо жесткости, или часть кольца; *6* - верхнее кольцо жесткости; *7,8* - промежуточные гибкие пояса оболочки; *9* - колонны-направляющие нижнего кольца жесткости; *10* - сетчатая оболочка; *11* - меридианальные ванты; *12,13* - диагональные ванты; *14* - распорка; *15* - наружное промежуточное кольцо жесткости; *16* - внутреннее промежуточное кольцо жесткости; *17* - нижняя сетчатая оболочка

На основе этой идеи в 1976 г. в Германии близ г. Дортмунда (Шмехаузен, Вестфалия) на АЭС Энтрон для энергоблока мощностью 300 мВт возведена вантовая градирня высотой 150 м при диаметре основания 140 м.

Вантовая сеть такой градирни потребовала высокой точности изготовления и установки элементов, а также обеспечения необходимой стабильности усилий преднапряжения для поддержания работоспособности ограждающих панелей. Возникли проблемы компенсации потерь преднапряжения от ползучести канатов, обеспечения устойчивости центрального пилона, защиты отдельных канатов от коррозии. При монтаже вантовой градирни рассматриваемой системы не исключены сложные монтажные операции по установке ячеек облицовки на большой высоте.

Дальнейший поиск эффективных конструктивных форм металлических каркасов градирен привел к решениям (Оргэнергострой, ЦНИИПСК им. Мельникова, Белпроектстальконструкция, ВНИПИэнергопром), показанным на схемах (*б*) и (*в*) рис.3.4, где нижнее кольцо жесткости своим весом натягивает меридиональные и диагональные элементы сети из полосовой стали, взаимоподвижные в промежуточных узлах пересечения вант. В отличие от схемы (*б*), в схеме (*в*) верхнее кольцо жесткости не испытывает значительного сжатия от постоянной нагрузки.

По схеме рис.3.4*б* построены и эксплуатируются две градирни высотой 53,6 м площадью орошения 1200 м^2 на ТЭЦ-2 в г. Волжском. Разработаны так же проекты оболочек таких градирен высотой 87 м и площадью орошения 3200 м^2.

Одно из направлений в создании конструктивных форм высотных башенных металлических градирен – сетчатые блочные оболочки с облицовкой из преднапряженных тонколистовых стальных или алюминиевых элементов (ЦНИИПСК) показано на рис.3.6. Ведутся поисковые исследования и по другим направлениям создания высотных металлических оболочек башенных градирен нового поколения, более эффективных, чем представленные на рис.3.1 и 3.2.

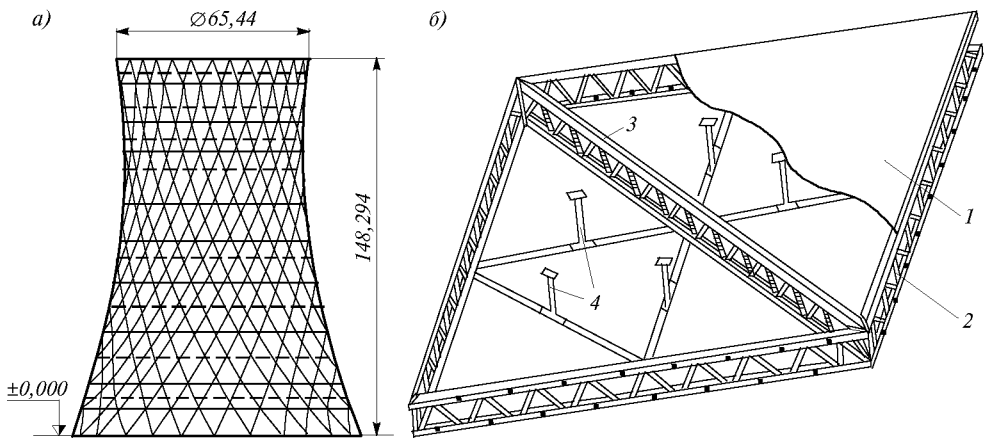


Рис.3.6. Сетчатая оболочка башенной градирни с облицовкой из преднапряженных тонколистных элементов: *а* – общий вид градирни; *б* – укрупненный монтажный блок; *1* – мембрана; *2* – бортовая ферма; *3* – средняя ферма; *4* – распорка

Разработаны специальные приемы монтажа высотных башенных градирен высотой до 180 м без применения дорогостоящих специальных монтажных кранов для подъема блоков монтируемых оболочек градирен на отметки выше 100 – 120 м. Этим приемам отвечают новые технические решения многопилонных оболочек, близких по схемам к показанным на рис.3.5.

Приемы использования пилона для бескранового монтажа градирен с напряженными оболочками показаны на рис.3.7 применительно к схемам (*а*) и (*б*) по рис.3.4.

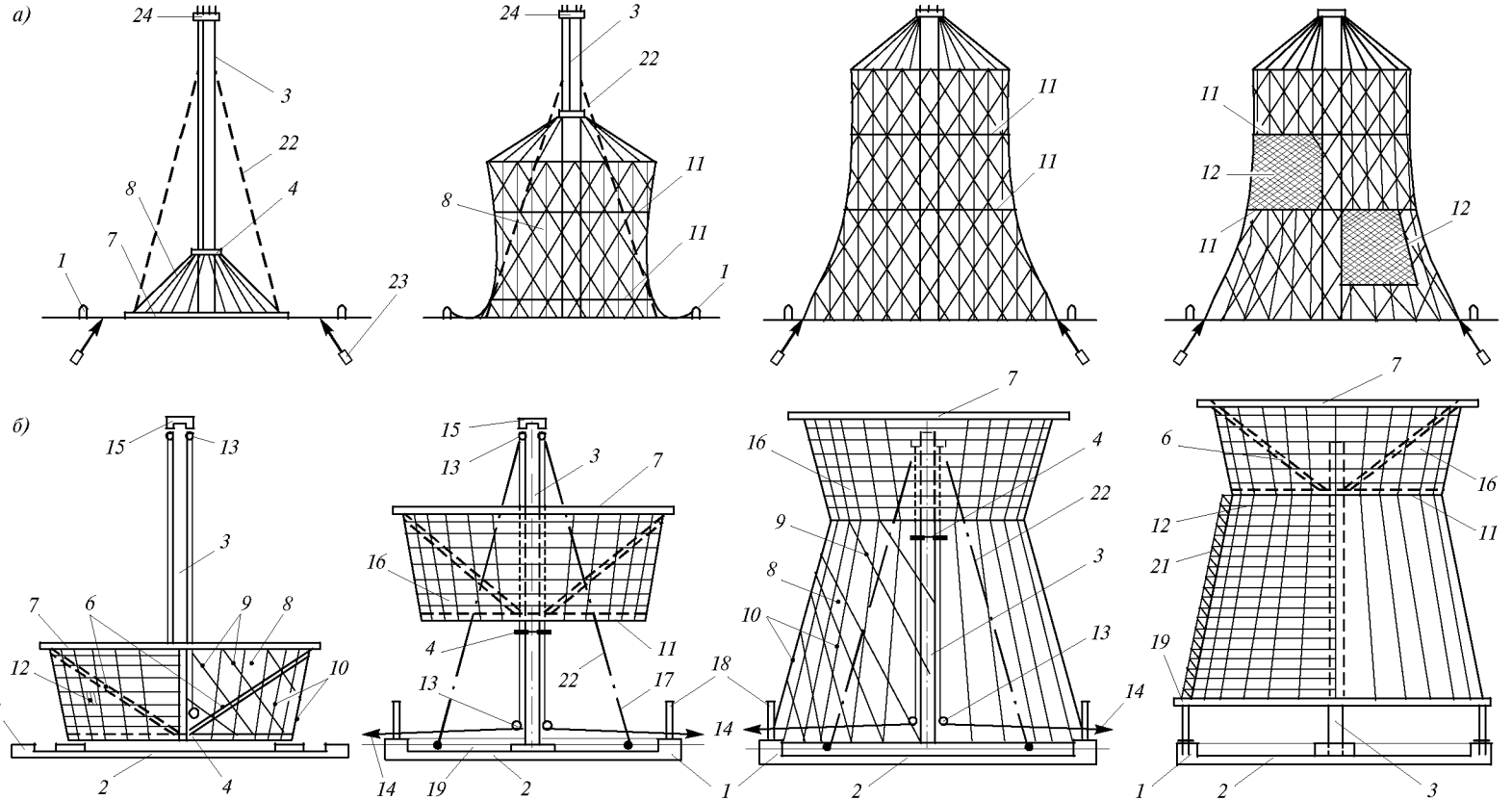


Рис.3.7. Схемы монтажа оболочки, изготавливаемой с применением напряженных вант

а - с натяжением вант на внешние анкера у основания башни; *б* - с натяжением вант массой нижнего кольца жесткости; *1* - фундамент; *2* - чаша; *3* - пилон; *4* - монтажное кольцо; *5* - грузоподъемный механизм; *6* - наклонный элемент; *7* - верхнее кольцо; *8* - вантовая сеть; *9* - диагональный элемент; *10* - меридиональный элемент; *11* - промежуточное кольцо; *12* - обшивка; *13* - полиспаст; *14* - лебедки; *15* - монтажный оголовок; *16* - укрупненный блок; *17* - расчалка; *18* - воздуховходное отверстие; *19* - блок-форма нижнего кольца; *20* - бадья; *21* - монтажные подмости; *22* - наклонные ванты; *23* - анкер; *24* - домкраты

3.3. Принципы проектирования и расчета оболочек башенных градирен

Расчеты металлоконструкций башенных градирен – одна из сложных задач строительной механики – решается для каркасов, представленных на рис.3.1 и 3.2 на основе конечно-элементного анализа стержневых конструкций. Для градирен с преднапряженными оболочками в ЦНИИПСК им. Мельникова разработаны специальные приемы расчета, отражающие специфику таких объектов – преднапряжение, переменность связей, геометрическую нелинейность.

При групповом расположении башен на расстояниях в свету между основаниями порядка высоты и менее к полученным расчетным усилиям от ветрового воздействия вводится множитель (коэффициент условий работы) до 1,4.

Более строгие оценки влияния ветра, а также сейсмики, на металлоконструкции высотных градирен могут быть получены после выполнения экспериментально-теоретических исследований применительно к конкретным площадкам строительства и рассматриваемым конструктивным формам градирен.

Теоретические исследования и проектирование металлических оболочек башенных градирен – как крупнейших современных сооружений с большими несущими поверхностями требуют решения ряда проблем.

Рассмотренные выше и намечаемые новые конструктивные формы оболочек градирен могут быть реализованы на основе системного подхода к их проектированию.

Особенности поведения конструкций, образующих сложную систему, видоизменяются и усложняются по мере совершенствования технических решений этих сооружений, вызываемых необходимостью увеличения технологических параметров градирен. Этот процесс опирается на развитие конструктивных форм, применительно к строительным металлическим конструкциям.

Переход от обычных железобетонных или металлических каркасно-обшивных гиперболических башен к преднапряженным сетчатым каркасам градирен характеризуется следующими приемами:

Во-первых, в данном случае используются предварительное напряжение конструкций с применением стальных полос, которые в определенных границах воспринимают не только нарастающие деформации растяжения, но и падение растягивающих (заранее созданных) деформаций, до полного исчерпания растяжения в ванте. Создается эффект восприятия гибкими элементами сжимающих деформаций.

Во-вторых, применяются растянутые поверхности. В данном случае растяжение создается специальными устройствами и носит самостоятельный характер или растянутая поверхность возникает в поле гравитационных сил, либо динамически при вращении опорной конструкции.

В градирнях с преднапряженными оболочками промежутки между узлами полос заполняются мембранными элементами, напрягаемыми либо одновременно с полосами, либо на специальные рамки-каркасы. Растянутые мембраны предельно тонки, и в их сечениях пренебрежимо мала энергия деформации изгиба, восприятие которого требует дополнительных затрат материала, что часто происходит в традиционных металлических каркасно-обшивных конструкциях башен.

В-третьих, концентрация материала. Например, в башенных градирнях с преднапряженными оболочками могут быть использованы высокопрочный растянутый материал, концентрируемый в полосах, и сжатый материал – в мощной стойке пилона и опорных кольцах.

В-четвертых, в одних и тех же элементах совмещается несколько функций: это – пространственная работа, совмещение в одном элементе несущего и ограждающего (или изолирующего) элемента и т.п. Обшивки оболочек градирен полностью или

частично сопротивляются воздействиям на башню. Кроме того, возможно наоборот осуществление разделения функций, что приводит к появлению градирен с внешними или внутренними опорными сжатыми пилонами, обеспечивающими совмещение трех функций – замену монтажных кранов, средство для обеспечения преднапряжения (подвески) сети и, наконец, участие в восприятии внешних (ветровых или сейсмических) воздействий.

В-пятых, создается динамически прочная и устойчивая конструкция, воспринимающая ветровые, сейсмические или импульсные нагрузки.

Многоэлементность математической модели металлической оболочки башенной градирни требует для выполнения расчетов и конструирования мощной вычислительной техники, поскольку необходимо учитывать возможность проявления не только общих, но и локальных эффектов статического и динамического поведения сооружения, определяющих его надежность и долговечность. Достаточно рациональные и компактные методы расчетного анализа таких строительных конструкций, как металлические башенные градирни, могут быть получены на базе распространенных в вычислительной математике проекционных подходов, обеспечивающих эффективное и корректное сжатие перерабатываемых данных.

Башня градирни типа преднапряженной оболочки – весьма сложная совокупность подконструкций: пилона, сети, колец жесткости и обшивки.

Полосы напрягаются нижним тяжелым сталежелезобетонным кольцом жесткости, скользящим по вертикальным колоннам-направляющим. По вертикали вверх смещение этого кольца ограничено упорами, что создает при ветровых воздействиях систему с односторонними связями, но гарантирует стабильное натяжение подавляющего большинства полос. В такой конструкции, в отличие от возведенной в Германии, исключаются реологические явления в элементах сети и не требуется чрезмерно высокая точность разметки длин вант, поскольку при натяжении оболочки происходит автоматическая самоустановка сети. Тем не менее, длина полос должна отвечать прокладке по хордам геодезических линий как геометрически кратчайших, например, на поверхности однополостного гиперболоида вращения. В ЦНИИПСК им. Мельникова разработана специальная программа построения геодезической сети.

Проблема обеспечения точности сборки стержневых металлоконструкций актуальна и для каркасов градирен. К ее решению может быть применен метод статистического моделирования сборки стержневой системы из элементов с допусками на длину и кривизны оси стержня, а также с допусками на геометрию монтажных стыков и узлов связей с внешней средой по отношению к конструкции. Для анализа точности сборки по координатам узлов и по контролируемым усилиям в элементах необходима разработка алгоритмов конечноэлементного анализа на основе метода перемещений. Основная система этого метода строится по номинальным размерам, а отклонения от номиналов моделируется нагрузками типа линейных и угловых дислокаций стержней. К дополнительным нагрузкам сводятся и начальные кривизны оси элементов. К таким же нагрузкам в принципе может быть сведена и погрешность в оценке жесткостей поперечных сечений стержней. В математической модели всегда используется триангулированная номинальная матрица жесткости, а все случайные факторы разыгрываются в правых частях линейной системы уравнений равновесия. Метод Монте-Карло обеспечивает с помощью специальных программ-датчиков случайных чисел формирование десятков и сотен правых частей.

Полученные факторы перемещений по мере их вычисления подвергаются статистической обработке, а после завершения ее этапов выдаются значения математических ожиданий и дисперсий усилий в элементах конструкции каркаса.

Взаимная подвижность полос в узлах каркаса моделируется с помощью дополнительных упругих связей, имеющих разную жесткость в направлении нормали и касательной плоскости к срединной поверхности оболочки.

Геометрическая нелинейность каркаса и пилона, а также колец жесткости учитывается в программах расчета на ЭВМ построением геометрической матрицы жесткости или приближенно на основе метода дополнительных параметров жесткости [4]. Этот метод позволяет использовать для геометрически нелинейного анализа стержневых конструкций обычные линейные программы расчета стержневых систем методом перемещений. Потеря натяжения некоторых полос и выключение связей по нижнему кольцу моделируется итерационно на основе метода дополнительной нагрузки, с применением способов ускорения сходимости. При этом в узлах установки односторонних связей вводятся фиктивные упругие связи и при необходимости либо компенсируются дополнительными нагрузками их реакции (если в узле реальная связь отсутствует), либо подбирается такая дополнительная нагрузка, которая по перемещениям обеспечивает замыкание системы при наличии связи. Во всех перечисленных подходах достигаются минимальные затраты машинного времени на самый трудоемкий процесс – триангуляцию матрицы жесткости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Шершнев Ф.А., Васильев А.П., Ким Ен Бе.** Металлические каркасно-обшивные башенные градирни. Обзорная информация. Серия I: Тепловые электростанции, теплофикация и тепловые сети. Вып.1, М.: Информэнерго, 1985.
2. Особенности проектирования и строительства вантовых башенных градирен – М.Б.Джуринский, М.О.Метс, Г.И.Дубовик и др. – /Обзорная информация сер.1 Тепловые электростанции. Теплофикация и тепловые сети, вып.4, – М.: Информэнерго, 1987.
3. Особенности проектирования и строительства вантовых башенных градирен на Волжской ТЭЦ №2, /М.Б.Джуринский, В.М.Фридкин, Б.М.Доскемпиров, М.О.Метс, В.Г.Чумаченко. Серия I: Тепловые электростанции теплофикации и тепловые сети. Обзорная информация, вып.12, М.: Информэнерго, 1989.
4. **Петропавловский А.А.** и др. Вантовые мосты. «Транспорт», М., 1985.

ГЛАВА 4

ОТКРЫТЫЕ КРАНОВЫЕ ЭСТАКАДЫ

4.1. Общие положения

Открытые крановые эстакады широко используются на многих предприятиях различных отраслей народного хозяйства. Они предназначены для обслуживания определенных технологических процессов, связанных с перемещением грузов. Открытые крановые эстакады относятся к категории специальных сооружений промышленного назначения, основными строительными элементами которых являются продольные ряды колонн и подкрановые конструкции, несущие мостовые краны.

В зависимости от требований эксплуатации эстакады могут проектироваться одно- или многопролетными.

Эстакады характеризуются грузоподъемностью кранов, высотой, величиной пролета и шагом колонн. В эстакадах применяются электрические мостовые краны разных типов: общего назначения, специальные грейферные и магнитно-грейферные. Грузоподъемность используемых кранов обычно колеблется от 5 до 50 т, в отдельных случаях она может достигать 100 т. Режим работы кранов, в соответствии с классификацией ГОСТ 25546-82*, в основном 5К-6К (средний). Возможны случаи применения кранов с режимом 8К. Высота эстакады (отметка головки подкранового рельса) устанавливается в зависимости от назначения эстакады и практически изменяется от 6 до 20 м; в конкретных случаях высота эстакады может превышать указанный предел (рис.4.1). Нулевой отметкой условно считается уровень спланированной земли в пролете эстакады либо отметка головки рельса железнодорожного пути. Пролет эстакады равен расстоянию между разбивочными осями, которое определяется пролетом крана и привязкой осей к крановым путям. В отличие от промышленных зданий пролеты эстакад могут не соответствовать унифицированным размерам. Пролеты применяемых мостовых кранов, как правило, располагаются в пределах от 16,5 до 34,5 м. Шаг колонн может приниматься 12, 18 и 24 м в зависимости от результатов технико-экономического расчета. Наиболее распространенный шаг колонн 12 м.

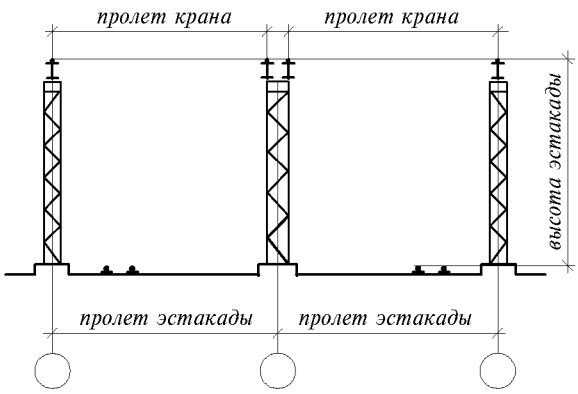


Рис.4.1. Основные размеры эстакады

Конструкции открытых крановых эстакад эксплуатируются в существенно худших условиях, чем конструкции производственных зданий, так как они постоянно подвергаются непосредственным атмосферным воздействиям; крановая нагрузка для них является основной (при относительной малой массе строительных конструкций) и вследствие этого увеличивается эффект ее многократного повторного действия; отдельно стоящие опоры эстакад гораздо более деформативны чем колонны зданий, развязанные конструкциями шатра, и поэтому локальная крановая нагрузка в меньшей степени перераспределяется между соседними несущими конструкциями; площадки для складирования часто перегружаются, что вызывает деформации грунтов оснований, соответствующие крены фундаментов и, как следствие,

изменение ширины подкранового пути и повышенный износ конструкций. С учетом перечисленных особенностей наиболее общие рекомендации по схемам, конструктивным решениям и расчету стальных, железобетонных и смешанных конструкций этого класса приводятся в справочном пособии к СНиП «Проектирование открытых крановых эстакад» [4].

Наряду с широко применяемыми обычными эстакадами, в последние десятилетия нашли применение надводные крановые эстакады. Эти эстакады предназначены в основном для выгрузки мостовыми кранами древесины, поступающей водным путем на предприятия целлюлозно-бумажной и деревообрабатывающей промышленности, и ее дальнейшей обработки.

Надводная крановая эстакада состоит из надводной части и примыкающей к ней береговой части, представляющей собой обычную открытую крановую эстакаду. Как правило, надводная и береговая части эстакады разделяются температурным швом. Надводная эстакада, в соответствии с технологическим процессом, для которого она предназначена, может не иметь береговой части. Начиная с 1965 года надводные эстакады проектируются консольными, что позволяет исключить опоры в русле реки [1, 2]. Надводная часть состоит в этом случае из одного или двух шагов продольных рядов колонн и подкрановых конструкций, имеющих надводную консоль (рис.4.2).

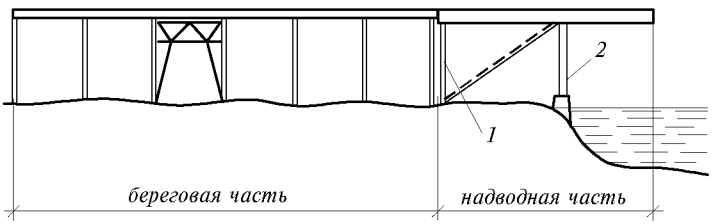


Рис.4.2. Принципиальная схема надводной крановой эстакады
1 – береговая опора; *2* – опора у уреза воды

Длина консоли в соответствии с условиями эксплуатации может быть принята 12÷30 м. Шаг колонн надводной части зависит от длины консольного участка. Применение консольных надводных эстакад снижает стоимость и сокращает сроки строительства, улучшает условия судоходства и выгрузки древесины по сравнению с эстакадами, имеющими опоры в русле реки.

4.2. Схемы эстакад

Открытые крановые эстакады могут проектироваться по двум схемам. Первая схема традиционная и представляет собой ряды колонн, связанные между собой подкрановыми конструкциями и вертикальными связями, обеспечивающими устойчивость в продольном направлении и воспринимающими силы продольного торможения кранов. Передача тормозных усилий с подкрановых балок на связи конструктивно осуществляется так же, как в аналогичных узлах промышленных зданий. В поперечном направлении колонны свободно стоящие, жестко заделанные в фундаменты. Во второй схеме в поперечном направлении имеются ригели (распорки), соединяющие надкрановые части («шейки») противоположных рядов колонн и расположенные выше габарита мостового крана. Вторая схема применяется в тех случаях, когда требуемая жесткость эстакады в поперечном направлении не может быть обеспечена только отдельно стоящими колоннами. Длина эстакады определяется технологическим заданием; разделение эстакады на температурные блоки определяется требованиями СНиП. Допускается проектирование эстакад с температурными блоками большей длины при учете результатов расчета на температурные воздействия.

Вертикальные связи устанавливаются, как правило, в середине температурного блока. Связи могут быть крестовыми, портальными или из одного раскоса.

Колонны эстакад проектируются решетчатыми или сплошностенчатыми. Обычно применяются решетчатые колонны габаритные для транспортировки, с вертикальными ветвями (тип *1*). Рекомендуемое отношение ширины свободно стоящей (консольной) колонны к ее высоте колеблется в пределах 1/4 – 1/5. В случае, когда высота эстакады превышает 15 м, экономически целесообразно обеспечивать требуемую деформативность эстакады в поперечном направлении за счет применения колонн с наклонными ветвями (рис.4.3): тип *2* – с вертикальной и наклонной ветвями, тип *3* – с двумя наклонными ветвями, в том числе – А-образная. Поскольку ширина таких колонн в основании может превышать транспортный габарит, при проектировании следует предусмотреть возможность расчленения ее на отдельные части. На А-образные колонны и колонны типа *2* рекомендуется устанавливать только одну «нитку» подкрановых балок, в связи с чем применение таких колонн ограничивается наружными рядами.

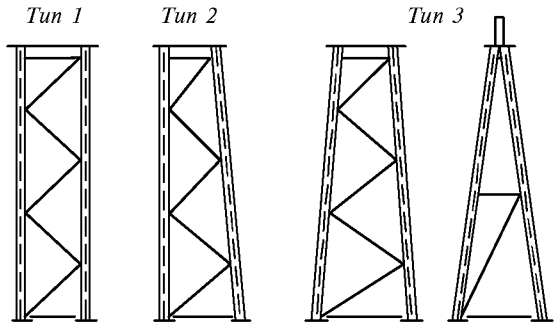


Рис.4.3. Типы колонн

Сплошностенчатые колонны могут применяться для невысоких однопролетных эстакад с кранами грузоподъемностью до 10 т, при этом целесообразно использование прокатных профилей. Особого внимания требует обеспечение устойчивости стержня колонны в направлении вдоль эстакады. Принимая решение об установке распорок, необходимо убедиться, что технологический процесс исключает возможность их повреждения при эксплуатации. Как правило, применение распорок из-за их уязвимости не рекомендуется.

Подкрановые конструкции включают в себя подкрановые балки, горизонтальные тормозные балки, вертикальные вспомогательные фермы, горизонтальные и вертикальные связи (рис.4.4). Для крановых эстакад применяются как разрезные, так и неразрезные подкрановые балки. Неразрезные подкрановые балки повышают надежность эксплуатации эстакады и обеспечивают снижение расхода стали на 10 – 15%. Целесообразность применения этих балок должна оцениваться в каждом конкретном случае с учетом режима работы кранов, шага колонн, податливости основания. Следует учесть, что неразрезные подкрановые балки несколько увеличивают трудоемкость монтажа из-за необходимости устройства равнопрочных стыков балок и усложняют выполнение ремонтных работ по замене отдельных пролетов балки, имеющих дефекты.

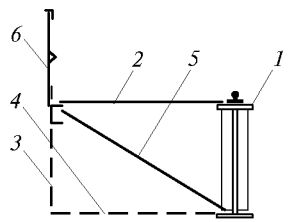


Рис.4.4. Схема подкрановой конструкции

1 – подкрановая балка; *2* – тормозная балка; *3* – вспомогательная ферма; *4* – горизонтальные связи по нижнему поясу; *5* – вертикальная связь; *6* – ограждение

Подкрановые балки обычно проектируются сплошностенчатыми прокатного или сварного двутаврового сечения. С целью снижения расхода металла при пролетах балки 24 м и более возможно применение решетчатых подкрановых балок. При наличии кранов грузоподъемностью до 20 т лег-

кого и среднего режимов работы (5К и ниже) и шаге колонн до 12 м включительно возможно применение подкрановых балок сварного двутаврового сечения с развитым верхним поясом, воспринимающим тормозные усилия [3]. Подкрановые балки устанавливаются по осям ветвей колонн либо со сдвижкой к середине колонны с целью уменьшения величины горизонтального смещения в поперечном направлении от вертикальной нагрузки.

Для обеспечения устойчивости верхних поясов подкрановых балок и восприятия поперечного торможения мостовых кранов предназначаются горизонтальные балки, являющиеся элементом тормозной конструкции. Тормозные балки при тяжелом режиме работы кранов (6К-8К) проектируются, как правило, сплошностенчатыми; в других случаях возможно применение решетчатых балок. Одним из поясов тормозных балок крайних рядов является верхний пояс подкрановой балки; для тормозных балок средних рядов поясами являются верхние пояса подкрановых балок смежных пролетов. Для удобства и безопасности прохода по тормозным конструкциям при решетчатых тормозных балках устраиваются специальные ходовые дорожки, при сплошностенчатых тормозных балках к гладкому листу приваривается дорожка из рифленой стали шириной 400 – 800 мм. В обоих случаях, по правилам техники безопасности, вдоль дорожек с двух сторон устанавливаются перила. Опорные реакции тормозных балок передаются на колонны и требуют соответствующего решения узла крепления.

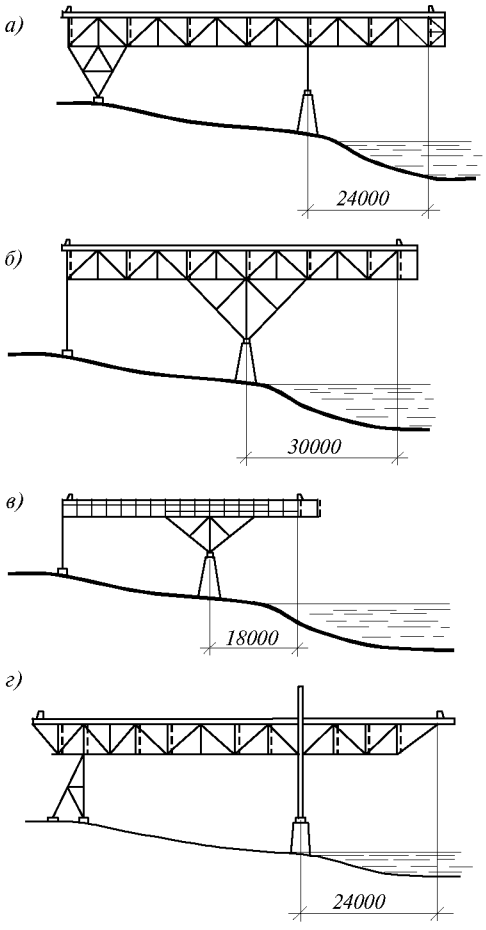


Рис.4.5. Схемы надводной части крановой эстакады

а, *б* – решетчатое пролетное строение; *в* – сплошностенчатое пролетное строение; *г* – решетчатое пролетное строение с рамной опорой у уреза воды

Следует отметить, что в практике строительства возможны случаи применения крановых эстакад с металлическими подкрановыми конструкциями, опирающимися на железобетонные колонны.

Надводная часть крановых эстакад, являющаяся самостоятельным сооружением, отличается разнообразием схем, которые по своим решениям и параметрам аналогичны мостовым конструкциям. В настоящее время различают два типа схем надводной части – консольный и консольно-подвесной (рис.4.5, 4.6, 4.7).

При разработке схемы надводной части эстакады в соответствии с заданной длиной консоли в первую очередь должно быть определено наиболее рациональное для данного конкретного случая расстояние между опорой у уреза воды и береговой опорой. В схемах первого типа, изображенных на рис.4.5(*а*,*б*), основной несущей конструкцией пролетного строения являются решетчатые стати-

чески определимые относительно опор фермы с жестким верхним поясом, работающим на местный изгиб от подвижной вертикальной нагрузки, а в схеме на рис.4.5*в* – сплошностенчатая сварная балка габаритной высоты. Схемы эстакад по рис.4.5*в* наиболее оправданы для районов северной климатической зоны с низкими отрицательными температурами. Береговая опора, устроенная по схеме рис.4.5*а*, и опора у уреза воды по схеме рис.4.5*б* и *в* – неподвижные, в виде равнобедренного треугольника с вершиной на фундаменте, куда передаются горизонтальные усилия. Существенным преимуществом схем с неподвижной опорой у уреза воды является наличие наибольшей высоты пролетного строения в месте максимального изгибающего момента и возможность сокращения длины консольного участка. Однако при этом необходимо учитывать и усложнение конструкции фундамента, возводимого, как правило, в сложных геологических условиях. К общему недостатку схем следует отнести некоторую податливость конструкции в продольном направлении при нахождении крана на консоли. Схема эстакады по рис.4.5*г* обладает преимуществом по сравнению со схемами 4.5*а*, *б*, *в*, так как благодаря треугольной форме береговой опоры с вершиной на уровне пролетного строения эстакада оказывается практически неподвижной в продольном направлении. Указанная схема применима в равной степени при решетчатых и сплошностенчатых подкрановых конструкциях. В рассмотренных схемах требуемая поперечная жесткость надводной части эстакады может быть обеспечена, как и в обычных эстакадах, либо соответствующей жесткостью консольной колонны, либо с помощью поперечных рам. При этом поперечные рамы рекомендуется устраивать в месте опоры, расположенной у уреза воды.

Принципиально другим решением надводной части эстакады является схема, изображенная на рис.4.6, где пролетное строение выполняется в виде габаритной сплошностенчатой двухпролетной балки с консолью, поддерживаемой жесткой подвеской, и оттяжкой, передающей усилие на анкерную опору. Место крепления подвески к подкрановым балкам обычно принимается на расстоянии 3 – 5 м от конца консоли до точки пересечения геометрических осей балки и подвески. Угол наклона подвески должен назначаться в интервале от 30° до 40°. Место прикрепления оттяжки к подкрановым балкам назначается вблизи анкерной опоры. При этом угол наклона оттяжки может не совпадать с углом наклона подвески, но должен находиться в том же интервале (30° – 40°). Для обеспечения надежности эксплуатации эстакады необходимо в максимальной степени обеспечить прямолинейность подвесок и оттяжек. Наряду с монтажными мероприятиями, следует предусматривать установку дополнительных стоек, уменьшающих прогиб подвесок и оттяжек в вертикальной плоскости. Неподвижность в продольном направле-

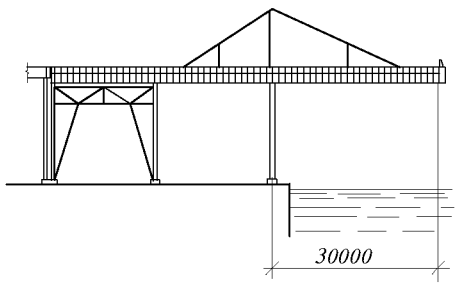


Рис.4.6. Сплошностенчатое пролетное строение консольно-подвесного типа

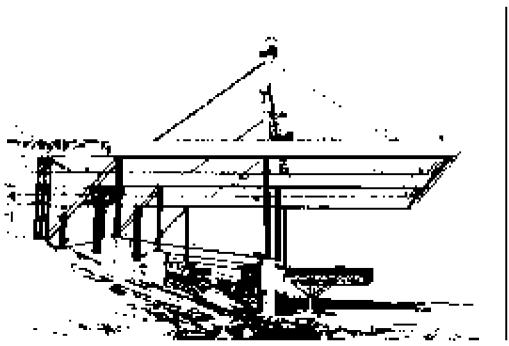


Рис.4.7. Консольно-подвесная (на переднем плане) и консольная эстакады

нии (при наличии температурного шва между надводной и береговой частями эстакады или при отсутствии береговой части) обеспечивается установкой вертикальных связей между двумя береговыми опорами (рис.4.6). Верхние узлы прикрепления подвесок должны быть соединены горизонтальной распоркой для образования рамы в поперечном направлении. Подвесная схема позволяет с наименьшими затратами металла проектировать эстакады с большим вылетом консоли.

Для повышения надежности конструкции и улучшения условий эксплуатации как эстакады, так и мостовых кранов рекомендуется в обязательном порядке соединение концов надводных консолей специальным горизонтальным элементом, как правило, решетчатого пространственного сечения. Созданная таким образом в плане (в уровне подкранового рельса) рамная конструкция с упругими опорами должна препятствовать скручиванию консолей при одностороннем загружении подкрановых балок. Распорки устанавливаются за пределами заданной рабочей длины консолей. Для многопролетных эстакад устройство поперечных рам в надводной и береговой частях эстакад и горизонтальных распорок на концах консолей возможно через пролет.

При разработке схемы надводной части эстакады в соответствии с заданной величиной консольного участка в первую очередь должно быть определено рациональное для данного конкретного случая расстояние между опорой у уреза воды и береговой опорой. Это расстояние для схем, показанных на рис.4.5, примерно в 1,2 - 1,5 раза превышает длину консольного участка. Дальнейшее увеличение расстояния приводит к повышенной деформативности в вертикальной плоскости, а уменьшение - резко увеличивает растягивающее (отрывающее) усилие в береговой опоре, что влечет за собой существенное усложнение конструкций фундамента и анкерного закрепления опоры. Для схемы по рис.4.6 расстояние между опорой у уреза воды и анкерной опорой зависит от заданной длины надводной консоли, высоты надкрановой части опоры у уреза воды и угла наклона подвесок. Обычно это расстояние несколько меньше длины консоли.

Приведенными схемами продольных несущих конструкций надводной части эстакады, естественно, не ограничиваются все возможные варианты технических решений, однако все новые схемы в той или иной степени будут лишь различными комбинациями или модификацией рассмотренных схем.

4.3. Основные конструктивные решения

В отличие от одноэтажных промышленных зданий, являющихся пространственными системами, эстакады, имеющие консольные колонны, работают практически по плоской схеме. В связи с этим при проектировании металлоконструкций эстакад большое значение имеет тщательность конструктивной проработки основных узлов, обеспечивающих надежность эксплуатации. Это положение особенно существенно при проектировании эстакад для климатических зон с низкими отрицательными температурами (северное исполнение).

Здесь, кроме общеизвестных принципов проектирования, должно быть обращено особое внимание на следующие основные положения:

- необходимость максимальной концентрации металла в ограниченном количестве элементов;
- создание конструктивной формы, наиболее удобной для транспортировки и менее чувствительной к повреждениям при перегрузках и складировании;
- отсутствие концентраторов напряжений от сварки, являющихся потенциальными источниками возникновения хрупкого излома;
- необходимость выполнения всех монтажных соединений на высокопрочных либо обычных болтах, кроме случаев, где их применение явно не оправдано, например, прикрепление тормозного настила к верхнему поясу подкрановых балок;

- необходимость максимального использования широкополочных двутавров;
- необходимость применения сталей повышенной и высокой прочности, качество которых в наибольшей степени гарантирует нормальную эксплуатацию крановых эстакад;
- необходимость обеспечения повышенной коррозионной стойкости конструкций как за счет специальной окраски, так и за счет конструктивных мероприятий.

При строительстве в северной климатической зоне для исключения большого объема монтажной сварки (приварка тормозного настила к верхним поясам подкрановых балок) необходимо предусматривать изготовление и монтаж подкрановых конструкций блоками. Эта рекомендация целесообразна и при строительстве эстакад в других климатических зонах.

В данном разделе рассмотрены только специфические (характерные) узлы обычных и надводных крановых эстакад; остальные узлы, как правило, выполняются аналогично соответствующим узлам промышленных зданий. При этом приведены только принципиальные конструктивные решения, которые в реальных проектах требуют уточнения в соответствии с расчетом и обычными правилами конструирования.

Учитывая повышенные требования к надежности эксплуатации крановых эстакад, и в первую очередь их надводной части, где конструктивные решения существенно отличаются от традиционных решений промышленных зданий, монтаж конструкций должен производится строго в соответствии с проектом производства работ. Особенного внимания заслуживает монтаж консольной части эстакады.

4.3.1. Узлы опирания сплошностенчатых подкрановых балок на колонны обычной крановой эстакады. Различают четыре основных варианта конструктивных решений узла.

Вариант 1 - крепление подкрановой балки к «пеньку» - короткому участку шейки колонны, высота которого примерно равна высоте подкрановых балок. В колоннах средних рядов «пенек» расположен посередине траверсы колонны; в колоннах наружных рядов место расположения «пенька» зависит от требуемого размера тормозной балки и при большой ширине колонны может не совпадать с наружной ветвью колонны (рис.4.8, 4.9). При этом к «пеньку» крепится вертикальная вспомогательная ферма (при пролете подкрановой балки более 12 м) или балка (при пролете 12 м). Верхний пояс вспомогательной фермы или балка образуют один из поясов тормозной балки.

Передача поперечных тормозных усилий на колонну производится через упоры, работающие на прижим. Упоры крепятся к тормозному листу высокопрочными болтами. Неточность изготовления и монтажа в пределах установленных допусков компенсируется в этой случае с помощью прокладок и овальных отверстий в вертикальной полке упора.

Возможна также передача усилий путем приварки тормозного листа непосредственно к торцевой заглушке «пенька». Соединение на высокопрочных болтах здесь не рекомендуется в связи с трудностью обеспечения совпадения отверстий в случае изготовления и монтажа подкрановых конструкций пространственными блоками. Для ожесточения края тормозного настила в непосредственной близости от места передачи поперечных сил должно быть приварено вертикальное ребро.

Вариант 2 - крепление подкрановой балки к колонне среднего ряда при помощи подкоса из одиночного уголка, через который передаются на колонну силы поперечного торможения (рис.4.10). Подкос крепится на высокопрочных болтах либо на монтажной сварке к специальным фасонкам, привариваемым вверху к торцевой заглушке подкрановой балки, а внизу - по оси траверсы колонны. Это решение пригодно для любого способа монтажа подкрановых конструкций, в том числе - пространственными блоками.

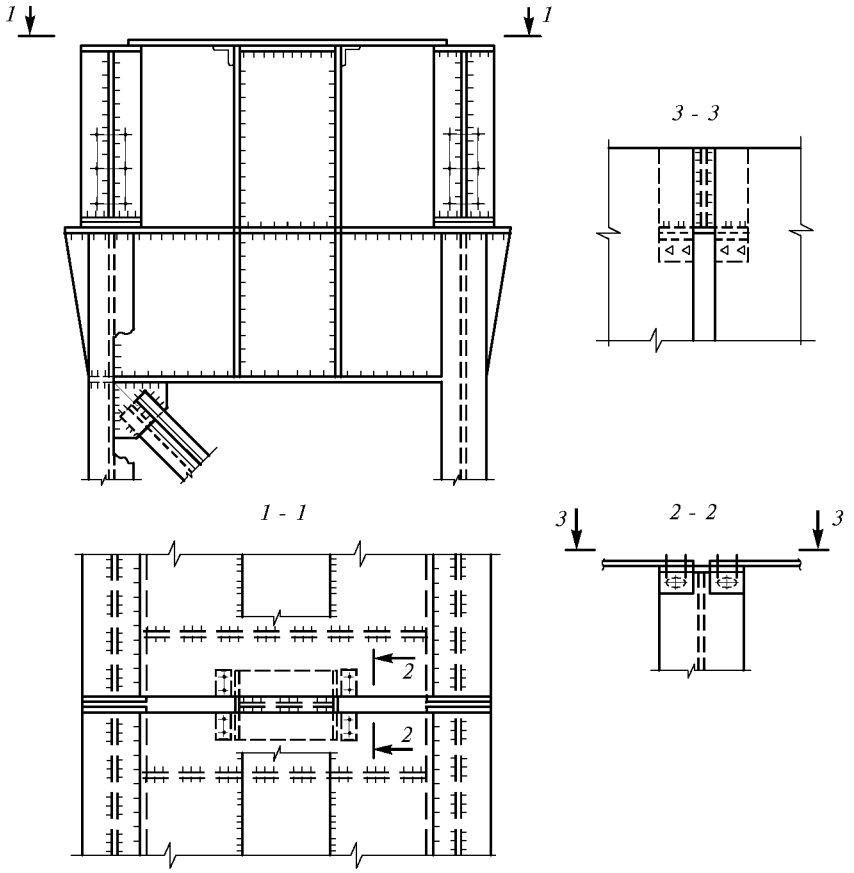


Рис.4.8. Крепление подкрановой балки к колонне среднего ряда через «пенек»

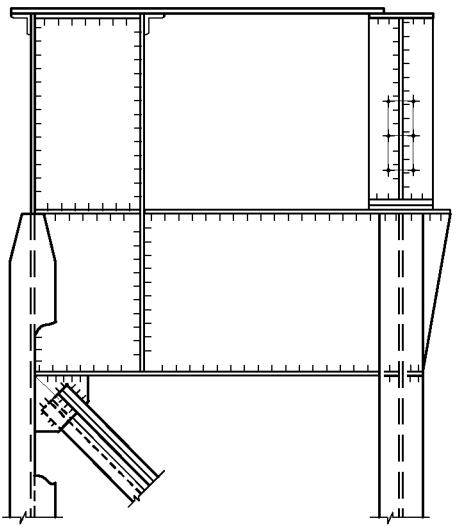


Рис.4.9. Крепление подкрановой балки к колонне наружного ряда через «пенек»

В зависимости от соотношения высоты подкрановой балки и ширины колонны подкос крепится к середине траверсы или сдвигается к ее краю. В соответствии с этим в проектном положении подкосы образуют либо V-образную, либо крестовую диафрагму. Для совпадения плоскостей верхних и нижних фасонок во избежание искривления подкоса следует использовать увеличенную толщину фасонок на траверсе колонны. Так же, как в узле по рис.4.10, тормозной настил усиливается приваркой вертикального ребра вблизи места передачи поперечных сил. В колоннах наружных рядов передача тормозных усилий осуществляется аналогично средним рядам. На траверсе устанавливается опорная стойка для крепления балки или вспомогательной фермы.

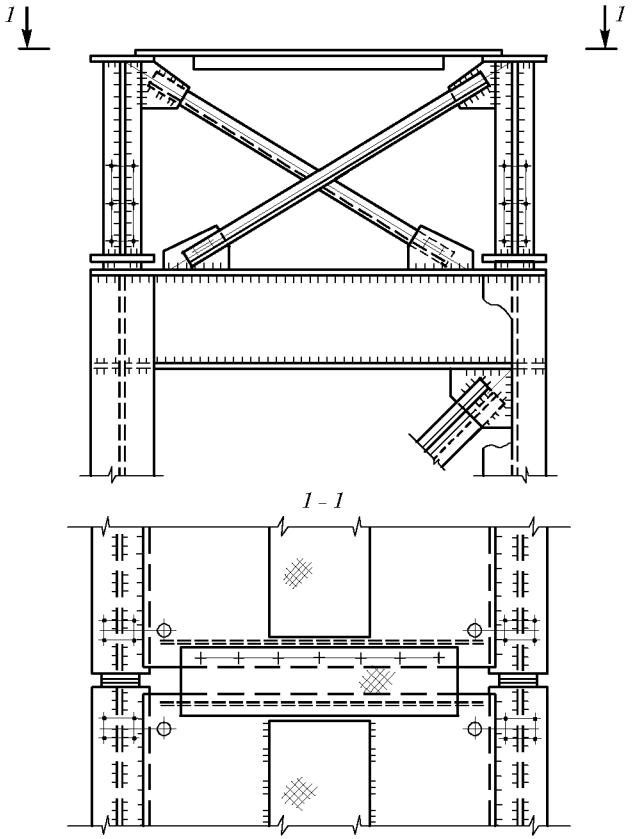


Рис.4.10. Крепление подкрановой балки к колонне среднего ряда при помощи подкоса из одиночного уголка

Вариант 3 – крепление подкрановой балки к А-образной колонне через сплошностенчатую шейку (рис.4.11). Шейка выполняется из прокатного двутавра, высота которого примерно равна высоте подкрановой балки, и приваривается к горизонтальному листу траверсы верхнего узла колонны. Передача тормозных усилий на колонну производится через упоры из уголков либо из толстого листа, которые прикрепляются в верхней части к стенке двутавра высокопрочными болтами. Верхний пояс вспомогательной фермы или балка, входящие в состав тормозных конструкций, опираются на специальный кронштейн, прикрепляемый к колонне.

Вариант 4 – крепление к колоннам сварных подкрановых балок двутаврового сечения с развитым верхним поясом, воспринимающим тормозные усилия (рис.4.12). Передача тормозных усилий на колонны производится через опорные вертикальные ребра (торцевые заглушки) и сварные опорные элементы таврового сечения. Последние устанавливаются между двумя смежными подкрановыми балками и крепятся к ним и колонне высокопрочными болтами. В отличие от вариантов *1÷3* рихтовка рельса производится совместно с подкрановыми балками за счет овальных отверстий в горизонтальном листе (фланце) опорного элемента. Применение узла крепления подкрановых балок по варианту *4* требует соблюдения специального порядка монтажа, предусмотренного типовым альбомом (шифр 9460КМ, вып.1, ГПИ Ленпроектстальконструкция, 1989).

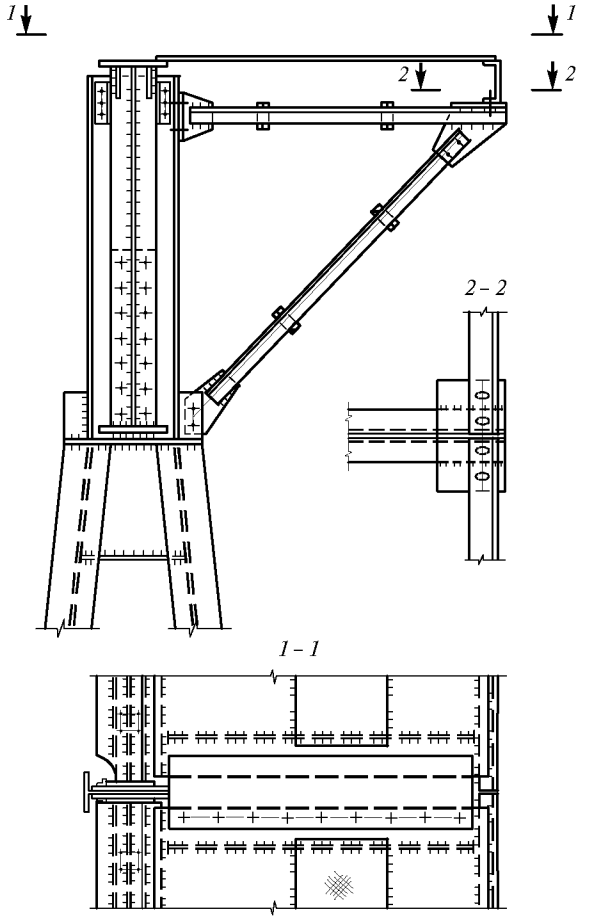


Рис.4.11. Крепление подкрановой балки к А-образной колонне через сплошностенчатую шейку

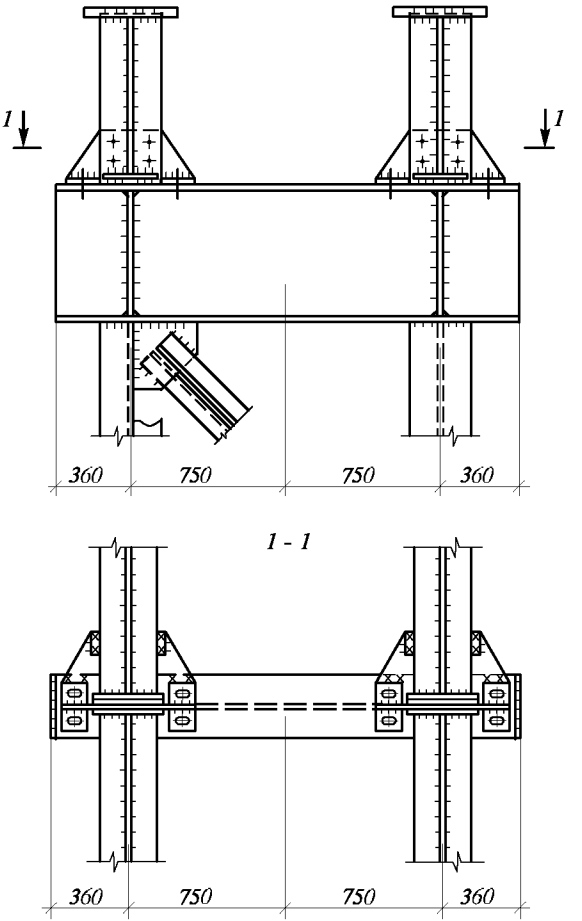


Рис.4.12. Крепление к колонне сварной подкрановой балки двутаврового сечения с развитым верхним поясом

4.3.2. Узлы опирания сплошностенчатых подкрановых балок на колонны надводной части крановой эстакады. Узел опирания подкрановых балок на береговую опору отличается от аналогичного узла обычной эстакады тем, что необходимо дополнительное закрепление подкрановых балок на значительное по величине отрывающее усилие, возникающее из-за наличия консоли.

На рис.4.13 показано опирание подкрановой балки непосредственно на торцевую заглушку ветви колонны. Стенка подкрановой балки усилена двумя опорными ребрами (с двух сторон). Между опорными ребрами нижний пояс подкрановой балки и торцевая заглушка, усиленные короткими ребрами, соединяются болтами, воспринимающими отрывающее усилие. Решение по рис.4.13 рекомендуется применять при небольшой величине отрывающего усилия. В связи с тем, что решение с применением коротких болтов создает «жесткое» крепление, применение его не рекомендуется при кранах тяжелого режима работы (7К-8К), создающих усиленное динамическое воздействие.

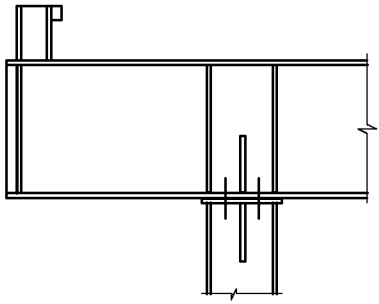


Рис.4.13. Узел опирания подкрановой балки с небольшим отрывающим усилием на колонну надводной части эстакады

В узле опирания, изображенном на рис.4.14*а*, отрывающее усилие воспринимается длинными болтами, закрепленными на горизонтальных ребрах, опирающихся на вертикальные ребра подкрановой балки и на полки ветви колонны. Для усиления горизонтальных ребер предусмотрены дополнительные вертикальные ребра, расположенные по оси узла. Длина болтов принимается обычно равной 800 – 1200 мм. В целях повышения надежности работы узла возможно осуществить опирание горизонтального ребра непосредственно на вертикальные опорные ребра подкрановой балки за счет их разрезки, а на ветви колонны – за счет приварки к внутренним граням полок двутавра специальных листовых накладок (рис.4.14*б*, деталь 1).

Крепление подкрановых балок к колонне на длинных болтах может быть решено также и при одном опорном ребре, передающем вертикальную опорную реакцию через центральную прокладку (рис.4.14*б*). В этом случае отрывающее усилие в балке воспринимается горизонтальными и вертикальными ребрами, приваренными по обе стороны опорного ребра, а в колонне – так же, как в узле по рис.4.14*а*. Деталь 1 при этом может быть применена и при решении узла по рис.4.14*а*.

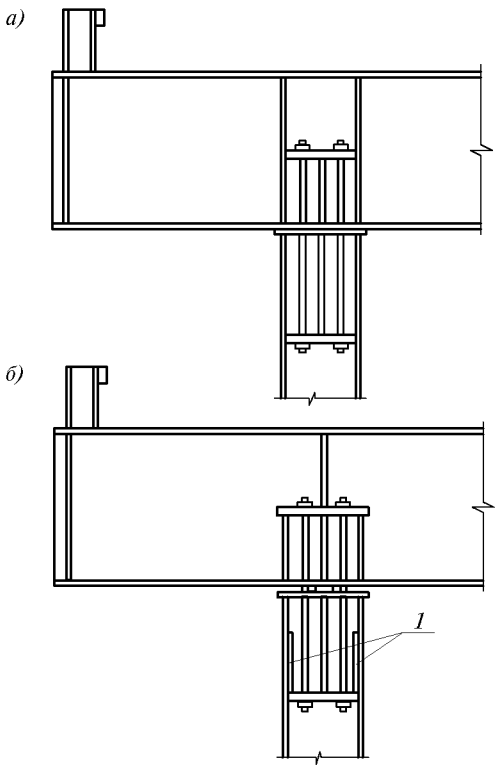


Рис.4.14. Опирание подкрановой балки с большим отрывающим усилием на колонну надводной части эстакады

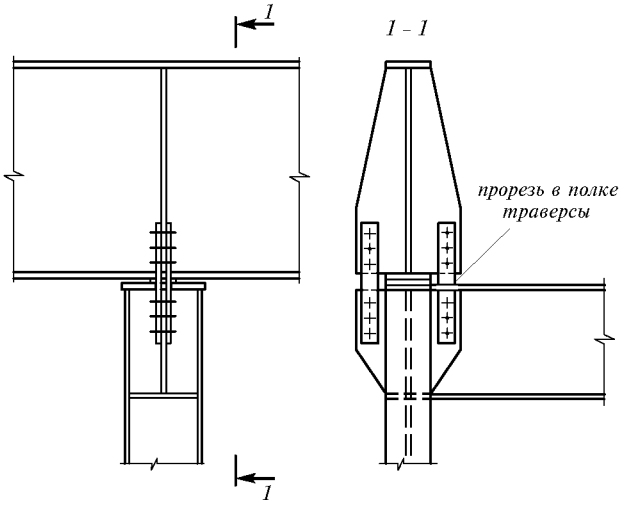


Рис.4.15. Опорный узел подкрановой балки с фрикционным соединением

Отрывающее усилие в узле с одним опорным ребром и центрирующей прокладкой может быть воспринято также фрикционным соединением на парных накладках с высокопрочными болтами (рис.4.15). Для установки накладок с внутренней стороны колонны в горизонтальном листе траверсы должны быть предусмотрены прорези.

Узлы, показанные на рис.4.13–4.15, относятся к надводным крановым эстакадам, не имеющим береговой части. При наличии береговой части и отсутствии температурного шва опирание подкрановой балки береговой части решается по рис.4.16.

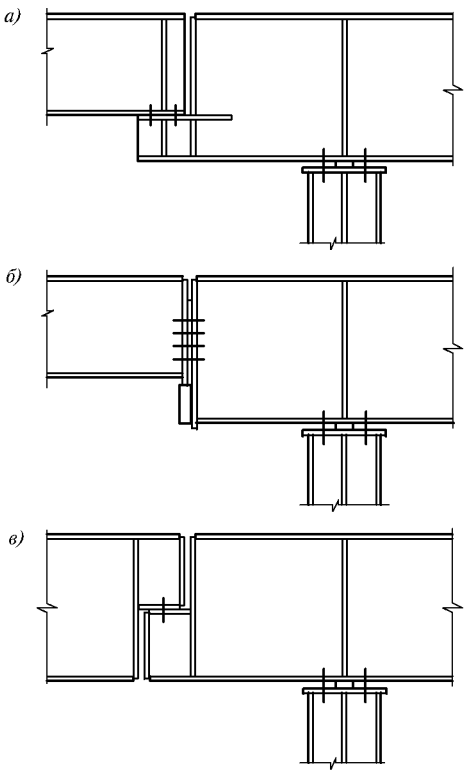


Рис.4.16. Опирание подкрановой балки на колонну эстакады, имеющей береговую часть (температурный шов отсутствует)
а, *в* – с подрезкой подкрановой балки;
б – с опорным столиком

Для узла опирания подкрановых балок на колонну у уреза воды характерно наличие надкрановой части (шейки) колонны, используемой для прикрепления поперечных ригелей и подвесок (в консольно-подвесной системе). На рис.4.17*а* изображен узел опирания подкрановых балок на колонну у уреза воды, решение которого аналогично узлу опирания подкрановых балок на колонны обычной крановой эстакады. Отличие заключается в том, что в узле по рис.4.17*а* высота «пенька» превышает высоту подкрановых балок и дает возможность просто осуществить монтажный стык с шейкой колонны. Стык может быть как сварным, так и на накладках с высокопрочными болтами. Такое решение применяется обычно в колоннах с шейками двутаврового сечения (из трех листов), не имеющими проходов, высотой до 6 м и шириной не более 600 – 800 мм, с относительно небольшим усилием сжатия от подвесок (100 – 150 т). Опирание подкрановых балок по рис.4.17*б* предусматривает монтаж подкрановых конструкций только блоками, для чего смежные подкрановые балки на опорах соединяются сплошностенчатой диафрагмой, на которую и опирается шейка колонны.

При большой высоте шейки колонны со значительными сжимающими усилиями, имеющей сложное двутавровое сечение и ширину 1000–1400 мм, опирание подкрановых балок на колонны и проход в шейке колонны выполняются по рис.4.18*а*. В целях обеспечения требований техники безопасности стык шейки колонны располагается под тормозной конструкцией; высота «пенька» в этом случае меньше высоты подкрановых балок. Как и в предыдущем случае, стык может быть сварным или на накладках с высокопрочными болтами.

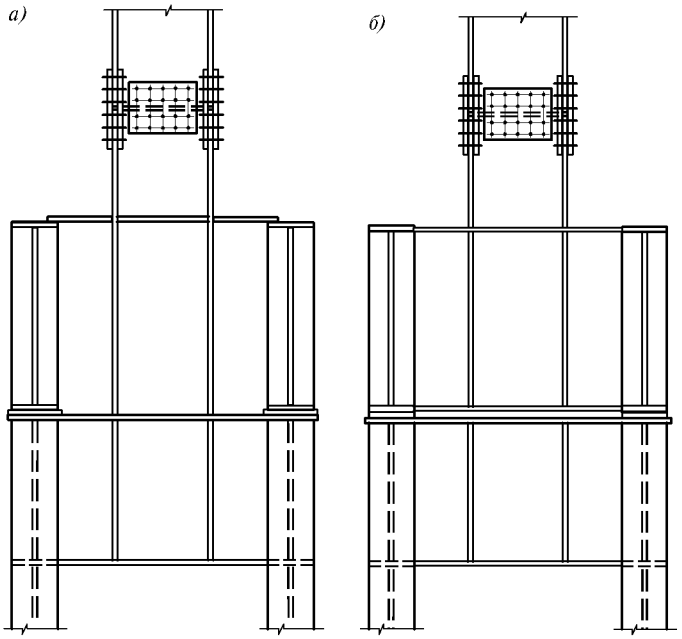


Рис.4.17. Узел соединения подкрановых балок с колонной у уреза воды
а – опирание через высокий «пенек»; *б* – соединение для монтажа подкрановых конструкций блоками

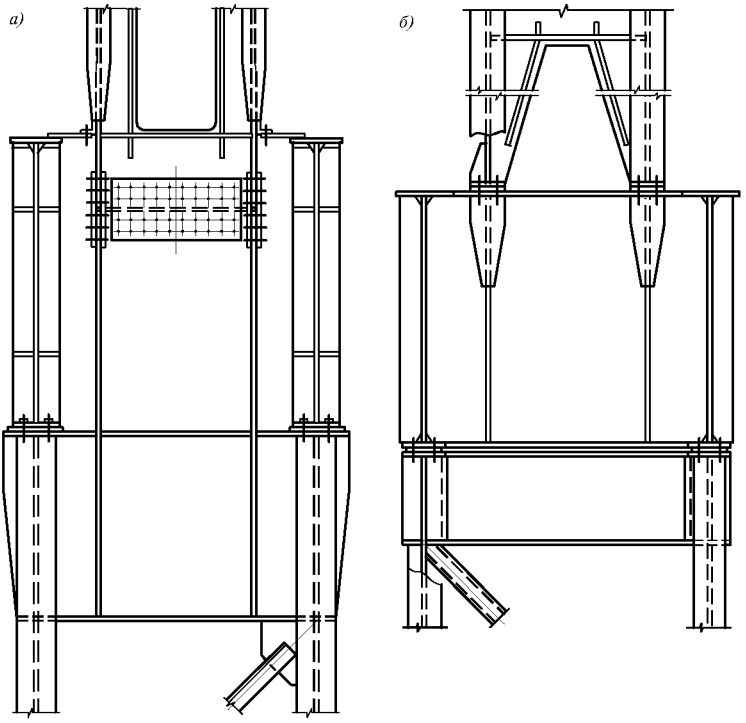


Рис.4.18. Узел опирания подкрановых балок на колонну у уреза воды
а – усилие от «шейки» передается через траверсу колонны; *б* – усилие от «шейки» передается через диафрагму блока подкрановых балок

В отличие от узла по рис.4.18*а*, решение того же узла, представленное на рис.4.18*б*, предусматривает монтаж подкрановых конструкций только блоками. Надкрановая часть колонны, имеющая проход, устанавливается непосредственно на верхний пояс сплошностенчатой диафрагмы, и ветви шейки двутаврового сечения соединяются с ним при помощи торцевой заглушки (фланца) на высокопрочных болтах.

4.3.3. Узлы крепления подвесок и оттяжек. Наклонные подвески, поддерживающие консольную часть надводной крановой эстакады, и оттяжки крепятся внизу к подкрановым балкам, вверху – к колонне (рис.4.6). Подвески и оттяжки представляют собой жесткие стержни преимущественно сварного Н-образного сечения. Для крепления подвески к подкрановым балкам предусматривается устройство специальной наклонной диафрагмы, расположенной по средним рядам между двумя подкрановыми балками, по крайним рядам – между подкрановой балкой и вспомогательной балкой. Диафрагма является фактически продолжением подвески и соединяется с ней монтажным стыком на высокопрочных болтах. Диафрагма обычно входит в состав блока подкрановых конструкций и крепится к подкрановым балкам заводскими швами. Возможно также крепление диафрагмы на монтаже с помощью высокопрочных болтов. Учитывая весьма значительные усилия растяжения в подвеске, достигающие в отдельных случаях порядка 1000 т, для надежности эксплуатации следует обеспечить конструктивными мероприятиями плавную и равномерную передачу усилия с основного сечения подвески на диафрагму и подкрановые балки. Узлы крепления оттяжек к подкрановым балкам решаются аналогично креплению подвесок.

На рис.4.19 показан вариант крепления к подкрановым балкам подвески большой ширины сварного Н-образного сечения. В стенке подвески предусмотрен проход, находящийся выше уровня верха подкрановых балок из-за соответствующего расположения монтажного стыка подвески с диафрагмой. В этом случае, по условиям техники безопасности, устанавливается переходная лестница. Несколько иное решение изображено на рис.4.20. Здесь подвеска большой ширины сварного Н-образного сечения в нижней части имеет двухветвевое сечение, образующее проход. Суммарное сечение двух Н-образных ветвей должно быть равнопрочным основному сечению подвески. Монтажный стык подвески с диафрагмой может располагаться в любом месте в пределах ветвей. Нижняя граница прохода не должна быть выше уровня верха подкрановых балок. Длина ветвей по наклону должна обеспечивать свободный проход по балке, в соответствии с требованиями техники безопасности.

На рис.4.21*а* представлено крепление к подкрановым балкам подвески небольшой ширины из прокатного профиля, которое используется обычно при относительно небольших усилиях в подвеске – случай наиболее характерный для наружных рядов. Возможно несимметричное расположение подвески (рис.4.21*б*) с целью передачи большей части нагрузки на подвеску. Такое решение наиболее обосновано при наличии вспомогательной фермы взамен балки.

Узлы крепления к подкрановым балкам подвесок сварного и прокатного Н-образного сечения, показанные на рис.4.19 - 4.21 могут быть рекомендованы при усилиях в подвеске, не превосходящих 500 т. Подвески, работающие на большие усилия, могут выполняться двухветвевого сечения. На рис.4.22 показан пример решения узла крепления к подкрановой балке подвески с усилием 900 т. В этом случае сечение подвески состоит из двух сварных двутавров, соединенных распорками также из сварного двутавра. Для обеспечения четкой передачи усилий от подвески на диафрагму, последняя врезана в стенку двутавра на длине свыше 3 м.

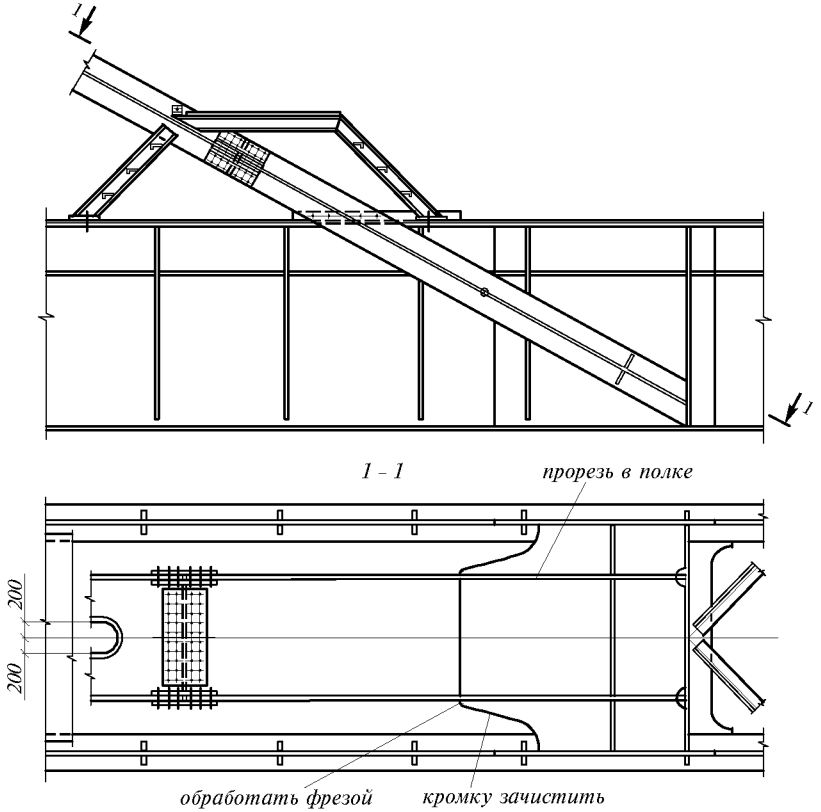


Рис.4.19. Крепление сварной подвески к подкрановым балкам

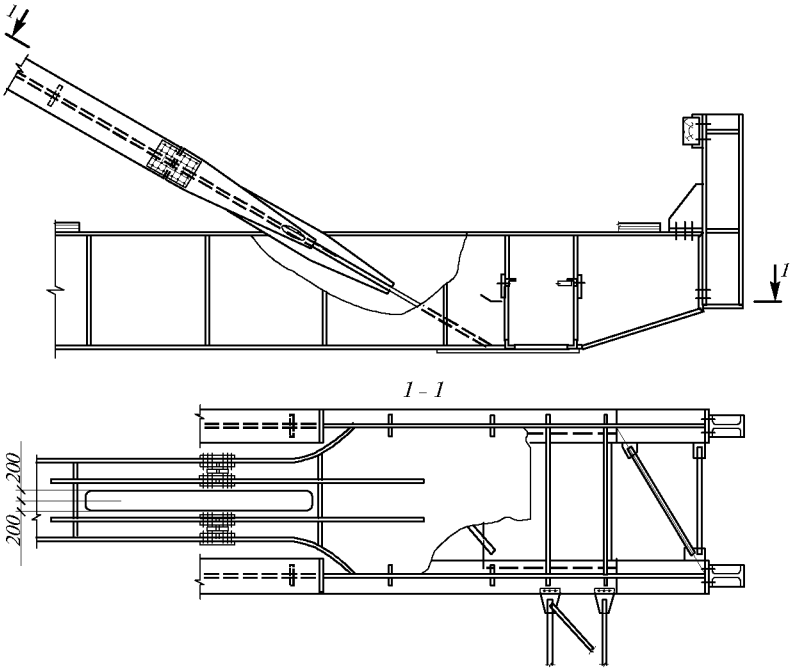


Рис.4.20. Крепление сварной подвески к подкрановым балкам с расположением низа прохода в уровне тормозного настила

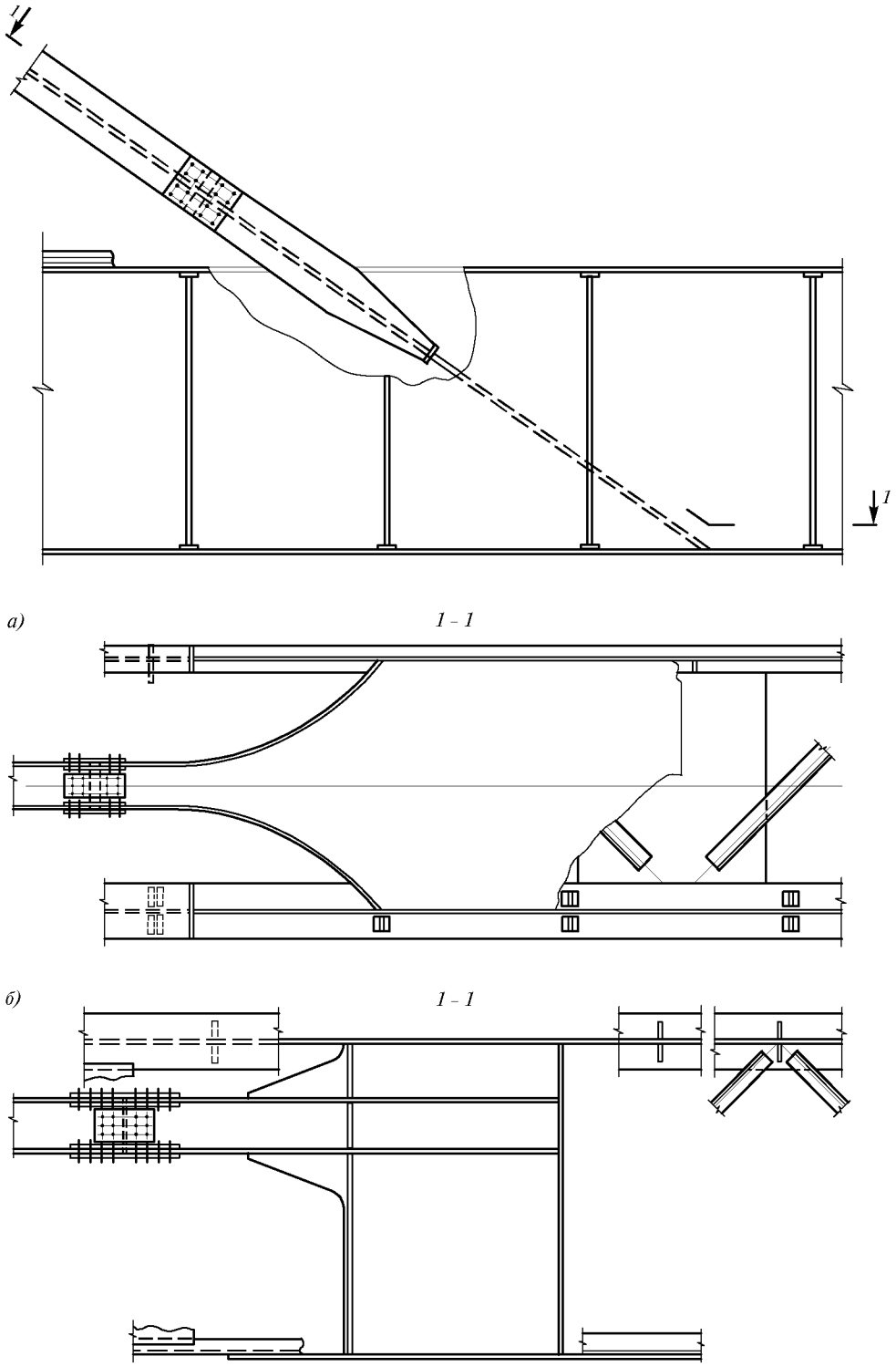
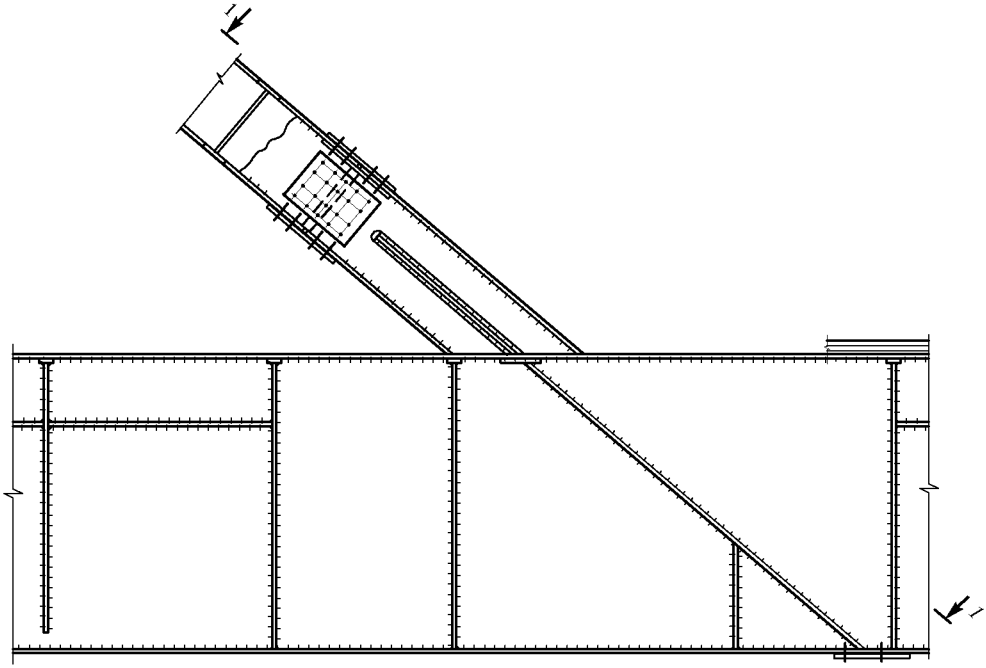


Рис.4.21. Узел крепления подвески к подкрановым балкам при небольших усилиях
а – симметричное расположение подвесок; *б* – несимметричное расположение подвесок



1 - 1

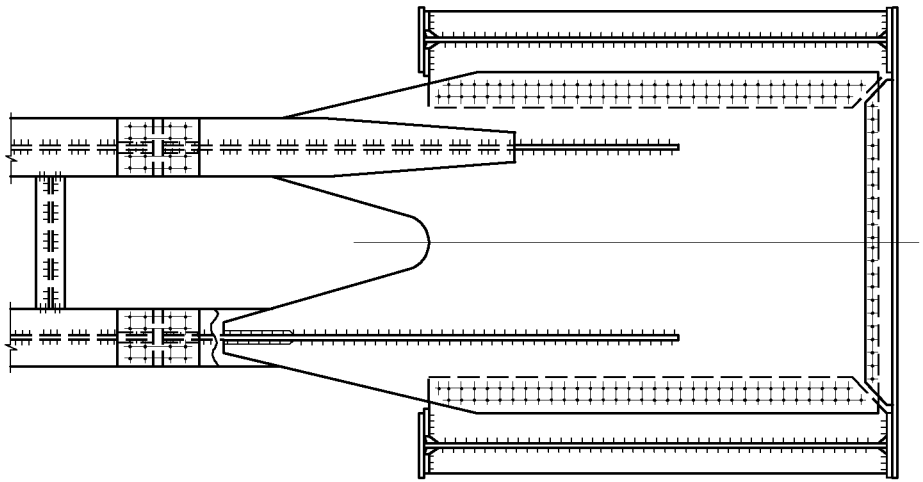


Рис.4.22. Узел крепления к подкрановой балке подвески с большим усилием

При этом толщина стенки двутавра на участке врезки должна быть увеличена. К подкрановым балкам диафрагма крепится на высокопрочных болтах. Учитывая большую величину усилия растяжения, диафрагму следует выполнять из цельного листа без поперечных стыковых швов. Монтажный стык ветвей подвески располагается выше первой распорки, положение которой определено необходимой высотой прохода.

Узлы крепления подвесок и оттяжек к колоннам представлены на рис.4.23 - 4.25. Подвески (оттяжки) крепятся обычно к специальным фасонкам на высокопрочных болтах. При этом возможны два случая, определяющие конструктивное решение узла: ширина подвески равна или меньше ширины колонны. В первом

случае, когда ширина подвески совпадает с шириной колонны, фасонки являются продолжением поясов колонны (рис.4.23). Приведенное решение рекомендуется, когда колонна выполнена в виде сварного двутавра обычного или сложного сварного сечения. Во втором случае фасонки приварены непосредственно к стенке двутаврового сечения. Варианты решения узла представлены на рис.4.24 и 4.25. Узел по рис.4.25, где колонна и подвеска имеют сечения из прокатного двутавра, может быть рекомендован для относительно небольших усилий в подвеске (до 250 т).

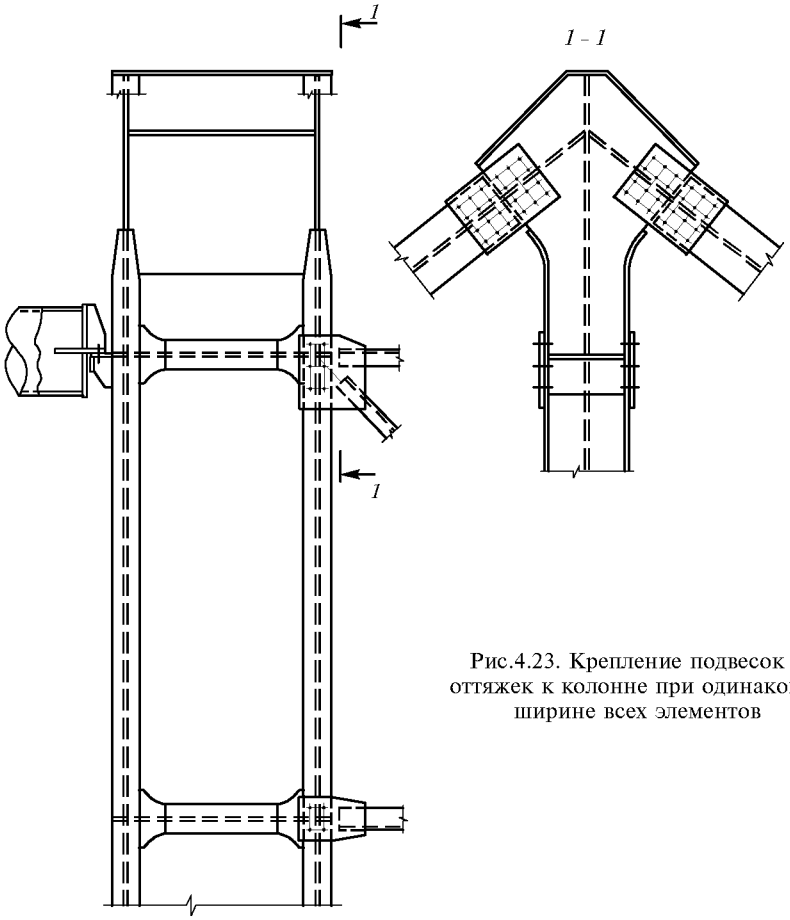


Рис.4.23. Крепление подвесок и оттяжек к колонне при одинаковой ширине всех элементов

Необходимо обратить внимание на то, что фасонка, передающая значительные усилия, находится в сложном напряженном состоянии: растяжение – в горизонтальном направлении, сжатие – в вертикальном. Компоновка элементов в узле должна исключать возможность возникновения изгибающих моментов в фасонке, а ее конфигурация должна по возможности обеспечить отсутствие концентраторов напряжений. В целях повышения надежности не следует допускать работу вертикальных сварных швов фасонки на горизонтальные растягивающие усилия. Для этого фасонка должна быть цельной, а в стенке колонны предусматривают прорези.

Независимо от числа пролетов эстакады в непосредственной близости к узлу присоединения подвесок и оттяжек к колонне должны крепиться ригели, создающие в поперечном направлении раму. В эстакадах, имеющих три или более пролетов ригели решетчатого пространственного сечения могут чередоваться с распорками

(см., например, рис.4.23). В узлах на рис.4.24 и 4.25 ригели и распорки условно не показаны. Для увеличения поперечной жесткости эстакады допускается расположение ригелей на 3–4 м ниже узла крепления подвески к колонне при условии сохранения требуемых габаритов для нормальной эксплуатации кранов (рис.4.26).

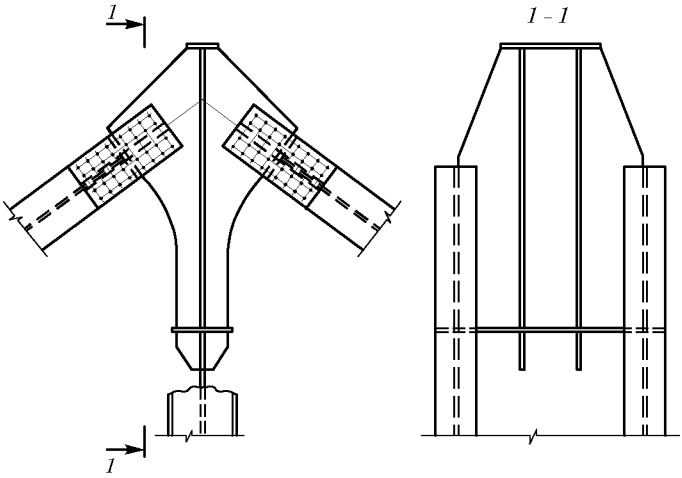


Рис.4.24. Крепление подвесок и оттяжек к колонне при больших усилиях в элементах

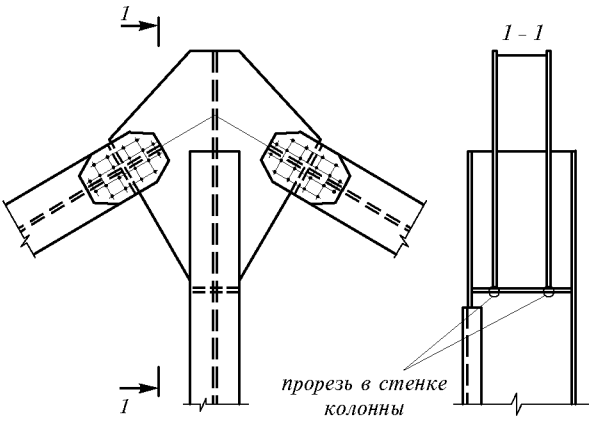


Рис.4.25. Крепление подвесок и оттяжек к колонне при небольших усилиях в элементах

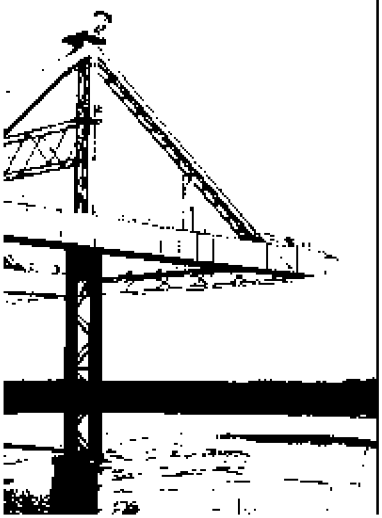


Рис.4.26. Конструктивные элементы консольно-подвесной эстакады

4.3.4. Узлы решетчатых подкрановых конструкций надводных крановых эстакад. Надводные части крановых эстакад, выполненные в решетчатых конструкциях (рис.4.27), представляют собой фермы большой высоты, изготовление которых, в связи с невозможностью транспортировки, производится россыпью. Сечение верхнего пояса обычно принимается в виде вертикального сварного либо широкополочного двутавра, работающего на осевое усилие и местный изгиб. Элементы решетки и нижний пояс – из сварных Н-образных сечений или широкополочных двутавров. Укрупнительная сборка ферм производится на высокопрочных болтах. Один из наиболее ответственных узлов верхнего пояса изображен на рис.4.28.

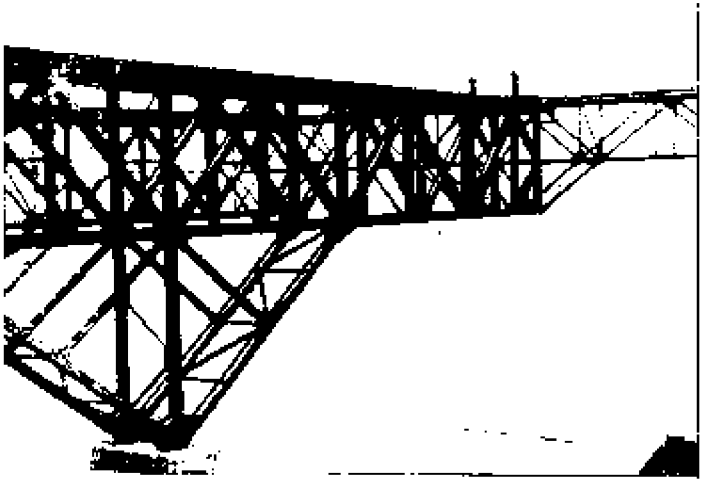


Рис.4.27. Решетчатая надводная крановая эстакада

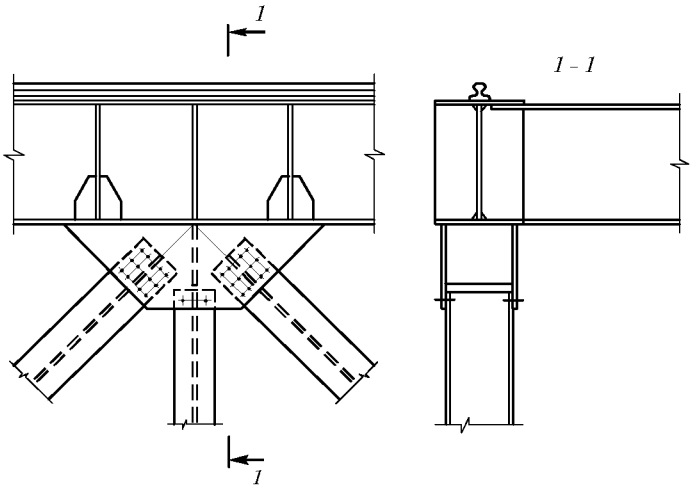


Рис.4.28. Узел верхнего пояса решетчатой конструкции надводной крановой эстакады

Конструктивное решение узла позволяет с достаточной надежностью осуществлять переход от пояса из сварного двутавра к парным фасонкам, необходимым для крепления элементов решетки. При таком решении давление от катков крана, приходящееся на одну панель, передается непосредственно как опорная реакция через центральное вертикальное ребро на соответствующее ему ребро, вваренное между парными фасонками, с которых усилие передается на раскосы. В целях облегчения укрупнительной сборки, учитывая вероятные неточности изготовления, возможно крепление элементов решетки к фасонкам осуществлять при помощи накладок. Следует учесть, однако, что при этом в два раза увеличивается количество болтов в узле. Изображенные на рисунке боковые вертикальные ребра с приваренными к ним отрезками продольных ребер (вдоль узловых фасонок) ставятся конструктивно и должны облегчить работу узла, находящегося в сложном напряженном состоянии. Для восприятия дополнительных усилий от возможного кручения верхнего пояса при эксцентричном приложении крановой нагрузки в каждом узле в плоскости центрального ребра должны быть предусмотрены специальные поперечные диафрагмы между поясами смежных ферм по средним рядам опор и между поясом основной и вспомогательной фермы по крайним рядам.

Узлы нижнего пояса при Н-образных сечениях решаются достаточно просто. Элементы решетки, аналогично узлам верхнего пояса, прикрепляются на высокопрочных болтах к парным фасонкам (рис.4.29). Последние приварены встык к кромкам вертикальных листов, а место перехода к основному сечению, во избежание образования концентраторов напряжений от сварки, зачищается шаровой фрезой либо шлифовальной машинкой.

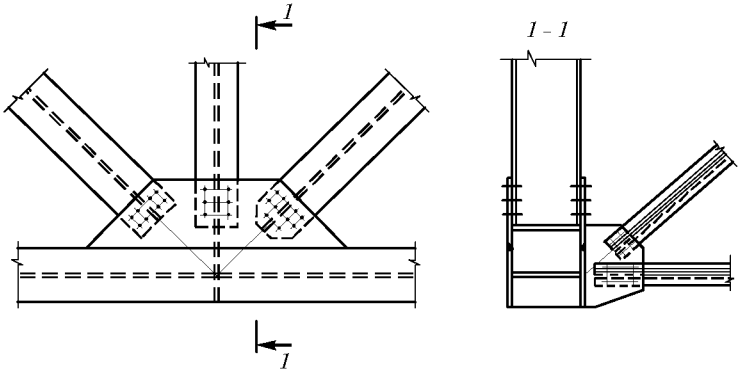


Рис.4.29. Узел нижнего пояса надводной крановой эстакады решетчатой конструкции

Следует иметь ввиду, что сварные швы, расположенные перпендикулярно действующему растягивающему усилию, должны иметь минимальную высоту для предотвращения возможных подрезов основного металла и создания концентраторов напряжения.

Повышение надежности узла может быть достигнуто за счет прикрепления поперечных ребер к подкладкам, приваренным к основному сечению пояса продольными швами. Встречающееся в практике проектирования решение узла нижнего пояса путем врезки узловых фасонок между вертикальными листами сечения крайне нетехнологично, приводит к необходимости выполнения четырех поперечных стыковых швов в растянутых элементах и не может быть рекомендовано для данного узла. Укрупнительный стык (монтажный) может быть выполнен как вне узла, так и по его оси. В последнем случае узловые фасонки должны быть накладными и прикрепляться, как и стыковые накладки, на высокопрочных болтах. Для отвода атмосферных осадков, собирающихся на нижнем поясе фермы, и горизонтальном листе в пределах узловых фасонок обычно предусматриваются по два симметрично расположенных просверленных отверстия диаметром от 50 до 100 мм.

При устройстве надводной части эстакады с вершиной треугольной опоры на фундаменте узел этой вершины, образованный двумя наклонными стержнями и одним вертикальным (при опирании у уреза воды) изготавливается как самостоятельный отправочный элемент. Решение этого узла должно строго соответствовать принятой статической схеме и исключать возможность восприятия им каких-либо изгибающих моментов.

Достаточно удачной можно считать конструкцию, приведенную на рис.4.30, заключающуюся в том, что линия центра передачи вертикальной опорной реакции совпадает с осью расположения анкерных бортов, тем самым обеспечивая определенную свободу поворота, необходимую для шарнирного узла. Основными деталями узла являются горизонтальный лист, к которому с одной стороны приварены парные вертикальные фасонки (траверсы) и вертикальное ребро, а с другой – опорная прокладка небольшой ширины с одной специально обработанной цилиндрической поверхностью. Между фасонками для более равномерной передачи усилий с примыкающих элементов также вварены наклонные ребра. С наружной стороны приварены вертикальные и горизонтальные ребра для крепления анкерных болтов. Прокладка расположена симметрично относительно внутреннего ребра и передает все вертикальное давление на фундамент через опорную плиту, толщина которой обычно равна 100–150 мм. Для передачи на фундамент усилий от распора и торможения к опорной

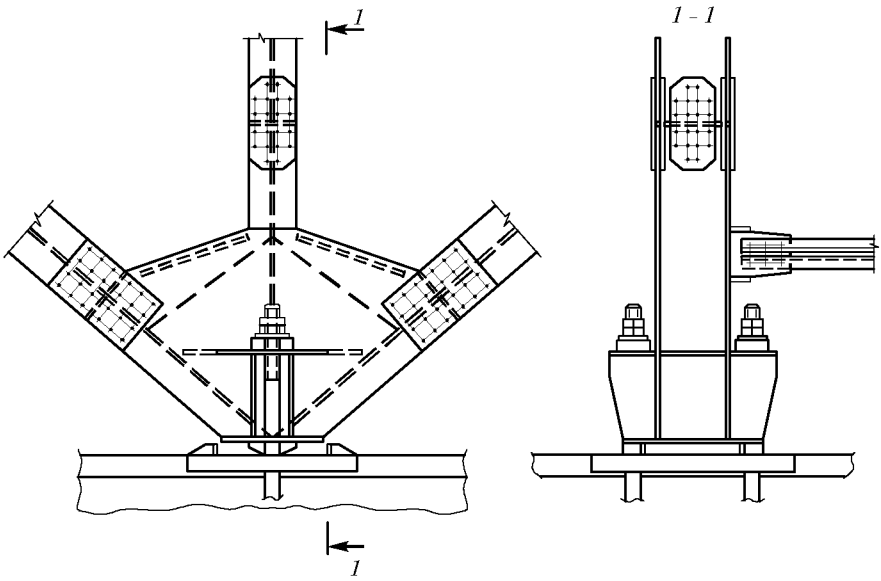


Рис.4.30. Опирание фермы на фундамент у уреза воды

плите в процессе монтажа по периметру горизонтального листа привариваются специальные упоры. Образовавшиеся внутри узла замкнутые объемы должны быть заполнены бетоном с целью предотвращения скопления воды и коррозии.

4.4. Особенности расчета открытых крановых эстакад

В данном разделе приведены некоторые указания по определению нагрузок и расчету, которые имеют первостепенное значение для нормальной эксплуатации конструкций эстакад и недостаточно освещены в нормативных и справочных материалах. В первую очередь это относится к определению крановых нагрузок, деформативности колонн в поперечном направлении, прогибам консоли надводной части эстакады и др.

Вертикальные и горизонтальные крановые нагрузки на колонны и балки крановых путей обычных крановых эстакад и береговой части надводных крановых эстакад определяются по указаниям СНиП 2.01.07-85, раздел *4*.

Надводная часть крановых эстакад, оборудованная, как правило, одним мостовым краном в пролете, рассчитывается на нагрузки от одного крана. Для надводных эстакад, имеющих береговую часть, должна быть гарантирована невозможность «захода» мостовых кранов береговой части в надводную. Это условие должно быть обеспечено проектной организацией, разрабатывающей технологическую часть, и согласовано со службой эксплуатации. В противном случае следует выполнять расчет надводной части эстакады в соответствии с возможным реальным расположением кранов. В случае учета в расчете надводной части эстакады вертикальных нагрузок от четырех кранов, расположенных в смежных пролетах, рекомендуется вводить коэффициент сочетаний 0,6, пониженный по сравнению со СНиП 2.01.07-85, п.4.1.7.

Необходимо учесть, что для получения максимальных вертикальных и горизонтальных нагрузок на колонну у уреза воды от мостового крана, последний следует располагать на конце консоли.

Снеговая нагрузка в расчете открытых крановых эстакад не учитывается (СНиП 2.09.03-85, п.3.16).

Ветровая нагрузка, в соответствии с опытом проектирования открытых крановых эстакад, может не учитываться. Однако при нестандартных параметрах эстакады (значительная высота, большой шаг колонн и, соответственно, большая высота подкрановых балок и др.) вопрос о необходимости учета ветровой нагрузки решается в каждом конкретном случае при проектировании.

Сейсмическую нагрузку при расчете открытых крановых эстакад можно не учитывать.

Расчетная схема открытой крановой эстакады в поперечном направлении принимается в виде отдельно стоящих консольных колонн, в продольном направлении – в виде рядов колонн, шарнирно или жестко сопряженных с фундаментом и шарнирно связанных по верху подкрановыми балками. Для уменьшения дополнительных напряжений от перепада температур и возможности увеличения длины температурного блока предпочтительнее шарнирное опирание колонн на фундаменты. Для эстакад с одноступенчатыми колоннами (подкрановая часть и шейка), соединенными ригелями (рис.4.5*г*, 4.6), расчетной схемой в поперечном направлении является одно- или многопролетная рама, а в продольном направлении – ряды колонн, связанные шарнирно подкрановыми балками и распорками по верху колонн.

Расчетная схема надводной части крановой эстакады как пространственной системы приведена на рис.4.31. (Типы узловых соединений на схеме условно не показаны). Практически при проектировании эта расчетная схема расчленяется на ряд отдельных плоских схем. В горизонтальной плоскости горизонтальная рама рассчитывается (рис.4.32) на воздействие поперечного торможения мостовых кранов. Опорами рамы являются колонны надводной части эстакады, условно заменненные жесткими опорами. Сечение элемента *1* включает все вертикальные и горизонтальные конструкции блока подкрановых балок. Элемент *2* имеет сплошностенчатое или решетчатое коробчатое сечение.

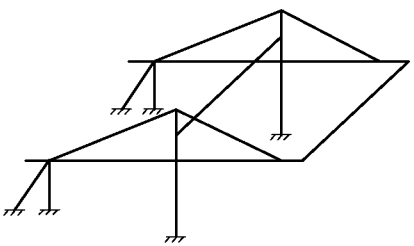


Рис.4.31. Расчетная схема надводной крановой эстакады

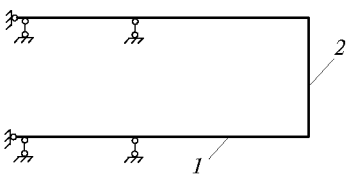


Рис.4.32. Расчетная схема горизонтальной рамы
1 – подкрановая конструкция; *2* – торцевая распорка

В вертикальной плоскости распорка (элемент *2* на рис.4.32) рассматривается как однопролетная балка с жестко защемленными опорами, к которым приложен изгибающий момент, $M = Pe$, где P – вертикальная нагрузка от крана, e – эксцентриситет, равный расстоянию от оси подкрановой балки до оси блока.

Расчетные длины колонн определяются по СНиП в соответствии с принятыми расчетными схемами эстакад. Следует обратить внимание на то, что при расчете рам консольно-подвесной системы вертикальная составляющая от усилий в подвеске и оттяжке приложена в верхнем сечении колонны.

Горизонтальные предельные перемещения колонн открытых крановых эстакад на уровне головки подкранового рельса, а также балок крановых путей от воздействия крановых нагрузок определяются по указаниям СНиП 2.01.07-85 «Нагрузки и воздействия». Необходимо обратить внимание, что в п.10.11 СНиП введены как верхняя (табл.21), так и нижняя (≥ 6 мм) границы предельных перемещений. Вели-

чины перемещений между верхней и нижней границами обеспечивают одновременно надежные условия эксплуатации кранового оборудования и предотвращают ощущение дискомфорта у крановщика. Для эстакад с невысокими колоннами и кранами тяжелого режима работы нижнее ограничение может оказаться определяющим. Например, для колонны с отметкой кранового рельса 10 м и режимом работы кранов 7К-8К предельный прогиб по табл.21 для открытых крановых эстакад равен $h/2500 = 4$ мм. Следовательно, чтобы удовлетворить условиям п.10.11, принятая жесткость колонн должна быть соответственно уменьшена.

Особое внимание должно быть обращено на вертикальный прогиб надводного участка консольной и консольно-подвесной крановых эстакад. Здесь следует во время монтажа предусмотреть такую величину строительного подъема конца консоли., чтобы в процессе эксплуатации под воздействием собственного веса и крановой нагрузки, в отличие от СНиПа, оставался уклон консоли в сторону береговой части равный примерно 1/1000 длины консоли. Приведенная рекомендация связана со спецификой работы крана на концевом участке эстакады: кран тормозит при подходе к концу консоли и разгоняется при движении в обратную сторону.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Солодарь М.Б., Плишкин Ю.С., Кузнецова М.В.** Металлические конструкции для строительства на Севере. Л., Стройиздат, ЛО, 1981.
2. **Солодарь М.Б.** Проектирование открытых крановых эстакад специального назначения. – Промышленное строительство, 1975, №4.
3. а.с. СССР №1221184 М.Кл. В66 С 6/00, 1986 г., БИ №12.
4. Проектирование открытых крановых эстакад. Справочное пособие к СНиП, М., Стройиздат, 1990.

ГЛАВА 5

НАДШАХТНЫЕ КОПРЫ

5.1. Общие сведения и классификация

Надшахтный копер – горнотехническое сооружение над шахтным стволом, входящее в состав шахтной подъемной установки. Копер предназначается для установки направляющих (копровых) шкивов, направляющих проводников, разгрузочных кривых для скипов и опрокидных клетей, а также крепления посадочных устройств, клетей и другого оборудования. Надшахтный копер воспринимает нагрузки от натяжения подъемных канатов, давление ветра, вес оборудования, установленного на копре. В зависимости от типа используемых подъемных сосудов копры называют клетевыми, скиповыми или клете-скиповыми, а в зависимости от числа расположенных в стволе шахты подъемов – одно-, двух- или трехподъемными. По назначению копры делят на проходческие и эксплуатационные, а по схеме и конструктивным особенностям выделяют следующие основные типы: станковые (укосные), шатровые и башенные копры.

Станковые (укосные) и шатровые копры устанавливаются преимущественно на шахтах с одноканатными подъемами. Используемые в этих подъемах барабанные подъемные машины размещаются на уровне земли в отдельных зданиях, а на копре устанавливаются направляющие шкивы для подъемных канатов – по 2 шкива на каждую подъемную машину. Высота таких копров достигает 60 метров. Станковый копер (рис.5.1) состоит из трех основных частей: станка, укосины и головки.

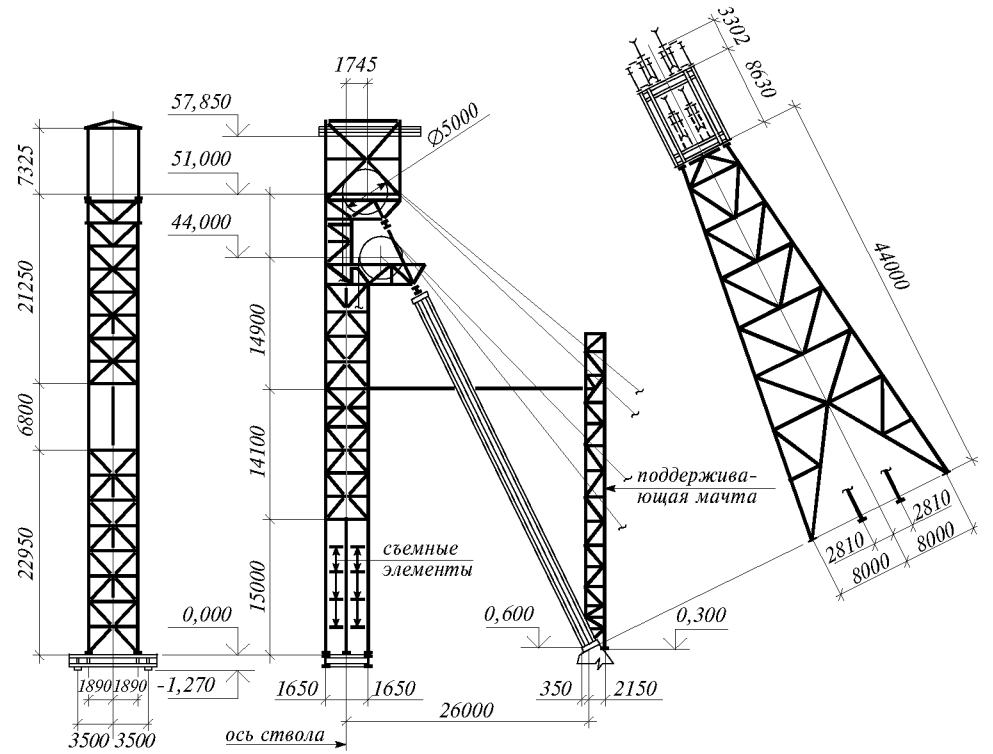


Рис.5.1. Схема двухподъемного станкового копра с одной укосиной

Станок – пространственная, обычно прямоугольная в плане решетчатая конструкция, расположенная непосредственно над стволом шахты. Станок опирается на раму, заложенную в бетонное устье ствола. В пределах высоты станка происходит движение подъемных сосудов к приемным площадкам и их разгрузка. В станке размещаются направляющие проводники, разгрузочные кривые, кулаки для посадки клетей или качающиеся площадки, амортизаторы для тормозных канатов, противопожарные ляды и другие приспособления. В копрах станкового типа на станок через головку передается часть усилий от натяжения подвесных канатов, т.е. станок является несущей конструкцией в составе пространственного каркаса копра. В копрах над вентиляционными стволами станок должен быть герметически закрыт, для чего каркас станка обшивается листовой сталью.

Укосина – наклонный элемент, обычно расположенный со стороны подъемной машины, обеспечивает устойчивость копра. Фермы, на которые опираются направляющие шкивы (подшкивные фермы), фасадные фермы, связи по фермам, конструкции площадок для обслуживания шкивов, головные балки станка и укосины образуют головку копра.

Станковые копры получили наибольшее распространение, так как они надежны в эксплуатации, а их конструкции достаточно просты в изготовлении и монтаже. В настоящее время проектируются и строятся цельнометаллические копры, ранее строились и еще эксплуатируются отдельные копры смешанной системы: станок – в виде короба из железобетона, головка и укосина – стальные.

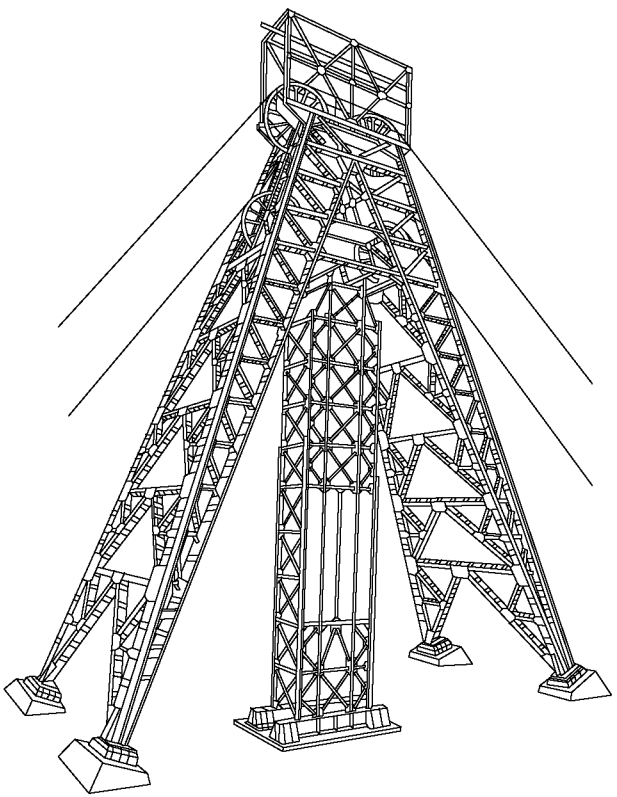


Рис.5.2. Двухподъемный копер шатрового типа

Шатровые копры (рис.5.2) имеют пространственный каркас пирамидальной формы, внутри которого размещается станок, не участвующий в работе каркаса на усилие от натяжения подвесных канатов и выполняющий только технологические функции. Такая схема характерна для двухподъемных копров при расположении подъемных машин под углом 180 градусов, в которых обе укосины жестко объединены конструкциями головки копра в пространственную раму и не передают на станок вертикальных и горизонтальных нагрузок от направляющих шкивов. Шатровую форму имеют каркасы большинства сборно-разборных проходческих копров

(рис.5.3). Такая форма позволяет свободно размещать вокруг ствола шахты подъемные машины и лебедки.

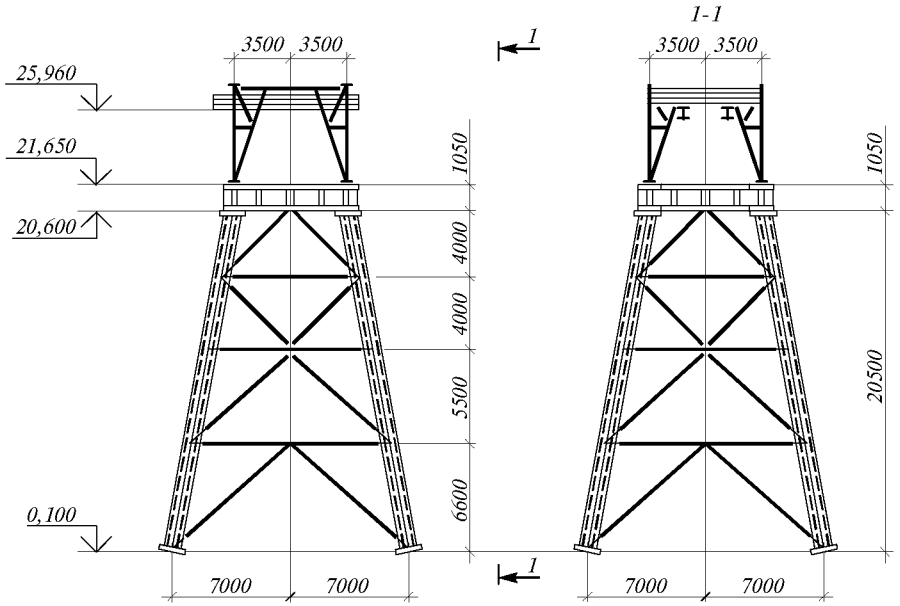


Рис.5.3. Схема сборно-разборного проходческого копра шатрового типа

С увеличением глубины подземных разработок растут концевые нагрузки на подъемных канатах. Соответствующее увеличение диаметров подъемных канатов и барабанов подъемных машин делает применение одноканатных подъемов малоэффективным. Более эффективными являются многоканатные подъемы с использованием многоканатных подъемных машин, которые по техническим возможностям превосходят одноканатные барабанные.

На шахтах с многоканатными подъемами устанавливаются преимущественно башенные надшахтные копры, а многоканатные подъемные машины размещаются на перекрытиях башенных копров. Несущие конструкции башен выполняются из монолитного железобетона или в виде стального каркаса. По стоимости эти решения примерно равноценны, но стальные каркасные башенные копры возводятся в среднем на 30% быстрее железобетонных.

Башенные копры со стальным каркасом имеют в плане квадратную или прямоугольную форму и достигают высоты 100 и более метров. Внутри башен для движения сосудов размещается станок, который своим основанием опирается на устье ствола, а в горизонтальном направлении раскреплен к перекрытиям копра. Сборно-монолитные железобетонные перекрытия по стальным балкам образуют жесткие горизонтальные диски, обеспечивающие горизонтальную жесткость каркаса. Каркас башенного копра состоит из колонн, связей, ригелей и балок перекрытий.

В последние годы на некоторых шахтах построены подъемные комплексы, где многоканатные подъемные машины используются по схеме одноканатного подъема, т.е. подъемная машина размещается на уровне земли в отдельном здании, а на надшахтном копре станкового или шатрового типа устанавливаются направляющие шкивы для подъемных канатов. Безбашенные подъемные комплексы экономичнее башенных, имеют меньший расход стали и могут особенно эффективно использоваться при реконструкции действующих одноканатных подъемных установок.

Надшахтные копры относятся ко II классу ответственности зданий и сооружений в соответствии с «Правилами учета степени ответственности зданий и сооружений при проектировании», а коэффициент надежности по назначению для них устанавливается $\gamma_н = 0{,}95$.

Доля надшахтных копров в общем объеме строительных стальных конструкций относительно невелика и составляет около 2% от общей массы монтируемых стальных конструкций [3].

Монтаж конструкций копра может выполняться непосредственно над стволом наращиванием укрупненными блоками с использованием башенного крана. Конструкции станковых копров обычно монтируются рядом со стволом и устанавливаются в рабочее положение надвижкой, способом поворота или подъемом со скольжением. Надвижку применяют и при строительстве башенных копров. Рекомендуется надвижка скольжением по стальным слябам с использованием прокладок из антифрикционных тканей. Метод монтажа выбирают, исходя из условия минимального перерыва в работе подъемной установки и особенностей площадки строительства. Надшахтные копры подвергаются воздействию специфических шахтных условий (промышленная атмосфера, загрязненная оксидами азота и серы, пылью и т.д.) и климатических факторов, чаще всего соответствующих слабой и средней агрессивности воздушной среды. Все металлоконструкции копра должны быть защищены в соответствии с требованием СНиП 2.03.11-85 и инструкцией ВНИИОМШС «Противокоррозийная защита армировки стволов, металлоконструкций шахтной поверхности и другого горнотехнического оборудования».

5.2. Нагрузки и воздействия

В соответствии со СНиП 2.01.07-85 нагрузки, учитываемые при проектировании надшахтных копров, подразделяются на постоянные и временные (длительные, кратковременные, особые). К постоянным нагрузкам относятся: вес несущих конструкций копра; вес ограждающих конструкций; вес расстрелов и направляющих проводников. К длительным нагрузкам относятся: собственный вес стационарного технологического оборудования и вспомогательных устройств; рабочие усилия в подъемных канатах; рабочие усилия (от предварительного натяжения) в проводниках; рабочие усилия (от предварительного натяжения) в тормозных канатах парашютных устройств; избыточное давление и разрежение воздуха (компрессия и депрессия), возникающие при вентиляции шахт; вес жидкостей и твердых тел, заполняющих оборудование и емкости в процессе эксплуатации; вес отложений производственной пыли.

К кратковременным нагрузкам относятся: усилия в тормозных канатах парашютных устройств при предохранительном торможении; нагрузки, возникающие при посадке клетей на кулаки; нагрузки от подвижного подъемно-транспортного оборудования, используемого при эксплуатации копра (от мостовых кранов, подъемников, лебедок и др.); вес людей, деталей и ремонтных материалов в зонах обслуживания и ремонта оборудования; ветровые нагрузки; снеговые нагрузки с полным нормативным значением; усилия, возникающие вследствие разворота и опрокидывания сосудов при разгрузке.

К особым нагрузкам относятся: аварийные (экстренные) нагрузки, вызванные усилиями в подъемных канатах при резкой задержке (защемлении) поднимаемого сосуда в стволе шахты и при переподъеме сосуда; нагрузки, возникающие от срабатывания парашютных устройств после обрыва каната; сейсмические воздействия; воздействия от оседания основания в районах горных выработок.

Нормативные значения постоянных нагрузок определяются по архитектурно-строительным чертежам. Нормативные значения временных технологических нагрузок определяются согласно технологическим заданиям на строительное проектирование. В заданиях должны быть указаны численные значения нормативных нагрузок, коэффициенты надежности по нагрузкам, приведены схемы расположения сосредоточенных и распределенных эксплуатационных нагрузок с указанием габаритов оборудования, узлов его опирания и привязок к разбивочным осям и отметкам перекрытий или площадок. В заданиях организаций, разрабатывающих проект организации строительства, приводятся схемы приложения и величины нагрузок от проходческого оборудования, возникающих при использовании постоянного копра для проходки ствола, и монтажных нагрузок.

Исходя из района строительства, снеговая и ветровая нагрузки определяются согласно СНиП 2.01.07-85 «Нагрузки и воздействия». Нагрузки от сейсмических воздействий определяются согласно СНиП II-7-81 «Строительство в сейсмических районах».

Воздействия от просадок основания учитываются согласно СНиП 2.01.09-91 «Здания и сооружения на подрабатываемых территориях и просадочных грунтах».

Масса несущих конструкций станкового копра с одной укосиной приближенно может быть определена по эмпирическим формулам:

$$G = 0{,}25H\sqrt{0{,}1S_{\max}} \quad \text{– для одноподъемных копров;}$$

$$G = 0{,}28H\sqrt{0{,}1S_{\max}} \quad \text{– для двухподъемных копров;}$$

где: H – высота копра, м; $S_{\max}$ – наибольшее разрывное усилие одного из канатов, кН; G – масса конструкций в тоннах.

Общая масса копра распределяется между его частями в следующих соотношениях: станок – 30 – 40%, головка – 20 – 40%, укосина – 25 – 35%. Массу вспомогательных конструкций (расстрелы, проводники, ляды, лестницы и пр.) можно учесть, введя в указанные формулы повышающий коэффициент 1,1 – 1,15.

Массу несущих конструкций башенного копра приближенно можно определить по удельному расходу стали на 1 м^3 строительного объема копра, принимая его равным: при высоте копра до 30 метров – 30 кг, при высоте копра от 30 до 80 метров – 31 – 40 кг, при высоте от 81 до 110 метров – 41 – 45 кг. Рабочие усилия в подъемном канате при одноканатном подъеме определяются из следующих выражений:

- в начале подъема сосуда с грузом $S_1 = \left[G_1 + Q + p(H+h)\right](1 + a_1/g)k$;
- в конце подъема сосуда с грузом $S_1 = \left[G_1 + Q + p(H+h)\right](1 - a_2/g)k$
- в начале спуска сосуда $S_2 = \left[G_2 + Q + p(H+h)\right](1 - a_1/g)\cdot 1/k$
- в конце спуска сосуда $S_2 = \left[G_2 + Q + p(H+h)\right](1 + a_2/g)\cdot 1/k$,

где G_1 и G_2 – полезная нагрузка соответственно поднимающегося и спускающегося сосуда; Q – собственный вес сосуда; p – вес 1м подъемных канатов; H – высота подъема; h – высота от приемной площадки до оси приводного шкива; a_1 и a_2 – ускорение и замедление соответственно в начале и конце подъема; g – ускорение свободного падения; k – коэффициент сопротивления перемещению движущихся частей подъемной установки ($k = 1{,}06 \div 1{,}15$). При расчете каркаса копра дополнительные усилия в канатах от ускорения, замедления и сопротивления перемещению разрешается не учитывать.

Рабочие усилия в подъемных канатах при многоканатном подъеме могут быть определены по формулам для одноканатного подъема, но непосредственно для расчета конструкций копра используются нагрузки на фундаменты многоканатных подъемных машин, которые в зависимости от рабочего усилия каната и параметров машины определяются по инструкции завода изготовителя подъемной машины. Для копров одноканатных подъемов аварийные (экстренные) нагрузки при внезапном защемлении поднимающегося сосуда определяются как сумма разрывного усилия в подъемном канате одного из подъемов, двойного рабочего усилия в сопряженном канате того же подъема, рабочих усилий в подъемных канатах остальных подъемов. Разрывное усилие каната определяется как частное от деления разрывного усилия каната в целом, установленного соответствующим государственным стандартом, на коэффициент однородности 0,8. Для копров многоканатных подъемов аварийные (экстренные) нагрузки при резкой задержке (защемлении) поднимающегося сосуда определяются в соответствии с инструкцией завода изготовителя подъемной машины. При отсутствии такой инструкции аварийные нагрузки допускается определять как сумму разрывного усилия всех канатов в поднимающейся ветви и 0,75 разрывного усилия всех канатов в опускающейся ветви. Коэффициенты надежности по нагрузке для определения расчетных нагрузок принимаются по СНиП 2.01.07-85 и СНиП 2.09.03-85.

Расчет конструкций копра следует выполнять с учетом наиболее неблагоприятных сочетаний нагрузок или соответствующих им усилий. Эти сочетания устанавливаются из анализа реально возможных вариантов одновременного действия различных нагрузок и различных схем их приложения, в т.ч. и отсутствия некоторых из нагрузок. При этом необходимо учитывать, что усилия в подъемных канатах одного подъема, относящиеся к нагрузкам различной длительности не могут действовать одновременно, т.е. являются взаимоисключающими. Некоторые из кратковременных нагрузок учитываются только при расчете элементов копра, на которые они оказывают непосредственное воздействие и поэтому не включаются в основные сочетания одновременно с рабочими усилиями в подъемных канатах. Этими нагрузками являются динамические нагрузки, возникающие при посадке клетей на кулаки, и усилия, возникающие при развороте и опрокидывании сосудов при разгрузке. Коэффициенты сочетаний для расчетных значений нагрузок принимаются согласно СНиП 2.01.07-85. В особых сочетаниях нагрузок (кроме расчета на сейсмические воздействия) для ветровой нагрузки коэффициент сочетаний разрешается принимать равным 0,5. При расчете на сейсмические воздействия коэффициенты сочетаний для расчетных нагрузок принимаются согласно СНиП II-7-81*.

5.3. Конструирование и расчет

5.3.1. Станковые копры. Для проектирования копра необходимы: задание на строительное проектирование, в котором приводятся анкетные данные для расчета копра; место постановки копра, т.е. название населенного пункта, предприятия, шахты; количество и род подъемов; глубина и диаметр ствола шахты; размеры, масса и грузоподъемность подъемных сосудов; скорость движения сосудов; отметка приемной площадки; отметки, диаметры и вес направляющих шкивов; диаметр и отметка барабана подъемной машины, ее тип; диаметры подъемных канатов и их разрывные усилия; масса 1м канатов; максимальная компрессия или депрессия; вес направляющих шкивов; нагрузки от тормозных канатов парашютных устройств. К заданию прилагаются чертежи примыкающих к копру зданий; чертежи направляющих шкивов, посадочных кулаков и другого оборудования; чертежи устройства устья ствола, поперечный разрез ствола с расположением подъемных сосудов.

Генеральные размеры копра, т. е. его высота (отметка оси верхнего копрового шкива) и расстояние от оси ствола до оси барабана подъемной машины, определяются по заданию на проектирование копра. Максимальная длина наклонной струны каната должна быть 60 – 65 метров. При больших длинах проектируются поддерживающие устройства (мачты и др.). Приближение подъемных канатов к конструкциям копра должно быть не менее: при вертикальном канате – 200 мм; при наклонном канате, расположенном под элементами конструкций – 150 мм; при наклонном канате, расположенном над элементами конструкций – 1/100 свободной длины каната.

Размеры станка копра и его положение в плане относительно ствола шахты определяются положением подъемных сосудов и армировки. Размеры между осями стоек принимаются кратными 100 мм. Зазоры между сосудом и выступающими гранями элементов станка должны быть при жестких проводниках не менее 150 мм и при канатных проводниках не менее 200 мм.

Опорная рама станка состоит из двух продольных и нескольких поперечных балок. Балки располагаются в плоскостях стенок станка и рассчитываются как разрезные балки на нагрузки от стоек станка. Глубина заложения рамы зависит от вида подъема.

Стойки станка проектируются из широкополочных двутавров, из прямоугольных труб или крестового сечения из 2-х уголков. Решетка между стойками станка выполняется по крестовой, раскосной или полураскосной схеме. Иногда применяется бераскосная решетка (рамного типа). Высота панели решетки должна быть увязана с расстоянием между расстрелами. Шаг узлов решетки принимается 3,5 – 3,0 м при металлических проводниках и 3,0 – 2,5 м – при деревянных.

Для ввода и вывода подъемных сосудов и крупногабаритных грузов, опускаемых в ствол, в решетке предусматриваются проемы. Стойки станка в пределах высоты проема рассчитываются как стойки рамы с учетом изгиба от горизонтальных сил, воспринимаемых решеткой станка. Проем окаймляется жесткими ригелями, установленными вместо распорок решетки, или усиленное сечение стойки продлевается на одну панель выше и ниже проема.

Решетка станка проектируется из уголков или замкнутых гнутых профилей. Расстрелы назначаются из двутавров для подвесных путей с шириной полки, равной ширине полки расстрелов, установленных в стволе шахты. Станок копра на уровне рабочих площадок ограждается решеткой или сеткой высотой не менее 2,5 м. Проемы в станке на рабочих площадках должны быть закрыты специальными предохранительными шахтными дверьми. Необходимость обшивки станка копра по всей высоте решается в зависимости от технологических требований. Обязательна обшивка участка станка, где ведется разгрузка скипов.

Рекомендуется выбирать такое положение укосины, чтобы ее ось проходила через центр верхнего копрового шкива. Расстояние от оси ствола до нижней опоры укосины назначается таким, чтобы укосина заняла положение, при котором пучок равнодействующих сил натяжения канатов размещается между станком и укосиной, а усилие в укосине от загружения копра силами натяжения канатов составляет 80 – 90% максимальной величины равнодействующей сил натяжения канатов. Выбор положения опоры укосины выполняется графическим построением. Высотная отметка нижней опоры укосины назначается на 0,6 метра выше планировочной отметки земли.

Разнос стоек укосины в поперечном направлении обеспечивает боковую устойчивость копра на ветровые нагрузки. Рекомендуется в верхней части укосины принимать разнос равным расстоянию между направляющими шкивами, а в нижней – равным (0,25 – 0,35) высоты копра. Для уменьшения расчетной длины стоек

из плоскости укосины устанавливаются распорки, соединяющие их со станком. В плоскости укосины ее стойки соединяются между собой решеткой крестовой или полураскосной схемы, или жестко прикрепленными к стойкам распорками без раскосов (рамная укосина). Обычное сечение стоек укосины – двутавровое, из прокатных двутавров с параллельными гранями полок или из сварных двутавров. В рамных укосинах для стоек применяются также круглые и прямоугольные трубы, сварные коробчатые сечения из 4 листов.

Головки копров отличаются большим разнообразием, так как их конструкция зависит от расположения подъемных сосудов в стволе шахты и способа размещения копровых шкивов (в одном уровне, в одной плоскости один под другим и т.д.). Под каждый шкив устанавливается 2 подшкивные фермы (балки). Расстояние между ними определяется конструкцией опорных подшипников шкива. Подшкивные фермы опираются на головные балки станка и укосины, через которые нагрузки передаются на укосину и, частично, на фасадные фермы и стойки станка. При расчете подшкивных ферм и балок действующие на них нагрузки от подъемных канатов увеличиваются на коэффициент динамичности 1,25. Положение узлов нижнего пояса подшкивных ферм определяется положением головных балок укосины и станка. Рекомендуется опорный раскос, опирающийся на укосину располагать так, чтобы его ось совпадала с осью укосины и проходила через центр шкива.

Пространственную жесткость конструкции головки копра обеспечивают горизонтальные связи по нижним поясам подшкивных ферм и наклонные связи в плоскостях элементов решетки, установленные между внутренними подшкивными фермами и между фасадными и наружными подшкивными фермами. По верхним поясам подшкивных ферм укладывается настил из рифленых листов, образующих пол подшкивной площадки. Для создания горизонтального жесткого диска настил приваривается к верхнему поясу ферм, а в местах заводки шкивов выполняется съемным и крепится на болтах. На подшкивную площадку опираются поддерживающие конструкции (каркас) монтажного устройства.

Несущие элементы конструкций надшахтных копров рассчитываются по методу предельных состояний: по несущей способности т.е. по прочности и устойчивости (предельное состояние первой группы) и по пригодности к нормальной эксплуатации (предельное состояние второй группы), для чего проверяется горизонтальное перемещение копра от статического давления ветра в поперечном направлении, которое не должно превышать 1/500 высоты копра.

Расчет копров на нагрузки от отдельных загружений и определение расчетных сочетаний усилий в сечениях стержней рекомендуется выполнять с использованием ПЭВМ. Подготовка расчетной схемы и входной информации выполняется по правилам, установленным инструкцией по применению программы расчета. Стальные копры рассчитываются по недеформированной схеме в предположении упругих деформаций стали. Копры высотой более 30 метров следует рассчитывать с учетом пульсационной составляющей ветровой нагрузки. Рекомендуется рассчитывать копры как единую пространственную систему конструкций. Допускается при расчете пространственную систему конструкций станкового копра разделять на плоские стержневые системы. Для расчета копра на нагрузки, действующие в продольном направлении, т.е. по направлению подъемных канатов, в расчетную схему включают: ферму фасадной плоскости станка (стойки и решетка), фасадную ферму головки и одну стойку укосины. Во вторую схему – две фермы, образованные конструкциями поперечных стенок копра включая головные балки, и ферму укосины (стойки с решеткой и головная балка), соединенные на уровне головных балок условными стержнями, обеспечивающими равенство горизонтальных перемещений узлов схемы.

Стальные конструкции копра и их расчет должны удовлетворять требованиям СНиП II-23-81*.

Материалы и соединения для конструкций станковых надшахтных копров следует принимать в соответствии с указаниями СНиП II-23-81* с учетом рекомендаций настоящей главы и гл.1 и 3 тома 1 настоящего справочника. Согласно классификации, принятой в СНиП II-23-81*, конструкции станковых копров по степени ответственности относятся к следующим группам:

1 группа – опорная рама станка, подшкивные фермы и балки, головные балки станка и укосины, узловые фасонки ферм, подкулачные балки, разгрузочные кривые, отбойные балки, проводники, другие конструкции, непосредственно воспринимающие динамические нагрузки;

2 группа – элементы укосины, расстрелы;

3 группа – каркас станка, подшкивные площадки, связи по подшкивным фермам и площадкам;

4 группа – обшивка станка.

5.3.2. Башенные копры. Задание на проектирование башенного копра помимо сведений о характеристиках подъема и оборудования, перечисленных в разделе для станковых копров, должно содержать поэтажные строительные планы и схемы расположения оборудования; задание на устройство подкрановых путей; схемы емкостей и объемные веса заполняющих их сыпучих материалов.

Стальные каркасы башенных копров имеют преимущественно каркасно-связевую схему (рис.5.4). Связи размещаются по наружному периметру башни и образуют вместе с колоннами прямоугольную оболочку, воспринимающую все горизонтальные нагрузки на каркас копра. Внутренние колонны копра воспринимают только вертикальные нагрузки от перекрытий. Наружные стены выполняются из легких ограждающих конструкций, в т.ч. из легких трехслойных металлических панелей.

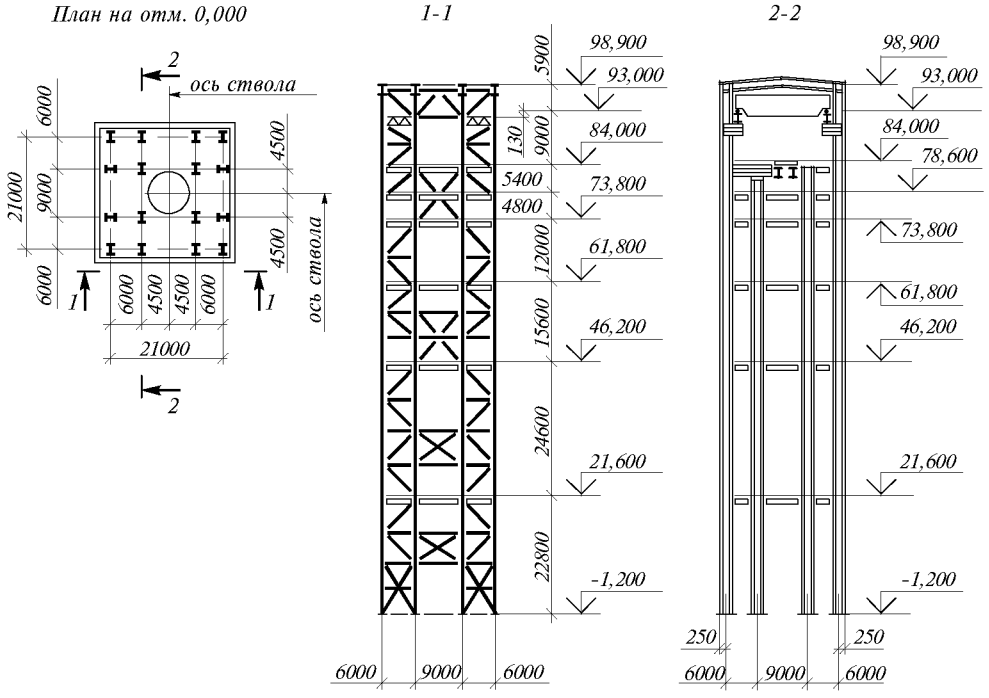


Рис.5.4. Схема башенного копра

Расчет башни копра как сооружения выполняется по первому предельному состоянию – проверяется устойчивость против опрокидывания, и по второму - проверяются осадка и крен башни, которые не должны превышать определенные пределы. Стальные конструкции башенных копров и их расчет должны удовлетворять требованиям СНиП II-23-81* и СНиП 2.09.03-85. Конструкции башенных копров по степени ответственности следует относить к группам в соответствии с указаниями главы СНиП II-23-81* и настоящей главы справочника. Каркасы башенных копров рассчитываются с использованием ПЭВМ, что дает возможность рассчитывать сложные стержневые системы как единую пространственную конструкцию или заменять их эквивалентными плоскими системами.

5.3.3. Вспомогательные элементы копров. *Подкулачные балки*, к которым крепятся кулаки для посадки клетей, устанавливаются ниже уровня приемной площадки. Балка рассчитывается как однопролетная, на нагрузки от одной пары кулаков. Нагрузки, возникающие при посадке клетей на кулаки, учитываются только при расчете подкулачных балок. Для учета динамического воздействия, возникающего при резкой посадке груженой клети на кулаки, эти нагрузки следует увеличивать умножением на коэффициент динамичности 5.

Противопожарные ляды обычно устанавливаются на уровне опорной рамы станка и предназначены для плотного перекрытия ствола шахты в случае пожара в надшахтном здании. В лядах предусматриваются вырезы и приспособления для пропуска канатов и направляющих проводников.

Разгрузочные кривые, при помощи которых производится выгрузка скипов, крепятся к станку у места разгрузки. В элементах станка, к которым закреплены кривые, учитываются дополнительные нагрузки, возникающие при опрокидывании сосуда.

Отбойные устройства. Учитывая наличие автоматических устройств, исключающих возможность переподъема, расчет устройств, предупреждающих удар сосуда о шкив производится на статическую нагрузку, равную четырехкратному весу груженого сосуда.

Балки тормозных устройств должны быть рассчитаны на нагрузку от усилия в канатах при аварийном торможении, принимая его равным четырехкратному рабочему усилию.

Обшивка копра. Для герметизации каркас станка обшивается стальными оцинкованными профилированными листами или стальными гладкими листами толщиной 3–4 мм.

Монтажное устройство. На всех копрах предусматриваются устройства для монтажа и демонтажа шкивов, представляющие собой две П-образные рамы, соединенные связями. К ригелям рам закреплены монорельсы, установленные над каждым шкивом. В сторону укосины монорельсы имеют консоль длиной около 1,5 м с упором для тали.

Лестницы. Надшахтные копры для осмотра подъемного оборудования и узлов копра оборудуются лестницами. Устройство лестниц непосредственно под подъемными канатами запрещается. Угол наклона маршей лестницы должен быть не более 70 градусов, ширина маршей – не менее 600 мм. При устройстве маршей лестниц один над другим они должны быть защищены сверху решетками с сеткой с размером ячеек 20×20 мм.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Розенблит Г.А.** Стальные конструкции зданий и сооружений угольной промышленности. М.-Л., Углетехиздат, 1953.
2. **Бровман И.В.** Надшахтные копры (проектирование, расчет и конструкция). М., Госгортехиздат, 1961.
3. **Стрелецкий Н.С. Стрелецкий Д.Н.** Проектирование и изготовление экономичных металлических конструкций. М., Стройиздат, 1964.
4. Указания по определению нормативных нагрузок и коэффициентов перегрузки для надшахтных зданий и сооружений предприятий угольной промышленности. Киев, Будивельник, 1964.
5. **Андреев В.Е.** Проектирование, строительство и эксплуатация башенных копров. М., Недра, 1970.
6. Инструкция по определению динамических нагрузок от машин, устанавливаемых на перекрытиях промышленных зданий. М., Стройиздат, 1970.
7. Инструкция по расчету несущих конструкций зданий и сооружений на динамические нагрузки. М., Стройиздат,1970.
8. Руководство по строительному проектированию башенных копров. Донецкий Промстройниипроект. М., Стройиздат, 1975.
9. Руководство по расчету башенных копров угольных и рудных шахт. Донецкий Промстройниипроект. М., Стройиздат,1975.
10. ВНТП 13-2-77. Нормы технологического проектирования горнодобывающих предприятий черной металлургии с подземным способом разработки. МЧМ СССР, Ленинград, 1979.
11. **Максимов А.П.** Горнотехнические здания и сооружения. Недра, 1984.
12. СНиП 2.01.07-85. Нагрузки и воздействия. М., Госстрой СССР, 1996.
13. СНиП II-23-81*. Стальные конструкции. М., Госстрой СССР, 1995.
14. СНиП 2.09.03-85. Сооружения промышленных предприятий. М., Госстрой СССР, 1986.
15. ВНТП 37-86. Нормы технологического проектирования рудников цветной металлургии с подземным способом разработки. Минцветмет СССР. М., 1986.

РАЗДЕЛ II

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

ГЛАВА 6

ОБЛАСТИ РАЦИОНАЛЬНОГО ПРИМЕНЕНИЯ; МАТЕРИАЛЫ И СОЕДИНЕНИЯ

6.1. Области рационального применения

Алюминиевые сплавы имеют специфические, отличные от стали, физико-механические, технологические и эксплуатационные свойства.

К положительным свойствам можно отнести почти в три раза меньшую, чем у стали объемную массу и значительно более высокую коррозионную стойкость при эксплуатации в обычных условиях, промышленной атмосфере и в атмосфере морского воздуха. Поверхность изделий из алюминиевых сплавов хорошо окрашивается лакокрасочными составами и анодируется, что повышает их коррозионную стойкость и архитектурную выразительность. Алюминиевые сплавы обладают высокими технологическими свойствами, позволяющими изготавливать экономичные профили рационального поперечного сечения как методом экструзии, так и формованием их на профилегибочных станах. Они хорошо свариваются, сохраняют пластические свойства при низких отрицательных температурах, ненамагничиваются и не образуют искр при ударе.

К недостаткам алюминиевых сплавов относятся меньший (почти в три раза) чем у стали модуль упругости, снижающий эффект применения алюминиевых сплавов в элементах конструкций, сечения которых определяются расчетом на устойчивость, и больший (почти в два раза) чем у стали коэффициент линейного расширения, что определяет особенности конструирования алюминиевых конструкций и в первую очередь, в случае их использования совместно с элементами из других материалов.

Алюминиевые сплавы дороже чем сталь и только комплексный анализ с учетом их специфических свойств и технико-экономического расчета может позволить объективно оценить рациональность их применения для конкретного объекта, что и подтверждает отечественный и зарубежный опыт применения алюминиевых сплавов в конструкциях здании и сооружений.

Наиболее обоснованным является их применение в сборно-разборных конструкциях, предназначенных для многократного использования и транспортирования, в том числе, авиационным, автомобильным и речным транспортом; в подвижных частях зданий и сооружений – крупноразмерных воротах эллингов и ангаров; в раздвижных частях покрытий зданий и сооружений, в сборно-разборных мостах, инвентарных подмостях, в высотных сооружениях, где монтажные элементы необходимо поднимать на большую высоту; в ограждающих (стеновых и кровельных) конструкциях зданий, особенно высотных, что значительно снижает нагрузку на несущие конструкции; в покрытиях зданий с большими пролетами, в которых влияние собственной массы на суммарную статическую нагрузку оказывается очень значительным и одновременно играет важную роль при монтаже; в витражах и конструкциях окон и светоаэрационных фонарей, подвесных потолках и перегородках общественных зданий; в конструкциях сельскохозяйственных зданий с высокой степенью агрессивности внутренней среды, резервуарах для хранения нефтепродуктов, силосах и других сооружениях, в том числе, в условиях низких температур.

Выполнение конструкций из алюминиевых сплавов для строительства в районах с повышенной сейсмичностью позволяет, благодаря малому весу конструкций, уменьшить затраты, связанные с обеспечением сейсмостойкости зданий и сооружений.

Наличие в России и странах СНГ индустриальной базы по изготовлению полуфабрикатов и изделий из алюминиевых сплавов создает предпосылки для еще более широкого внедрения их в строительстве.

6.2. Характеристика материалов

Алюминий, применяемый в строительстве, по технологическому признаку делится на деформируемый (обрабатываемый давлением – прокаткой, прессованием, штамповкой, гибкой) и литейный. При этом используют почти исключительно деформируемый алюминий, из которого делают листы, ленты, профили, трубы и другие полуфабрикаты. Из литейного алюминия изготавливают, в основном, небольшие фасонные детали для соединения отдельных элементов и для скобяных изделий.

Марки алюминия классифицируют по химическому составу. Различают технический алюминий и алюминий, легированный одним, двумя и более компонентами. Например, система Al–Mg–Si означает: «основа – алюминий, основные легирующие элементы – магний и кремний» (таблица 6.1). Вид легирования определяет способность некоторых марок упрочняться в результате термической обработки (закалки и последующего старения). Такой алюминий называют термически упрочняемым. Остальные марки относят к термически неупрочняемому алюминию. Эти марки упрочняют механическим воздействием – нагартовкой. В строительстве применяют ограниченное количество марок из числа освоенных промышленностью. СНиП 2.03.06-85 рекомендует семь марок, относящихся как к термически неупрочняемому (марки АД1, АМц, АМг2), так и термически упрочняемому алюминию (марки АД31, 1915, 1925, 1935).

Наличие или отсутствие упрочнения и его характер («состояние поставки») обозначают заглавными буквами и цифрами, следующими за названием марки. Существуют следующие состояния поставки:

отожженное (мягкое) рекристаллизованное	– М
отожженное гомогонизованное	– МП
закаленное и естественно состаренное	– Т
закаленное и искусственно состаренное	– Т1
закаленное и состаренное по смягчающему режиму старения № 2	– Т2
закаленное и состаренное по смягчающему режиму старения № 3	– Т3
закаленное не полностью и естественно состаренное	– Т4
закаленное не полностью и искусственно состаренное	– Т5
закаленное и искусственно состаренное по режиму № 6	– Т6
четвертьнагартованное	– Н1
полунагартованное	– Н2
тричетвертинагартованное	– Н3
нагартованное	– Н
нагартованное с повышенной степенью нагартовки	– НН
нагартованное после закалки и естественного старения	– ТН
нагартованное после закалки и искусственного старения	– Т1Н

В строительстве применяют полуфабрикаты состояний поставки М, Т1, Т4, Т5, Н1 и Н2. Пример обозначения: АД31Т5 – алюминий марки АД31, не полностью закаленный и искусственно состаренный. Если термическое упрочнение или нагартовку не производили, состояние поставки не обозначают. Полуфабрикаты других состояний могут быть получены по согласованию с заводами-изготовителями.

Нагартовка применяется преимущественно для термически неупрочняемых сплавов. Закалка и старение – для термически упрочняемых сплавов.

Легирование повышает прочность алюминия, но снижает его пластичность и коррозионную стойкость. Поэтому в строительстве применяют малолегированный алюминий малой и средней прочности. Механические, технологические и эксплуатационные свойства алюминиевых сплавов определяются химическим составом и условиями термической обработки полуфабрикатов.

Принято классифицировать алюминиевые сплавы по содержанию в них легирующих добавок, которые во многом определяют их основные свойства.

1. Технический алюминий и термически неупрочняемые сплавы алюминия с магнием и марганцем (Al, Al–Mg, Al–Mn). Принятая у нас маркировка – Al 97, AMg, AMn. Сплавы этой группы обладают высокими пластическими свойствами, технологичностью, коррозионной стойкостью, хорошей свариваемостью. Для повышения прочностных характеристик эти сплавы дополнительно упрочняют холодным деформированием.
2. Сплавы системы Al–Mg–Si (маркировка, принятая в России – АД31, АД33, АД35 и АВ) отличаются высокой коррозионной стойкостью и пластичностью, что позволяет прессовать из них тонкостенные профили при больших скоростях, а также высоким сопротивлением усталостным напряжениям. Сплавы сохраняют высокую пластичность как в отожженном, так и свежезакаленном и естественно состаренном состоянии, что способствует штамповке из них изделий с глубокой вытяжкой. Они удовлетворительно свариваются аргоно-дуговой, роликовой и точечной сваркой, хорошо полируются, имеют хороший декоративный вид.
3. Сплавы системы Al–Zn–Mg (маркировка – 1911, 1915, 1925, 1935) обладают так же, как и сплавы системы Al–Mg–Si, высокой пластичностью в горячем состоянии. Кроме того, они так же, как и сплавы марок АД31, АД33, АД35, имеют свойство самозакаливания.

Способность изделий из этого сплава закаливаться на воздухе обуславливает небольшую потерю прочности сварных соединений по отношению к основному металлу. Сплавы системы Al–Zn–Mg имеют высокие прочностные свойства при криогенных температурах, удовлетворительную свариваемость и хорошую коррозионную стойкость. Для того, чтобы обеспечить их устойчивость к коррозии под напряжением, содержание в сплаве цинка и магния регулируется. С этой же целью в сплав вводятся цирконий, хром и титан. С целью снижения затрат на изготовление и улучшения эксплуатационных характеристик разработан сравнительно новый сплав этой системы – 1935. Он позволяет повысить скорость прессования в 1,5 раза по сравнению со сплавом 1925. Из сплава 1935 изготавливают профили сложной конфигурации с тонкими стенками. Этот сплав хорошо противостоит вязкому разрушению, обладает более высокими антикоррозионными свойствами и лучшей свариваемостью по сравнению со сплавом 1915.

При длительной эксплуатации конструкций из алюминиевых сплавов при температуре 100°С и выше необходимо учитывать снижение механических свойств и ползучесть.

Предел выносливости алюминиевых сплавов зависит от химического состава и состояния поставки материала. Так, неупрочняемые сплавы имеют предел выносливости, составляющий примерно 0,5 от предела прочности, так же как у стали, а для сплавов термоупрочняемых он снижается до 0,3 предела прочности.

Для изготовления ограждающих конструкций и декоративных деталей применяют: АД1М (штамповки со сложным, глубоким рельефом, листовые детали, требующие при изготовлении многократных перегибов); АМг2М (штамповки с умеренным рельефом); АМг2Н2 (профилированные и гладкие листы); АД31Т, АД31Т1, АД31Т4, АД31Т5 (прессованные профили, листы); АМцМ и АМцН2 (преимущественно для конструкций с лакокрасочными покрытиями и конструкции, к внешнему виду которых не предъявляют высоких требований – штамповки, профилированные и гладкие листы).

Несущие сварные конструкции изготавливают из алюминия марок АМг2М, АМг2Н2, АД31Т, АД31Т1, АД31Т4, АД31Т5, 1915, 1915Т, 1935. Несущие клепаные конструкции и элементы конструкций, не имеющие сварных соединений, изготавливают из алюминия марок АМг2Н2, АД31Т, АД31Т1, АД31Т4, АД31Т5, 1915, 1915Т, 1925, I935Т.

Алюминиевые заклепки изготавливают из алюминия марок АД1Н, АМг2Н, АМг5ПМ, АВТ. Алюминиевые болты – из алюминия марок АМг5П, АВТ1. В качестве электродной или присадочной проволоки при аргонодуговой сварке применяют алюминий марок СвАМг3, 1557, СвА1, СвАК5, СвАМг3.

Химический состав, технологические и механические свойства полуфабрикатов, физические свойства, свойства сварных соединений и другие справочные данные для алюминия марок, применяемых в строительных конструкциях, приведены в таблицах 6.1. ... 6.8.

Таблица 6.1. Номинальный химический состав деформируемых алюминиевых сплавов (по ГОСТ 4784-74), применяемых в строительных конструкциях

Система	Буквенное или цифровое обозначение	Номинальный химический состав, % по массе										
		Cu	Mg	Mn	Fe	Si	Zn	Ti	Zr	Cr	Be	Al
Al	АД1											не менее 99,3
Al-Mn	АМц			1,3								основа
Al-Mg	АМг1		1,0									основа
Al-Mn-Mg	АМг2		2,2	0,4								основа
Al-Mn-Mg	АМг3		3,5	0,45		0,65						основа
Al-Mn-Mg	АМг5П		5,3	0,55				0,06			0,0026	основа
Al-Mg-Si	АД31		0,65			0,5						основа
Al-Mg-Si	АД35*		1,1	0,7		1,0						основа
Al-Si--Mg-Cu	АВ	0,3	0,7	0,25 или хром		0,85						основа
Al-Zn-Mg	1915		1,55	0,4			3,7		0,18	0,14		основа
	1925		1,55	0,45			3,7		0,15	0,2		основа
	1935*		0,9	0,4			3,7		0,15÷ 0,22			

* по ОСТ-1-92014-76

Таблица 6.2. Номинальный химический состав сварочной проволоки из алюминиевых сплавов (по ГОСТ 7871-75)

Система	Буквенное обозначение	Номинальный химический состав, % по массе								
		Al	Mg	Mn	Fe	Si	Ti	Be	Zr	Cr
Al	СвА97	99,97	–	–	–	–	–	–	–	–
Al-Mg-Mn	СвАМг3	остальные	3,5	0,45	–	0,65	–	–	–	–
Al-Mg-Mn	Св1557	остальные	5,0	0,4	–	–	–	0,0035	0,2	0,11

Таблица 6.3. Механические свойства прессованных профилей из алюминия и алюминиевых сплавов (ГОСТ 8617-81*)

Марка сплава	Состояние материала профилей при изготовлении	Состояние материала образцов при испытании	Толщина полки или стенки, мм	Временное сопротивление, МПа (кгс/мм^2)	Предел текучести, МПа (кгс/мм^2)	Относительное удлинение, %
1	2	3	4	5	6	7
АД1	Без термической обработки	Без термической обработки	Все размеры	59 (6,0)	–	20
АМц	Без термической обработки	Без термической обработки	Все размеры	98 (10,0)	–	16
АМг2	Без термической обработки	Без термической обработки	Все размеры	147 (15,0)	59 (6,0)	13
	Отожженные	Отожженные	Все размеры	не более 225 (23,0)	59 (6,0)	13
АМг3	Без термической обработки	Без термической обработки	Все размеры	176 (18,0)	78 (8,0)	12
	Отожженные	Отожженные	Все размеры	176 (18,0)	78 (8,0)	12
АМг5	Без термической обработки	Без термической обработки	Все размеры	225 (26,0)	127 (13,0)	15
	Отожженные	Отожженные	Все размеры	225 (26,0)	127 (13,0)	15
АД31	Без термической обработки	Закаленные и естественно состаренные	Все размеры	127 (13,0)	69 (7,0)	13
АД31Т	Закаленное и естественно состаренное	Закаленные и естественно состаренные	до 100 вкл.	127 (13,0)	69 (7,0)	13
АД31Т1	Закаленное и искусственно состаренное	Закаленные и искусственно состаренные	до 100 вкл.	196 (20,0)	147 (15,0)	10
АД31Т5	Не полностью закаленное и искусственно состаренное	Не полностью закаленные и искусственно состаренные	до 100 вкл.	157 (16,0)	118 (12,0)	8

Продолжение табл.6.3

1	2	3	4	5	6	7
1915М	Отожженное	Отожженные	Все размеры	не более 277 (28,0)	176 (18,0)	12
1915Т	Закаленное и естественно состаренное	Закаленные и естественно состаренные в течение 30–35 суток	до 100 вкл.	343 (35,0)	216 (22,0)	10
1915Т	Закаленное и естественно состаренное	Закаленные и естественно состаренные в течение 2–4 суток	до 100 вкл.	275 (28,0)	176 (18,0)	10
	Без термической обработки	Горячепрессованные с естественным старением в течение 30–35 суток	до 12 вкл.	314 (32,0)	196 (20,0)	10
	Без термической обработки	Горячепрессованные с естественным старением в течение 2–4 суток	до 12 вкл.	265 (27,0)	167 (17,0)	10
1915Т1	Закаленное и естественно состаренное	Закаленные и искусственно состаренные	Св.12 до 100 вкл.	373 (38,0)	245 (25,0)	8
АВТ	Без термической обработки	Закаленные и естественно состаренные	Все размеры	176 (18,0)	–	14
АВТ	Закаленное и естественно состаренное	Закаленные и естественно состаренные	до 100 вкл.	176 (18,0)	–	14
АВТ1	Закаленное и искусственно состаренное	Закаленные и искусственно состаренные	до 100 вкл.	294 (30,0)	225 (23,0)	10
1925	Без термической обработки	Горячепрессованные с естественным старением в течение 30–35 суток	до 12 включ.	343 (35,0)	196 (20,0)	9,0

Окончание табл.6.3

1	2	3	4	5	6	7
1925	Без термической обработки	Горячепрессованные с естественным старением в течение 2–4 суток	до 12 включ.	275 (28,0)	176 (18,0)	10,0
1925М	Отожженные	Отожженные	Все размеры	не более 294 (30,0)	–	12,0
1925Т	Закаленное и естественно состаренное	Закаленные и естественно состаренные в течение 30–35 суток	Св.12 до 100 вкл.	343 (35,0)	196 (20,0)	10,0
1925Т	Закаленное и естественно состаренное	Закаленные и естественно состаренные в течение 2–4 суток	до 100 включ.	275 (28,0)	176 (18,0)	10,0
1935	Без термической обработки	Естественно состаренные в течение 30–35 суток	до 10 включ.	245 (25,0)	155 (16,0)	10,0
1935	Без термической обработки	Естественно состаренные в течение 2–4 суток	до 10 вкл.	185 (19,0)	120 (12)	12
1935Т	Закаленное и естественно состаренное	Закаленные и естественно состаренные в течение 30–35 суток	до 100 вкл.	245 (25)	155 (16)	10
1935Т1	Закаленное и естественно состаренное	Закаленные и естественно состаренные в течение 2–4 суток	до 100 вкл.	185 (19)	120 (12)	12

Примечания: 1. Механические свойства профилей любого состояния материала из алюминия марок АД и алюминиевых сплавов АМц, АМг2, АМг3, АД31, АД35, 1925, а также показатели механических свойств профилей без термической обработки и в отожженном состоянии из алюминиевых сплавов марок 1915 и 1935 обеспечиваются технологией изготовления.

2. По требованию потребителя нормы относительного удлинения профилей из сплава марки АМг2 должны быть не менее 15%.

Таблица 6.4. Механические свойства листов при растяжении (ГОСТ 21631-76*)

Марка алюминия и алюминиевого сплава	Состояние поставки	Обозначение сплава и состояние материала	Состояние испытываемых образцов	Толщина листа, мм	Временное сопротивление, МПа (кгс/мм^2)	Предел текучести, МПа (кгс/мм^2)	Относительное удлинение при $l = 11{,}3\sqrt{F}\delta$, %
1	2	3	4	5	6	7	8
АД1	Отожженные	АД1М	Отожженные	от 0,3 до 0,5 св. 0,5 до 0,9 от 0,9 до 10	60 (6,0) 60 (6,0) 60 (6,0)	– – –	20 25 28
	Полунагартованные	АД1Н2	Полунагартованные	от 0,8 до 4,5	100 (10,0)	–	6
	Нагартованные	АД1Н		от 0,3 до 0,8 св. 0,8 до 3,5 св. 3,5 до 10,5	150 (15,0) 150 (15,0) 130 (13,0)	– – –	3 4 5
	Без термической обработки	АД1	Без термической обработки	от 5 до 10,5	70 (7,0)	–	15
АМц	Отожженные	АМцМ	Отожженные	от 0,5 до 0,7 св. 0,7 до 3,0 св. 3 до 10,5	90 (9,0) 90 (9,0) 90 (9,0)	– – –	18 22 20
	Полунагартованные	АМцН2	Полунагартованные	от 0,5 до 3,5 св. 3,5 до 10,5	145 (15,0) 145 (15,0)	– –	5 6
	Нагартованные	АМцН	Нагартованные	0,5 св. 0,5 до 0,8 св. 0,8 до 1,2 св. 1,2 до 10,5	185 (19,0) 185 (19,0) 185 (19,0) 185 (19,0)	– – – –	1 2 3 4
	Без термической обработки	АМц	Без термической обработки	от 5 до 10,5	100 (10,0)	–	10
АМг2	Отожженные	АМг2М	Отожженные	от 0,5 до 1 св. 1 до 10,5	165 (17,0) 165 (17,0)	– –	16 18
	Полунагартованные	АМг2Н2	Полунагартованные	от 0,5 до 1 св. 1 до 5 св. 5 до 10,5	235-314 (24,0-32,0) 235-314 (24,0-32,0) 225 (23,0)	145 (15,0) 145 (15,0) 135 (14,0)	5 6 6

Окончание табл.6.4

1	2	3	4	5	6	7	8
АМг2	Нагартованные	АМг2Н	Нагартованные	от 0,5 до 1 св. 1 до 10,5	265 (27,0) 265 (27,0)	215 (22,0) 215 (22,0)	3 4
	Без термической обработки	АМг2	Без термической обработки	от 5 до 10,5	175 (18,0)	–	7
АМг3	Отожженные	АМг3М	Отожженные	от 0,5 до 0,6 св. 0,6 до 4,5 св. 4,5 до 10,5	195 (20,0) 195 (20,0) 185 (19,0)	90 (9,0) 100 (10,0) 80 (8,0)	15 15 15
	Полунагартованные	АМг3Н2	Полунагартованные	от 0,5 до 1 св. 1 до 5 св. 5 до 10,5	245 (25,0) 245 (25,0) 235 (24,0)	195 (20,0) 195 (20,0) 175 (18,0)	7 7 6
	Без термической обработки	АМг3	Без термической обработки	от 5 до 6 св. 6 до 10,5	185 (19,0) 185 (19,0)	80 (8,0) 80 (8,0)	12 15
АВ	Отожженные	АВМ	Отожженные	от 0,5 до 5 св. 5 до 10,5	не более 145 (15,0) не более 145 (15,0)	– –	20 15
	Закаленные и естественно состаренные	АВТ	Закаленные и естественно состаренные	от 0,5 до 0,6 св. 0,6 до 3 св. 3 до 5 св. 5 до 10,5	195 (20,0) 195 (20,0) 195 (20,0) 175 (18,0)	– – – –	18 20 18 16
	Закаленные и искусственно состаренные	АВТ1	Закаленные и искусственно состаренные	от 0,5 до 5 св. 5 до 10,5	295 (30,0) 295 (30,0)	– –	10 8
	Без термической обработки	АВ	Закаленные и естественно состаренные	от 5 до 10,5	175 (18,0)	–	14
	Без термической обработки		Закаленные и искусственно состаренные	от 5 до 10,5	295 (30,0)	–	7

Таблица 6.5. Типичные механические свойства некоторых алюминиевых сплавов при различных температурах, МПа (кратковременные испытания)

Сплав и его состояние	Виды полуфабрикатов	Свойства	Температура, °С								
			-253	-196	-70	20	100	150	200	250	300
АДМ		$\sigma_в$	260	170	95	80	–	60	42	28	18
АД1М	Катаные	$\sigma_{0,2}$	54	40	30	30	–	29	25	17	10
		δ	46	50	45	35	–	55	65	74	80
		$\sigma_в$	–	253	187	170	160	145	100	60	30
АМцП	Катаные	$\sigma_{0,2}$	–	165	140	130	115	100	65	30	18
		δ	–	24	16	10	10	12	20	60	70
		$\sigma_в$	–	300	230	220	200	180	110	60	30
АМцН	Катаные	$\sigma_{0,2}$	–	225	196	180	150	120	65	30	18
		δ	–	25	10	8	8	11	18	60	70
		$\sigma_в$	–	200-250	110-160	80-140	80-140	70-130	60-100	40-80	30-60
АМг1М	Катаные	$\sigma_{0,2}$	–	70	65	60	60	56	52	40	28
		δ	–	46	38	25	25	30	40	55	65
		$\sigma_в$	–	350	270	150-230	140-220	130-200	110-170	90-130	70-80
АМг1Н		$\sigma_{0,2}$	–	270	225	140-220	130-200	110-170	90-110	70-80	40-50
		δ	–	26	18	5-3	5-3	5-4	13-7	18-9	30-15
		$\sigma_в$	–	310	200	190	170	160	130	110	70
АМг2М	Катаные	$\sigma_{0,2}$	–	160	90	80	80	70	60	–	–
		δ	–	50	38	23	26	35	51	62	72
		$\sigma_в$	500	380	280	260	260	220	160	80	50
АМг2П	Катаные	$\sigma_{0,2}$	280	260	220	210	210	190	100	50	35
		δ	40	30	21	14	16	25	40	80	100
		$\sigma_в$	630	440	330	290	–	250	160	90	50
АМг2Н	Катаные	$\sigma_{0,2}$	380	330	280	260	–	210	100	70	30
		δ	32	25	11	8	–	24	40	60	100
		$\sigma_в$	580	400	310	300	270	230	180	140	–
АМг5М	Катаные	$\sigma_{0,2}$	190	170	160	150	140	140	120	90	–
		δ	24	28	24	20	29	37	48	55	–
		$\sigma_в$	–	480	410	360	310	280	250	–	–
1915Т1	Катаные	$\sigma_{0,2}$	–	350	320	280	260	220	170	–	–
		δ	–	16	11	11	16	20	16	–	–
		$\sigma_в$	–	560	–	400	340	300	–	–	–
1915Т1	Прессованные	$\sigma_{0,2}$	–	440	–	350	310	270	–	–	–
		δ	–	18	–	10	12	15	–	–	–

Таблица 6.6. Физические характеристики алюминия

Физическая характеристика	Значения
Модуль упругости E, МПа (кгс/см2), при температуре, °С:	
минус 70	$0{,}735 \cdot 10^5$ ($0{,}75 \cdot 10^6$)
от минус 40 до плюс 50	$0{,}7 \cdot 10^5$ ($0{,}71 \cdot 10^6$)
100	$0{,}64 \cdot 10^5$ ($0{,}65 \cdot 10^6$)
Модуль сдвига G, МПа (кгс/см2), при температуре, °С:	
минус 70	$0{,}274 \cdot 10^5$ ($0{,}28 \cdot 10^6$)
от минус 40 до плюс 50	$0{,}265 \cdot 10^5$ ($0{,}27 \cdot 10^6$)
100	$0{,}255 \cdot 10^5$ ($0{,}26 \cdot 10^6$)
Коэффициент поперечной деформации (Пуассона)	0,3
Коэффициент линейного расширения $°C^{-1}$, при температуре от минус 70 до плюс 100 °С	$0{,}23 \cdot 10^{-4}$
Среднее значение плотности ρ_m, кг/м^3	2700

Примечание. Для промежуточных значений температуры значения E и G следует определять линейной интерполяцией.

Таблица 6.7. Плотность алюминия

Марка алюминия	АД1	АМц	АМг	АД31	1935	1925	1915	АЛ8
Плотность кг/м^3	2710	2730	2680	2710	2760	2770	2770	2550

Таблица 6.8. Алюминиевые полуфабрикаты, применяемые для строительных конструкций

Марка алюминия	Полуфабрикаты					
	листы	ленты	плиты	прутки	профили	трубы
АД1	+	+	–	–	–	–
АМц	+	+	–	–	–	–
АМг2	+	+	+	–	–	+
АД31	–	–	–	+	+	+
1935	–	–	–	+	+	–
1925	–	–	–	+	+	+
1915	–	–	–	+	+	+
1935	–	–	–	+	+	+

Примечание. Знак «+» означает, что данный полуфабрикат применяется для строительных конструкций; знак «–» – данный полуфабрикат не применяется.

6.3. Виды полуфабрикатов

Отечественная промышленность вырабатывает из алюминиевых сплавов листы, ленты, плиты, профили различной конфигурации. К алюминиевым полуфабрикатам относят прессованные и гнутые профили, гладкие (не профилированные и не имеющие декоративного тиснения) листы и ленты, профилированные в виде различной формы гофров листы, листы с декоративным тиснением. В ряде случаев полуфабрикаты могут быть поставлены с заранее нанесенными защитно-декоративными покрытиями (окрашенные или плакированные полимерными пленками листы и ленты, анодированные или окрашенные профили и др.). В табл.6.9. приведены данные о номенклатуре полуфабрикатов, изготавливаемых из алюминиевых сплавов.

Таблица 6.9. Полуфабрикаты, изготавливаемые из алюминиевых сплавов и обычное состояние поставки

Марка сплава	Лента	Лист	Плита	Трубы			Профиль	Пруток	Поковка, штамповка	Проволока заклепочная	Проволока сварочная
				тянутые, катаные	прессованные	сварные					
АД1	М	М Н Н2 б/о	б/о	М Н	б/о		б/о	б/о		М Н	
АМц	М Н2 Н3 Н б/о	М Н2 Н	б/о	М Н	б/о	М Н	б/о	б/о		М Н	
АМг2	М Н1 Н2 Н3 Н б/о	М Н1 Н2 Н б/о	б/о	М Н	б/о	б/о Н	б/о	б/о	М	М Н	
АМг3	М Н2 б/о	М Н2 б/о	б/о	М Н	М б/о	Н	б/о	М б/о	М		
АМг5П										М Н	
АМг6				б/о			б/о	б/о			
АВ	М б/о	Т Т1 б/о	б/о	М Т Т1	Т Т1 б/о		Т Т1	Т Т1	Т1		
АД31					б/о Т		Т Т1 Т5	Т Т1			
АД35							Т1				
1915		М Т			б/о М Т		б/о М Т	б/о Т			
1925					б/о М Т		М Т	М Т			
1935					б/о М Т		М Т	М Т			
СвА97											Н
СвАМг3											М Н
Св1557											М Н

б/о – без термообработки

От шестидесяти до восьмидесяти процентов строительных алюминиевых конструкций изготавливают из профилей, в том числе подавляющее большинство – из прессованных, а остальные – из холодногнутых. Прокатные профили, как уже упоминалось, в алюминиевых конструкциях практически не применяют.

Прессованные алюминиевые профили поставляют по двум стандартам. Стандарт «Профили прессованные из алюминиевых сплавов для ограждающих строительных конструкций. Общие технические условия» (ГОСТ 22233-93) распространяется на прессованные профили постоянного сечения из алюминия марок АД31, АМц с диаметром описанной окружности до 220 мм для сплошных и 180 мм для полых профилей, изготавливаемых на специализированных заводах алюминиевых конструкций и предназначенных для применения в строительных ограждающих конструкциях. Стандарт «Профили прессованные из алюминия и алюминиевых сплавов. Технические условия» (ГОСТ 8617-81*) распространяется на профили, изготавливаемые из большого количества марок алюминия на металлургических заводах. Максимальные размеры профилей, подпадающих под действие этого стандарта, для сплошных профилей определяется диаметром описанной окружности 350 мм и площадью поперечного сечения в 200 см^2, а для полых – диаметром описанной окружности 250 мм и площадью поперечного сечения в 60 см^2.

Сортамента алюминиевых профилей, построенного по принципу сортамента стальных профилей, не существует. Для подбора профилей при проектировании конструкций следует пользоваться отраслевыми или заводскими каталогами профилей. В исключительных случаях допускается разработка индивидуальных профилей. При этом необходимость создания нового профиля должна быть соответствующим образом обоснована, а возможность его изготовления – согласована с заводом.

Максимальные габариты профиля, который можно изготовить на прессе, ограничены диаметром окружности, описывающей профиль. Диаметр описанной окружности зависит от усилия пресса, формы профиля (сплошной или полый), а также от диаметра контейнера, которым пресс укомплектован. Максимальные диаметры описанной окружности для прессов, установленных на заводах алюминиевых конструкций, даны в табл.6.10. Указанные размеры приведены для ориентации, так как точные размеры профиля определяют в процессе проектирования матрицы. Поэтому возможно как некоторое уменьшение, так и увеличение габаритов профиля против приведенных.

Обычно диаметр контейнера превышает диаметр описанной окружности не менее чем на 30 – 40 мм для сплошных и 60 – 100 мм – для полых профилей. Кроме этого, поперечное сечение профиля и его длина определяются мощностью машин, подвергающих профиль правке растяжением после прессования. Современное прессовое оборудование позволяет изготовлять профили площадью сечения от 0,5 до 200÷300 см^2. Предприятия авиационной промышленности оснащены более мощными прессами.

Таблица 6.10.

Усилие пресса (МПа)	Диаметр контейнера (мм)	Максимальный диаметр описанной окружности (мм)		Максимальная площадь профиля (см^2)
		Сплошные профили	Полые профили	
12,5	150	120	100	6
	130	100	80	4
13,5	170	140	110	8
	150	120	100	6
22,5	250	220	160	20
	200	160	125	15
25,0	250	220	160	20

Минимальная толщина стенок профиля зависит от марки сплава, габаритов (диаметра описанной окружности) и вида (сплошной или полый) профиля. Стандартом на строительные профили (ГОСТ 22233-93) обусловлены минимальные толщины стенок профилей, которые заказчик имеет право требовать, а профильные цеха заводов алюминиевых конструкций обязаны выдержать (табл.6.11).

Таблица 6.11.

Диаметр описанной окружности (мм)	Минимальные толщины стенки профиля (мм)	
	Сплошные профили	Полые профили
До 30	1,0	1,5
Св. 30 до 50	1,5	1,8
Св. 50 до 80	1,7	2,0
Св. 80 до 120	2,0	2,3
Св. 120 до 180	2,2	2,5
Св. 180 до 220	3,2	–

Примечание. По согласованию с заводом-изготовителем могут быть изготовлены профили с меньшими толщинами стенок, чем предусмотрено в ГОСТах.

Соотношение размеров пазов в профилях должно быть таким, чтобы глубина паза h не превосходила его двойной ширины b. Максимальное отношение глубины паза h к ширине b не должно превосходить указанных в таблице 6.12 предельно допустимых величин.

Таблица 6.12.

h (мм)	h/b
Свыше 4 до 10	3,0
Свыше 10 до 30	4,0
Свыше 30 до 80	3,0
Свыше 80 до 120	2,0
Свыше 120	1,5

По технологическим условиям острые кромки профилей должны быть слегка скруглены, причем радиус скругления зависит от толщины сходящихся стенок.

При проектировании профилей важно учитывать и другие правила, более общего характера, которые не всегда выражаются в цифрах. Симметричные профили всегда технологичнее несимметричных. Особенно полезно добиваться симметричности полостей полых профилей. Следует также стремиться к упрощению формы полостей. Резкие различия в толщине различных элементов профиля нежелательны. В частности, нетехнологичны массивные профиля с тонкими ребрами. Вследствие неравномерности истечения алюминия при прессовании кромки ребер таких профилей часто получаются волнистыми. Отношение высоты (выноса) ребра к его толщине не следует делать более 10. Нетехнологичны профили с ярко выраженной клиновидностью – толстым обушком и сходящим на нет острием. Острие такого профиля почти всегда будет волнистым. В профилях с двумя и более полостями перемычки между полостями не должны сильно отличаться по толщине от стенок и полок профилей.

При выборе типа профиля необходимо учитывать не только целесообразность сечения с точки зрения несущей способности, но и удобство сопряжения элементов в конструкции (удобство постановки болтов, заклепок, наложения сварных швов). При этом решающими могут быть экономические соображения. Сравнение стоимости профилей различной конфигурации и площадей поперечного сечения

показывает, что выгодный с точки зрения расхода металла трубчатый круглый профиль может оказаться нерациональным из-за сложности конструирования соединений и высокой его стоимости.

Кроме конфигурации профиля и площади поперечного сечения на стоимость полуфабриката влияет его технологичность – возможность выполнения точных геометрических размеров (с минимальными допусками) и скорость истечения металла из матрицы. Мягкие сплавы дают более благоприятные показатели.

Широко применяют холодногнутые профили, получаемые из лент, листов или рулонных заготовок. Гнутые профили можно получить с помощью профилирования лент и листов на профилегибочных станах либо гибкой на кромкогибочных прессах. Опыт зарубежных фирм и отечественных предприятий показывает, что изготовлять гнутые профили можно также на оборудовании, предназначенном для изготовления стальных профилей. К преимуществам холодногнутых алюминиевых профилей по сравнению с прессованными могут быть отнесены следующие:

- оборудование для производства гнутых профилей конструктивно менее сложно, проще в обслуживании, дешевле в изготовлении; себестоимость 1 т гнутых профилей ниже себестоимости прессованных на 8–15%; скорость непрерывного профилирования составляет 50–60 м/мин, а скорость прессования наиболее технологичных сплавов – 30÷40 м/мин; вес 1 т гнутых профилей на 7–15% меньше, чем прессованных профилей тех же типоразмеров, что имеет особенно большое значение для декоративных облицовочных элементов;
- гнутые профили легко изготовить в виде замкнутых полых сечений, для чего линия профилирования оборудуется сварочной установкой. В этом случае можно получить более рациональные соотношения толщины стенки к диаметру – от 1/50÷1/60 для профилей с гладкими стенками, до 1/80÷1/100 с гофрированными стенками;
- для гнутых и гнутосварных профилей чаще всего применяют сплавы, обладающие большей пластичностью (технический алюминий, сплавы системы алюминий–магний, алюминий–марганец и алюминий–магний–кремний в отожженном и полунагартованном состоянии).

При конструировании профилей следует учитывать радиусы гиба, возрастающие с увеличением толщины заготовки.

Листовые полуфабрикаты включают гладкие листы, профилированные (главным образом, гофрированные) листы, тисненые листы. Гладкие листы и ленты изготавливают на металлургических заводах на прокатных станах из слябов и поставляют на заводы алюминиевых конструкций в пачках (листы) и в рулонах (ленты). Профилированные листы изготавливают как на металлургических заводах, так и на заводах алюминиевых конструкций на профилегибочных станах, оборудованных сменными комплектами валков. Тисненые листы в настоящее время изготавливают только на отдельных металлургических заводах, но в дальнейшем предусмотрена организация такого производства и на некоторых заводах алюминиевых конструкций.

Сортамент гладких листов и лент и технические требования к ним определены ГОСТ 21631-76* «Листы из алюминия и алюминиевых сплавов» и ГОСТ 13726-78* «Ленты из алюминия и алюминиевых сплавов». Указанные стандарты охватывают широкую номенклатуру листов по маркам алюминия, состоянию поставки, длине, ширине и толщине листов, однако, для изготовления алюминиевых конструкций вообще, а ограждающих – в особенности, используют преимущественно тонкие (толщиной до 2 мм включительно) листы, которые составляют более 80% общего объема применяемых в строительстве листов (таблица 6.13).

Таблица 6.13. Сортамент алюминиевых листов

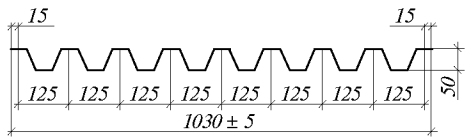
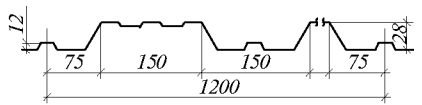
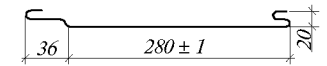
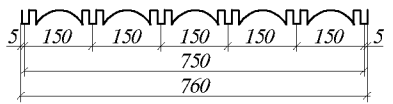
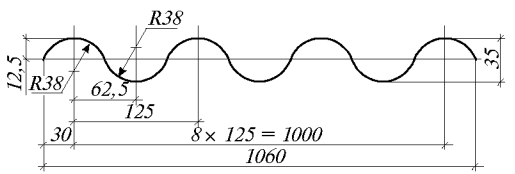
Состояние поставки	Марка сплава	Толщина (мм)	Ширина (мм)	Длина (мм)
М	АДО, АД1	0,3–10,5	600, 800, 900, 1000	2000
	АДО, АД1, АМц, АМг2	0,5–0,7	1000, 1200, 1400, 1500, 1600	2000–4000
	— ″—	0,75–10,5	1000, 1200, 1400, 1500, 1600, 1800, 2000	2000–7000
Н2	АДО, АД1	0,8–4,5	1000, 1200, 1400, 1500	2000–4000
	АМц, АМг2	0,5–0,7	1000, 1200, 1400, 1500, 1600	2000–7000
	— ″—	0,75–4,0	1000, 1200, 1400, 1500, 1600, 1800, 2000	2000–7000
	— ″—	4,5–10,5	1000, 1200, 1400, 1500, 1600, 1800, 2000	2000–4000
Н	АДО, АД1	0,5–0,7	1000, 1200, 1400, 1500, 1600	2000–7000
	— ″—	0,8–4,0	1000, 1200, 1400, 1500, 1600, 1800, 2000	2000–7000
	— ″—	4,5–10,5	— ″—	2000–4000
	АМц, АМг2	0,5–4,0	1000, 1200, 1400, 1500, 1600	2000–7000
	— ″—	4,5–10,5	— ″—	2000–4000

Номенклатура профилированных листов и технические требования к ним определены ГОСТ 24767-81* «Профили холодногнутые из алюминия и алюминиевых сплавов для ограждающих строительных конструкций», а также техническими условиями и номенклатурой заводов-изготовителей. Рекомендуется, в основном, применять профилированные листы, изготавливаемые на заводах алюминиевых конструкций, так как профили этих листов разработаны с учетом требований строительства, а сами листы имеют более жесткие допуски. Заводы алюминиевых конструкций одновременно с профилированными листами могут поставлять в определенной комплектации (в соответствии с номенклатурой продукции заводов) нащельники, сливы, элементы подвески и другие необходимые для монтажа на объекте детали.

Следует иметь в виду, что в ГОСТ включены листы А15-750-0,8 для декоративной облицовки стен, однако в силу ряда технических причин качество этих листов недостаточно высокое. В таблице 6.14. приведены сечения и геометрические характеристики некоторых профилированных листов и реек (рейками называют профилированные листы шириной не более 300 мм при отношении длины к ширине более 4), предназначенных для стеновых обшивок, кровельных настилов, лицевых элементов подвесных потолков, декоративной облицовки стен.

Тисненые листы – листы с выдавленным на их поверхности рисунком мелкого рельефа – являются для отечественной строительной промышленности сравнительно новой продукцией. Тиснение производят путем прокатки алюминиевого листа в стальных вальцах, поверхность одного из которых награвирована. При этом на лицевой стороне листа образуется рельефный рисунок, а обратная сторона остается гладкой (гладкой относительно, так как в ряде случаев незначительной деформации обратной стороны листа избежать не удается). Цель тиснения – достичь определенного эстетического эффекта, в первую очередь – устранить крайне неприятное впечатление от неровностей поверхности алюминиевого листа. Кроме того, тиснение смягчает слепящий блеск алюминиевых листов, освещенных солнцем или ярким искусственным светом.

Таблица 6.14. Профилированные листы (профили холодногнутые) по ГОСТ 24767-81

Обозначение профиля	Форма и размеры профиля	Толщина, мм	Длина, мм не более	Ширина заготовки, мм	Площадь сечения, см^2	Масса, кг		Момент инерции I см^4 на 1 м ширины профиля
						1 п.м	1 м^2	
СПА-1503 *		0,8 1,0	7800 7800	1440 1440	10,87 13,60	3,02 3,78	3,02 3,78	39,10 48,80
А28-1200 **		0,8 1,0	6000 6000	1420 1420	11,36 14,20	3,11 3,89	2,47 3,09	10,17 12,78
А20-280 **		0,8	6000	386	3,09	0,83	2,61	3,1
А15-750 **		0,8 1,0	6000 6000	1028 1028	8,22 10,28	2,10 2,78	2,92 3,85	2,26 2,94
***		0,8 1,0	7000 7000	1245 1245	9,93 12,41	2,68 3,35	2,53 3,16	8,24 10,32

* – изготавливается на заводе Мосметаллоконструкция в г. Видное
** – изготавливается на Воронежском заводе алюминиевых конструкций
*** – изготавливается на Самарском металлургическом заводе им. В.И. Ленина

6.4. Соединения

Элементы алюминиевых конструкций соединяются с помощью электродуговой сварки, болтов, винтов, заклепок, склеиванием и с использованием пайки. Наиболее употребительные типы соединений в несущих конструкциях – сварка, болты и реже – заклепки. В ограждающих конструкциях – винты, заклепки, значительно реже – сварка, пайка, клеесварные и клеезаклепочные соединения.

Сварка алюминиевых элементов осуществляется механизированной (автоматической или полуавтоматической) или ручной электродуговой сваркой в защитной среде аргона с применением неплавящегося вольфрамового электрода и с подачей в зону сварки присадочной проволоки (плавящегося электрода); механизированной электродуговой сваркой в среде аргона с применением плавящегося электрода; контактной сваркой; автоматической электросваркой по слою флюса; газовой сваркой; холодной сваркой.

Наибольшее распространение получила электродуговая сварка неплавящимся вольфрамовым электродом и плавящимся электродом в среде аргона. Контактная (точечная) сварка применяется для соединения тонкостенных элементов. Расчетная несущая способность на срез сварных точек приведена в табл.6.15.

Таблица 6.15. Расчетная несущая способность сварных точек на срез

Толщина элементов, мм	Расчетная несущая способность точки на срез H (кгс)	Толщина элементов, мм	Расчетная несущая способность точки на срез H (кгс)
Контактная сварка (алюминий) марок АМг2Н2 и АМг2М		Аргонодуговая точечная сварка плавящимся электродом (алюминий марки АМг2Н2; сварочная проволока марки СвАМг-3 или 1557)	
1	800 (80)	1+1	1950 (200)
1,5	1250 (130)	1+2	2350 (230)
2,0	1950 (200)	1,5+1,5	2950 (300)
		2+2	3350 (340)

Примечания: 1. Для контактной сварки указана толщина наиболее тонкого элемента; для дуговой точечной сварки его первая цифра – толщина верхнего элемента; 2. Сварные точки следует выполнять в соответствии с «Руководством по аргонодуговой сварке соединении элементов алюминиевых строительных конструкций»/ЦНИИСК им. Кучеренко Госстроя СССР, М.:Стройиздат, 1984.

Широкое распространение соединений на винтах, болтах, заклепках, в том числе специальных типов, вызвано не только известными ограничениями, обуславливающими применение электросварки, но и некоторыми особенностями алюминиевых профилей, благоприятных для соединений на болтах и винтах.

Технология изготовления профилей позволяет получить на них местные утолщения стенки или полок, с целью увеличения сечения в местах установки болтов и винтов при общей небольшой толщине профиля, а также специальные пазы и каналы для установки винтов как вдоль оси профиля, так и перпендикулярно ей, которые дают возможность исключить в части профилей сверление отверстий.

Рекомендуемые алюминиевые сплавы для изготовления болтов и заклепок приведены в табл. 6.16.

Для соединения элементов могут быть применены стальные кадмированные или оцинкованные болты, в том числе высокопрочные, а также болты из нержавеющей стали.

Таблица 6.16. Марки сплавов алюминия, применяемые для заклепок, устанавливаемых в холодном состоянии, и болтов

Марки и состояние поставки	ГОСТ
Заклепки:	
АД1Н, АМг2Н, АМг5п, АВТ	ГОСТ 10299-80*
Болты:	
АМг5п	ГОСТ 14838-78*
АВТ1	ГОСТ 21488-76*

Стальные болты выполняются из стали (технические требования по ГОСТ 1759-70) повышенной, нормальной и грубой точности по ГОСТ 7796-70, ГОСТ 7798-70, ГОСТ 15589-70 и ГОСТ 15591-70, высокопрочные болты, гайки и шайбы к ним соответственно по ГОСТ 22353-77, ГОСТ 22354-77, ГОСТ 22355-77 с техническими требованиями к ним по ГОСТ 22356-77. Винты нормальной точности по ГОСТ 17473-80, ГОСТ 17475-80, ГОСТ 10619-80 и ГОСТ 10621-80.

В качестве соединительных элементов, опорных элементов конструкций и скобяных изделий может применяться алюминиевый литейный сплав АЛ8 по ГОСТ 2685-75.

Могут использоваться также стальные отливки из материалов, указанных в нормах проектирования стальных конструкций с учетом соответствующей защиты сопрягаемых с ними элементов из алюминиевых сплавов.

Виды крепежа. В ограждающих конструкциях соединения на винтах и болтах, а также заклепках являются преобладающими, сортамент применяемого крепежа весьма велик, но ограничивается винтами и болтами малых диаметров (4 – 6 мм, реже – 8 мм). Болты и винты диаметрами 10 – 12 мм применяют, как правило, только в анкерах. Основные виды резьбового крепежа – болты, крюк-болты, шпильки, штифты, винты, самонарезающие винты, в том числе винты-самодыры, болты и штифты с обжимными кольцами, различного вида обычные и специальные гайки.

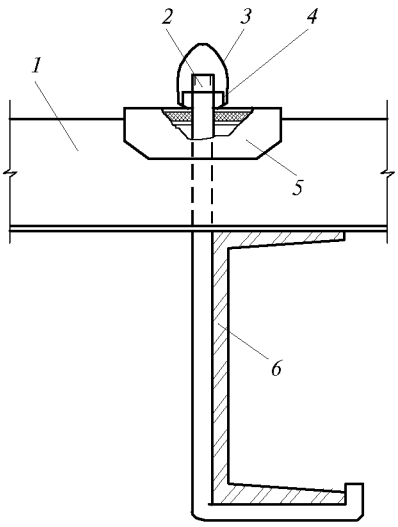


Рис.6.1. Крепление кровельного настила к прогону крюк-болтами

1 – профилированный настил; *2* – крюк-болт; *3* – колпачковая гайка; *4* – гайка; *5* – комбинированная гайка; *6* – прогон

Крюк-болты (рис.6.1) применяют для крепления кровельных профилированных настилов и стеновых обшивок к прогонам и ригелям. Их комплектуют гайками и комбинированными шайбами, состоящими из жесткой алюминиевой и упругой резиновой шайб.

Для соединения элементов применяют самонарезающие винты по ГОСТ 10619-80* «Винты с потайной головкой самонарезающие для металла и пластмассы», ГОСТ 10620-80* «Винты с полупотайной головкой самонарезающие для металла и пластмассы», ГОСТ 10621-80* «Винты с полукруглой головкой самонарезающие для металла и пластмассы». Кроме того, самонарезающие винты выпускают по своим техническим условиям ряд заводов алюминиевых и легких металлических конструкций. Разновидностью самона-

резающих винтов являются винты-самодыры (рис.6.2), конец которых заточен, как сверло. Такой винт сам сверлит отверстие и нарезает в нем резьбу. Используют их, в основном, на монтаже.

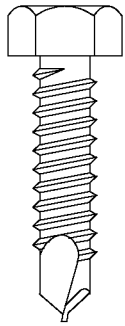


Рис.6.2. Винт-самодыр

Заклепки в алюминиевых конструкциях ставят исключительно в холодном состоянии, в этом случае обеспечивается хорошее заполнение отверстия стержнем заклепки и не разупрочняется металл соединяемых элементов из термозакаленных сплавов. Заклепки поставляются по ГОСТ 10299-80* «Заклепки с полукруглой головкой (нормальной точности)», ГОСТ 10301-80* «Заклепки с полупотайной головкой (нормальной точности)» и ГОСТ 10304-80* «Заклепки нормальной точности общего назначения».

Для крепления между собой профилированных настилов или иных тонкостенных элементов применяют заклепки с выпадающим сердечником и с остающимся сердечником. Прочность на срез заклепок с выпадающим сердечником на 40 - 50%, заклепок с остающимся сердечником - на 25%, а на отрыв головки у всех видов заклепок с выпадающим сердечником на 30 - 40% ниже, чем прочность полнотелых заклепок. Эти заклепки поставляются по ведомственным стандартам и техническим условиям строительных и машиностроительных министерств. Материал и сортамент некоторых заклепок с выпадающим сердечником, выпускаемых строительными министерствами, приведены в табл.6.17. К недостаткам заклепок с выпадающим сердечником следует отнести неконтролируемое качество образованной изнутри головки, необходимость дополнительной герметизации отверстия в пистоне, в целях исключения возможных протечек и продувания. Это ограничивает их область применения в наружных обшивках стен и кровли и снижает расчетное усилие, как отмечено выше, на заклепку.

Таблица 6.17. Материал и сортамент заклепок с выпадающим сердечником

Нормативный документ	Диаметр пистона, мм	Материал пистона / сердечника	Длина пистона, мм	Толщина пакета, мм
ОСТ 34-13-017-78	±0,16; 4,8	АМц / Ст.45	8,0	2-3
ТУ 36-2088-76	4,82	АМг, АМц / Ст.20кп	11,95	до 5
ТУ 67-74-75	4,82	АМг2 / Ст.20	10,00	до 4

Примечание. Диаметр стального формообразующего внутреннюю головку заклепки стержня - 2,5 мм.

Заклепки с обжимными кольцами (болт-заклепки) прочнее обычных полнотелых заклепок, более точно обеспечивают заданное усилие сжатия пакета (рис.6.3). Изготавливаются на машиностроительных заводах (ОСТ 1 11628-75(2)*).

К прочим соединениям относятся:

- соединения с использованием профилей специальной формы, в том числе в замок, шпунт, паз и др.;
- соединения, осуществляемые за счет пластических деформаций алюминия, в том числе в фальц, запрессовкой, пистонного типа;
- соединения, осуществляемые за счет упругих деформаций алюминия;

- фрикционные соединения;
- соединения сшиванием;
- клеевые, клеесварные и клеезаклепочные соединения.

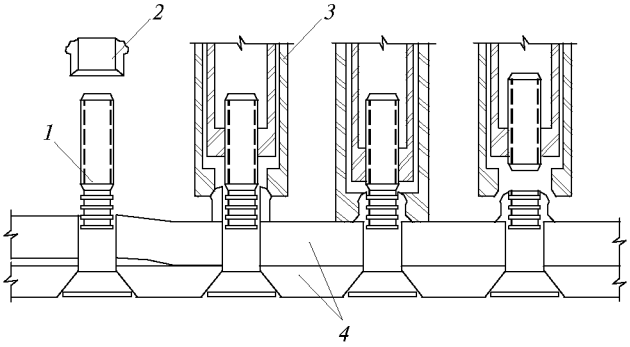


Рис.6.3. Заклепки с обжимным кольцом (порядок постановки) *1* – рифленый стержень; *2* – обжимное кольцо; *3* – клепаный инструмент; *4* – соединительные элементы

Соединения с использованием профилей специальной формы

Соединением в замок (рис.6.4) называют соединение двух профилей, осуществляемое заведением выступа одного профиля в выемку другого и поворотом профиля на определенный угол. Соединение в замок может быть неподвижным (в этом случае часто применяют дополнительные винты или заклепки) и подвижным.

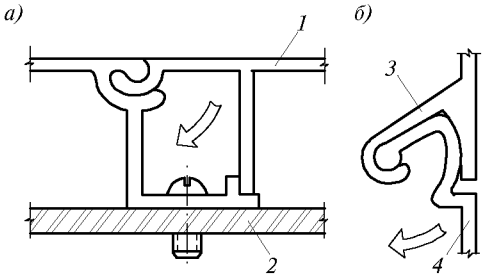


Рис.6.4. Соединения в замок *а* – профилей силовой обшивки со скрытым креплением; *б* – навеска створки окна без специальных петель; *1* – облицовочный профиль; *2* – обрешетка; *3* – коробка окна; *4* – створка окна. Стрелками показано направление поворота устанавливаемого профиля (*а*) и открывания створки (*б*)

Неподвижные соединения применяют для устройства облицовок, силовых обшивок и др. со скрытым креплением. Подвижное соединение «в замок» иногда используют для навески без петель и шарниров открывающихся створок окон, витражей в случаях, когда достаточно открывания створки на малый угол. Соединения в шпунт (рис.6.5) аналогичны одноименным соединениям, применяемым в деревянных конструкциях. Их используют в облицовках и обшивках стен и других конструктивных элементах. Профили, соединенные в шпунт, склонны к дребезжанию при пульсирующих нагрузках (вибрация, порывистый ветер). Чтобы избежать этого, применяют соединение, в котором прикрепляемая винтами кромка при установке требует подтягивания к нижележащей конструкции.

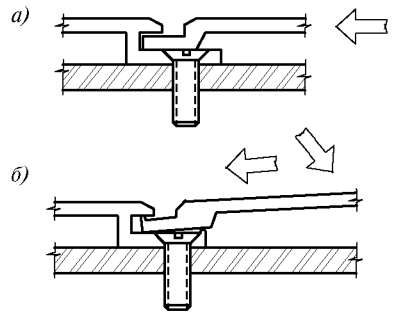


Рис.6.5. Соединения в шпунт *а* – свободное введение гребня; *б* – установка с натягом; стрелками показано направление движения устанавливаемого профиля

Соединения в паз осуществляют путем соосного введения ребра одного профиля в паз другого (рис.6.6). Соединения в паз («ласточкин хвост»), в отличие от соединений в шпунт, способны воспринимать усилия, направленные перпендикулярно оси профиля. В алюминиевых конструкциях в паз соединяют алюминиевые профили между собой и алюминиевые профили с неалюминиевыми. Наиболее широкое распространение этот тип соединений получил для закрепления на алюминиевых профилях упругих уплотняющих прокладок (преимущественно резиновых), ибо это позволяет отказаться от применения клея и упрощает смену изношенных прокладок.

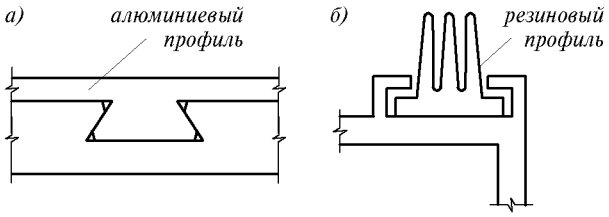


Рис.6.6. Соединение в паз
а – алюминий-алюминий; *б* – алюминий-резина

Соединения, осуществляемые за счет пластических деформаций (в фальц), в основном применяют в фасонных элементах кровель и стен (сливы, нащельники) изготовленных из листов. Правила устройства фальцев те же, что и фальцев из кровельной стали с учетом марки и состояния поставки применяемого алюминия. Преимущественное применение в алюминиевых конструкциях малопластичного полунагартованного материала ограничивает применение фальцев, которые можно делать только на листах мягкого или четвертьнагартованного материала.

Надежность фальцевых соединений достаточно высока: известно, что в некоторых случаях фальцы являются единственным способом соединения таких ответственных конструкций, как, например, корпуса спирально-навивных емкостей силосного типа высотой до 20 м. При этом плотность фальцев, согнутых и обжатых на специальной установке, такова, что силосы можно использовать в качестве резервуаров. Соединения в фальц много лет применяют также и в опирально-навивных воздуховодах.

Соединения запрессовкой и обжатием представляют собой разновидность соединений в паз или в шпунт. В отличие от обычных соединений в паз, соединения запрессовкой и соединения обжатием неразборны (рис.6.7).

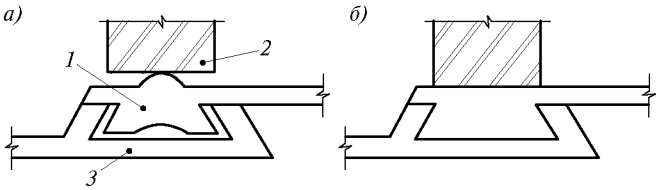


Рис.6.7. Соединение с запрессовкой
а – ребро соединяемого профиля введено в паз другого; *б* – после приложения давления ребро деформировалось и полностью заполнило паз (за счет передавливания алюминия из прилива); *1* – ребро; *2* – прилив; *3* – паз

Соединения расклиниванием применяют либо для стягивания соединяемых элементов (например, при соединении полых профилей на сухарях с кривым нагелем – рис.6.8), либо для создания фрикционных соединений (например, во фрикционных соединениях полых профилей). В этом виде соединений клин – чаще всего из нержавеющей стали или алюминия – обминает материал соединяемых профилей и за счет этого прочно удерживается в гнезде.

Соединения пистонного типа применяют в конструкциях из листов, пробивая в примыкающих друг к другу листах отверстия и развальцовывая на выходной стороне отверстия лепестки, образованные ранее заполнявшим отверстие металлом.

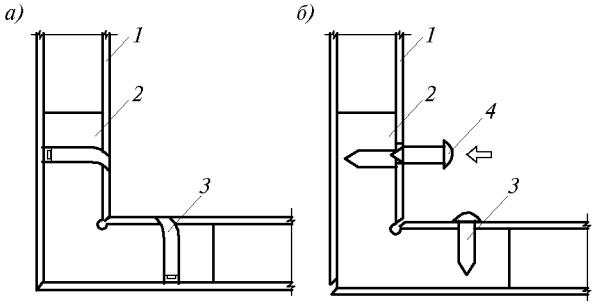


Рис.6.8. Соединение расклиниванием
а – на сухаре и кривых нагелях; *б* – на сухаре и штифтах; *1* – соединяемый профиль; *2* – сухарь; *3* – кривой нагель; *4* – штифт

Соединения, осуществляемые за счет упругих деформаций, включают два вида – соединения защелкиванием и враспор. Соединения защелкиванием в алюминиевых конструкциях распространены весьма широко и применяются для крепления стекла, филенок различного вида в конструкционной решетке из профилей, в качестве нащельников и раскладок в стыках и для других слабо нагруженных соединений.

Соединения защелкиванием (рис.6.9) могут быть разъемными и неразъемными. В разъемном варианте ножки защелки после постановки должны быть расположены так, чтобы их можно было отжать и вывести из зацепления. В неразъемных соединениях ножки защелки, как правило, скрыты стенками основного профиля, а зубцы имеют резко несимметричную форму. Эти зубцы должны легко входить в зацепление и не выходить из него.

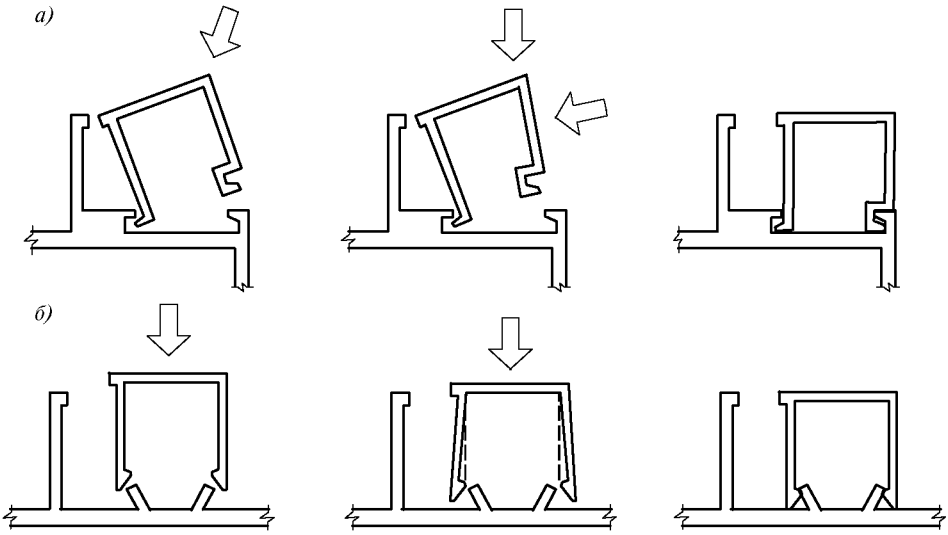


Рис.6.9. Соединения защелкиванием
а – установка защелки с поворотом; *б* – установка защелки насаживанием



Рис.6.10. Соединение враспор

Соединения враспор основаны, как и соединения защелкиванием, на принципе пружинения алюминия и находят применение, в основном, для крепления элементов листовых облицовок (рис.6.10).

Приложение 6.1

ПЕРЕЧЕНЬ

стандартов на алюминиевые сплавы, применяемые для строительных конструкций

Марка и состояние алюминия	Государственные стандарты или технические условия на поставку алюминия				
	по химическому составу	листы	профили	трубы	ленты
АД1М	ГОСТ 4784-74*	ГОСТ 21631-76*	—	—	ГОСТ 13726-78*
АМцМ	ГОСТ 4784-74*	ГОСТ 21631-76*	—	—	ГОСТ 13726-78*
АМг2М	ГОСТ 4784- 74*	ГОСТ 21631-76*	—	ГОСТ 18475-82	ГОСТ 13726-78*
АМг2Н2	ГОСТ 4784- 74*	ГОСТ 21631-76*	—	—	ГОСТ 13726-78*
АД31Т	ГОСТ 4784- 74*	—	ГОСТ 8617-81* ГОСТ 22233-93	ГОСТ 18482-79	—
АД31Т1	ГОСТ 4784- 74*	—	ГОСТ 8617-81* ГОСТ 22233-93	—	—
АД31Т4	ГОСТ 4784- 74*	—	ГОСТ 8617-81* ГОСТ 22233-93	—	—
АД31Т5	ГОСТ 4784- 74*	—	ГОСТ 8617-81* ГОСТ 22233-93	—	—
1915	ГОСТ 4784- 74*	—	ГОСТ 8617-81* ГОСТ22233-93	ГОСТ 18482-79*	—
1915Т	ГОСТ 4784- 74*	—	ГОСТ 8617-81* ГОСТ 22233-93	ГОСТ 18482-79*	—
1935Т	ОСТ 1-92014-76	—	ТУ1-9-346-77	—	—

Приложение 6.2

ПЕРЕЧЕНЬ

стандартов на сортамент прессованных профилей из легких сплавов наиболее употребляемых в строительных конструкциях

№№ пп	Наименование стандарта	№ стандарта
1	2	3
1.	Профили прессованные прямоугольного равнополочного двутаврового сечения из алюминиевых и магниевых сплавов. Сортамент.	ГОСТ I3621-90
2.	Профили прессованные прямоугольные равнополочного таврового сечения из алюминиевых и магниевых сплавов. Сортамент.	ГОСТ 13622-91
3.	Профили прессованные прямоугольные равнополочного уголкового сечения из алюминиевых и магниевых сплавов. Сортамент.	ГОСТ 13737-90
4.	Профили прессованные прямоугольные отбортованного швеллерного сечения из алюминиевых и магниевых сплавов. Сортамент.	ГОСТ 13624-90

1	2	3
5.	Профили прессованные прямоугольные полосообразного сечения из алюминия и алюминиевых сплавов. Сортамент.	ГОСТ 13616-78*
6.	Профили прессованные бульбообразные уголкового сечения из алюминия и алюминиевых сплавов. Сортамент.	ГОСТ 13617-82*
7.	Профили прессованные прямоугольные фасонного зетового сечения из алюминия и алюминиевых сплавов. Сортамент.	ГОСТ 13619-81*
8.	Профили прессованные прямоугольного равнополочного зетового сечения из алюминиевых и магниевых сплавов. Сортамент.	ГОСТ 13620-90
9.	Профили прессованные прямоугольного равнополочного швеллерного сечения из алюминиевых и магниевых сплавов	ГОСТ 13623-90
10.	Профили прессованные прямоугольного неравнополочного уголкового селения из алюминиевых и магниевых сплавов. Сортамент.	ГОСТ 13738-91
11.	Профили прессованные прямоугольные тавро-швеллерного сечения из алюминиевых и магниевых сплавов. Сортамент.	ГОСТ 17575-90
12.	Профили прессованные косоугольные трапециевидного отбортованного сечения из алюминия и алюминиевых сплавов. Сортамент.	ГОСТ 17576-81*
13.	Профили алюминиевые специальные. Сортамент. Технические требования.	ГОСТ 18591-91
14.	Профили холоднотнутые из алюминия и алюминиевых сплавов для ограждающих строительных конструкций. Технические условия.	ГОСТ 24767-81*

ГЛАВА 7

РАСЧЕТ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

7.1. Расчетные характеристики материалов и соединений

Расчетные значения сопротивления алюминиевых сплавов и литейного алюминия для расчетных температур наружного воздуха в диапазоне от -65°С до +50°С приведены в табл.7.1, 7.2. При этом расчетные сопротивления сдвигу и смятию представлены в табл.7.3 с округлением значений до 5 МПа.

При расчете конструкций следует учитывать коэффициенты влияния изменения температуры γ_t и коэффициенты условий работы элементов алюминиевых конструкций γ_c, указанные соответственно в табл.7.11, 7.12, а также коэффициенты надежности по назначению γ_n, принимаемые согласно правилам учета степени ответственности зданий и сооружений при проектировании конструкций.

Таблица 7.1. Расчетные сопротивления термически не упрочняемого алюминия

Напряженное состояние	Обозначение	Расчетное сопротивление R, МПа (кгс/см^2), термически не упрочняемого алюминия марок					
		АД1М	АМцМ	АМг2М	АМг2Н2		литейного марки АЛ8
					листы	ленты	
Растяжение, сжатие и изгиб	R	25(250)	40(400)	70(700)	125(1250)	145(1500)	135(1400)
Сдвиг	R_s	15(150)	25(250)	40(400)	75(750)	90(900)	80(800)
Смятие торцевой поверхности (при наличии пригонки)	R_p	40(400)	65(650)	110(1100)	200(2000)	230(2400)	215(2250)
Сжатие местное при плотном касании	R_{lp}	20(200)	30(300)	50(500)	90(900)	110(1100)	105(1050)
Растяжение в направлении толщины прессованных полуфабрикатов	R_{th}	25(250)	40(400)	70(700)	125(1250)	–	–

При проектировании ограждающих конструкций из алюминиевых сплавов марок АМц и АМг (состояние поставок «М» и «Н2») расчетные сопротивления при изгибе, растяжении и сжатии могут быть увеличены на 10% для:

- профилированных листов и замкнутых погонных элементов, у которых плоские прямолинейные участки не превышают 50 толщин исходной заготовки;
- профилированных, холодногнутых погонных элементов, в том случае, если они заканчиваются деформированным участком и плоские участки не превышают 50 толщин исходной заготовки.

Таблица 7.2. Расчетные сопротивления термически упрочняемого алюминия

Напряженное состояние	Обозначение	Расчетное сопротивление R, МПа (кгс/см^2), термически упрочняемого алюминия марок					
		АД31Т; АД31Т4	АД31Т5	АД31Т1	1935Т	1925; 1915	1915Т
1	2	3	4	5	6	7	8
Растяжение, сжатие и изгиб	R	55(550)	100(1000)	120(1250)	140(1450)	175(1800)	195(2000)
Сдвиг	R_s	35(350)	60(600)	75(750)	85(850)	105(1050)	120(1200)

1	2	3	4	5	6	7	8
Смятие торцевой поверхности (при наличии пригонки)	R_p	90(900)	160(1600)	190(2000)	225(2300)	280(2900)	310(3200)
Сжатие местное при плотном касании	R_{lp}	40(400)	75(750)	90(900)	105(1050)	130(1350)	145(1500)
Растяжение в направлении толщины прессованных полуфабрикатов	R_{th}	55(550)	100(1000)	120(1200)	50(500)	50(500)	50(500)

Таблица 7.3. Расчетное сопротивление сдвигу и смятию алюминиевых сплавов

Напряженное состояние	Обозначение	Расчетное сопротивление
Растяжение, сжатие и изгиб	R	R^*
Сдвиг	R_s	$R_s = 0{,}6R$
Смятие торцевой поверхности (при наличии пригонки)	R_p	$R_p = 1{,}6R$
Сжатие местное при плотном касании	R_{lp}	$R_{lp} = 0{,}75R$

* Значение расчетного сопротивления алюминия R следует принимать равным меньшему из значений расчетного сопротивления алюминия растяжению, сжатию, изгибу по условному пределу текучести R_y и расчетного сопротивления алюминия растяжению, сжатию, изгибу по временному сопротивлению R_u.

$$R_y = R_{yn}/\gamma_m$$

$$R_u = R_{un}/\gamma_m\gamma_u$$

где R_{yn} – нормативное сопротивление алюминия, принимаемое равным значению условного предела текучести $\sigma_{0,2}$ по государственным стандартам и техническим условиям на алюминий; R_{un} – нормативное сопротивление алюминия разрыву, принимаемое равным минимальному значению временного сопротивления $\sigma_в$ по государственным стандартам и техническим условиям на алюминий; $\gamma_m = 1{,}1$; $\gamma_u = 1{,}45$.

Расчетные сопротивления растяжению алюминия R_{pl} из листов для элементов конструкций, эксплуатация которых возможна и после достижения алюминием предела текучести, следует принимать по табл.7.4.

Таблица 7.4. Расчетное сопротивление растяжению листов после достижения алюминием предела текучести

Марка и состояние алюминия	АД1М	АМцМ	АМг2М
Расчетное сопротивление R_{pl}, МПа (кгс/см^2)	35 (350)	55 (550)	85 (850)

Расчетные сопротивления сварных соединений для расчетных температур наружного воздуха в интервале -65°С до +50°С приведены в табл.7.5÷7.7.

Для соединений на заклепках и болтах (табл.7.8÷7.10), расчетные сопротивления растяжению и срезу следует принимать по материалу заклепок или болтов, смятию – по марке алюминия соединяемых элементов конструкций.

Расчетное сопротивление R_{wz} алюминия в околошовной зоне (рис.7.1) при аргонодуговой сварке следует принимать по табл.7.5.

Расчетное сопротивление R_w сварных соединений, выполненных аргонодуговой сваркой с физическим контролем качества швов (рентгено- или гамма-графированием, ультразвуковой дефектоскопией и др.) следует принимать по табл.7.6, 7.7.

Таблица 7.5. Расчетное сопротивление алюминия в околошовной зоне

Вид сварного соединения	Напряженное состояние	Обозначение	Расчетное сопротивление, МПа (кгс/см^2) алюминия в околошовной зоне								
			термически не упрочняемого марок			термически упрочняемого марок					
			АД1М	АМцМ	АМг2М; АМг2Н2	АД31Т; АД31Т4	АД31Т5	АД31Т1	1935Т	1915	1915Т
			при сварке с применением электродной или присадочной проволоки марок								
			СвА1	СвАМг3		СвАМг3; 1557			1557		
Встык и внахлестку лобовыми швами	Растяжение, сжатие и изгиб	R_{wz}	25 (250)	40 (400)	65 (650)	55 (550)	65 (650)	80 (800)	$\frac{115\ (1150)}{120\ (1250)}$	140 (1450)	155 (1600)
(рис.7.1 *а,б*, сечение *1-1*)	Сдвиг	R_{wzs}	15 (150)	25 (250)	40 (400)	35 (350)	40 (400)	50 (500)	80 (800)	90 (900)	105 (1050)
Внахлестку фланговыми (рис.7.1 *в*, сечение *1-1*)	Растяжение, сжатие и изгиб	R_z	25 (250)	40 (400)	65 (650)	50 (500)	$\frac{60\ (600)^*}{75\ (750)^*}$	$\frac{80\ (800)^*}{105\ (1050)^*}$	$\frac{100\ (1000)^*}{105\ (1050)^*}$	$\frac{130\ (1300)^*}{140\ (1450)^*}$	$\frac{140\ (1450)^*}{155\ (1600)^*}$

* Для соединений внахлестку из профильных элементов.

Примечания: 1. Расчетное сопротивление R_{wz} алюминия марки 1915Т указано для профилей толщиной 5–12 мм. Для профилей толщиной 4 мм при сварке вольфрамовым электродом R_{wz} = 165 МПа (1700 кгс/см^2). 2. Влияние продольных сварных швов элементов конструкций (в обшивках, кровельных полотнищах и т.п.) на разупрочнение алюминия в околошовной зоне не учитывается. 3. Над чертой указаны расчетные сопротивления при сварке алюминия вольфрамовым электродом, под чертой – плавящимся электродом.

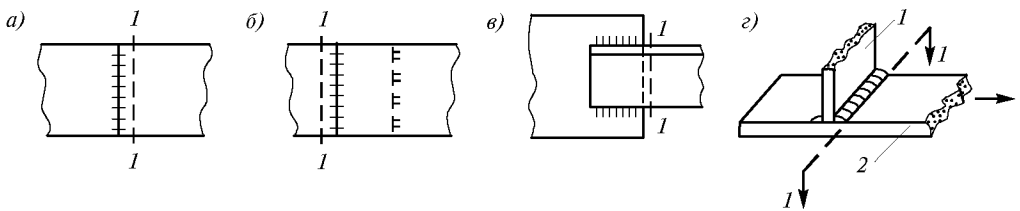


Рис.7.1. Схемы сварных соединений конструкций

а – встык; *б* – внахлестку лобовыми швами; *в* – внахлестку фланговыми швами; *г* – схема прикрепления поперечного элемента к элементу, не имеющему стыка; *1* – поперечный элемент; *2* – элемент без стыка; *1-1* – расчетное сечение

Таблица 7.6. Расчетное сопротивление сварных швов для термически не упрочняемых марок сплавов

Сварные соединения и швы	Напряженное состояние	Обозначение	Расчетное сопротивление сварных швов, МПа (кгс/см^2), алюминия марок		
			АД1М	АМцМ	АМг2М; АМг2Н2
			при сварке с применением электродной или присадочной проволоки марок		
			СвА1	СвАМг3	СвАМг3
Встык	Сжатие, растяжение, изгиб	R_w	25 (250); 30 (300)*	40 (400); 45 (450)*	65 (650)
	Сдвиг	R_{ws}	15 (150)	25 (250)	40 (400)
Угловые швы	Срез	R_{wf}	20 (200)	30 (300)	45 (450)

* Для конструкций, эксплуатация которых возможна и после достижения алюминием предела текучести.

Таблица 7.7. Расчетное сопротивление сварных швов для термически упрочняемых марок сплавов

Сварные соединения	Напряженное состояние	Обозначение	Расчетное сопротивление сварных швов, МПа (кгс/см^2), алюминия марок						
			АД31Т; АД31Т4	АД31Т5	АД31Т1	1935Т	1915	1915Т при толщине металла, мм	
								4	5–12
			при сварке с применением электродной или присадочной проволоки марок						
			СвАМг3; 1557			1557			
Встык	Сжатие, растяжение, изгиб при сварке электродом: а) плавящимся (автоматическая и полуавтоматическая сварка)	R_w	55 (550)	65 (650)	80 (800)	120 (1250)	140 (1450)	–	155 (1600)
	б) вольфрамовым (ручная и механизированная сварка)		55 (550)	65 (650)	80 (800)	115 (1150)	140 (1450)	155 (1600)	155 (1600)
	Сдвиг	R_{ws}	35 (350)	40 (400)	50 (500)	80 (800)	90 (900)	110 (1100)	105 (1050)
Угловые (швы фланговые и лобовые)	Срез	R_{wf}	45 (450)	45 (450)	45 (450)	80 (800)	110 (1100)	110 (1100)	110 (1100)

Примечания: 1. Расчетные сопротивления сварных соединений алюминия марки 1915Т указаны для прессованных профилей. 2. Расчетные сопротивления сварных соединений термически упрочняемого алюминия могут быть повышены повторной термической обработкой (после сварки соединения), при этом для алюминия системы Al-Mg-Si следует принимать $R_w = 0{,}9R$; для алюминия системы Al-Zn-Mg $R_w = R$ (где R – расчетное сопротивление, определяемое по табл.7.7). 3. В сварных нахлесточных соединениях из алюминия марок АД31Т, АД31Т1, АД31Т4, и АД31Т5 применять лобовые швы не допускается.

Таблица 7.8. Расчетное сопротивление срезу заклепочных соединений

Марка алюминия для заклепок	АД1Н	АМг2Н	АМг5пМ	АВТ1
Расчетное сопротивление срезу соединений на заклепках R_{rs}, МПа (кгс/см^2)	35(350)	70(700)	100(1000)	100(1000)

Примечания: 1. В продавленные отверстия ставить заклепки не допускается. 2. Расчетные сопротивления соединений на заклепках с потайными или полупотайными головками следует снижать на 20%. Указанные заклепки растягивающие усилия не воспринимают.

Таблица 7.9. Расчетное сопротивление болтовых соединений на растяжение и срез

Соединение на болтах	Напряженное состояние	Обозначение	Расчетное сопротивление соединений на болтах R_b, МПа (кгс/см^2) из алюминия марок	
			АМг5п	АВТ1
Повышенной точности	Растяжение Срез	R_{bt} R_{bs}	125(1250) 90(900)	155(1600) 95(950)
Номинальной и грубой точности	Растяжение Срез	R_{bt} R_{bs}	125(1250) 80(800)	155(1600) 85(850)

Для сварных стыковых растянутых швов, качество которых не контролируется физическими методами, значения расчетных сопротивлений по табл.7.6; 7.7 следует умножать на коэффициент 0,8.

При расчете на прочность сварных конструкций рис.7.1 с элементами без стыка, к которым прикрепляются сваркой поперечные элементы рис.7.1*г* следует учитывать местное ослабление этих элементов (в зоне термического влияния) путем снижения значения расчетного сопротивления R алюминия до значения R_w, принимаемого по табл.7.10; 7.11.

Таблица 7.10. Расчетные сопротивления смятию заклепочных и болтовых соединений

Марка алюминия элементов конструкций	Расчетное сопротивление смятию элементов конструкций, Мпа (кгс/см^2) для соединений	
	на заклепках, R_{rp}	на болтах, R_{bp}
АД1М	40(400)	35(350)
АМцМ	65(650)	60(600)
АМг2М	110(1100)	100(1000)
АМг2Н2	195(2000)	175(1800)
АД31Т	90(900)	80(800)
АД31Т4	90(900)	80(800)
АД31Т5	155(1600)	140(1450)
АД31Т1	195(2000)	175(1800)
1935Т	225(2300)	205(2100)
1925	275(2800)	245(2500)
1915	275(2800)	245(2500)
1915Т	315(3200)	285(2900)

Примечание. Расчетные сопротивления приведены для соединений на болтах, поставленных на расстоянии 2*d* от их оси до края элемента. При сокращении этого расстояния до 1,5*d* приведенные расчетные сопротивления следует понижать на 40%.

Таблица 7.11. Коэффициент влияния изменения температуры γ_t

Марка алюминия конструкций	АД1, АМц	Амг2, АД31, 1915, 1925, 1935, АЛВ
Коэффициент γ_t (при температуре от 51 до 100°С)	0,85	0,90

Примечания: 1. Приведенные значения коэффициентов γ_t не зависят от состояния алюминия. 2. Для конструкций, эксплуатируемых при расчетных температурах выше 50°С, коэффициенты γ_t следует уменьшать на 10% при непрерывном действии нормативной нагрузки свыше одного года, а также при непрерывном действии свыше двух лет нормативной нагрузки, составляющей свыше 0,9 расчетной.

В алюминиевых тонколистовых конструкциях допускается применять контактную и аргонодуговую точечную сварку плавящимся электродом. Расчетная несущая способность на срез сварных точек, выполненных контактной и аргонодуговой точечной сваркой плавящимся электродом по ГОСТ 14776-79, указана в табл.7.13.

Расчетные сопротивления срезу сварных соединений внахлестку R_{wsm}, выполненных контактной роликовой сваркой, для алюминия марок АД1М, АМцМ, АМг2М следует принимать равными расчетным сопротивлениям R (табл.7.6 и 7.3).

Для алюминия марки АМг2Н2 $R_{wsm} = (0,9 - 0,1t)R$ (где t - толщина более тонкого из свариваемых элементов, мм).

Расчетные сопротивления срезу R_{rs} соединений на заклепках, поставленных в холодном состоянии в сверленные и рассверленные отверстия, приведены в табл.7.8.

Расчетные сопротивления растяжению R_{bt} и срезу R_{bs} соединений на болтах, поставленных в сверленные или рассверленные отверстия, приведены в табл.7.9.

Расчетные сопротивления смятию элементов конструкций для соединений на заклепках R_{rp} и болтах R_{bp}, поставленных в сверленные отверстия, следует принимать по табл.7.10.

Расчетные сопротивления алюминия и литейного алюминия, соединений сварных, на заклепках и болтах для конструкций, эксплуатируемых при расчетных температурах выше 50°С, необходимо умножать на коэффициент γ_t, указанный в табл.7.11.

При расчете элементов и соединений алюминиевых конструкций следует учитывать коэффициенты условий работы γ_c, принимаемые по табл.7.12.

Таблица 7.12. Коэффициент условий работы элементов алюминиевых конструкций γ_c

Элементы конструкций	Коэффициент γ_c
1. Корпуса и днища резервуаров	0,8
2. Колонны жилых и общественных зданий и опор водонапорных башен	0,9
3. Сжатые элементы решетки плоских ферм при гибкости:	
$\lambda \le 50$	0,9
$\lambda > 50$	0,75
4. Сжатые раскосы пространственных решетчатых конструкций из одиночных уголков, прикрепляемых к поясам одной полкой:	
а) сварными швами или двумя заклепками (болтами) и более, поставленными вдоль уголка	0,75
б) одним болтом	0,6
5. Сжатые элементы из одиночных уголков, прикрепляемые одной полкой (для неравнополочных уголков - только узкой полкой), за исключением элементов конструкций, указанных в поз.4 настоящей таблицы, и плоских ферм из одиночных уголков	0,6

Примечания: 1. Коэффициенты условий работы поз.3 и 5 одновременно не учитываются. 2. Коэффициенты условий работы поз.3 и 4 не распространяются на крепления соответствующих элементов в узлах. 3. Для сжатых раскосов пространственных решетчатых конструкций из одиночных уголков при треугольной решетке с распорками коэффициент условий работы поз.4 не учитывается. 4. Для случаев, не оговоренных настоящей таблицей, в формулах следует принимать $\gamma_c = 1,0$.

Таблица 7.13. Расчетная несущая способность на срез сварных точек

Толщина элементов, мм	Расчетная несущая способность точки на срез, H (кгс)
Контактная сварка (алюминий марок АМг2Н2 и АМг2М)	
	800 (80)
1,5	1250 (130)
2	1950 (200)

Толщина элементов, мм	Расчетная несущая способность точки на срез, H (кгс)
Аргонодуговая точечная сварка плавящимся электродом (алюминий марки АМг2Н2; сварочная проволока марки СвАМг3 или 1557)	
1 + 1	1950 (200)
1 + 2	2350 (240)
1,5 + 1,5	2950 (300)
2 + 2	3350 (340)

Примечания: 1. Для контактной сварки указана толщина наиболее тонкого элемента; для дуговой точечной сварки в гр.1 первая цифра – толщина верхнего элемента. 2. Сварные точки следует выполнять в соответствии с «Руководством по аргонодуговой сварке соединений элементов алюминиевых строительных конструкций» /ЦНИИСК им.Кучеренко Госстроя СССР, М., Стройиздат, 1984.

7.2. Расчет на осевые силы и изгиб

7.2.1. Центрально-растянутые и центрально-сжатые элементы. Расчет на прочность элементов, подверженных центральному растяжению или сжатию силой N, следует выполнять по формуле

$$\frac{N}{A_n} \le R\gamma_c \tag{7.1}$$

Расчет на устойчивость сплошностенчатых элементов, подверженных центральному сжатию силой N, следует выполнять по формуле

$$\frac{N}{\varphi A} \le R\gamma_c\,, \tag{7.2}$$

где A – площадь брутто, A_n – площадь нетто.

Численные значения коэффициента φ приведены в табл.7.14, 7.15, 7.16.

При расчете стержней из одиночных уголков на центральное сжатие радиус инерции сечения i следует принимать:

- минимальным, если стержни прикреплены только по концам;
- относительно оси, параллельной одной из полок уголка при наличии промежуточного закрепления (распорок, шпренгелей, связей и т.п.), предопределяющего направление выпучивания уголка в плоскости, параллельной второй полке.

Сжатые элементы со сплошными стенками открытого П-образного сечения, не усиленные и усиленные отбортовками, рассчитываются в соответствии с нормами проектирования стальных конструкций.

При наличии утолщений круглого сечения (бульб) момент инерции при кручении следует увеличить на $n\pi D^4/32$, где n – число бульб в сечении; D – диаметр бульб.

Коэффициенты φ продольного изгиба центрально сжатых элементов. В таблице 7.14 показаны схемы сечения, для которых в табл. 7.15 и 7.16 приведены значения коэффициента φ.

Для составных сжатых стержней, ветви которых соединены планками или решетками, коэффициент φ относительно свободной оси (перпендикулярной плоскости планок или решеток) следует определять по табл.7.15, 7.16 с заменой λ на λ_{ef}. Значение λ_{ef} необходимо определять по формулам табл.2.2 СНиП 2-03.06-85.

Таблица 7.14. Схемы сечений для определения коэффициента φ

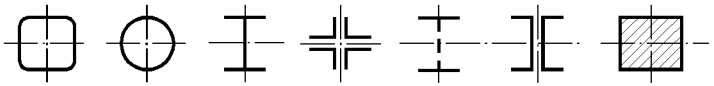
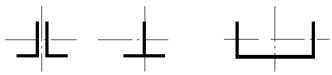
Тип сечения	Схема сечения	Номер таблицы
1		7.15
2		7.16

Таблица 7.15. Коэффициенты φ продольного изгиба центрально-сжатых элементов для сечений типа 1

Гибкость элементов λ	Коэффициенты φ для элементов из алюминия марок								
	АД1М	АМцМ	АД31Т; АД31Т4	АМг2М	АД31Т5	АД31Т1; АМг2Н2	1935Т	1925; 1915	1915Т
0	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
10	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
20	1,000	1,000	0,995	0,982	0,946	0,936	0,930	0,915	0,910
30	0,985	0,955	0,930	0,915	0,880	0,865	0,852	0,838	0,830
40	0,935	0,900	0,880	0,860	0,818	0,802	0,790	0,770	0,758
50	0,887	0,860	0,835	0,812	0,763	0,740	0,722	0,696	0,676
60	0,858	0,820	0,793	0,766	0,705	0,675	0,650	0,615	0,590
70	0,825	0,782	0,750	0,717	0,644	0,605	0,572	0,530	0,500
80	0,792	0,745	0,706	0,665	0,590	0,542	0,500	0,440	0,385
90	0,760	0,710	0,656	0,608	0,510	0,450	0,403	0,348	0,305
100	0,726	0,665	0,610	0,555	0,432	0,367	0,326	0,282	0,246
110	0,693	0,625	0,562	0,506	0,382	0,313	0,270	0,233	0,204
120	0,660	0,530	0,518	0,458	0,330	0,262	0,228	0,196	0,171
130	0,630	0,545	0,475	0,415	0,290	0,227	0,192	0,167	0,146
140	0,595	0,505	0,435	0,362	0,255	0,197	0,168	0,144	0,126
150	0,562	0,470	0,400	0,313	0,212	0,168	0,146	0,125	0,110

Таблица 7.16. Коэффициенты φ продольного изгиба центрально-сжатых элементов для сечений типа 2

Гибкость элементов λ	Коэффициенты φ для элементов из алюминия марок								
	АД1М	АМцМ	АД31Т; АД31Т4	АМг2М	АД31Т5	АД31Т1; АМг2Н2	1935Т	1925; 1915	1915Т
0	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
10	1,000	1,000	1,000	1,000	0,990	0,983	0,980	0,967	0,960
20	0,975	0,950	0,940	0,920	0,885	0,880	0,880	0,867	0,860
30	0,922	0,895	0,878	0,862	0,820	0,808	0,802	0,790	0,775
40	0,877	0,842	0,822	0,807	0,760	0,742	0,730	0,715	0,695
50	0,832	0,796	0,773	0,750	0,700	0,678	0,662	0,638	0,613
60	0,795	0,752	0,725	0,698	0,635	0,607	0,590	0,560	0,530
70	0,757	0,713	0,680	0,647	0,574	0,538	0,516	0,482	0,450
80	0,720	0,670	0,635	0,597	0,520	0,480	0,450	0,413	0,380
90	0,690	0,632	0,588	0,545	0,466	0,422	0,392	0,348	0,305
100	0,657	0,593	0,543	0,498	0,410	0,360	0,328	0,282	0,246
110	0,625	0,553	0,500	0,450	0,362	0,310	0,272	0,233	0,204
120	0,590	0,515	0,460	0,408	0,316	0,263	0,230	0,196	0,171
130	0,560	0,480	0,420	0,370	0,280	0,228	0,195	0,167	0,146
140	0,527	0,445	0,385	0,333	0,237	0,194	0,170	0,144	0,126
150	0,497	0,412	0,352	0,300	0,205	0,166	0,146	0,125	0,110

В составных стержнях с решетками помимо расчета на устойчивость стержня в целом следует производить расчет на устойчивость отдельных ветвей на участках между узлами. Гибкость отдельных ветвей λ_1 и λ_2 на участке между планками должна быть не более 30. В составных стержнях гибкость отдельных ветвей между узлами не должна превышать приведенную гибкость λ_{ef} стержня в целом. Расчет составных элементов из уголков, швеллеров и т.п., соединенных вплотную или через прокладки, следует выполнять как сплошностенчатых при условии, что наибольшие расстояния между их соединениями (прокладками, шайбами и т.п.) не превышают: $30i$ – для сжатых элементов; $80i$ – для растянутых элементов. В этом случае радиус инерции i уголка или швеллера следует принимать для тавровых или двутавровых сечений относительно оси, параллельной плоскости расположения прокладок, а для крестовых сечений – минимальными. При этом в пределах длины сжатого элемента следует ставить не менее двух прокладок.

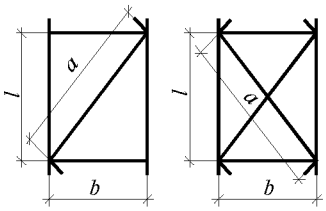


Рис.7.2. Схема решетки
а - раскосной; *б* - крестовой с распорками

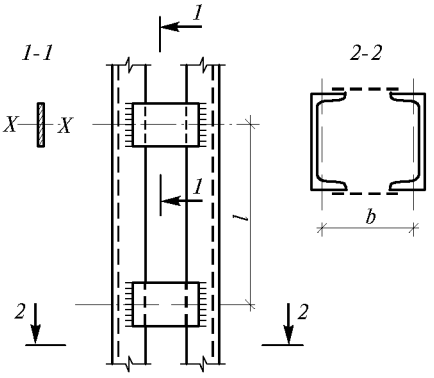


Рис.7.3. Составной стержень на планках

Расчет соединительных элементов (планок, решеток) сжатых составных стержней сквозного сечения следует выполнять на условную поперечную силу Q_{fic}, принимаемую постоянной по всей длине стержня и определяемую по формуле

$$Q_{fic} = 4{,}2 \cdot 10^{-6}\left(400 - \frac{E}{R}\right)\frac{N}{\varphi}, \qquad (7.3)$$

где N – продольное усилие в составном стержне; φ – коэффициент продольного изгиба, принимаемый для составного сквозного стержня в плоскости соединительных элементов.

Условную поперечную силу Q_{fic} следует распределять при наличии:

- только соединительных планок (решеток) – поровну между планками (решетками), лежащими в плоскостях, перпендикулярных оси, относительно которой производится проверка устойчивости;
- сплошного листа и соединительных планок (решеток) – пополам между листом и планками (решетками), лежащими в плоскостях, параллельных листу.

При расчете равносторонних трехгранных составных стержней условную поперечную силу Q_{fic}, приходящуюся на систему соединительных элементов, расположенных в одной плоскости, следует принимать равной $0{,}8\,Q_{fic}$.

Расчет соединительных планок и решеток следует вести в соответствии с пп.4.7 и 4.8 СНиП 2-03.06-85.

Расчет стержней, предназначенных для уменьшения расчетной длины сжатых элементов, следует выполнять на усилия, равные условной поперечной силе в основном сжатом элементе, определяемой по формуле (7.3).

7.2.2. Изгибаемые элементы. Расчет на прочность элементов, изгибаемых в одной из главных плоскостей, следует выполнять по формулам:

$$\frac{M}{W_{n,\min}} \le R\gamma_c; \tag{7.4}$$

$$\tau = \frac{QS}{It} \le R_s\gamma_c. \tag{7.5}$$

При наличии ослабления отверстиями для заклепок или болтов значения касательных напряжений τ в формуле (7.5) следует умножать на величину отношения

$$\frac{a}{a-d}, \tag{7.6}$$

где a – шаг отверстий; d – диаметр отверстия.

Для стенок балок, рассчитываемых по формуле (7.4), должны быть выполнены условия:

$$\sqrt{\sigma_x^2 - \sigma_x\sigma_y + \sigma_y^2 + 3\tau_{xy}} \le R\gamma_c; \quad \tau_{xy} \le R_s\gamma_c, \tag{7.7}$$

где $\sigma_x = \frac{M_x}{I_n} y$ – нормальные напряжения в срединной плоскости стенки, параллельные оси балки; σ_y – нормальные напряжения в срединной плоскости стенки, перпендикулярные оси балки, в том числе σ_{loc}, определяемое по формуле

$$\sigma_{loc} = \frac{F}{tl_{ef}} < R\gamma_c, \tag{7.8}$$

где F – расчетное значение сосредоточенной нагрузки (силы); t – толщина стенки; $l_{ef} = c\sqrt[3]{I_f/t}$ – условная длина распределения сосредоточенной нагрузки; c – коэффициент, принимаемый равным 3,25 для сварных балок и 3,75для балок клепанных и на высокопрочных болтах; I_f – момент инерции пояса балки относительно собственной оси; $\tau_{xy} = \frac{Q}{th}$ – среднее касательное напряжение, вычисляемое с учетом формулы (7.6); t, h – соответственно толщина и высота стенки.

Напряжения σ_x и σ_y следует определять в одной и той же точке стенки балки и принимать в формуле (7.7) каждое со своим знаком.

Расчет на устойчивость балок двутаврового сечения, изгибаемых в плоскости стенки, следует выполнять по формуле

$$\frac{M}{\varphi_b W_c} \le R\gamma_c, \tag{7.9}$$

где W_c – для сжатого пояса;

При определении значения φ_b за расчетную длину балки l_{ef} следует принимать расстояния между точками закреплений сжатого пояса от поперечных смещений; при отсутствии связей $l_{ef} = l$ (где l – пролет балки). За расчетную длину консоли следует принимать: $l_{ef} = l$ при отсутствии закрепления сжатого пояса на конце консоли в горизонтальной плоскости (здесь l – длина консоли); расстояние между точками закреплений сжатого пояса в горизонтальной плоскости при закреплении пояса на конце и по длине консоли.

Устойчивость балок не требуется проверять:

- при передаче нагрузки через сплошной жесткий настил, непрерывно опирающийся на сжатый пояс балки и надежно с ним связанный (плоский и профилированный металлический настил, волнистая сталь и т.п.);
- при отношении расчетной длины балки l_{ef} к ширине сжатого пояса b, не превышающем значений, определяемых по формулам табл.7.17. для балок симметричного двутаврового сечения и с более развитым сжатым поясом, для которых ширина растянутого пояса составляет не менее 0,75% ширины сжатого пояса.

Расчет на прочность элементов, изгибаемых в двух главных плоскостях, следует выполнять по формуле

$$\frac{M_x}{I_{xn}} y \pm \frac{M_y}{I_{yn}} x \le R\gamma_c , \qquad (7.10)$$

где x, y – координаты рассматриваемой точки сечения относительно его главных осей.

В балках, рассчитанных по формуле (7.10), значения напряжений в стенке балки следует проверять по формулам (7.5), (7.7) в двух главных плоскостях изгиба.

Таблица 7.17. Значения l_{ef}/b, при которых не требуется расчет на устойчивость

Место приложения нагрузки	Наибольшие значения l_{ef}/b, при которых не требуется расчет на устойчивость прокатных и сварных балок (при $1 \le \frac{h}{b} < 6$ и $15 \le \frac{b}{t} < 35$)
К верхнему поясу	$0{,}45\left[0{,}35 + 0{,}0032\frac{b}{t} + \left(0{,}76 - 0{,}02\frac{b}{t}\right)\frac{b}{h}\right]\sqrt{\frac{E}{R}}$
К нижнему поясу	$0{,}45\left[0{,}57 + 0{,}0032\frac{b}{t} + \left(0{,}92 - 0{,}02\frac{b}{t}\right)\frac{b}{h}\right]\sqrt{\frac{E}{R}}$
Независимо от уровня приложения нагрузки при расчете участка балки между связями или при чистом изгибе	$0{,}45\left[0{,}41 + 0{,}0032\frac{b}{t} + \left(0{,}73 - 0{,}016\frac{b}{t}\right)\frac{b}{h}\right]\sqrt{\frac{E}{R}}$

Принятые обозначения: b, t – соответственно ширина и толщина сжатого пояса; h – расстояние (высота) между осями поясных листов.

Примечание. Для балок с поясными соединениями на заклепках и высокопрочных болтах значения l_{ef}/b, получаемые при расчете по формулам табл.7.17, следует умножать на коэффициент 1,2.

7.2.3. Элементы, подверженные действию осевой силы с изгибом. Расчет на прочность сплошностенчатых внецентренно сжатых, сжато-изгибаемых, внецентренно растянутых и растянуто-изгибаемых элементов следует выполнять по формуле

$$\frac{N}{A_n} + \frac{M_x}{I_{xn}} y \pm \frac{M_y}{I_{yn}} x \le R\gamma_c , \qquad (7.11)$$

где x, y – координаты рассматриваемой точки сечения относительно его главных осей.

В составных сквозных стержнях каждую ветвь необходимо проверять по формуле (7.11) при соответствующих значениях N, M_x, M_y, вычисленных для данной ветви.

Расчет на устойчивость внецентренно сжатых и сжато-изгибаемых элементов следует выполнять как в плоскости действия момента (плоская форма потери устойчивости), так и из плоскости действия момента (изгибно-крутильная форма потери устойчивости).

Расчет на устойчивость внецентренно сжатых и сжато-изгибаемых элементов постоянного сечения в плоскости действия момента, совпадающей с плоскостью симметрии, необходимо выполнять по формуле

$$\frac{N}{\varphi_e A} \le R\gamma_c . \qquad (7.12)$$

В формуле (7.12) коэффициент φ_e следует определять:

а) для сплошностенчатых стержней - по табл.7.18 в зависимости от условной гибкости $\bar{\lambda} = \lambda\sqrt{R/E}$ и приведенного относительного эксцентриситета m_{ef}, определяемого по формуле

$$m_{ef} = \eta m , \qquad (7.13)$$

где η - коэффициент влияния формы сечения, определяемый по табл.3 прил.4 СНиП 2.03.06-85; $m = eA/W_c$ - относительный эксцентриситет (здесь e - эксцентриситет; W_c - момент сопротивления сечения для наиболее сжатого волокна).

Расчет на устойчивость выполнять не требуется для сплошностенчатых стержней при $m_{ef} > 10$;

б) для сквозных стержней с решетками или планками, расположенными в плоскостях, параллельных плоскости изгиба - по табл.7.19 в зависимости от условной приведенной гибкости, определяемой по формуле

$$\bar{\lambda}_{ef} = \lambda_{ef}\sqrt{R/E} \qquad (7.14)$$

и относительного эксцентриситета m, определяемого по формулам

$$\left.\begin{aligned} m_x &= e_x \frac{Ay_1}{I_x} \\ m_y &= e_y \frac{Ax_1}{I_y} \end{aligned}\right\}, \qquad (7.15)$$

или

где x_1 , y_1 - расстояния соответственно от оси Y-Y или X-X до оси наиболее сжатой ветви, но не менее расстояния до оси стенки ветви.

Расчетные значения изгибающих моментов M, необходимые для вычисления эксцентриситета $e = M/N$, определять согласно п.4.17 СНиП 2-03.06-85.

Для балок двутаврового сечения с двумя осями симметрии при определении коэффициента φ_b необходимо вычислить коэффициент φ_1 по формуле

$$\varphi_1 = 1{,}41\psi \frac{I_y}{I_x}\left(\frac{h}{l_{ef}}\right)^2 \frac{E}{R}, \qquad (7.16)$$

где ψ - коэффициент, определяемый по табл.7.20, 7.21 в зависимости от характера нагрузки и параметра α.

Для прессованных двутавров параметр α следует вычислять по формуле

$$\alpha = 1{,}54 \frac{I_t}{I_y}\left(\frac{l_{ef}}{h}\right)^2, \qquad (7.17)$$

где $I_t = 0{,}42\sum b_i t_i^3$ - момент инерции при кручении (здесь b_i и t_i - соответственно ширина и толщина прямоугольников, образующих сечение); l_{ef} - расчетная длина балки, определяемая согласно формулы (7.8).

При наличии утолщений круглого сечения (бульб)

$$I_t = 0{,}42\Sigma b_i t_i^3 + n\frac{\pi D^4}{32},$$

где D - диаметр бульб; n - число бульб в сечении.

Таблица 7.18. Коэффициенты φ_e для проверки устойчивости внецентренно сжатых(сжато-изгибаемых) сплошностенчатых стержней в плоскости действия момента, совпадающей с плоскостью симметрии

Условная гибкость $\bar{\lambda}$	Коэффициенты φ_e при приведенном относительном эксцентриситете m_{ef}, равном																				
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	1,0	1,2	1,5	2,0	2,5	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	9,0	10,0
0,5	990	980	973	937	905	880	850	920	767	725	657	567	500	445	360	302	257	225	203	182	165
1,0	947	907	872	837	807	778	752	725	680	637	583	505	445	394	323	272	235	205	186	167	151
1,5	880	832	793	758	726	700	670	647	607	570	518	452	398	355	292	247	215	188	171	153	140
2,0	817	765	723	687	656	627	602	580	540	507	463	405	358	320	265	227	197	175	158	142	130
2,5	750	695	652	617	587	560	536	515	482	452	413	362	322	290	242	208	182	162	146	132	121
3,0	677	618	578	545	517	495	472	455	425	400	367	323	290	262	220	192	167	150	135	123	114
3,5	593	542	505	475	453	434	415	398	374	355	325	288	260	236	202	175	155	140	126	116	108
4,0	505	436	435	412	393	378	362	350	327	312	288	257	233	214	184	159	144	130	117	109	101
4,5	425	395	374	356	342	328	315	306	288	275	255	230	210	193	167	146	132	121	110	102	095
5,0	358	338	320	307	295	285	275	268	253	242	227	205	190	175	152	135	123	113	103	096	090
5,5	303	287	276	265	257	248	242	235	225	215	202	185	172	160	140	125	115	105	097	090	085
6,0	257	246	238	230	223	218	213	208	198	192	180	166	155	145	128	115	106	097	090	085	080
6,5	222	212	207	202	197	191	187	183	175	170	161	148	141	132	117	107	097	090	085	080	075
7,0	192	187	181	177	172	168	165	161	155	150	145	135	128	120	108	098	090	085	080	075	070
8,0	148	145	142	139	137	134	132	129	126	123	120	112	107	100	091	085	080	077	072	067	062
9,0	120	117	115	113	111	110	108	107	105	102	100	094	090	086	080	076	072	067	063	059	055
10,0	097	095	093	092	091	090	088	087	085	084	082	080	077	075	070	067	062	060	056	052	048

Примечания: 1. Значения коэффициентов φ_e в таблице увеличены в 1000 раз. 2. Значения φ_e следует принимать не выше значений φ.

Таблица 7.19. Коэффициенты φ_e для проверки устойчивости внецентренно сжатых (сжато-изгибаемых) сквозных стержней в плоскости действия момента, совпадающей с плоскостью симметрии

Условная приведенная гибкость $\bar{\lambda}_{ef}$	Коэффициенты φ_e при относительном эксцентриситете m, равном																				
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	1,0	1,2	1,5	2,0	2,5	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	9,0	10,0
0,5	950	888	825	755	718	660	635	605	540	495	436	370	320	282	232	196	170	157	143	122	110
1,0	882	810	756	693	660	609	582	548	496	453	405	342	296	262	213	182	155	145	130	113	096
1,5	872	753	694	643	607	568	534	507	458	420	375	318	275	243	198	170	144	134	130	105	090
2,0	773	700	640	593	558	523	492	468	423	390	347	294	257	227	185	159	135	125	112	100	084
2,5	712	637	585	543	508	477	450	427	390	358	320	273	240	213	173	150	127	117	105	095	079
3,0	640	575	530	488	458	430	408	387	355	327	294	253	222	197	164	142	121	111	100	092	075
3,5	565	507	467	432	410	385	365	350	321	297	270	232	206	185	155	133	115	106	095	087	072
4,0	490	442	410	382	363	343	327	313	290	269	247	213	190	172	145	125	110	100	090	083	070
4,5	418	382	357	335	320	304	290	280	260	243	223	195	177	160	135	117	105	094	086	080	067
5,0	353	328	309	293	280	268	257	249	233	219	202	178	162	148	127	110	098	089	082	076	064
5,5	300	282	267	255	245	237	228	222	208	197	183	163	150	137	120	105	094	084	077	072	062
6,0	256	242	233	223	216	210	202	197	187	178	166	150	138	128	112	098	090	080	073	068	060
6,5	220	210	205	197	190	185	182	175	167	160	150	136	127	118	103	094	085	076	070	065	058
7,0	192	186	180	173	169	165	162	157	150	145	136	125	117	108	096	090	081	072	067	062	056
8,0	150	145	142	139	135	133	130	127	122	120	112	105	100	092	086	082	072	065	060	056	052
9,0	120	117	115	112	110	108	107	105	101	098	095	090	087	081	077	072	065	058	055	050	048
10,0	097	096	095	093	092	091	090	087	085	083	082	080	076	071	068	064	057	052	048	044	044

Примечания: 1. Значения коэффициентов φ_e в таблице увеличены в 1000 раз. 2. Значения φ_e следует принимать не выше значений φ.

Таблица 7.20. Коэффициент ψ для балок двутаврового сечения с двумя осями симметрии

Коэффициент α	Коэффициент ψ				
	для балок без закрепления в пролете				при наличии не менее двух промежуточных закреплений верхнего пояса, делящих пролет на равные части, независимо от места приложения
	при сосредоточенной нагрузке, приложенной к поясу		при равномерно распределенной нагрузке, приложенной к поясу		
	верхнему	нижнему	верхнему	нижнему	
0,1	0,98	2,80	0,91	2,14	1,20
0,4	0,98	2,84	0,91	2,14	1,23
1,0	1,05	2,87	0,95	2,17	1,26
4,0	1,26	3,05	1,12	2,35	1,44
8,0	1,47	3,29	1,30	2,56	1,65
16,0	1,89	3,75	1,68	2,94	1,96
24,0	2,24	4,10	2,00	3,22	2,24
32,0	2,56	4,45	2,28	3,50	2,49
48,0	3,15	4,97	2,73	3,99	2,91
64,0	3,64	5,50	3,15	4,45	3,33
80,0	4,10	5,95	3,50	4,80	3,64
96,0	4,48	6,30	3,89	5,15	3,96
128,0	5,25	7,04	4,48	5,78	4,50
160,0	5,92	7,77	5,04	6,30	5,01
240,0	7,35	9,17	6,30	7,56	6,09
320,0	8,54	10,40	7,32	8,40	7,00
400,0	9,63	11,48	8,16	9,38	7,77

Примечание. При одном закреплении балки в середине пролета необходимо учитывать следующие случаи: при сосредоточенной силе в середине пролета (независимо от уровня приложения) $\psi = 1{,}75\psi_1$; при сосредоточенной силе в четверти пролета или равномерно распределенной нагрузке, приложенной к верхнему поясу $\psi = 1{,}14\psi_1$; при сосредоточенной силе в четверти пролета, приложенной к нижнему поясу, $\psi = 1{,}6\psi_1$; при равномерно распределенной нагрузке по нижнему поясу $\psi = 1{,}3\psi_1$;, Здесь значение ψ_1 следует принимать по гр.6 (при наличии не менее двух промежуточных закреплений).

Таблица 7.21. Коэффициенты ψ для консолей двутаврового сечения с двумя осями симметрии

Коэффициент α	Коэффициенты ψ при нагрузке, приложенной к поясу	
	верхнему	нижнему
4	0,875	3,640
6	1,120	3,745
8	1,295	3,850
10	1,505	3,920
12	1,680	4,025
14	1,855	4,130
16	2,030	4,200
24	2,520	4,550
32	2,975	4,830
40	3,290	5,040
100	5,040	6,720

Для сварных и клепаных двутавровых балок при отсутствии отбортовок, утолщений по краям и значительных утолщений в углах параметр α надлежит определять по формуле

$$\alpha = 8\left(\frac{lt_1}{b_f h}\right)^2\left(1+\frac{at^3}{b_f t_1^3}\right), \qquad (7.18)$$

где для сварных и прессованных двутавровых балок: t_1, b_f - соответственно толщина и ширина пояса балки; $a = 0{,}5h$; для клепаных двутавровых балок: t_1 - сумма толщин листов пояса и горизонтальной полки поясного уголка; b_f - ширина листов пояса; h - расстояние между осями пакета поясных листов; a - сумма высоты вертикальной полки поясного уголка с толщиной пакета горизонтальных листов; t - сумма толщин стенки и вертикальных поясных уголков.

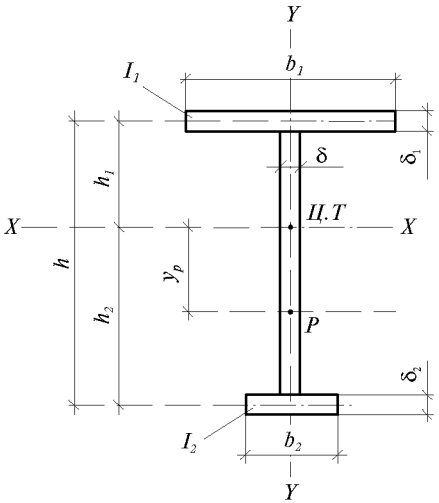


Рис.7.4. Поперечное сечение балки с развитым верхним поясом

Значение коэффициента φ_b в формуле (7.9) необходимо принимать:

при $\varphi_1 \le 0{,}667$ $\varphi_b = \varphi_1$;

при $\varphi_1 > 0{,}667$ $\varphi_b = 0{,}5 + 0{,}25\varphi_1$

для алюминия всех марок указанных в табл.7.1, 7.2, за исключением АМг2Н2, АД31Т1 и АД31Т5 и $\varphi_b = \varphi_1$, но не более 1,0 - для марок АМг2Н2, АД31Т1 и АД31Т5.

Для балок двутаврового сечения с одной осью симметрии с развитым верхним поясом (рис.7.4) для определения коэффициента φ_b необходимо вычислить коэффициенты φ_1 и φ_2 по формулам:

$$\varphi_1 = 1{,}41\psi\frac{I_y}{I_x}\frac{2\xi h h_1}{l_{ef}^2}\frac{E}{R}; \qquad (7.19)$$

$$\varphi_2 = 1{,}41\psi\frac{I_y}{I_x}\frac{2\xi h h_2}{l_{ef}^2}\frac{E}{R}; \qquad (7.20)$$

$$\psi = 2{,}6\left[\sqrt{(0{,}5\bar{y}_p+\beta_y)^2+c^2}+(0{,}5\bar{y}_p+\beta_y)\right]. \qquad (7.21)$$

В формулах (7.19), (7.20), (7.21): ξ - коэффициент, зависящий от вида нагрузки и принимаемый по табл.7.22; h_1, h_2 - размеры (рис.7.4); $\bar{y}_p = y_p/h$ - относительная координата точки приложения нагрузки со своим знаком;

$$\beta_y = \left[0{,}43 - 0{,}065\left(\frac{b_1}{h}\right)^2\right](2n-1), \qquad (7.22)$$

здесь $n = I_1/(I_1+I_2)$; I_1 , I_2 - моменты инерции соответственно сжатого и растянутого поясов относительно оси симметрии сечения);

$$c^2 = \frac{1}{I_y}\left(\frac{I_1 I_2}{I_y}+0{,}04 I_t\frac{l^2}{h^2}\right), \qquad (7.23)$$

I_t - момент инерции при кручении (см. обозначения к формуле (7.17).

Таблица 7.22. Значение коэффициента ξ в формуле (7.19)

Вид нагрузки	Чистый изгиб	Равномерно распределенная нагрузка	Сосредоточенная сила в середине пролета	Момент на одном конце балки
Коэффициент ξ	1,00	1,12	1,35	1,75

Значение коэффициента φ_b в формуле (7.9) необходимо принимать:

при $\varphi_2 \le 0{,}667$ $\quad \varphi_b = \varphi_1$;

при $\varphi_b > 0{,}667$ $\quad \varphi_b = \varphi_1\left[0{,}5 + 0{,}25\left(\dfrac{n}{\varphi_1} - \dfrac{1-n}{\varphi_2}\right)\right]$ (7.24)

для алюминия всех марок, указанных в табл.7.1; 7.2, за исключением марок АМг2Н2, АД31Т1 и АД31Т5, для которых φ_2 вычисляется по формуле (7.20) и принимается не более 1,0.

Устойчивость балок швеллерного сечения следует проверять так же, как балок двутаврового сечения, при этом α вычислять по формуле (7.17); найденные значения φ_b умножать на коэффициент 0,7.

Значения I_x, I_y и I_t в формулах (7.16), (7.17) следует принимать для швеллера.

Расчет устойчивости внецентренно сжатых элементов постоянного сечения из плоскости действия момента при их изгибе в плоскости наибольшей жесткости ($I_x > I_y$), совпадающей с плоскостью симметрии, следует выполнять по формуле

$$\frac{N}{c\varphi_y A} \le R\gamma_c\,. \tag{7.25}$$

Коэффициент c определяется по формуле

$$c = \frac{\beta}{1 + \alpha m_x}\,, \tag{7.26}$$

где α, β – коэффициенты, принимаемые по табл.7.23.

Таблица 7.23. Значения коэффициентов α и β в зависимости от типа сечения внецентренно сжатого элемента

Тип сечения	Значение коэффициентов		
	α при $1 \le m_x \le 5$	β при	
		$\lambda_y \le \lambda_c$	$\lambda_y > \lambda_c$
Открытое	$0{,}75 + 0{,}05m_x$	1	$\sqrt{\dfrac{\varphi_c}{\varphi_y}}$
	$1 - (0{,}25 - 0{,}05m_x)\,\dfrac{I_2}{I_1}$	1	$1 - \left(1 - \sqrt{\dfrac{\varphi_c}{\varphi_y}}\right)\left(2\dfrac{I_2}{I_1} - 1\right)$ при $\dfrac{I_2}{I_1} < 0{,}5$, $\beta = 1$
Замкнутое или сквозное с решетками (или планками)	$0{,}55 + 0{,}05m_x$	1	$\sqrt{\dfrac{\varphi_c}{\varphi_y}}$

Обозначения, принятые в табл.7.23.: I_1, I_2 – моменты инерции соответственно большей и меньшей полок относительно оси симметрии сечения Y-Y; φ_c – значение φ_y при $\lambda_y = \lambda_c = 3{,}8\sqrt{E/R}$.

Примечания к табл.7.23.: 1. значения коэффициентов α и β для сквозных стержней с решетками (или планками) следует принимать только при наличии не менее двух промежуточных диафрагм по длине стержня. В противном случае следует принимать коэффициенты, установленные для стержней открытого двутаврового сечения. 2. При значениях $m_x < 1$ или $m_x > 5$ следует принимать соответственно $m_x = 1$ или $m_x = 5$.

При определении m_x за расчетный момент M_x следует принимать:

а) для стержней с шарнирно-опертыми концами, закрепленными от смещения перпендикулярно плоскости действия момента, – максимальный момент в пределах средней трети длины (но не менее половины момента, наибольшего на длине стержня);

б) для консолей – момент в заделке (но не менее момента в сечении, отстоящем от заделки на треть длины стержня).

При гибкости $\lambda_y > \lambda_c = 3{,}8\sqrt{E/R}$ коэффициент c не должен превышать для стержней:

- замкнутого сечения – единицы;
- двутаврового сечения с двумя осями симметрии – значений определяемых по формуле

$$c_{\max} = \frac{2}{\left[1 + \delta + \sqrt{(1-\delta)^2 + \frac{16}{\mu}\left(\frac{M_x}{Nh}\right)^2}\right]}, \qquad (7.27)$$

где $\delta = \frac{4p}{\mu}$; $p = \frac{I_x + I_y}{Ah^2}$; h – расстояние между осями поясов; $\mu = 2 + 0{,}156\frac{I_t}{Ah^2}\lambda_y^2$; $I_t = 0{,}433\sum b_i t_i^3$.

Внецентренно сжатые элементы, изгибаемые в плоскости наименьшей жесткости ($I_y < I_x$ и $e_y \neq 0$) при $\lambda_x > \lambda_y$, следует рассчитывать по формуле (7.12), а также проверять на устойчивость из плоскости действия момента как центрально-сжатые стержни по формуле

$$\frac{N}{\varphi_x A} \le R\gamma_c. \qquad (7.28)$$

При $\lambda_x \le \lambda_y$ проверка устойчивости из плоскости действия момента не требуется.

В сквозных внецентренно сжатых стержнях с решетками, расположенными в плоскостях, параллельных плоскости изгиба, кроме расчета на устойчивость стержня в целом по формуле (7.12) следует проверить отдельные ветви как центрально-сжатые стержни по формуле (7.2).

Продольную силу в каждой ветви следует определять с учетом дополнительного усилия от момента; величину этого усилия при параллельных ветвях (поясах) необходимо вычислять по формуле $N_{ad} = M/b$, где b – расстояние между осями ветвей (поясов).

Отдельные ветви внецентренно сжатых сквозных элементов с планками следует проверять на устойчивость как внецентренно сжатые элементы с учетом усилий от момента и местного изгиба ветвей от фактической или условной поперечной силы (как в поясах безраскосной фермы).

Расчет на устойчивость сплошностенчатых стержней, подверженных сжатию и изгибу в двух главных плоскостях, при совпадении плоскости наибольшей жесткости ($I_x > I_y$) с плоскостью симметрии выполнять по формуле

$$\frac{N}{\varphi_{exy} A} \le R\gamma_c, \qquad (7.29)$$

где $\varphi_{exy} = \varphi_{ey}\sqrt{c}$,

здесь φ_{ey} – следует определять согласно формулам (7.12) – (7.14); c – необходимо определять согласно формулы (7.26).

Если $m_{ef,y} < 2m_x$, то кроме расчета по формуле (7.25), следует произвести дополнительную проверку по формулам (7.12) и (7.28), принимая $e_y = 0$.

Значения относительных эксцентриситетов определяют по формулам

$$m_x = e_x \frac{A}{W_{cx}} \text{ и } m_y = e_y \frac{A}{W_{cy}}, \qquad (7.30)$$

где W_{cx}, W_{cy} – моменты сопротивления сечений наиболее сжатого волокна относительно осей соответственно X-X и Y-Y.

Если $\lambda_x > \lambda_y$, то кроме расчета по формуле (7.25), следует произвести дополнительную проверку по формуле (7.12), принимая $e_y = 0$. В случае несовпадения плоскости наибольшей жесткости ($I_x > I_y$) с плоскостью симметрии расчетное значение следует увеличить на 25%.

Расчет на устойчивость сквозных стержней из двух сплошностенчатых ветвей, симметричных относительно оси Y-Y (рис.7.5) с решетками в двух параллельных плоскостях, подверженных сжатию и изгибу в обеих главных плоскостях, следует выполнять:

- для стержней в целом – в плоскости, параллельной плоскостям решеток, согласно (7.12) ÷ (7.15) принимая $e_y = 0$ (рис.7.5);
- для отдельных ветвей – как внецентренно сжатых элементов по формулам (7.12) и (7.27), при этом продольную силу в каждой ветви следует определять с учетом усилия от момента M_x, а момент M_y – распределять между ветвями пропорционально их жесткостям;
- если момент M_y действует в плоскости одной из ветвей, то следует считать его полностью передающимся на эту ветвь.

При проверке отдельной ветви по формуле (7.28) гибкость ее определяется по максимальному расстоянию между узлами решетки.

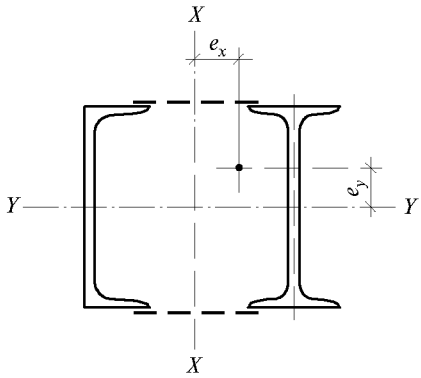


Рис.7.5. Сечение составного элемента из двух сплошностенчатых ветвей с решетками в двух параллельных плоскостях

Расчет соединительных элементов (планок или решеток) сквозных внецентренно сжатых стержней следует выполнять согласно формулы (7.3) на наибольшую поперечную силу – фактическую Q или условную Q_{fic}.

В случае, когда фактическая поперечная сила больше условной, соединять планками ветви сквозных внецентренно сжатых элементов, как правило, не следует.

7.3. Расчетная длина и предельная гибкость элементов алюминиевых конструкций

Расчетные длины элементов алюминиевых конструкций принимают по СНиП 2-03.06-85. Гибкость сжатых элементов не должна превышать значений, приведенных в табл.7.24.

Таблица 7.24. Предельная гибкость сжатых элементов

Элементы конструкций	Предельная гибкость сжатых элементов
Пояса, опорные раскосы и стойки ферм, передающие опорные реакции	100
Прочие элементы ферм	120
Колонны второстепенные (стойки фахверка, фонарей и т.п.), элементы решетки колонн	120
Связи	150
Стержни, служащие для уменьшения расчетной длины сжатых стержней, и другие ненагруженные элементы	150
Элементы ограждающих конструкций:	
симметрично нагруженные	100
несимметрично нагруженные (крайние и угловые стойки витражей и т.д.)	70

Примечание. Приведенные в табл.7.24 данные относятся к элементам с сечением, симметричным относительно действия сил. При сечениях, несимметричных относительно действия сил, предельную гибкость надлежит уменьшать на 30%.

Гибкость растянутых элементов не должна превышать значений, приведенных в табл.7.25.

Таблица 7.25. Предельная гибкость растянутых элементов

Элементы конструкций	Предельная гибкость растянутых элементов
Пояса и опорные раскосы ферм	300
Прочие элементы ферм	300
Связи (кроме элементов, подвергающихся предварительному напряжению)	300

Примечания: 1. Гибкость растянутых элементов проверяется только в вертикальной плоскости. 2. При проверке гибкости растянутых стержней перекрестной решетки из одиночных уголков радиус инерции принимается относительно оси, параллельной полке уголка. 3. Стержни перекрестной решетки в месте пересечения должны быть скреплены между собой. 4. Для растянутых раскосов стропильных ферм с незначительными усилиями, в которых при неблагоприятном расположении нагрузки может изменяться знак усилия, предельная гибкость принимается как для сжатых элементов, при этом соединительные прокладки должны устанавливаться не реже чем через $40i$.

7.4. Устойчивость сжатых поясов балок, свесов, полок

Расчетную ширину свеса поясных листов (полок) b_{ef} следует принимать равной расстоянию: в прессованных, прокатных, сварных и клепаных элементах без поясных листов – от грани стенки до края поясного листа (полки); в клепаных элементах с поясными листами – от ближайшей риски заклепок до свободного края листа. При наличии вута, образующего со свесом угол не менее 30°, расчетную ширину свеса следует измерять до начала вута (в случае выкружки – принимать вписанный вут).

В центрально-, внецентренно сжатых и сжато-изгибаемых элементах значение гибкости свеса поясного листа (полки) $\bar{\lambda}_f = \frac{b_{ef}}{t}\sqrt{R/E}$ следует принимать не более значений, указанных в табл.7.26 в зависимости от условной $\bar{\lambda}$ и типа сечения.

Таблица 7.26. Предельная гибкость свеса полки $\bar{\lambda}_f$ сжатых и сжато-изгибаемых элементов

Характеристика полки (поясного листа) и сечения элемента	Наибольшие значения $\bar{\lambda}_f$ при значениях условной гибкости стержня	
	$\bar{\lambda} \le 1$	$\bar{\lambda} \ge 5$
Неокаймленная двутавра и тавра	$\frac{14}{\sqrt{E/R+507}}$	0,8
Неокаймленная большая неравнополочного уголка, стенка тавра и полка швеллера	$\frac{15}{\sqrt{E/R+507}}$	0,8
Неокаймленная равнополочных уголков	$\frac{14}{\sqrt{E/R+507}}$	0,7

Примечание. При вычислении $\bar{\lambda}_f$ для промежуточных значений $\bar{\lambda}$ следует определять линейной интерполяцией между значениями при $\bar{\lambda} = 1$ и $\bar{\lambda} = 5$.

В случае недонапряжения элемента наибольшие значения $\bar{\lambda}_f$ (табл.7.26) следует увеличивать в $\sqrt{R\varphi_m/\sigma}$ раз, но не более чем в 1,5 раза, при этом значения $\bar{\lambda}_f$ необходимо принимать не более 1,3 (здесь φ_m – меньшее из значений φ, φ_e, φ_{exy}, $c\varphi$, использованное при проверке устойчивости стержня; $\sigma = N/A$).

В изгибаемых элементах наибольшую гибкость свеса поясного листа (полки) прессованных, сварных и клепаных балок следует назначать с учетом предельных размеров свесов, приведенных в табл.7.26 для $\bar{\lambda} \le 1$.

Наибольшую гибкость свеса неокаймленных полок уголков в сжатых поясах клепаных балок без горизонтальных листов принимать по формуле

$$\bar{\lambda}_f = 0{,}6 + \sqrt{R/E}\,. \qquad (7.31)$$

В случае недонапряжения элемента наибольшую гибкость свеса поясного листа (полки) следует увеличивать $\sqrt{R/\sigma}$ в раз, но не более чем в 1,5 раза: здесь σ – большее из двух значений:

$$\sigma = \frac{M}{\varphi_b W} \quad \text{или} \quad \sigma = \left| \frac{M_x y}{I_{xn}} \pm \frac{M_y x}{I_{yn}} \right|.$$

При усилении свободных свесов утолщениями (бульбами) наибольшее значение свеса $\bar{\lambda}_{f1} = \frac{b_{ef1}}{t}\sqrt{R/E}$ [здесь b_{ef1} – расчетная ширина свеса поясных листов или полок, измеряемая от центра утолщения до грани примыкающей стенки (полки) или до начала вута] следует определять по формуле:

$$\bar{\lambda}_{f1} = k\bar{\lambda}_f\,, \qquad (7.32)$$

где k – коэффициент, определяемый по табл.7.27 в зависимости от $\bar{\lambda}_f$, γ_1 и $\bar{\lambda}$; $\bar{\lambda}_f$ – наибольшее значение условной гибкости свеса при отсутствии утолщения, принимаемое по табл.7.26.

Таблица 7.27. Значение коэффициента k в функции $\bar{\lambda}_f$, γ_1 и $\bar{\lambda}$

Сечение	$\bar{\lambda}_f$	γ_1	Значения коэффициента k в формуле (7.32) при гибкости $\bar{\lambda}$, равной	
			1	5
Швеллер, двутавр	$0,35 \le \bar{\lambda}_f \le 0,60$	2,5 3,0 3,5	1,06 1,24 1,46	1,35 1,69 2,06
	$0,75 \le \bar{\lambda}_f \le 0,90$	2,5 3,0 3,5	1,04 1,20 1,40	1,28 1,59 1,94
Уголок, тавр, крестовое	$0,3 \le \bar{\lambda}_f \le 0,60$	2,5 3,0 3,5	1,06 1,24 1,46	1,17 1,47 1,67
	$0,75 \le \bar{\lambda}_f \le 0,90$	2,5 3,0 3,5	1,04 1,20 1,40	1,13 1,35 1,67

Примечание. Коэффициент k для промежуточных значений $\bar{\lambda}_f$ от 0,6 до 0,75 и гибкости $\bar{\lambda}$ от 1 до 5 определяется линейной интерполяцией.

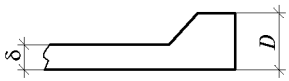


Рис.7.6. Схема утолщения (бульбы)

Величина γ_1 равна: $\gamma_1 = D/t$, где D – размер утолщения, принимаемый равным диаметру круглой бульбы; в квадратных и трапецевидных утолщениях нормального профиля D – высота утолщения при ширине бульб не менее $1,5D$ в трапецевидных (рис.7.6) и не менее D – в прямоугольных утолщениях.

Расчет на устойчивость замкнутых круговых цилиндрических оболочек вращения, равномерно сжатых параллельно образующим, следует выполнять по формуле

$$\sigma_1 \le \gamma_c \sigma_{cr1}, \qquad (7.33)$$

где σ_1 – расчетное напряжение в оболочке; σ_{cr1} – критическое напряжение, равное меньшему из значений ψR или cEt/r (здесь r – радиус срединной поверхности оболочки; t – толщина оболочки).

Значения коэффициентов ψ и c необходимо определять соответственно по табл.7.28; 7.29.

Таблица 7.28. Значение коэффициента ψ для круглых труб в функции R и r/t

Значение R, МПа	Коэффициенты ψ при r/t, равном								
	0	25	50	75	100	125	150	200	250
$R \le 140$	1,00	0,98	0,88	0,79	0,72	0,65	0,59	0,45	0,39
$R \ge 280$	1,00	0,94	0,78	0,67	0,57	0,49	0,42	0,29	–

Примечание. Значения коэффициентов ψ при 140 МПа $< R <$ 280 МПа и для промежуточных значений r/t вычисляются линейной интерполяцией.

Таблица 7.29. Значение коэффициента c для круглых труб в зависимости от отношения r/t

Значение r/t	50	100	150	200	250	500
Коэффициент c	0,30	0,22	0,20	0,18	0,16	0,12

Примечание. Для промежуточных значений r/t коэффициенты следует определять линейной интерполяцией.

В случае внецентренного сжатия параллельно образующим или чистого изгиба в диаметральной плоскости при касательных напряжениях в месте наибольшего момента, не превышающих значений $0{,}07E(t/r)^{3/2}$, напряжение σ_{cr1} следует увеличить в $(1{,}1-0{,}1\sigma_1'/\sigma_1)$ раз, где σ'_1 – наименьшее напряжение (растягивающие напряжения считать отрицательными).

В круглых трубах, рассчитываемых как сжатые или сжато-изгибаемые стержни при условной гибкости $\bar{\lambda}=\lambda\sqrt{R/E}\geq 0{,}65$ должно быть выполнено условие

$$\frac{r}{t}\leq\frac{280}{1+1400\dfrac{R}{E}}. \qquad (7.34)$$

Кроме этого, устойчивость стенок таких труб должна быть проверена по формуле 7.33.

Расчет на устойчивость стенок бесшовных труб не требуется, если r/t не превышает значений $1{,}7\,E/R$ или 35.

7.5. Расчет элементов конструкций с применением тонколистового алюминия

Тонколистовой алюминий (толщиной до 2 мм) следует применять в качестве элементов ограждающих и несущих конструкций в виде:

- плоских листов, укрепленных ребрами или специальной штамповкой;
- плоских листов и лент, предварительно напряженных как в одном, так и в двух направлениях;
- гофрированных листов без укреплений или со специальными укреплениями.

При расчете на прочность сжатого в одном направлении плоского листа, шарнирно-опертого по контуру (рис.7.7) в рабочую площадь включается часть листа размером $2c$, определяемым по формуле

$$c=1{,}16t\sqrt{E/R}, \qquad (7.35)$$

где t – толщина.

При расчете на прочность и деформативность тонколистовых конструкций, усиленных продольными ребрами, в которых плоский лист при действии продольной и поперечной нагрузок имеет сжимающие напряжения, в рабочую площадь ребер следует включать часть листа размером c, определяемым по формуле (7.35) (рис.7.8).

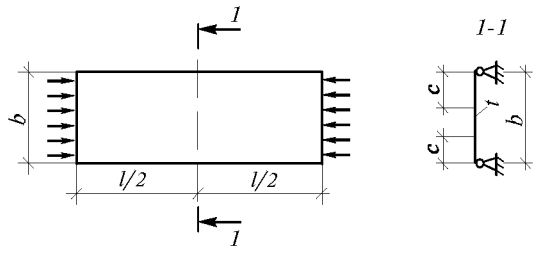


Рис.7.7. Расчетная схема сжатого тонколистового элемента
b – полная ширина сечения; c – рабочая ширина сечения

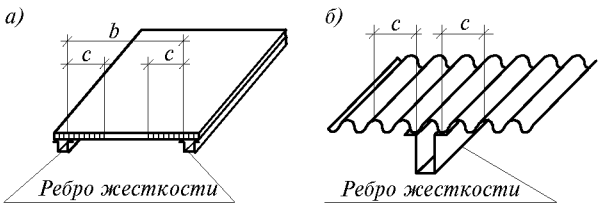


Рис.7.8. Расчетная схема тонколистовых конструкций, усиленных продольными ребрами
а – плоский лист; *б* – гофрированный лист

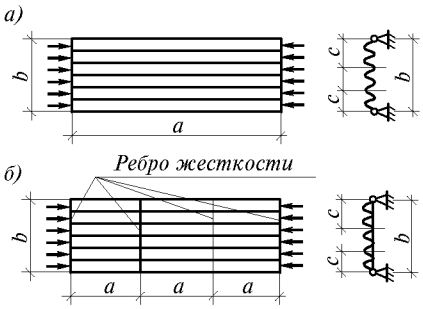


Рис.7.9. Расчетная схема сжатого гофрированного листа
а – без поперечных ребер жесткости;
б – с поперечными ребрами жесткости

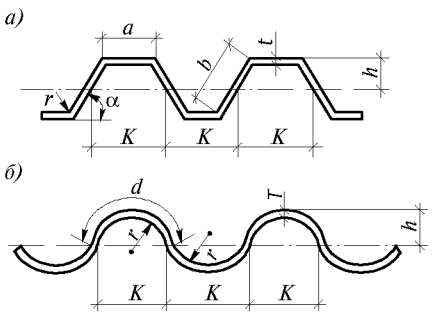


Рис.7.10. Геометрические параметры для гофра
а – трапециевидного, *б* – волнистого

При расчете на прочность листов с волнистыми и трапециевидными гофрами, шарнирно-опертых по контуру и сжимаемых в направлении гофров, при отношении $a/b \geq 3$ (рис.7.9) в рабочую площадь следует включать часть листа размером $2c$:

$$c = 1{,}04\sqrt{\frac{K}{tdR}\left(\sqrt{D_x D_y} + D_{xy}\right)}, \qquad (7.36)$$

где

$$D_x = EI_x, \qquad D_y = \frac{K}{d}\frac{Et^3}{12(1-\mu^2)},$$

$$D_{xy} = \mu D_y + \frac{d}{K}\frac{t^3}{6}, \qquad I_x = \frac{I_{x1}}{2K},$$

здесь K, d – соответственно шаг и длина по периметру одной полуволны (рис.7.10); I_{x1} – момент инерции одной волны.

Когда отношение $a/b \leq 3$ или гофрированный лист разделяется поперечными ребрами, имеющими момент инерции I_S (см. ниже) на ряд ячеек с соотношением сторон $a/b < 3$ (рис.7.9), значение c необходимо определять по формуле

$$c = 0{,}74\sqrt{\frac{K}{tdR}\left(D_x\frac{b^2}{a^2} + 2D_{xy} + D_y\frac{a^2}{b^2}\right)}. \qquad (7.37)$$

В формуле (7.37) обозначения те же, что в формуле (7.36), значения a и b следует принимать по рис.7.9.

При наличии продольных ребер (рис.7.11) в рабочую площадь должна включаться площадь этих ребер и часть листа размером c в каждую сторону от ребра.

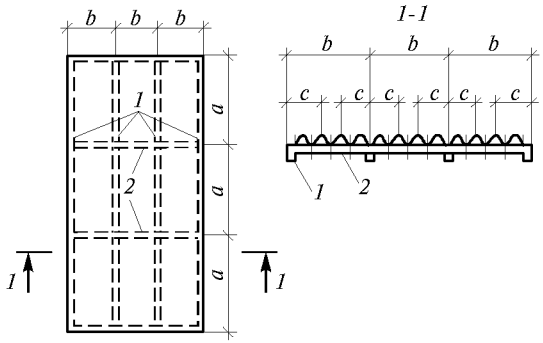


Рис.7.11. Схема плиты из гофрированного листа с продольными и поперечным ребрами
1 – продольные ребра; *2* – поперечные ребра

При расчете по формуле $\sigma = \frac{M}{I_x}y$ момент инерции поперечных ребер жесткости не должен быть меньше величины

$$I_S \geq \frac{I_x b^4}{4a^3}. \qquad (7.38)$$

Если гофрированный лист и поперечные ребра имеют различные модули упругости, то

$$I_S \geq \frac{D_x b^4}{4E_S a^3}, \qquad (7.39)$$

где E_S – модуль упругости материала ребра.

Обозначения в формулах (7.38) и (7.39) те же, что в формуле (7.36).

В случае, если значения I_S меньше указанных в формулах (7.38) и (7.39) величин, то значение c подсчитывается по формуле (7.36). При этом значение D_y следует принимать

$$D_y = \frac{K}{d}\frac{Et^3}{12(1-\mu^2)} + \frac{EI_S}{a}.$$

Гофрированный лист, не имеющий усиливающих ребер, при действии поперечной нагрузки должен рассчитываться на изгиб по формулам (7.4) и (7.5) как балка.

Для листов с трапециевидным гофром размер сжатых полок включаемых в расчетное сечение, следует определять по формуле (7.35). При этом в формулах (7.4) и (7.5) W_x и I_x необходимо вычислять для рабочей площади сечения.

Прогиб свободно опертых гофрированных листов при изгибе следует определять по формуле

$$f = \alpha f_0, \tag{7.40}$$

где α – коэффициент, учитывающий увеличение прогиба вследствие деформации поперечного сечения гофрированного листа под нагрузкой и принимаемый: для волнистых листов – равным 1, для трапециевидных – по табл.7.30, для листа с трапециевидным гофром с приклеенным жестким утеплителем (типа пенопласта) $\alpha = 1$; f_0 – прогиб гофрированного листа, работающего как балка, при вычислении которого I_x определяется по рабочей площади сечения.

Таблица 7.30. Значение коэффициента α, учитывающего увеличение прогиба вследствие деформации поперечного сечения гофрированного листа под нагрузкой

Отношение $\frac{b}{a}$	Значения α при угле наклона боковых граней гофра, град.			
	45	60	75	90
2,0	1,10	1,14	1,20	1,30
1,5	1,15	1,20	1,30	1,40
1,0	1,20	1,25	1,35	1,45
0,5	1,25	1,30	1,40	1,50

Принятые обозначения: b – размер наклонной грани; a – размер сжатой горизонтальной грани (рис.7.10).

Примечание. Значения α для промежуточных отношений b/a надлежит определять линейной интерполяцией.

Изгибаемые тонколистовые конструкции с гофрированным листом усиленным продольными ребрами, следует рассчитывать на прочность и прогиб с учетом включения в работу ребер и части листа размером c в каждую сторону от ребра (рис.7.8), определяемым по формуле (7.36) независимо от наличия поперечных ребер.

При расчете сжато-изгибаемых и растянуто-изгибаемых гофрированных листов с трапециевидным гофром (обшивок трехслойных панелей с закладным утеплителем) на прочность при обеспечении совместной работы обшивок и продольных ребер, кроме моментов инерции гофрированных листов относительно их нейтральных осей, следует учитывать момент инерции сечения, в которое входят продольные ребра и часть обшивок размером c.

$$c = 47 + 30\frac{b}{a} - 3{,}3\frac{EI_x}{10^5}, \text{ мм} \tag{7.41}$$

где b/a – отношение ширины панели к шагу поперечных ребер; EI_x – жесткость гофра на единицу относительно его нейтральной оси, кН · м.

Местную устойчивость сжатых горизонтальных граней изгибаемых листов с трапециевидным гофром (рис.7.12) необходимо проверять с учетом упругого защемления продольных кромок по формуле

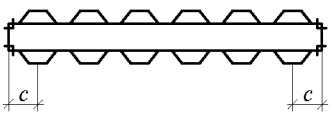


Рис.7.12. Сечение трехслойной панели

$$\sigma \le k_{loc}\xi E\left(\frac{t}{a}\right)^2, \qquad (7.42)$$

где σ – сжимающие напряжения в грани от внешней нагрузки; k_{loc} – коэффициент, принимаемый по табл.7.31; ξ – коэффициент, принимаемый по табл.7.32.

Таблица 7.31. Значение коэффициента k_{loc} при проверке местной устойчивости трапециевидных гофров

Отношение $\frac{b}{a}$	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,4
Коэффициент k_{loc}	5,22	5,15	5,10	5,05	5,00	4,95	4,88	4,84	4,80	4,72

Принятые обозначения: b – размер наклонной грани; a – размер сжатой горизонтальной грани (рис.7.10).

Таблица 7.32. Значение коэффициента ξ при проверке местной устойчивости трапециевидных гофров

Отношение $\frac{\sigma}{R}$	0,7	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	2,5	3,0
Коэффициент ξ	1,00	0,86	0,76	0,67	0,61	0,56	0,52	0,48	0,41	0,35

Примечание. Напряжение σ определяется в зависимости от напряженного состояния по формулам (7.38)÷(7.41) при ξ = 1.

Местную устойчивость наклонных граней листов с трапециевидным гофром в местах опирания на прогоны или ригели следует проверять по приложению 6. к СНиП 2-03.06-85.

Местную устойчивость волнистых листов при изгибе (рис.7.10) проверяют по формуле

$$\sigma \le 0{,}22\xi E\frac{t}{r}. \qquad (7.43)$$

Общая устойчивость центрально-сжатого гофрированного листа должна быть проверена по формуле (7.2).

За расчетную длину необходимо принимать расстояние между закреплениями, препятствующими смещению гофрированного листа из его плоскости, независимо от наличия поперечных ребер.

Местная устойчивость элементов листа трапециевидной формы при центральном сжатии должна проверяться по формуле

$$\sigma \le 3{,}6\xi E\left(\frac{t}{b}\right)^2, \qquad (7.44)$$

где b – ширина большей грани.

Местную устойчивость волнистого гофрированного листа при центральном сжатии следует проверять по формуле

$$\sigma \le 0{,}12\xi E\frac{t}{r}. \qquad (7.45)$$

Расчет элементов мембранных конструкций следует производить на основе совместной работы мембраны и контура с учетом их деформированного состояния и геометрической нелинейности мембраны.

При расчете элементов мембранных конструкций (мембраны и контура) необходимо учитывать:

- осевое сжатие;
- сжатие, вызываемое усилиями сдвига по линии контакта мембраны с элементами контура;
- изгиб в тангенциальной и вертикальной плоскостях;
- начальный (имеющийся до нагружения) прогиб мембраны.

При креплении мембраны с эксцентриситетом относительно центра тяжести сечения элементов контура, кроме условий, изложенных выше, при расчете контуров следует учитывать кручение.

При расчете пространственных блоков с предварительно напряженной обшивкой и наличии торцевых элементов жесткости обшивку необходимо вводить в работу каркаса блока только при условии обеспечения надежной передачи усилий от элементов каркаса к обшивке.

Величину предварительного натяжения обшивки, расположенной в сжатой зоне, определяют из условия равенства в ней нулю суммарных напряжений (без учета мембранных) при действии расчетной нагрузки.

Величину предварительного натяжения листа в расчете обшивок при контроле процесса натяжения по силовым параметрам и возможности регулирования растягивающих усилий следует определять с учетом коэффициента условий работы $\gamma_c = 1$. При контроле по геометрическим параметрам напряжения в обшивке должны удовлетворять условиям:

$$\left.\begin{aligned} \sigma_p + \sigma_F \cdot 1{,}1 \le R; \\ -\sigma_p + \sigma_F \cdot 0{,}9 \ge 0, \end{aligned}\right\}, \qquad (7.46)$$

где σ_p, σ_F - напряжения в листе соответственно от предварительного натяжения и от внешней нагрузки.

При расчете элементов мембранных конструкций с одноосным напряжением обшивок необходимо учитывать дополнительное воздействие цепных усилий в обшивке, воспринимаемых продольными элементами каркаса. Соединения мембран из алюминиевых сплавов, а также прикрепление их к опорному контуру следует рассчитывать на воздействие температурного перепада (с учетом разности коэффициентов линейного расширения материалов мембраны и контура).

7.6. Расчет соединений конструкций из алюминиевых сплавов

7.6.1. Сварные соединения. Расчет сварных швов следует выполнять по формулам табл.7.33.

Сварные соединения внахлестку двумя лобовыми швами имеют расчетное сопротивление, равное расчетному сопротивлению сварного стыкового соединения при условии, что лобовые швы наложены по всей толщине свариваемых элементов и концы их выведены за пределы соединения.

Сварные стыковые соединения, работающие на изгиб, рассчитываются по формулам для расчета целого сечения с расчетными сопротивлениями, принятыми по табл.7.6 и 7.7.

Сварные стыковые соединения, работающие одновременно на изгиб и срез, следует проверять по формуле

$$\frac{\sigma_w}{2} + \sqrt{\frac{\sigma_w^2}{4} + \tau_w^2} \le R_w \gamma_c , \qquad (7.47)$$

где σ_w – напряжение в сварном соединении от изгиба; τ_w – напряжение в сварном соединении от среза.

Таблица 7.33. Формулы для расчета сварных соединений

Сварные швы	Напряженное состояние	Расчетная формула
Стыковые, расположенные перпендикулярно действующей силе	Сжатие, растяжение	$\frac{N}{l_w t} \le R_w \gamma_c$
Угловые	Срез	$\frac{N}{\beta_f k_f l_w} \le R_{wf} \gamma_c$

Принятые обозначения: N – расчетная продольная сила; l_w – расчетная длина шва, равная его полной длине за вычетом $3t$ или k_f; при выводе шва за пределы соединения (на подкладки и т.п.) за расчетную длину шва принимается его полная длина; t – наименьшая толщина соединяемых элементов; β_f – коэффициент, принимаемый равным: 0,9 – при автоматической одно- и двухпроходной сварке; 0,7 – при автоматической многопроходной сварке, а также при ручной и полуавтоматической сварке с любым числом проходов; k_f – катет углового шва, принимаемый равным катету вписанного равнобедренного треугольника.

При одновременном действии срезывающих напряжений в двух направлениях в одном и том же сечении углового шва расчет следует производить на равнодействующую этих напряжений.

Угловые швы, прикрепляющие элемент, на который действуют одновременно осевое усилие и изгибающий момент, необходимо рассчитывать по формуле (7.11), в которой: $A_n = A_{wf}$ – расчетная площадь швов; I_{xn}, I_{yn} – момент инерции расчетной площади швов соответственно относительно осей X-X и Y-Y; $R = R_{wf}$ – расчетное сопротивление углового шва.

7.6.2. Заклепочные и болтовые соединения. В заклепочных и болтовых соединениях при действии продольной силы N, проходящей через центр тяжести соединения, распределение этой силы между заклепками или болтами принимается равномерным.

Заклепочные или болтовые соединения, воспринимающие продольные силы, следует рассчитывать на срез и смятие заклепок и болтов по формулам табл.7.34.

Заклепки и болты, работающие одновременно на срез и растяжение, должны проверяться отдельно на срез и на растяжение.

В креплениях одного элемента к другому через прокладки или иные промежуточные элементы, а также в креплениях с односторонней накладкой число заклепок (болтов) должно быть увеличено против расчетного числа на 10%.

При прикреплении выступающих полок уголков или швеллеров с помощью коротышей число заклепок (болтов), прикрепляющих одну из полок коротыша, требуется увеличить против расчетного числа на 50%.

Таблица 7.34. Формулы для расчета заклепочных и болтовых соединений

Соединение	Напряженное состояние	Расчетная формула
Заклепки (или болты)	Срез	$\frac{N}{nn_s\frac{\pi d^2}{4}} \le R_{rs}\left(R_{bs}\right)$ (7.48)
	Смятие	$\frac{N}{nd\sum t} \le R_{rp}\left(R_{bp}\right)$ (7.49)
Болты	Растяжение	$\frac{N}{n\frac{\pi d_0^2}{4}} \le R_{bt}$ (7.50)
Заклепки	Отрыв головки заклепки	$\frac{N}{n\pi dh} \le R_{rs}$ (7.51)

Принятые обозначения: N – расчетная продольная сила, действующая на соединение; n – число заклепок или болтов в соединении; n_s – число рабочих срезов одной заклепки или болта; d – диаметр отверстия для заклепки или наружный диаметр стержня болта; Σt – наименьшая суммарная толщина элементов, сминаемых в одном направлении; d_0 – внутренний диаметр резьбы болта; $h = 0{,}4d$ – высота поверхности отрыва головки (рис.7.13).

Примечание. Расчет болтов на срез и смятие следует производить по формулам (7.48) и (7.49) с заменой R_{rs} и R_{rp} соответственно на R_{bs} и R_{bp}.

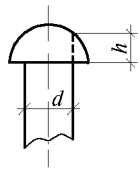


Рис.7.13. Заклепка с полукруглой головкой

7.6.3. Монтажные соединения на высокопрочных стальных болтах. Монтажные соединения на высокопрочных стальных болтах рассчитываются в предположении передачи действующих в стыках и прикреплениях усилий через трение, возникающее по соприкасающимся плоскостям соединяемых элементов от натяжения высокопрочных болтов. При этом распределение продольной силы между болтами следует принимать равномерным.

Расчетное усилие Q_{bh}, которое может быть воспринято каждой поверхностью трения соединяемых элементов, стянутых одним высокопрочным болтом, определяется по формуле

$$Q_{bh} = \frac{R_{bh}\gamma_b A_{bn}\mu}{\gamma_h}, \qquad (7.52)$$

где R_{bh} – расчетное сопротивление растяжению высокопрочного болта, γ_b – коэффициент условий работы соединения, принимаемый равным 0,8; A_{bn} – площадь сечения болта нетто, μ – коэффициент трения, принимаемый по табл.7.35; γ_h – коэффициент надежности, принимаемый по нормам проектирования стальных конструкций.

Таблица 7.35. Величина коэффициента трения μ в зависимости от способа подготовки поверхности элементов

Способ обработки соединяемых поверхностей	Пескоструйная очистка	Травление поверхности	Без обработки (после обезжиривания)
Коэффициент трения μ	0,45	0,4	0,15

Количество n высокопрочных болтов в соединении при действии продольной силы должно определяться по формуле

$$n \ge \frac{N}{k_1\gamma_c Q_{bh}}, \qquad (7.53)$$

где k_1 – количество поверхностей трения соединяемых элементов.

Натяжение высокопрочного болта следует производить осевым усилием $P = R_{bh} \cdot A_{bn}$.

Расчет на прочность соединяемых элементов, ослабленных отверстиями под высокопрочные болты, необходимо выполнять с учетом того, что половина усилия, приходящегося на каждый болт, в рассматриваемом сечении уже передана силами трения. При этом проверку ослабленных сечений следует производить по площади сечения брутто A при $A_n \geq 0{,}85A$ или по условной площади $A_c = 1{,}18A_n$ при $A_n \leq 0{,}85A$.

7.6.4. Соединения с фрезерованными торцами. В соединениях с фрезерованными торцами (в стыках сжатых элементов и т.п.) сжимающую силу рекомендуется считать полностью передающейся через торцы.

Во внецентренно сжатых и сжато-изгибаемых элементах сварные швы и болты, включая высокопрочные, указанных соединений следует рассчитывать на максимальное растягивающее усилие от действия момента и продольной силы при наиболее неблагоприятном их сочетании, а также на сдвигающее усилие от действия поперечной силы.

7.6.5. Поясные соединения в составных балках. Сварные швы, заклепки и высокопрочные болты, соединяющие стенки и пояса составных двутавровых балок, следует рассчитывать по табл.7.36.

Таблица 7.36. Формулы для расчета поясных соединений составных балок

Нагрузка	Вид соединения	Формулы для расчета поясных соединений в составных балках
Неподвижная (распределенная и сосредоточенная)	Угловые швы	$\frac{T}{2\beta_f k_f} \leq R_{wf}\gamma_c$ (7.54)
	Заклепки	$aT \leq Q_{rs}\gamma_c n_s$ (7.55)
	Высокопрочные болты	$aT \leq Q_{bh}\gamma_c k_1$ (7.56)
Местная сосредоточенная	Угловые швы	$\sqrt{\frac{T^2 + V^2}{2\beta_f k_f}} \leq R_{wf}\gamma_c$ (7.57)
	Заклепки	$a\sqrt{T^2 + \alpha V^2} \leq Q_{rs}\gamma_c n_s$ (7.58)
	Высокопрочные болты	$a\sqrt{T^2 + \alpha V^2} \leq Q_{bh}\gamma_c k_1$ (7.59)

Принятые обозначения: $T = QS/I$ – сдвигающее пояс усилие на единицу длины, вызываемое поперечной силой Q (здесь S – статический момент брутто пояса балки относительно нейтральной оси); a – шаг поясных заклепок или высокопрочных болтов; $Q_{rs} = R_{rs} n_s \pi d^2/4$ – расчетное усилие одной заклепки на срез, определяемое по формуле (7.55); n_s – число расчетных срезов одной заклепки; Q_{bh} – расчетное усилие одного высокопрочного болта, определяемое по формуле (7.52); k_1 – количество поверхностей трения соединяемых элементов; $V = \gamma_f F/l_{ef}$ – давление от сосредоточенного груза F (здесь γ_f – коэффициент, принимаемый согласно СНиП 2.01.07-85); l_{ef} – условная длина распределения сосредоточенной нагрузки, принимаемая по СНиП 2.01.07-85; α – коэффициент, принимаемый при нагрузке по верхнему поясу балки, в которой стенка пристрогана к верхнему поясу, $\alpha = 0{,}4$; при отсутствии пристрожки стенки или при нагрузке по нижнему поясу $\alpha = 1$.

В балках с соединениями на заклепках и высокопрочных болтах с многолистовыми поясными пакетами прикрепление каждого из листов за местом своего теоретического обрыва следует рассчитывать на половину усилия, которое может быть воспринято сечением листа. Прикрепление каждого листа на участке между действительным местом его обрыва и местом обрыва предыдущего листа следует рассчитывать на полное усилие, которое может быть воспринято сечением листа.

7.6.6. Анкерные болты. В конструкциях из алюминиевых сплавов анкерные болты следует выполнять из стали. Расчет стальных анкерных болтов осуществляется по действующим нормам проектирования стальных конструкций.

7.7. Проектирование алюминиевых конструкций

7.7.1. Общие рекомендации. При проектировании алюминиевых конструкций необходимо:

- предусматривать конструктивные решения, снижающие отрицательные свойства алюминиевых сплавов – пониженный до сравнению со сталью модуль упругости и в два раза больший, чем у стали, коэффициент температурного расширения;
- максимально использовать технологические возможности алюминиевых сплавов – легко образовывать профиль сложной конфигурации при прессовании и холодном профилировании для получения оптимальных характеристик сечения при минимальном расходе металла;
- компоновать конструкцию, особенно сварную, из элементов одной марки сплава и из наименьшего числа профилей и деталей; использовать металл с наименьшими отходами и потерями, рационально размещая стыки в конструкции;
- избегать резкого изменения поперечного сечения, особенно в элементах, работающих на растяжение;
- по возможности размещать стыки элементов вне зоны действия максимальных усилий.

Оси стержней ферм и других решетчатых конструкций следует центрировать в узлах. В сварных конструкциях следует производить центрирование по центрам тяжести стержней, в клепаных и болтовых – по рискам элементов. Если невозможно выполнить это условие, необходимо при подборе сечений элементов учитывать влияние эксцентриситетов.

- не разрешается применять комбинированные соединения, в которых часть усилий воспринимается заклепками (болтами), а часть – сварными швами;
- на одном изделии не рекомендуется применять для однотипных профилей разные марки сплавов или разные состояния их поставки ;
- воздействия от температурных изменений и влияние температурных деформаций рекомендуется исключать преимущественно конструктивными мероприятиями;
- выбирать статически определимую расчетную схему с обеспечением свободы продольной деформации несущих элементов; в целях снижения деформативности несущих конструкций, можно применять неразрезные системы, но при надлежащем технико-экономическом обосновании с учетом усложнения монтажных стыков в неразрезных схемах;
- предусматривать максимальную заводскую готовность или возможность укрупнения отправочных элементов конструкций на стройплощадке для монтажа крупными блоками с обеспечением устойчивости отдельных элементов и блоков сооружения в целом;
- предусматривать монтажные крепления элементов, обеспечивающие возможность легкой сборки и удобного выполнения соединений элементов на монтаже, а также быстроту выверки конструкций;
- при транспортировании конструкций и изделий из алюминиевых сплавов следует предусматривать их сохранность путем пакетирования и перевозки в контейнерах. Монтажные нагрузки на конструкции и отдельные элементы при достаточном обосновании могут быть приняты по первому предельному состоянию (прочности и устойчивости), превышая ограничения по второму предельному состоянию (деформациям).
- предусматривать связи, обеспечивающие в процессе монтажа и эксплуатации устойчивость и пространственную неизменяемость сооружения в целом и ее элементов;

- применять монтажные соединения, как правило, на болтах; сварные и заклепочные соединения применять в случаях, когда эти типы соединений обеспечивают функциональное назначение конструкций (сосуды, резервуары, листовые растянутые поверхности больших размеров и т.п.);
- учитывать технологические возможности предприятий-изготовителей профилей и конструкций.

Прогибы и перемещения элементов конструкций не должны превышать предельных, установленных СНиП 2.01.07-85*, относительные прогибы элементов не должны превышать значений, приведенных в табл.7.37. При применении подвесного транспорта прогибы конструкций следует определять в каждом конкретном случае из условия нормальной эксплуатации подъемно-транспортного механизма. Предельные значения прогибов допускается определять при соответствующем обосновании из условия сохранения плотности стыков.

Таблица 7.37. Относительные прогибы элементов конструкций из алюминиевых сплавов

№№ п/п	Элементы конструкций	Относительные прогибы элементов (к пролету)
1.	Балки покрытий и чердачных перекрытий:	
	главные балки	1/250 (1/200)
	прогоны	1/200 (1/150)
	обрешетки	1/150 (1/125)
2.	Покрытия, в том числе большепролетные без подвесного транспорта	1/300 (1/250)
3.	Элементы фахверка:	
	стойки, ригели	1/300 (1/200)
	прогоны остекления (в вертикальной и горизонтальной плоскостях)	(1/200)
4.	Стеновые панели:	
	с остеклением	1/200
	без остекления	1/125 (1/100)
5.	Кровельные панели, подвесные потолки	1/150 (1/125)
6.	Вертикальные и горизонтальные элементы ограждающих конструкций (импосты) при остеклении:	
	одинарном	1/200
	стеклопакетами	1/300

Примечания: 1. Величины прогибов, приведенные в скобках, допускаются лишь при наличии обоснования (опытное строительство, наличие строительного подъема и др.); 2. Предельные значения прогибов допускается определять при соответствующем обосновании из условия сохранения плотности стыков; 3. При применении подвесного транспорта прогибы конструкций следует определять в каждом конкретном случае из условия нормальной эксплуатации подъемно-транспортного механизма.

Температурные климатические воздействия на алюминиевые конструкции одноэтажных зданий и сооружений должны учитываться соблюдением предельных размеров температурных отсеков зданий и сооружений, указанных в табл.7.38, а также применением конструктивных мер при проектировании ограждающих конструкций, их стыков и нащельников.

Ограждающие конструкции зданий (стены и покрытия, отдельные панели, в том числе светопрозрачные элементы, настилы и их стыки), а также детали крепления ограждений к каркасу здания следует проектировать с учетом изменения температуры в течение года, обеспечивая при этом свободу температурных деформаций при сохранении теплоизоляционных характеристик конструкций. При этом в летнее время должно быть учтено воздействие солнечной радиации.

Таблица 7.38. Предельные размеры температурных отсеков, м, зданий и сооружений

Характеристика зданий и сооружений	Наибольшее расстояние, м		
	от температурного шва или торца зданий до ближайшей вертикальной связи	между температурными швами	
		по длине блока (вдоль здания)	по ширине блока
Отапливаемые здания	72	144	120
Неотапливаемые здания и горячие цехи	48	96	90
Открытые эстакады	36	72	–

Примечание. Наибольшие расстояния указаны для зданий и сооружений, в которых конструкции покрытий или (и) стен выполнены из алюминия, а колонны – из стали или алюминия.

Коррозионную стойкость алюминиевых конструкций производственных и сельскохозяйственных зданий и сооружений, подвергающихся воздействию агрессивных сред, следует обеспечивать путем выбора марки и состояния алюминиевого сплава, назначения рациональных конструктивных форм и минимальных толщин в соответствии со СНиП 2.03.11-85.

7.7.2. Конструктивные требования к соединениям. Вид соединения (сварное, болтовое, заклепочное и др.) выбирают в зависимости от характера его работы с учетом степени ослабления алюминиевого элемента, определяемого видом соединения.

Сварные соединения элементов несущих конструкций должны выполняться, как правило, в заводских условиях. При проектировании сварных конструкций необходимо предусматривать применение кондукторов.

При проектировании конструкций со сварными соединениями надлежит:

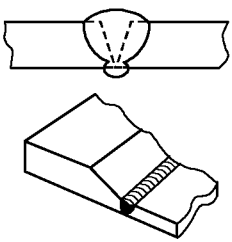
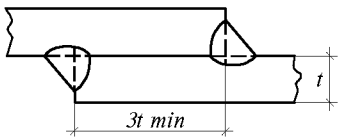
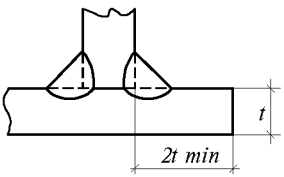
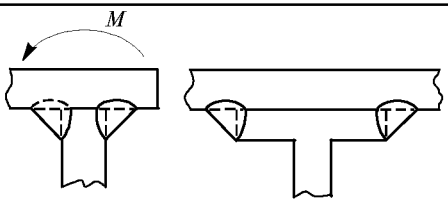
- предусматривать применение высокопроизводительных механизированных способов сварки;
- предусматривать возможность сварки без кантовки конструкций при изготовлении;
- обеспечивать свободный доступ к местам наложения швов с учетом выбранного способа и технологии сварки;
- назначать размеры и взаимное расположение швов и выбирать способ сварки, исходя из требования обеспечения наименьших собственных напряжений и деформаций при сварке;
- избегать сосредоточения большого числа швов в одном месте;
- принимать число и размеры сварных швов минимально необходимыми.

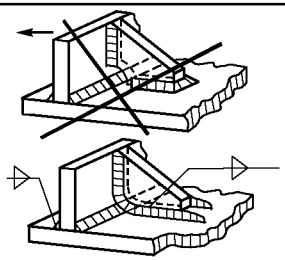
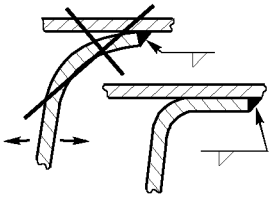
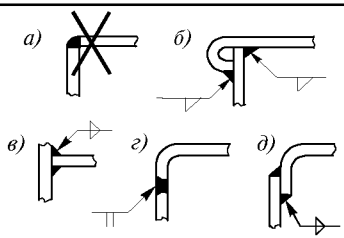
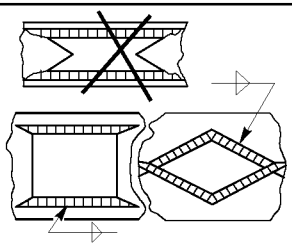
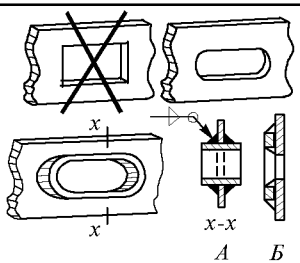
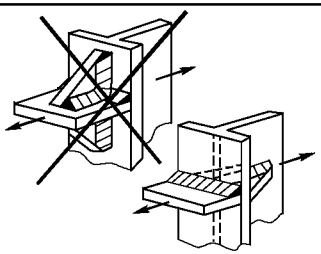
Разделку кромок под сварку следует назначать с учетом способа и технологии сварки, положения шва в пространстве и толщины свариваемых элементов по ГОСТ 14806-80 и заводским нормалям. При проектировании сварных соединений и узлов в несущих конструкциях необходимо предусматривать снижение концентрации напряжений, применяя для этой цели соответствующие конструктивные решения, а также технологические мероприятия. Надлежит применять преимущественно сварные соединения встык с обязательной подваркой корня шва или использованием формирующих подкладок.

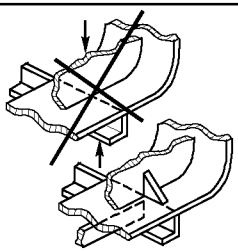
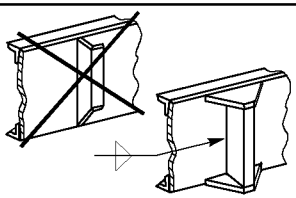
Концы швов встык должны выводиться за пределы стыка, например, с помощью выводных планок. При сварке встык двух листов разной толщины следует осуществлять переход от толстого листа к тонкому устройством скоса по ГОСТ 14806-80. Число стыков в расчетных элементах должно быть минимальным. Сварные соединения

должны располагаться в менее напряженных местах элементов конструкции. В узлах несущих конструкций из прессованных профилей должны предусматриваться сварные соединения встык или втавр. При сварке замкнутых профилей встык рекомендуется использовать подкладки. Размеры и форма сварных угловых швов должны удовлетворять следующим требованиям: катет швов k_f (при сварке элементов толщиной 4 мм и более) надлежит принимать не менее 4 мм. При сварке швов нахлесточных соединений катет по вертикальному размеру не должен выступать над поверхностью верхней детали более, чем на 1 мм. Если в соединении более тонкий элемент имеет бульбу, то предельная величина катета шва k_f может быть увеличена до $1{,}5t$ (где t – наименьшая толщина соединяемых элементов). Расчетная длина флангового и лобового швов должна быть не менее 40 мм и не менее $4\,k_f$; расчетная длина флангового шва должна быть не более $50\,k_f$, за исключением соединений, где воспринимаемое фланговым швом усилие возникает на всем протяжении шва, в последнем случае длина флангового шва не ограничивается. В соединениях внахлестку с угловыми швами величина нахлестки должна быть не менее пяти толщин наиболее тонкого элемента. В табл.7.39 приведены рекомендации по конструированию сварных соединений. Если сварной шов поперек направления усилия является неизбежным, то ослабление, обусловленное поперечным швом, может быть исправлено путем добавления усилительного элемента.

Таблица 7.39. Рекомендации по конструированию сварных соединений

Вид сварного соединения	Рекомендации
Стыковое соединение 	Должна быть обязательной разделка кромок, вырубка и подварка шва. При соединении листов разной толщины более толстый должен быть скошен, в соответствии с ГОСТ 14806-80. Для более успешного сопротивления усталостным напряжениям, выступ сварного шва над плоскостью соединяемого элемента необходимо устранить. По возможности не рекомендуется применять пересекающихся швов
Соединение внахлестку 	Во избежание изгибающих напряжений в сварном шве необходима постановка швов с двух сторон. Как правило, разделка кромок не требуется
Тавровое соединение 	Необходима тщательная подгонка торца вертикального элемента к пластине. Сварка должна осуществляться в кондукторе. Как правило, разделка кромок не требуется. Если возможен изгиб стенки, необходимо предусмотреть сварной шов с двух сторон
	При опирании листа на ребро жесткости, в случае если лист подвергается изгибу, рекомендуется переместить сварной шов в сторону от действия максимального изгибающего момента

Вид сварного соединения	Рекомендации
	Для восприятия момента тавровое соединение должно быть усилено угловыми ребрами жесткости. Ребро должно быть прикреплено так, чтобы угловой шов был непрерывен во избежание образования кратеров
	Отбортованные элементы в резервуарах должны быть расположены под прямым углом к привариваемому элементу с целью снижения изгибающих напряжений в сварном шве. Не допускается приварка закругленного конца элемента
	Простой угловой шов (*а*) трудно выполнять и, кроме того, он плохо работает в конструкции, особенно в случае изгиба. Рекомендуется применить двойные угловые швы (*б*, *в*, *г*), предусматривающие соединение встык или внахлестку (*д*)
	Усилительная стыковая накладка лучше всего может быть выполнена из элемента ромбовидной формы со швами, проходящими за концевые точки листа. Это снижает максимальные срезающие напряжения в угловых швах по сравнению с прямоугольной накладкой
	Вырезы должны быть закругленными во избежание концентраторов напряжений в углах. Если в месте выреза предусматривается усиление, то необходимо предусмотреть, чтобы сварной шов являлся достаточным для восприятия всей нагрузки, которая передается на усилительный элемент. Для небольших вырезов следует предпочесть случай «*Б*» случаю «*А*», что облегчает подгонку усилительного элемента и улучшает противодействие усталостным напряжениям
	В кронштейнах, прикрепленных к полкам, части полок отдаленные от стенки, воспринимают меньшие усилия, чем часть, примыкающая к стенке. Это приводит к высоким значениям напряжений в центральной части полки. Чтобы распределить напряжения по шву более равномерно, необходима постановка ребер жесткости, передающих нагрузку на стенку основного элемента

Вид сварного соединения	Рекомендации
	При пересечении главных балок с элементами переборок и перегородок, во избежание возникновения в месте их пересечения высоких местных напряжений необходима постановка поперечных ребер
	Ребра жесткости, предотвращающие деформацию из плоскости стенки балки, должны иметь конструкцию крепления к полкам, с целью передачи усилий от стенки к полкам балки

Разрушения от усталостных напряжений в сварных конструкциях почти неизменно связываются с высокими местным напряжениями в сварных швах, или в непосредственной близости от них. Непровар, кратеры, трещины, подрезы, большая пористость и другие дефекты сварных швов снижают сопротивление усталостным разрушениям. Простые сварные швы встык без усиления лучше других противостоят усталостным напряжениям. Непрерывные швы лучше прерывистых.

Сварные соединения тонколистовых конструкций надлежит проектировать с учетом технологических особенностей, применяемых способов сварки. Приварку тонких листов обшивок к более толстым элементам каркаса допускается выполнять аргонодуговой точечной или контактной точечной сваркой; при контактной точечной сварке отношение толщин свариваемых элементов не должно превышать 1:3. В заводских условиях для укрупнения тонколистовых элементов следует, как правило, применять контактную роликовую сварку, обеспечивающую получение прочных водонепроницаемых соединений. Размеры соединений при контактной роликовой сварке приведены в таблице 7.40.

Таблица 7.40

Толщина наиболее тонкой детали, мм	Контактная точечная сварка				Роликовая сварка			
	диаметр ядра, мм	минимальные размеры, мм			ширина литой зоны, мм	минимальные размеры, мм		
		ширина нахлестки* при шве		шаг между точками		ширина нахлестки* при шве		расстояние от оси до края листа
		однорядном	двухрядном (в шахматном порядке)			однорядном	двухрядном**	
0,5	3–4	10	18	10	3–4	10	12	5
0,8	3,5–4,5	12	25	13	3,5–4,5	10	14	5
1	4–5	14	28	15	4–5	12	16	6
1,2	5–6	16	30	15	5–6	14	20	7
1,5	6–7	18	35	20	6–7	16	24	8
2	7–8	20	42	25	7–8	20	28	10
3	9–10	26	56	35	8–9	24	34	12

Примечания. * При сварке трех листов алюминия ее следует увеличивать на 15–20%.
** Выполняется с перекрытием на 30–50%.

Допускается укрупнение тонколистовых элементов в заводских условиях выполнять контактной точечной сваркой (размеры соединений приведены в табл.7.18, аргонодуговой точечной и аргонодуговой – непрерывным швом. При сварке стыков кровельных покрытий в монтажных условиях следует, как правило, применять аргонодуговую сварку вольфрамовым или плавящимся электродом с импульсным питанием дуги. Основными видами соединений при этом являются нахлесточное и бортовое. В табл.7.41 и 7.42 приведены данные о свариваемости и основных свойствах сварных швов алюминиевых сплавов, применяемых в строительных конструкциях.

При применении аргонодуговой точечной сварки в монтажных условиях для соединения тонколистовых элементов основным видом соединения является нахлесточное; величина нахлестки должна быть не менее 30 мм. Аргонодуговой точечной сваркой допускается сваривать пакет из трех элементов (толщина двух верхних листов в пакете не должна превышать 3 мм).

Заклепочные и болтовые соединения. В рабочих элементах конструкций число расположенных по одну сторону стыка заклепок, должно быть не менее двух.

При заводской холодной клепке толщина склепываемого пакета на скобе не должна превышать четырех диаметров заклепок. Разбивку заклепок и болтов, в том числе высокопрочных, надлежит производить согласно табл.7.43. Соединительные заклепки и болты, располагаемые вне узлов и стыков, следует размещать на максимальных расстояниях. При конструировании соединений с использованием стальных болтов необходимо предусматривать мероприятия по защите их от контактной коррозии. Диаметр заклепки должен быть не более пяти толщин наиболее тонкого элемента. За расчетный диаметр заклепки следует принимать диаметр отверстия. Форма заклепки и ее размеры для холодной клепки устанавливаются техническими условиями на изготовление строительных конструкций из алюминия.

При соединении внахлестку профилированных листов кровли (вдоль гофра) элементы крепления (болты, заклепки) следует располагать в каждом гребне гофра.

Стыки мембранной или предварительно напряженной обшивки толщиной до 2 мм следует выполнять внахлестку, при этом стык должен быть соединен не менее чем двумя рядами сварных точек или заклепок.

В конструкциях из профилированных листов ребра жесткости или диафрагмы следует соединять в каждой точке касания с гофром и элементом, усиливающим конструкцию.

Конструкция соединения тонких алюминиевых лент с контуром должна иметь регулируемое предварительное натяжение и не допускать контакта между алюминием, сталью или бетоном.

7.7.3. Конструктивные и эксплуатационные требования к ограждающим конструкциям из алюминиевых сплавов

Виды ограждающих конструкций. Ограждающие алюминиевые конструкции находят применение преимущественно при решении фасадов, кровель и интерьеров зданий различного назначения. По конструктивной форме ограждающие конструкции делятся на две группы. К группе каркасно-филенчатых конструкций, выполняемых в основном из линейных элементов, могут быть отнесены навесные стены (в том числе многоэтажные витражи), конструкции заполнения проемов (одноэтажные витражи, окна, световые фонари, двери), основная часть перегородок, некоторые конструкции подвесных потолков. Линейные элементы выполняют преимущественно прессованными, при этом их форма и размеры подчиняются не только требованиям прочности и жесткости, но и требованиям присоединения примыкающих элементов заполнения ячеек каркаса, например, стекла.

Таблица 7.41. Эксплуатационные характеристики основного металла и сварных соединений деформируемых алюминиевых сплавов, наиболее часто применяющихся в строительных конструкциях

Марка		Тип образца	Температура испытаний, °С								Сварочные напряжения σ_{max}, МПа	Коррозия		
			+20				–196	+100	+200	+300				
			$\sigma_в$, МПа	α, град.	σ_R, МПа	ограниченный σ_R, МПа	предел прочности $\sigma_в$, МПа					общая стойкость	склонность к межкристаллитной коррозии	склонность к коррозионному растрескиванию
сплава	проволоки													
АД1		основной металл	80	180	40/40	–	170	65	37	20	–	ОА	ОА	ОА
	СвА5	сварное соединение	80	180	35	–	160	60	35	20	–	ОА	ОА	ОА
АМц		основной металл	120	180	60/50	105/95	210	95	70	45	–	ОА	ОА	ОА
	СвАМц	сварное соединение	110	180	55	80	170	95	70	40	60	ОА	ОА	ОА
АМг1		основной металл	120	180	–	–	220	100	80	50	–	ОА	ОА	ОА
	СвАМг1	сварное соединение	110	180	–	–	200	100	80	48	–	ОА	ОА	ОА
АМг2		основной металл	190	180	70/60	210/180	300	180	130	65	–	ОА	ОА	ОА
	СвАМг3	сварное соединение	180	180	50	180	240	160	120	60	30	ОА	ОА	ОА
АМг3		основной металл	220	180	100/40	200/160	340	210	150	70	–	ОА	ОА	ОА
	СвАМг3	сварное соединение	200	160	50	170	300	180	140	65	35	ОА	ОА	ОА
АД31		основной металл	240	140	–	–	340	210	160	60	–	ОА	А	ОА
	СвАК5	сварное соединение	190	70	–	–	270	150	110	50	–	ОА	А	ОА
АД35		основной металл	320	70	–	–	400	250	200	90	–	ОА	А	ОА
	СвАК5	сварное соединение	240	50	–	–	290	190	140	80	–	ОА	А	ОА
АВ		основной металл	320	80	–	–	410	300	240	100	–	А	Б	ОА
	СвАК5	сварное соединение	230	50	–	–	310	120	170	90	–	А	Б	ОА
1915		основной металл	380	60	120/75	300/200	460	320	220	120	–	А	Б	А
	Св1557	сварное соединение	320	70	70	190	400	290	180	90	55	А	Б	А

Примечания: 1. Аргоно-дуговая сварка неплавящимся электродом. Листы толщиной 2 мм. Сварное соединение с усилием и проплавом. 2. Состояние материала: – сплав термически неупрочняемый: отжиг + сварка; – сплав термически упрочняемый: закалка + искусственное старение + сварка. 3. При испытании при повышенных температурах время выдержки 30 минут. 4. Предел выносливости R_p определялся на базе $N = 5 \cdot 10^7$ циклов при $n = 47$ Гц. 5. Ограниченный предел выносливости определялся на базе $N = 20 \cdot 10^3$ циклов при $n = 0{,}07 - 0{,}16$ Гц. 6. Сварочные напряжения определялись по методике МВТУ. 7. ОА – весьма стойкие; А – стойкие; Б – удовлетворительная стойкость. 8. В числителе – свойства основного металла без концентратора; в знаменателе – свойства основного металла с отверстием диаметром 0,8 мм.

Таблица 7.42. Марки алюминиевых деформируемых сплавов наиболее часто применяемых в строительных конструкциях бывшего СССР и США, их свариваемость и вид полуфабриката

Система	Страна	Марка	Оптимальны химический состав по основным компонентам	Свариваемость		$\sigma_в$ основного металла, МПа	Вид полуфабриката						
				Дуговая сварка в среде инертных газов	Контактная (точечная и роликовая) сварка		Лист	Плита	Поковка	Пруток	Профиль	Труба	Проволока (заклепочная)
Al-Mg	б.СССР	АМг2	Al 2.2 Mg 0.4 Mn	Б	А	190	+	+	+	+	+	+	+
	—//—	АМг3	Al 2.5 Mg 0.6 Mn 0.6 Si	А	А	220	+	+	+	+	+	+	–
	США	5052	Al 2.5 Mg 0.25 Cr	А	А	195	+	+	–	+	–	+	+
Al-Mg-Si	б.СССР	АД31	Al 0.6 Mg 0.5 Si	Б	Б	240	–	–	–	+	+	–	–
	—//—	АВ	Al 0.7 Mg 0.8 Si 0.25 Mn	А	А	320	+	+	+	+	+	+	–
	США	6061	Al 1.0 Mg 0.6 Si 0.2 Cr 0.25 Mn	А	А	310	+	+	+	+	+	+	+
Al-Zn-Mg	б.СССР	1915	Al 3.7 Zn 1.1 Mg 0.4 Mn	Б	Б	380	+	–	–	–	+	+	–
	США	7005	Al 4.5 Zn 1.4 Mg 0.45 Mn 0.13 Cr	А	А	350	+	–	–	–	–	–	–
	США	7075	Al 5.6 Zn 2.5 Mg 1.6 Cu 0.2 Cr	С	А	570	+	+	+	+	+	+	+

Примечания. Оценка свариваемости:

б.СССР – А – хорошая свариваемость; Б – удовлетворительная, требуется разработка специальной технологии;

США – А – легко свариваемый; В – свариваемый во многих случаях, однако требуется специальная технология; С – ограниченная свариваемость.

Таблица 7.43. Рекомендуемые параметры размещения заклепок и болтов

Характеристика расстояния	Расстояния при размещении заклепок и болтов
Между центрами заклепок и болтов в любом направлении:	
минимальное	для заклепок – $3d$ для болтов – $3{,}5d$
максимальное в средних и крайних рядах при отсутствии окаймляющих уголков при растяжении и сжатии	$5d$ или 10δ
максимальное в средних и крайних рядах при наличии окаймляющих уголков:	
при растяжении	$12d$ или 20δ
при сжатии	$10d$ или 14δ
От центра заклепки или болта до края элементов:	
минимальное вдоль усилия и по диагонали	$2{,}5d$
минимальное поперек усилия при обрезных кромках	$2{,}5d$
то же, при прокатных или прессованных кромках	$2d$
максимальное	$6d$

Примечание: d – диаметр отверстия для заклепки или болта; δ – толщина наиболее тонкого наружного элемента пакета.

К группе листовых относят кровельные и глухие стеновые конструкции, подвесные потолки, различного вида экраны и другие конструкции из листов с толщиной 0,6 - 1,5 мм. Листовые конструкции, за исключением трехслойных панелей типа «сэндвич», и некоторых мембран, содержат определенное количество профильных элементов, причем масса последних иногда превосходит массу листов.

Алюминиевые ограждающие конструкции имеют определяемый физико-механическими свойствами алюминия ряд особенностей, основными из которых являются:

- подвижность стыков и других сочленений, вызываемая высоким значением коэффициента линейного расширения, при необходимости обеспечения достаточных водо- и воздухонепроницаемости;
- широкое применение вставок и вкладышей из материалов с малой теплопроводностью для ликвидации мостиков холода, которые в алюминиевых конструкциях более опасны, чем в конструкциях из других материалов (стержневой мостик холода площадью примерно 0,003 площади утепленной стены увеличивает ее теплопотери почти втрое);
- наличие съемных и разборных элементов, цель которых - облегчить замену частей конструкции, выполненных из сравнительно недолговечных материалов (герметиков, резины, минераловатных плит и др.);
- более широкое, чем в традиционных материалах, применение в ряде зданий дополнительных мер обеспечения противопожарной защиты, что связано с недостаточной огнестойкостью большинства алюминиевых конструкций.

В отечественном и мировом строительстве применяют одно-, двух- и трехслойные стены из профилированных листов через обшивки прикрепляемые к фахверку при помощи крюк-болтов, самонарезающих винтов, клямер, штифтов переменного сечения. В стенах высотой до 10 - 12 м обшивки делают, как правило, из одного гофрированного листа на всю высоту стены, избегая, таким образом, горизонтальных стыков. При увеличении высоты листы стыкуют простой нахлесткой на 50 мм.

Штампованные листы обычно применяют как средство, позволяющее значительно обогатить пластику фасадов, конструктивно же и функционально они уступают гофрированным листам. Штампованные листы крепят дюбелями, винтами или гвоздями непосредственно к телу стены или устраивают легкую решетку типа облегченного фахверка, в этом случае листы можно закрепить на специальных клямерах, что значительно снижает трудоемкость монтажа.

Кровельные настилы применяют для устройства неутепленных и утепленных кровель по обрешетке или прогонам. Применяют преимущественно одно и трехслойные кровли. Кровли из профилированных настилов, относящиеся к конструкциям полистовой сборки, монтируют из отдельных листов на несущей конструкции, находящейся в проектном положении, или на укрупненных блоках покрытия, полностью собираемых на земле.

Требования к кровлям аналогичны требованиям к стеновым обшивкам, но условия их работы более жестки. Малые уклоны кровель промышленных зданий не препятствуют скоплению снега, что при его неравномерном таянии может привести в отдельных местах к подпору воды. Наиболее подвержены протеканию даже при значительных нахлестках стыки, параллельные карнизам здания, поэтому в строительной практике прослеживается тенденция к увеличению длины листов с тем, чтобы одним листом перекрыть скат кровли от конька до карниза.

Кровельные настилы крепят к прогонам крюк-болтами, штифтами и др. через верх гофра, и для повышения водонепроницаемости применяют комбинированные металлорезиновые шайбы. Существуют конструкции, позволяющие крепить настил без образования в нем отверстий. При малых уклонах обязательно применяют герметики или упругие прокладки. Хороший результат дает применение каскадных

стыков. В коньке применяют перегнутые гофрированные листы того же профиля, что и настил (только при небольших уклонах кровли), либо перегнутые гладкие листы с выштампованными на продольных кромках гофрами (при настилах сравнительно мелкого профиля, обычно – волнистых), либо перегнутые гладкие листы с отогнутыми кромками, вырубленными по профилю настила.

Подвесные потолки в гражданских и промышленных зданиях несут одновременно несколько функций: улучшают акустику помещений, создают герметичное ограждение между помещением и техническим этажом, решают эстетические задачи. Наиболее распространены акустические потолки, состоящие из перфорированных алюминиевых панелей или реек, линейных элементов из прессованных или гнутых профилей, звукопоглощающих пакетов (волокнистые плиты в тонкой пленке). Потолки располагают на регулируемых по высоте подвесках.

В цехах особо точных производств, в помещениях с контролируемой средой применяют герметичные потолки из каркасных панелей с гладкой нижней обшивкой.

Общие требования. Стеновые глухие и светопрозрачные ограждающие конструкции следует, как правило, проектировать навесными. Самонесущие ограждающие конструкции допускается применять при поэтажном их опирании, а несущие – в одноэтажных полносборных бескаркасных зданиях типа сборно-разборных зданий жилищно-гражданского и производственного назначения.

Огнестойкость ограждающих конструкций панелей должна соответствовать группе возгораемости и степени огнестойкости здания. Необходимо предусматривать конструктивные мероприятия, повышающие сопротивление панелей действию огня и препятствующие переходу огня с одной панели на другую. Конструкция панелей, крепление наружных листов, элементов стыков и нащельников, а также детали крепления к каркасу здания должны проектироваться с учетом возможных температурных перепадов.

Все фасадные алюминиевые элементы и детали, как правило, изготовляют из сплавов повышенной коррозионной стойкости с анодированной поверхностью (цветной или бесцветной).

При проектировании ограждающих алюминиевых конструкций необходимо учитывать некоторые особенности, отражающиеся на их внешнем виде. В том числе следует:

- избегать больших плоских поверхностей на фасадах, облицовках, подвесных потолках из тонких листов. Рекомендуется придавать тонким листам какой-либо рельеф. В известной мере скрадывает дефекты матирование листов (в том числе окраска матовыми красками);
- учитывать некоторую разнотонность анодированных алюминиевых деталей, особенно при цветном анодировании, заметную при сплачивании профилей (например, в декоративных облицовках). Рекомендуется расчленять поверхность облицовки каннелюрами. В значительной мере скрадывается разнотонность бесцветным лаком по цветной анодной пленке;
- избегать применения в интерьере больших поверхностей, анодированных в натуральный цвет или без отделки, создающих весьма отрицательный психологический эффект;
- размещать крепежные детали (винты, болты) из углеродистой стали в местах, исключающих появление на видимых поверхностях конструкций ржавых потеков; под стальные крепежные детали следует ставить некорродирующие прокладки (резиновые или пластмассовые);
- подкреплять кромки тонких плоских листов, особенно фасонных деталей (сливов и др.) – отгибами, фальцами и т.д.

При проектировании ограждающих алюминиевых конструкций необходимо обеспечить возможность легкой замены элементов, подверженных ускоренному старению, износу или ремонту (например, уплотнительных прокладок, стекла и т.п.).

При применении деталей из алюминиевых сплавов в сочетании с другими строительными материалами – в оконных и дверных конструкциях, стеновых и кровельных панелях, светоаэрационных конструкциях и т.п. – необходимо учитывать различие в величинах модулей упругости и коэффициентов температурного расширения и предусматривать мероприятия по защите алюминиевых деталей от контактной коррозии.

Крепление панелей к несущему каркасу и конструкция стыков должны обеспечивать: необходимую прочность, надежность и долговечность; восприятие монтажных и эксплуатационных нагрузок; соблюдение расчетного предела огнестойкости ограждающих конструкций; возможность компенсации неточностей изготовления в пределах допускаемых отклонений в несущих конструкциях, а также самих панелей, компенсацию температурных деформаций с сохранением необходимой герметизации стенового ограждения; возможность производить ремонт и замену панелей, а также элементов уплотнения и герметизации стыков; простоту и удобство крепления панелей к несущему каркасу в процессе монтажа, ремонта и демонтажа.

Расчетные перепады температур между наружными и внутренними поверхностями ограждающих конструкций следует принимать с учетом внутреннего температурного режима эксплуатации зданий.

Расчет бескаркасных трехслойных панелей на поперечную нагрузку и температурные воздействия следует производить по «Рекомендациям по расчету трехслойных панелей с металлическими обшивками и заполнителем из пенопласта», ЦНИИСК им.Кучеренко, Москва, 1976 г.

7.8. Примеры конструктивных решений

Приведенные ниже примеры применения алюминиевых сплавов в мировой и отечественной практике показывают, в какой мере и как полно были реализованы их преимущества.

Для перекрытия лабораторного корпуса пролетом 90 метров, в котором был размещен ускоритель синхрофазотрона, необходим был немагнитный материал. Для этой цели был использован алюминиевый сплав марки АВ системы алюминий-магний-кремний. Проект был разработан институтом ЦНИИпроектстальконструкция.

Бесшарнирная арка кругового очертания имеет поперечное сечение в виде равностороннего треугольника со сторонами, равными 2 м, высота сечения – 1,73 мм; или 1/52 пролета; радиус окружности осевой линии арки 106 м; стрела подъема – 10 м.

Верхний пояс арки в сочетании с кровельными алюминиевыми панелями, работающими как жесткие распорки, обеспечивает устойчивость арки из плоскости и воспринимает нагрузки от торцевого фахверка; нижний пояс развязан двумя наклонными гранями, и, таким образом, отпадает необходимость установки системы связей по поясам арки. Кроме того, трехгранное поперечное сечение способно воспринимать скручивающие усилия, возникающие при неравномерном загружении панелей кровли. Для элементов арки были разработаны специальные профили. В качестве заводских и монтажных соединений использованы стальные кадмированные высокопрочные болты из стали 40Х. Многолетняя эксплуатация здания (возведено в 1960 году) дает основание сделать вывод, что высокопрочные стальные болты являются эффективным видом соединения элементов несущих конструкций из термоупрочненных алюминиевых сплавов.

Расход алюминия на несущие конструкции составил 13,9 кг/м^2, на ограждающие – 14 кг/м^2, расход стали – 4,35 кг/м^2. В этом же здании для обслуживания аппаратуры и ремонтно-монтажных работ был смонтирован портальный кран пролетом 86 м и грузоподъемностью 40 т. Вся рама – криволинейный ригель и опоры – выполнена из сплава марки АВ (состояние поставки Т1), а затяжка, на которой

расположены пути катания грузовых тележек – из низколегированной стали 15ХСНД. Для поясов и раскосов решетки и подвесок, так же как и для арки, были разработаны и применены специальные профили. В местах соприкасания алюминиевого сплава и стали установлены две прокладки: одна из листа сплава АВТ, а другая – из оцинкованной стали. Заводские соединения выполнялись на заклепках диаметром 9 и 14 мм из сплава АВТ1. Монтажные соединения выполнены на стальных кадмированных болтах из стали 40Х. Схемы сооружений приведены в гл.12 второго тома справочника.

В районе г. Истра сдана в эксплуатацию в 1972 году теплица площадью 10000 м^2, в которой несущие и ограждающие конструкции покрытия выполнены из алюминиевых сплавов. Разработанные институтом ЦНИИпроектстальконструкция пространственные фермы пролетом 2×36 м представляют собой трехгранную двухпролетную неразрезную систему с одним верхним и двумя нижними поясами. Для сокращения отапливаемого объема теплицы несущий каркас вынесен наружу, что выявляет преимущества алюминия как атмосферостойкого материала и существенно снижает эксплуатационные расходы (рис.7.14). Все элементы ферм (пояса, стойки, раскосы) выполнены из круглых прессованных труб сплава марки 1915Т. Ферма пролетом 36 м собрана из трех отправочных марок длиной 12 м, соединенных на болтах из нержавеющей стали 1Х13 через фланцы. Отправочные марки сваривали в кондукторах и перевозили автотранспортом. Масса одной отправочной марки – около 300 кг. Соединение фермы со стойками шарнирное. Средняя опора внизу закреплена жестко. Крайние стойки имеют внизу шарнирные опоры, благодаря чему стойки могут поворачиваться, компенсируя температурные деформации фермы. Расход алюминия на несущие конструкции составил 4,8 кг/м^2, на ограждающие – 3,8 кг/м^2.

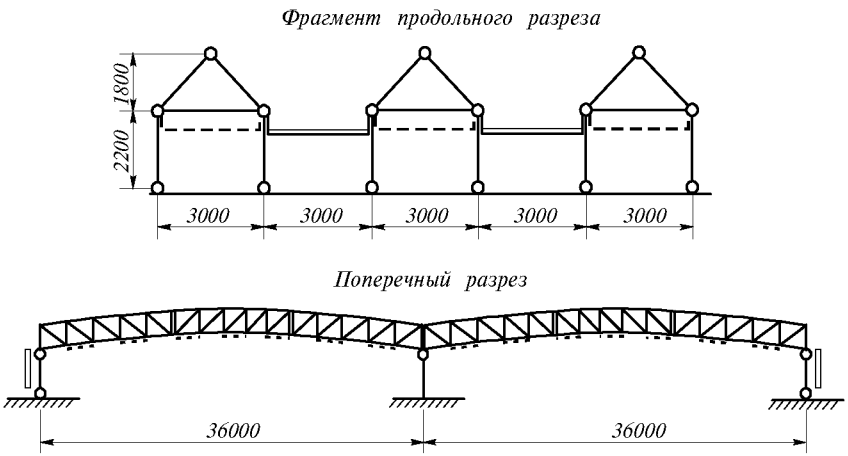


Рис.7.14. Большепролетная теплица из алюминиевых сплавов в г. Истра Московской обл.

В этом же институте разработаны и осуществлены на нескольких объектах алюминиевые сетчатые сферические оболочки, которые могут быть применены в качестве покрытия для промышленных и гражданских зданий пролетом 20 – 60 м. Каркас оболочки и узловые детали выполнены из алюминиевых профилей. Кровля – из алюминиевых листов толщиной 1 мм. Для утепления покрытия с внутренней стороны подвешивается утеплитель. Конструкции изготавливаются на заводе по производству алюминиевых конструкций Мосстройкомитета. Высокая степень сборности, атмосферостойкость и архитектурная выразительность могут обеспечить этим конструкциям широкую область применения в качестве зданий для выставочных павильонов, клубов, районных спортзалов, бассейнов и предприятий общественного питания.



Рис.7.15. Здание астрономической обсерватории РАН
а – общий вид; *б* – алюминиевая ферма забрала пролетом 12 м

Примером эффективного использования алюминиевых сплавов является здание астрономической обсерватории АН СССР, в которой установлен телескоп с линзой диаметром 6 м. Ограждающие конструкции стен и вращающегося купола диаметром 40 м выполнены из алюминиевых трехслойных панелей с пенопластовым утеплителем. Подвижное забрало пролетом 12 м изготовлено также из алюминиевых сплавов (рис.7.15). По фермам, выполненным из круглых прессованных труб сплава марки АМг61, уложены трехслойные алюминиевые панели. За счет резкого снижения инерционных сил от массы подвижных частей сооружения удалось уменьшить мощность приводных механизмов и улучшить режим их работы.

Алюминиевые сплавы весьма эффективны в полносборных конструкциях, совмещающих несущие и ограждающие функции.

В комплексе реализованных институтом ЦНИИПСК им.Н.П.Мельникова новых идей особого внимания заслуживает разработка и осуществление впервые в мировой практике предварительно-напряженной панели покрытия и стен (авторы инж. Г.Д.Попов и д.т.н. В.М.Вахуркин). Стремление использовать полное сечение тонкой сжатой обшивки в общей работе панели на поперечный изгиб привело к созданию принципиально новой конструктивной формы с предварительно-напряженной обшивкой. Для создания в обшивке напряжений, противоположных по знаку возникающим при эксплуатации конструкции, каркас, на который она прикрепляется, предварительно упруго выгибается по кривой, центр которой расположен со стороны обшивки. Схема представлена на рис.7.16. В таком состоянии

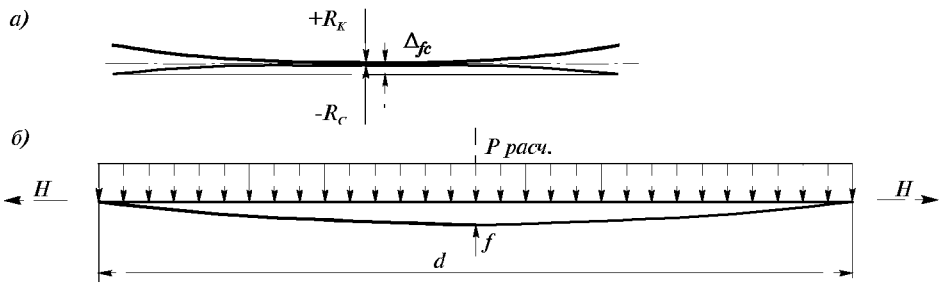


Рис.7.16. Схема преднапряжения мембраны
а – выгиб полупанелей при различных предварительных напряжениях в верхних и нижних обшивках; *б* – схема работы мембраны на местную нагрузку; R_c – радиус выгиба стенда; $R_к$ – радиус выгиба верхней полупанели; Δ_{fc} – строительный подъем стенда; *H* – распор

обшивка прикрепляется к каркасу. При возвращении конструкции в первоначальное положение в обшивке возникают растягивающие напряжения, величина которых зависит от соотношения жесткостей каркаса и обшивки и от заданного начального искривления каркаса. Две полупанели соединяются в одну конструкцию с помощью решетки или нетеплопроводных окаймляющих планок.

Во Всероссийском институте легких сплавов (ВИЛС) с участием ЦНИИСК им.Кучеренко были разработаны конструкции панелей с предварительно-напряженной верхней обшивкой. При изготовлении панелей для зданий пролетом 30 м и 66 м, расположенных на территории ВИЛС, предварительное напряжение в верхней обшивке создавалось иным способом, однако, так же как и в предыдущем примере, преследовалась цель включить в сжатую зону сечения панели максимальную ширину ее верхнего листа. Перекрытия такого типа возведены в Риге, Кишиневе и других городах. Одним из эффективных типов конструкций, совмещающих несущие и ограждающие функции, являются трехслойные панели, у которых наружные обшивки выполняются из тонкого алюминиевого листа, а средний слой из пенопласта, соединяемого с обшивками клеем.

С начала 60-х годов эксплуатируется алмазообогатительный ГОК в г. Мирном Якутской республики САХА. Благодаря применению алюминиево-пластмассовых панелей полной заводской готовности вместо керамзитобетонных, была ощутимо снижена стоимость строительства и на полгода ускорен ввод обогатительного комплекса в эксплуатацию. В таких же конструкциях выполнена кровля и стены здания алмазообогатительного ГОК «Удачная» в Якутской республики, несколько обогатительных фабрик в Магаданской области.

В ЦНИИСК им.Кучеренко были разработаны и осуществлены на ряде объектов ограждающие конструкции – большепролетные кровля и стены из плоского тонкого алюминиевого листа, разматываемого из рулона. В таких конструкциях алюминиевый лист необходимо предварительно напрягать, с тем, чтобы компенсировать температурные деформации при эксплуатации сооружения.

Весьма эффективное решение конструкции, совмещающей несущие и ограждающие функции, разработано в институте УкрНИИпроектстальконструкция. Конструкция представляет собой свод пролетом от 6 до 24 м, собираемый из алюминиевых складок (рис.7.17). Такие своды нашли широкое применение для сооружения складских помещений, как в «холодном», так и в «теплом» варианте. Широкие перспективы использования подобных конструкций открываются при сооружении объектов сельского хозяйства и складских помещений.

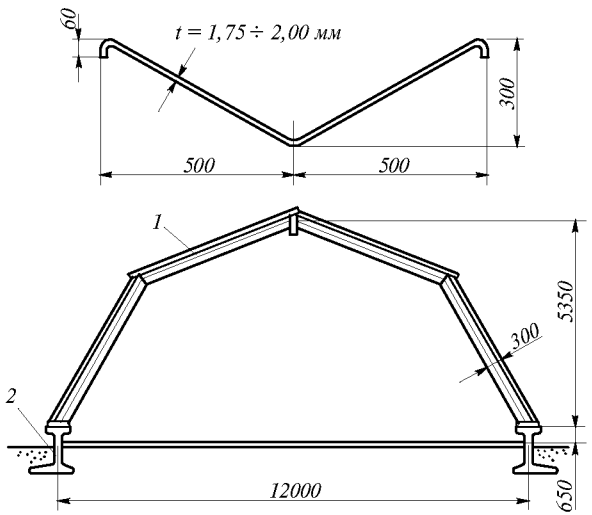


Рис.7.17. Свод из холодногнутых алюминиевых складчатых элементов пролетом 12 м

С начала 80-х годов изготавливаются разработанные ВИЛСом спирально-фальцевые зернохранилища силосного типа. Цилиндрический корпус такого зернохранилища возводят непосредственно на площадке из поставляемой в рулоне

ленты (алюминий марки Амг2Н1) путем формирования ленты на специальной машине и закатки фальцев, соединяющих кромки спиральных витков ленты. Кровлю, рабочие площадки, обрамление люков и др. поставляют на площадку и устанавливают на корпус по мере его навивки. Вся работа ведется с уровня земли. Спирально-фальцевые зернохранилища установлены в ряде хозяйств Латвии, Одесской области, Российского Нечерноземья. Расход алюминия – 10 кг на тонну емкости зернохранилища.

Алюминиевые сплавы находят применение и при устройстве витражей, перегородок, различных элементов интерьеров, что заметно снижает эксплуатационные расходы, существенно повышает эстетические качества фасадов и интерьеров зданий. Так, по проекту ЦНИИпроектстальконструкция им.Н.П.Мельникова в здании московской гостиницы «Россия» применено более 1000 т алюминиевых конструкций в виде витражей, козырьков, подвесных потолков, перегородок и других конструкций.

Алюминиевые сплавы применены в качестве ограждающих конструкций при сооружении обзорных площадок Останкинской телебашни, здания Дома Советов России, многих других зданий Москвы, С.-Петербурга, крупнейших городов стран СНГ.

В 1987 году в районе г.Алушты выстроен комплекс зданий экспериментальной базы Энергетического института РАН, где на двух корпусах впервые применены наклонные алюминиевые стены, совмещенные с солнечными коллекторами (так называемые энергоактивные конструкции). Общая площадь энергоактивных стен составляет 1200 м^2. Применение этих конструкций позволяет снизить расход топлива на отопление здания и подогрев воды в бассейне более, чем на 150 тонн условного топлива в год, а также существенно сократить количество выбросов, загрязняющих окружающую среду.

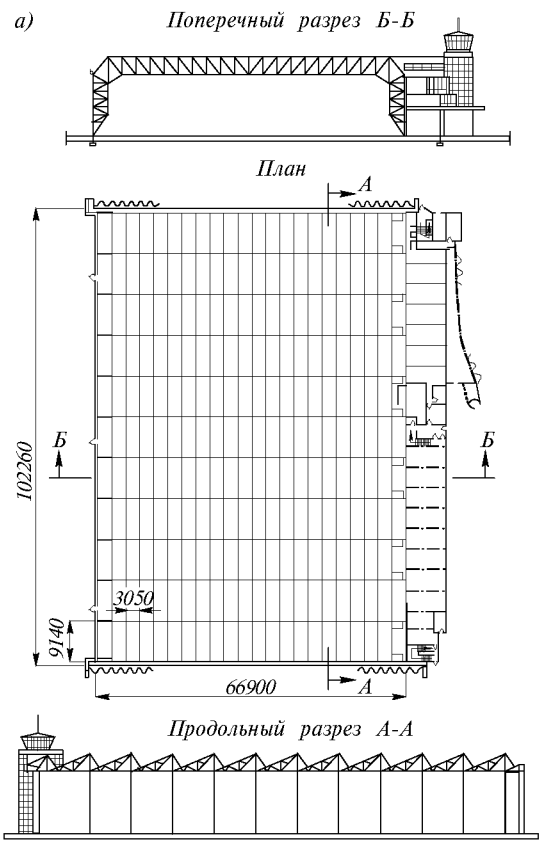


Рис.7.18 *а*. Ангар в Хэтфилде.
Поперечный и продольный разрезы, план здания

Из алюминия изготовлены гелиоприемники, анодированные в черный цвет, каркас прозрачной изоляции (наклонного витража), внутренняя обшивка стены.

Зарубежный опыт также показывает, что имеется широкая область эффективного использования алюминиевых сплавов в несущих и ограждающих конструкциях промышленных и гражданских зданий.

Ангар в Хэтфилде (рис.7.18) – однопролетное здание размерами в плане 100,6×66,1 м. Несущие конструкции выполнены в виде двухшарнирных решетчатых рам. Прогоны по ригелям рам расположены таким образом, что образуют

шеды, вертикальные плоскости которых остеклены, а наклонные покрыты волнистым алюминиевым листом. Расход алюминия на несущий каркас и связи составил 20 кг/м^2. Масса конструкций составила около 35% массы подобного стального каркаса, благодаря чему по стоимости алюминиевый вариант оказался экономичнее стального.



Рис.7.18 *б*. Ангар в Хэтфилде. Монтаж несущих конструкций

Здание склада Бельгийской морской компании в Антверпене имеет ширину 80 м, длину 250 м, высоту от уровня пола до низа конструкции покрытий посередине пролета 18,5 м. Основными несущими элементами каркаса являются двухшарнирные рамы пролетом 80 м с решетчатыми алюминиевыми ригелями и прогонами и стальными стойками сплошного сечения (рис.7.19). Заводские соединения – клепаные (кроме сварных прогонов); монтажные – на стальных кадмированных болтах. Для кровли применены волнистые листы толщиной 1 мм из технического алюминия, аналогичного отечественному сплаву АД1. Общая масса несущих алюминиевых конструкций 127 т, масса кровли 65 т.

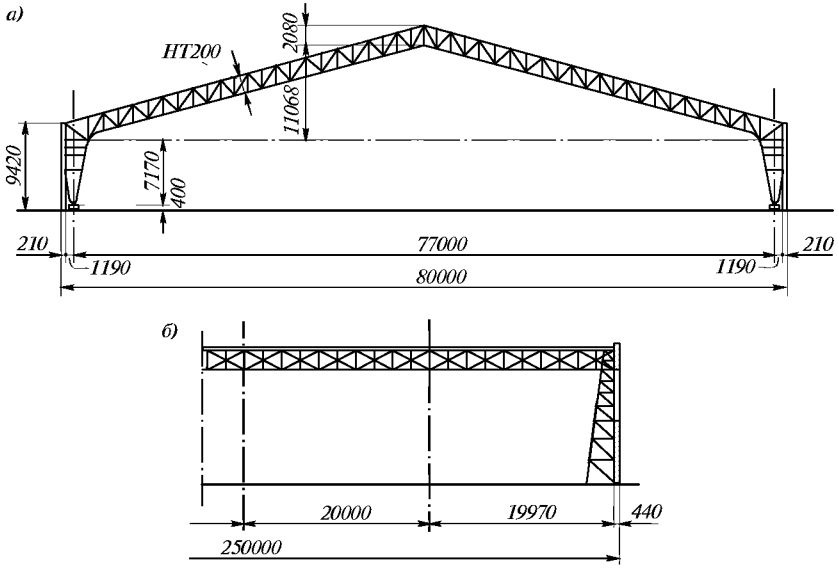


Рис.7.19. Здание склада морской компании в Антверпене
а – поперечный разрез; *б* – фрагмент продольного разреза

Масса алюминиевых конструкций составила приблизительно 1/7 стального эквивалента, а стоимость алюминиевых конструкций оказалась ниже стоимости стальных.

В здании павильона транспорта на Всемирной выставке в Брюсселе (рис.7.20) размерами в плане 69×192 м несущие конструкции выполнены из алюминия в виде решетчатых ферм, имеющих дополнительные стойки и подвески. Наличие такой решетки уменьшает свободные длины элементов, что особенно важно для конструкций из алюминиевых сплавов. Кровля также выполнена из профилированных алюминиевых листов.

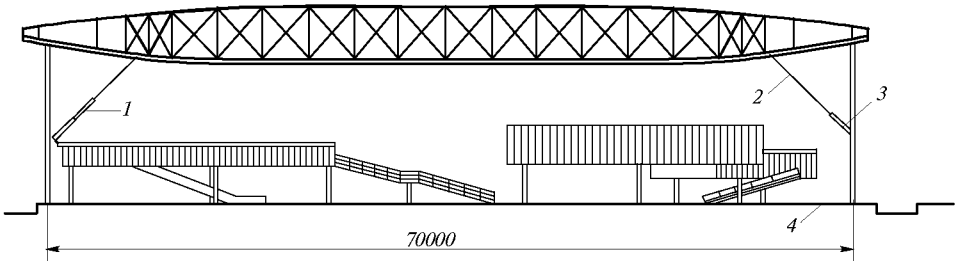


Рис.7.20. Павильон транспорта на Брюссельской международной выставке 1958 г. Несущие фермы пролетом 69 м

1 – стальная труба диаметром 200 мм; *2* – тросы ветровых связей; *3* – компенсационная пружина; *4* – железобетонное основание

Алюминиевые сплавы широко применяются за рубежом в конструкциях куполов, где элементы совмещают несущие и ограждающие функции. При выборе материала для куполов учитывались атмосферостойкость, архитектурная выразительность и технологичность образования пространственных элементов из алюминиевых сплавов. Один из многочисленных куполов, возведенных во многих странах мира, так называемых, «геодезических» Фулера был сооружен в 1959 г. в Москве. Основным элементом купола является алюминиевый анодированный лист в форме ромба, согнутый по большой диагонали. Вершины ромба – по малой диагонали соединены распорками из алюминиевых круглых труб. Между собой такие пространственные элементы купола соединены стальными кадмированными болтами посредством специальной стальной штампованной детали.

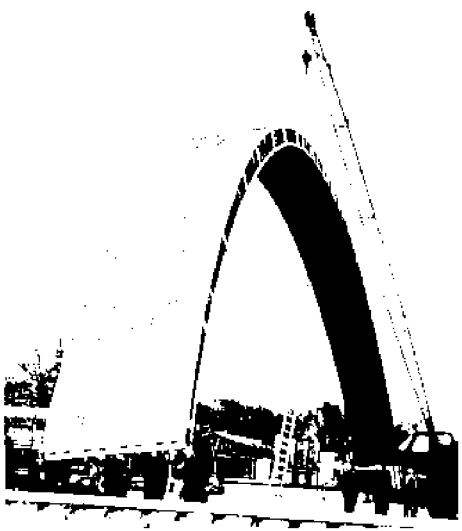


Рис.7.21. Арочные трехслойные алюминиевые конструкции пролетом 40 м (Венгрия)

В Венгрии были разработаны и осуществлены арочные системы из алюминиевых сплавов пролетом до 40 м, где в качестве арки применены криволинейные элементы, образованные двумя слоями профилированного листа, соединенными решеткой из алюминиевых профилей (рис.7.21).

В Будапеште цилиндрическим сводом пролетом 24 м перекрыт бассейн. Свод представляет собой трехслойную конструкцию, в которой наружные слои выполнены из алюминиевых профилированных листов, а средний слой – из пенополиуретана. Клеевой слой обеспечивает хорошее соединение пенополиуретановой теплоизоляции с алюминиевыми листами по всей поверхности их касания. Для регулирования температурно-влажностного климата в бассейне, а также для возможности освещения бассейна

в летнее время естественным светом часть покрытия выполнена раздвижной (рис.7.22). Легкий вес, коррозионная стойкость, высокая теплоизолирующая способность, герметичность – эти бесспорные достоинства доказали преимущества такой конструкции над традиционными решениями. Алюминиевые сплавы применяются и для различных инженерных сооружений.

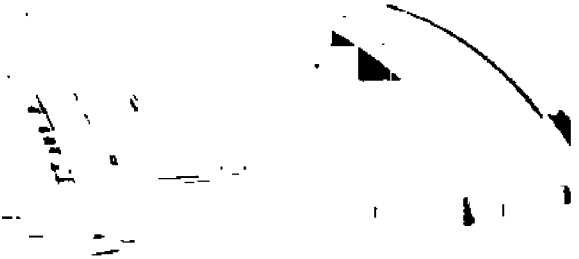


Рис.7.22. Раздвижное покрытие бассейна из арочных алюминиевых трехслойных элементов пролетом 24 м (Венгрия)

В Германии в г.Вайхингене для устройства покрытия над стоянкой автомобилей применены алюминиевые профилированные листы в оболочке покрытия в форме гиперболического параболоида. Покрытие решено в виде зонта размерами в плане 15×15 м, разделенного на четыре равные части размерами в плане 7,5×7,5 м в форме гиперболического параболоида. Для изготовления оболочки были использованы алюминиевые профилированные листы толщиной 1 мм из сплава системы Al-Mg с трапецеидальной формой гофра, высотой 80 мм. Подкрепляющие гофрированный лист снизу ребра жесткости, расположенные в третях пролета и окаймляющие элементы выполнены из прессованных алюминиевых профилей системы Al-Mg-Si (рис.7.23). Масса 1 м^2 оболочки, включая элементы усиления, составила 10 кг. Оболочка рассчитана на снеговую нагрузку 75 кгс/м^2 при равномерном загружении и 37,5 кгс/м^2 – при одностороннем. Ветровая нагрузка – 15 кгс/м^2 при положительном давлении и 30 кгс/м^2 – при отсосе. Специалисты считают, что гиперболические оболочки, составленные из прямолинейных элементов, могут найти применение для покрытий зданий и сооружений с сеткой опор до 30×30 м.

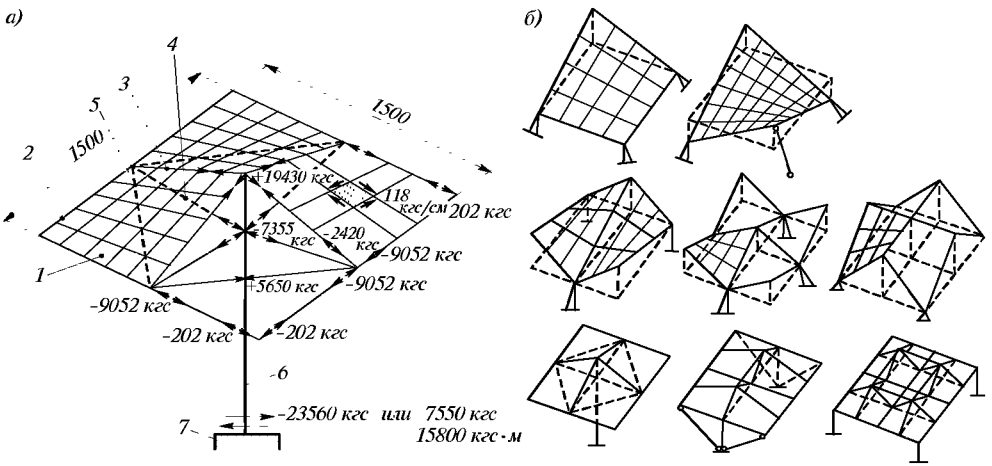


Рис.7.23. Зонтичная гиперболическая оболочка из алюминиевых профилированных листов
а – конструктивная схема зонтичной оболочки; *1* – оболочка; *2* – краевое ребро; *3* – промежуточное ребро; *4* – распорка; *5* – затяжка; *6* – колонна; *7* – фундамент; *б* – некоторые варианты схем гиперболических оболочек

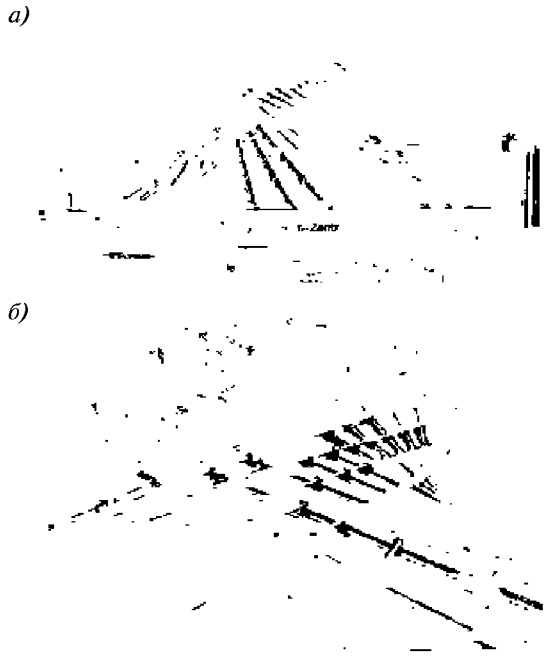


Рис.7.24. Выставочный павильон в Ганновере (Германия)
а – общий вид оболочки; *б* – фрагмент оболочки

На территории ярмарки в г.Ганновере фирмой «Aluminium Trade» построен выставочный павильон диаметром круга в плане 32 м и высотой 10 м. Общая выставочная площадь 580 м^2. Покрытие здания выполнено в форме гиперболоида вращения системы Шухова, имеющего решетчатую конструкцию. Решетка (рис.7.24) образована двумя системами перекрещивающихся разнонаклонных прямолинейных неразрезных трубчатых элементов (по 48 шт. в каждой), соединенных между собой специальными узловыми элементами. Трубчатые элементы диаметром 80 мм, с толщиной стенки 8 мм выполнены из алюминиевого сплава марки Al-Zn-Mg1F36. Узловые элементы также выполнены из алюминиевого литейного сплава марки GKAlSi10Mg в термообработанном состоянии. Каждый узловой элемент состоит из четырех литых дисков диаметром 196 мм, толщиной 54 мм с полуцилиндрическими выемками для пропуска трубчатых элементов. Два средних диска соединены между собой центральным болтом из высокопрочной нержавеющей стали, крайние соединены с соответствующими средними двумя болтами. При таком решении узла обеспечивается неразрезность трубчатых элементов решетки, возможность соединения их под любым углом и образование плеча между соединяемыми элементами, что благоприятствует восприятию изгибающих и крутящих моментов.

Концы трубчатых элементов закреплены в нижнем (опорном) и верхнем (центральном) кольцах. Опорное кольцо решено в виде многоугольника и состоит из 48 элементов коробчатого сечения шириной 500 мм, высотой 180 мм с наружной стороны и 520 мм с внутренней. Элементы изготовлены из листов алюминиевого сплава толщиной 8 мм и подкреплены листовой диафрагмой. Опорное кольцо поддерживается 12 железобетонными колоннами. Центральное кольцо имеет также форму многоугольника, но собрано оно из элементов открытого швеллерного сечения. Это кольцо служит одновременно основанием конусообразного фонаря верхнего света диаметром около 10 м.

Кроме нижнего и верхнего колец, в конструкции покрытия предусмотрены три промежуточных кольца жесткости, выполненных из трубчатых профилей диаметром 100 мм со стенкой толщиной 12 мм и соединенных со всеми трубчатыми элементами гиперболической решетки.

Ограждающая часть покрытия (обшивки) выполнена из листов светопрозрачного стеклопластика и листов алюминиевого сплава марки AlMg3F23. Листам придана форма ромба различных размеров. Все элементы из алюминиевых сплавов как решетки, так и обшивки анодированы. Общая масса конструкций из алюминиевых сплавов составила 33 т.

Примером синтеза эффективного технологического и конструктивного решения покрытия, выполняемого из алюминиевых сплавов, может служить разработанная австрийскими специалистами система «Пара», представляющая собой своды-оболочки двоякой кривизны, способные перекрывать пролеты до 20 метров (рис.7.25). Такое покрытие совмещает несущие и ограждающие функции и может быть осуществлено как в «холодном», так и в «теплом» варианте. В последнем случае утеплитель закладывается между двумя слоями оболочки или подвешивается к нижней оболочке.

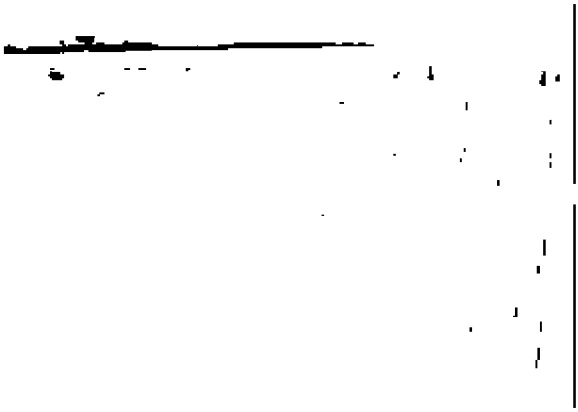


Рис.7.25. Элементы двоякой кривизны сводчатых покрытий из алюминия системы «Пара" (Австрия)

Еще один пример, когда совместное решение конструкторов и технологов эффективно осуществлено на практике, показан ниже.

В Германии широко применяется система покрытий и ограждений стен, состоящая из тонкостенных профилей из алюминиевого сплава, соединяемых на монтаже между собой с помощью специального устройства, плотно завальцовывающего кромки соседних листов. Эта конструктивная система, получившая название «Кал-Цин», отличается от подобной системы фирмы «Кайзер» по характеру соединения соседних элементов (рис.7.26) тем, что оказалось технологически возможным совместить в одном агрегате формообразование профилированного листа с последующим изгибом его по требуемому радиусу.

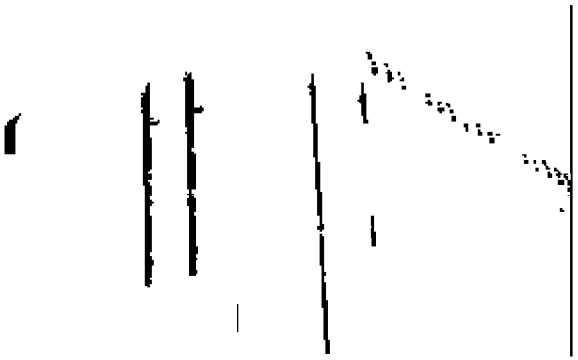


Рис.7.26. Фрагмент наружного ограждения здания с применением криволинейных профилированных листов системы «Кал-Цин» (Германия)

Особенностью агрегата является то, что после гиба спрофилированного листа обеспечивается неизменность исходных размеров профиля.

Конструкция системы «Кал-Цин», создавая прочную и жесткую систему, улучшает эксплуатационные и эстетические качества ограждающих конструкций.

Учитывая высокие эстетические свойства алюминиевых конструкций и технологические возможности формообразования профилей различной конфигурации, алюминиевые сплавы нашли широкое применение в ограждающих конструкциях светопрозрачных и глухих элементов стен и покрытий.

Имеется множество случаев совмещения несущих и ограждающих функций в элементах витражей, импосты которых воспринимают значительные нагрузки. В проектах ВИЛС, Моспроекта, ЦНИИпроектстальконструкция им.Мельникова применены конструктивные решения, в которых импосты витражей осуществляют функции фахверка, поэтому к ним предъявляются все требования как к несущим конструкциям.

На рис.7.27 – 7.30 показаны примеры применения алюминиевых сплавов в витражах за рубежом.

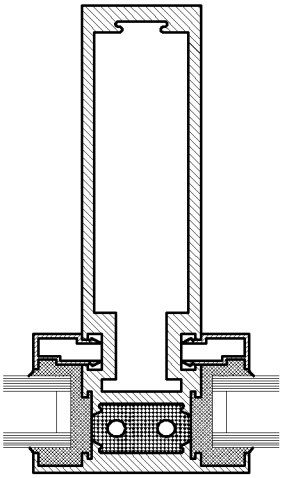


Рис.7.27. Деталь витража промышленного здания (Швейцария)

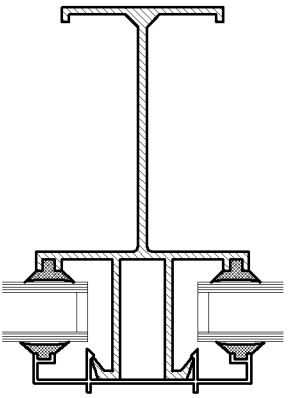


Рис.7.28. Деталь витража здания часового завода в Бриг-Бюле (Швейцария, "Алюсюис")

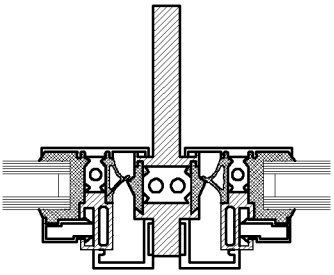


Рис.7.29. Деталь витража промышленного здания в Копенгагене (Дания)

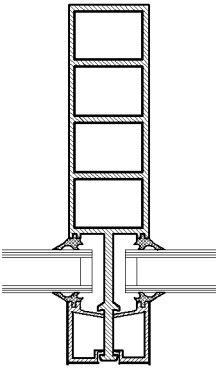


Рис.7.30. Деталь витража здания в Бергене (Норвегия, "Алюсюис")

В различных странах мира построено свыше 30 мостов, в пролетных строениях которых использованы алюминиевые сплавы. Мост в Канаде через реку Сегеней имеет полную длину 153 м (рис.7.31) и основной русловый пролет 88,5 м, перекрытый бесшарнирными арками коробчатого сечения высотой 1,39 м. На мост, при полной его ширине около 10 м, было затрачено всего около 170 т алюминиевого сплава марки 26 ST (аналог отечественного сплава Д16 системы алюминий-медь-магний-марганец), имеющего предел текучести 350 МПа и принятое основное допускаемое напряжение 147 МПа.

Алюминиевые сплавы находят применение также в краностроении. Во Франции стальные стрелы на двух кранах-драгляйнах были заменены алюминиевыми, что позволило удлинить их на 50% при сохранении грузоподъемности кранов. Из алюминиевых сплавов 2024-Т6 системы алюминий-медь-магний изготовляют стрелы кранов, элементы которых соединяют на болтах или заклепках.

Алюминиевые сплавы используются за рубежом и в мачтовых конструкциях. В Англии построены телевизионные опоры высотой 18,3 м и массой 152 кг, в Германии – радиомачты высотой 76 м, имеющие массу 1 т, а также опоры линий электропередачи.

Алюминиевые сплавы находят применение в конструкциях буровых платформ для морских нефтепромыслов. Для таких конструкций применяют сплав марки 6063-Т6 системы алюминий-магний-кремний в виде труб с внешним диаметром 860 мм и толщиной стенки 9,4 мм.

Из алюминиевых сплавов успешно изготовляют различного назначения коррозионно стойкие трубопроводы, вентиляционные короба, нефте- и газопроводы, резервуары для хранения сжиженных газов и нефтепродуктов.



Рис.7.31. Мост из алюминиевых сплавов через р. Сегеней с русловым пролетом 88,5 м (Канада)

7.9. Оценка экономической эффективности применения алюминиевых сплавов

Экономическая эффективность применениям алюминиевых сплавов в строительных конструкциях определяется рядом факторов.

Эти факторы включают в себя такие показатели, как стоимость сплава, из которого выполнен полуфабрикат; стоимость технологической переработки в изделие, которая зависит от выбранного типа конструкции и методов антикоррозионной защиты; стоимость транспортировки, зависящая от компактности перевозимых элементов и методов, предусматривающих их безопасную транспортировку до строительной площадки, а также сохранение их эксплуатационных свойств; стоимость монтажа, которая включает трудозатраты на монтаж и сроки возведения конструкций; стоимость эксплуатационных расходов, которая определяется нормативами, устанавливаемыми в зависимости от назначения конструкции, и условий ее эксплуатации; ремонтопригодность.

При определении эффективности применения алюминиевых сплавов по отношению к конструкциям из других материалов должны быть обеспечены следующие условия сопоставимости:

- сравниваются конструкции одинакового назначения, запроектированные в соответствии с действующими Строительными нормами и правилами и техническими условиями для одного и того же района строительства, одинаковых условий эксплуатации;
- конструкции рассчитываются на одинаковые нагрузки;
- в отапливаемых зданиях учитывается разница эксплуатационных затрат на отопление;
- стоимости конструкций сравниваются на основе единой сметно-нормативной базы;
- для высотных и протяженных инженерных сооружений – мачт, башен, градирен, путепроводов и т.д. – приведенная стоимость 1 т конструкций;

- при сравнении эксплуатационных затрат учитываются за один и тот же период эксплуатации все затраты как профилактического характера, так и необходимые замены конструкций в связи с потерей ими эксплуатационных свойств.

При проведении сопоставительных расчетов для определения экономической эффективности применения алюминиевых сплавов рекомендуется руководствоваться «Методическими рекомендациями по оценке экономической эффективности применения алюминиевых конструкций», разработанных ВНИЭУС Госстроя СССР.

ГЛАВА 8

ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПОЛУФАБРИКАТОВ И КОНСТРУКЦИЙ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

Процесс изготовления алюминиевых конструкций состоит из нескольких переделов: металлургического (изготовление полуфабрикатов: профилей, лент, листов), нанесения защитно-декоративных покрытий, заготовительного (механическая обработка) и сборочного.

Гладкие листы и ленты (иногда окрашенные) поступают на заводы алюминиевых конструкций с металлургических заводов.

Прессованные профили обычно изготавливают на заводах алюминиевых конструкций из заготовок, поставляемых с металлургических заводов или отливаемых в собственных литейных цехах. Основные сведения о возможностях профильных цехов заводов строительных алюминиевых конструкций приведены в гл.6.

Нанесение покрытий производится в соответствующих цехах заводов алюминиевых конструкций, где могут быть подвергнуты цветному анодированию детали длиной до 7 м, бесцветному анодированию (анодированию в натуральный цвет) – до 12 м при ширине деталей до 2 м. Лакокрасочные покрытия наносят на детали длиной до 6м при ширине до 2 м.

Сравнительные технологические характеристики (в баллах) алюминиевых сплавов, наиболее широко применяемых в строительстве, приведены в таблице 8.1.

Таблица 8.1. Сравнительные технологические характеристики алюминиевых сплавов, применяемых в строительстве

Сплавы и их состояние	Сопротивление коррозии		Обрабатываемость в холодную ***	Обрабатываемость резанием ***	Паяемость****	Свариваемость ****		
	общая коррозия *	коррозия под напряжением **				газовая	дуговая	точечная и роликовая
1	2	3	4	5	6	7	8	9
АД1 без т/о	5	5	4	2	5	5	5	5
Н2	1	5	5	1	5	5	5	5
Н	1	5	4	2	5	5	5	5
М	1	5	5	1	5	5	5	5
АМц без т/о	1	5	4	2	5	5	5	5
Н1	1	5	5	1	5	5	5	5
Н2	1	5	4	2	5	5	5	5
Н3	1	5	3	2	5	5	5	5
Н	1	5	3	2	5	5	5	5
М	1	5	5	1	5	5	5	5

Продолжение табл.8.1.

1	2	3	4	5	6	7	8	9
АМц2 без т/о	1	5	4	2	3	5	5	5
Н1	1	5	4	2	3	5	5	5
Н2	1	5	4	3	3	5	5	5
Н3	1	5	3	3	3	5	5	5
Н	1	5	3	3	3	5	5	5
М	1	5	5	2	3	5	5	5
АМг3 без т/о	1	5	3	3	2	3	5	5
Н2	1	5	4	3	2	3	5	5
М	1	5	5	2	2	3	5	4
АМг5 без т/о	1	3	5	3	2	3	5	5
М	1	4	3	2	2	3	5	4
АД31 без т/о	1	5	4	3	5	5	5	5
Т	1	5	4	3	5	5	5	5
Т1	1	5	3	4	5	5	5	5
Т5	1	5	3	4	5	5	5	5
АВ без т/о	2	5	4	3	5	5	5	5
М	2	5	5	2	5	5	5	5
Т	2	5	4	3	5	5	5	5
Т1	2	5	3	4	5	5	5	5
1915 без т/о	1	5	4	3	4	3	5	4
Т	1	5	4	3	4	3	5	4
1925, 1935 без т/о	1	5	4	3	3	3	4	3
Т	1	5	4	3	3	3	4	3

Примечания:

* общую коррозионную стойкость сплавов оценивают по десятибалльной системе, в соответствия с ГОСТ 13819-68:1 – совершенно стойкие; 2,3 – весьма стойкие; 4,5 – стойкие; 6,7 – пониженно стойкие; 8,9 – малостойкие; 10 – нестойкие.

** Сопротивление сплавов коррозии под напряжением оценивают по пятибалльной системе: 5 – весьма стойкие; 4 – стойкие; 3 – удовлетворительная стойкость; 2 – пониженная стойкость.

*** Обрабатываемость сплавов давлением в холодную оценена баллами от 5 до 2, а обрабатываемость резанием – баллами от 5 до 1. Качество снижается от 5 к 1 баллу.

**** Свариваемость (паяемость) сплавов баллами от 5 до 2 характеризуют таким образом: 5 – сварка (пайка) с использованием всех промышленных приемов и методов; 4 – сварка (пайка) с использованием специальной техники, приемов, методов или применительно к специальным областям; сварка требует предварительных проб и испытаний с целью усовершенствования сварочных приемов и оборудования; 3 – пониженная свариваемость (паяемость) из-за чувствительности к трещинам или вследствие снижения сопротивления коррозии и механических свойств; 2 – сварку (пайку) не используют.

8.1. Технология изготовления конструкций из профилей

Заготовительный и сборочный переделы конструкций из профилей осуществляют в отдельных цехах или в общем заготовительно-сборочном цехе. Обработку алюминиевых профилей производят на металлорежущих станках (отрезных, фрезерных, сверлильных) и прессах. Огневая резка алюминия не применяется вовсе. Практически все профили, изготовленные собственными профильными цехами заводов строительных алюминиевых конструкций, могут быть обработаны на оборудовании заготовительных цехов. При получении крупногабаритных профилей со стороны (с металлургических заводов) следует проверить возможности станочного парка, в первую очередь – отрезных станков.

На сборке наиболее часто применяют резьбовые соединения, осуществляемые с использованием ручного инструмента. Широкое распространение получила запрессовка в алюминиевые профили мелких закладных деталей, предназначенных для осуществления угловых соединений окон, дверей и др. Следует иметь в виду, что доля разметки, наметки, применения шаблонов для сверления отверстий или крепежа в балансе трудоемкости изготовления алюминиевых конструкций значительно ниже, чем стальных, так как уже в прессованных профилях значительная часть этой работы оказывается выполненной. Например, наличие винтового канала однозначно определяет положение винта в будущем соединении; специальные риски, служащие линией постановки винтов и др., образуются при прессовании профиля и не требуют специальной наметки; положение штапиков на основном профиле также строго фиксируется лапками и другими выступами или пазами.

При соединениях элементов и деталей с помощью электродуговой сварки необходимо учитывать специфические свойства алюминия.

В отличие от многих металлов алюминий не растворяет свои окислы. Поэтому при сварке пленка окисла, имеющая удельный вес 3,69 г/см^3 и температуру плавления – 2050 °С может опуститься в расплавленный алюминий и расположиться в сварном шве в виде слоя или отдельных включений. Это приводит к снижению механической прочности шва и коррозионной стойкости. Для уменьшения этого отрицательного явления сварные швы выполняются в среде инертного газа (аргон или смесь аргона с гелием) с нанесением их на предварительно зачищенные и протравленные кромки алюминиевых деталей.

При применении сварки плавящимся электродом сварочная проволока должна быть протравлена не более чем за 18 часов до начала сварки. При сравнительно низкой температуре плавления алюминий имеет очень высокие теплоемкость, теплопроводность и скрытую теплоту плавления. Поэтому, несмотря на низкую температуру плавления, для его сварки требуется сварочный ток примерно в 1,2 – 1,5 раза больший, чем для сварки нержавеющих сталей. Объемная усадка расплавленного алюминия при затвердевании больше, чем у многих металлов и сплавов. Это приводит к большим внутренним напряжениям (или деформациям) при местном нагреве, который является характерным для сварки. Кроме того, большая усадка отрицательно влияет па деформирование шва. В конце шва после обрыва дуги образуется кратер, возможно также возникновение трещин. Чтобы уменьшить эти отрицательные последствия сварки, особо ответственные конструкции (толстостенные и крупногабаритные) перед сваркой и в процессе сварки нагревают до 250 – 300 °С газовыми горелками, паяльными лампами и т.п.

На интенсивность подогрева влияет температура окружающего воздуха. При сварке тонкостенных и небольших деталей из-за быстрого нагрева детали, приходится, во избежание прожогов, увеличивать скорость сварки или уменьшать сварочный шов. Если при ручной сварке это легко сделать, то при автоматической сварке для этого необходимо применять микропроцессорные устройства. Ручную аргонодуговую сварку вольфрамовым электродом рекомендуется применять для сварки элементов толщиной от 1,6 мм и более швами всех видов в горизонтальном и вертикальном положениях, а толщиной 1,0 – 1,5 мм – только внахлестку или по отбортовке. Сварку ведут на специализированных установках УДГ. Скорость ручной сварки невелика, за один проход можно наложить валик толщиной не более 5 – 6 мм при скорости 4 – 5 м/час.

Автоматическую аргонодуговую сварку вольфрамовым электродом рекомендуется применять для соединения элементов толщиной не менее 2 мм всеми видами швов в горизонтальном положении и при протяженности прямолинейных швов более 1000 мм. Сварку ведут при помощи автоматов АДНГ, АДСВ, АГВ, АСП, УСП. Скорость сварки – 5 – 25 м/час.

Сварку сопротивлением (контактную сварку давлением) применяют для соединения листов (иногда - тонкостенных сплошных профилей) внахлестку или с накладками. Различают сварку отдельными точками (контактная точечная сварка) и сварку сплошным швом (контактная роликовая или шовная сварка). Суть процесса заключается в том, что при прохождении тока большой силы соединяемые детали, особенно на соприкасающихся поверхностях, нагреваются до тестообразного, частично - расплавленного состояния, и после отключения тока под давлением соединяются друг о другом. При этом окисная пленка выдавливается из зоны сварки.

Диапазон толщин листов, свариваемых контактным способом - 0,2 - 5,0 мм (наиболее распространена сварка листов толщиной 0,8 - 3,0 мм). Лучшее качество сварки получают при соединении листов одинаковой толщины. Нормы рекомендуют сваривать детали при соотношении толщин не более 1:3. Максимальная ширина листов, свариваемых контактной сваркой, определяется вылетом консолей сварочной машины, колеблющимся в машинах различных марок от 300 до 1500 мм. Слишком близкое расположение точек друг к другу приводит к снижению прочности отдельной точки, поэтому нормы проектирования алюминиевых конструкций ограничивают минимальное расстояние между отдельными сварными точками в зависимости от толщины свариваемых листов и диаметров сварных точек.

Для получения сплошного шва применяют роликовую сварку, которой обычно соединяют алюминиевые листы не толще 2,5 мм. Роликовая сварка осуществляется короткими импульсами при одинаковых силе тока и продолжительности импульса. Роликовая сварка - разновидность точечной, при которой точки накладываются одна на другую. Требуемые сила тока и усилие сжатия на электродах при роликовой сварке примерно на 25% выше, чем при точечной. Контактную сварку ведут на сварочных машинах типа МТПР, МГПУ, МТИПИ, МТПГ.

Стыковую сварку оплавлением применяют для соединения под углом профилей одинакового сечения. Суть сварки оплавлением заключается в сближении находящихся под током профилей, в результате чего между ними возникает дуга, а после оплавления торцов профили прижимают друг к другу, часть оплавленного алюминия выжимается наружу, а по сечению профилей образуется сварной шов высокого качества. Выдавленный наружу металл удаляют и зачищают место сварки. В настоящее время стыковую сварку оплавлением применяют сравнительно редко в связи с неэффективным использованием ванн анодирования при работе со сваренными рамками.

Механическая обработка полуфабрикатов и другие технологические операции идентичны операциям при изготовлении стальных конструкций. Необходимо только более внимательно контролировать линейные размеры деталей, учитывая высокие значения термического расширения алюминия.

8.2. Технология изготовления листовых конструкций

Изготовление профилированных листов, используемых в качестве кровельных и стеновых панелей, а также в перегородках, подвесных потолках и т.п., осуществляется на универсальных профилегибочных станах, имеющих сменные валки.

Максимально возможная высота гофров, которую можно получить на станах, установленных на заводах алюминиевых конструкций - 80 мм, ширина - 1350 мм (при ширине заготовки до 1540 мм). На станах профилирования реек - 40 мм и 450 мм соответственно. Типичные параметры профилированных листов приведены на рис.8.1 и в табл.8.2.

Мелкие партии фасонных деталей, комплектующих стены, кровли, потолки (элементы примыкания к соседним конструкциям, карнизы, покрытие парапетов, коньковые листы кровель) изготавливают на гибочных прессах. Размеры листов,

обработанных на гибочных прессах, ограничиваются расстоянием между колоннами пресса, обычно не превышающим 2,5 – 3,3 м при длине ножа 4 – 6 м и выносе консоли 250 – 500 мм (таблица 8.3).

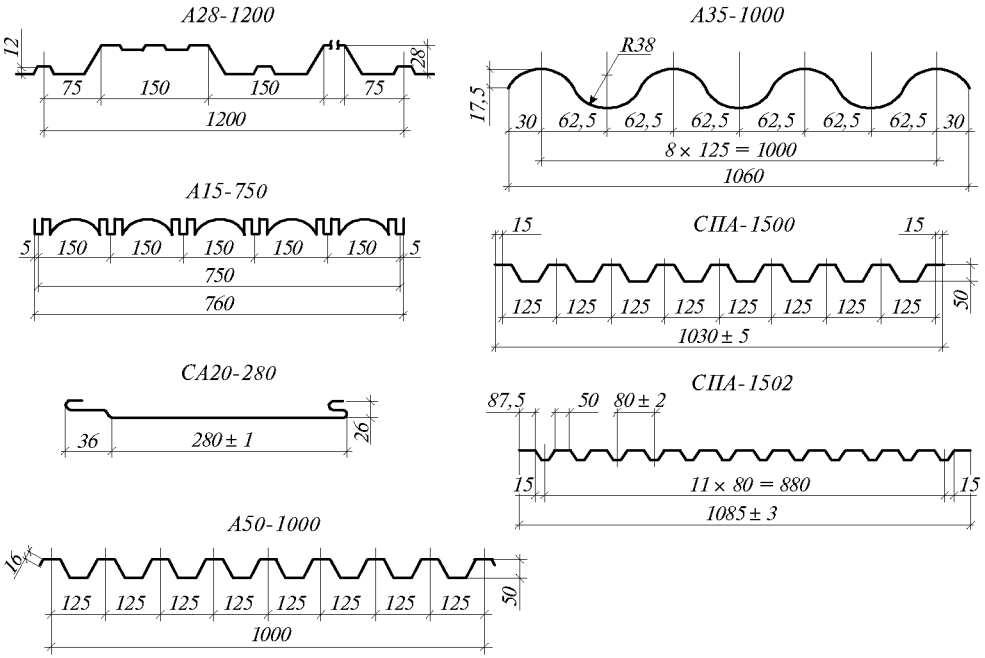


Рис.8.1. Геометрические параметры профилированных алюминиевых листов

Таблица 8.2. Профилированные листы (профили холодногнутые)

Марка	Толщина	Длина не более	Ширина заготовки	Площадь сечения, см^2	Масса, кг		J_x на 1 м ширины, см^4
					1 п.м.	1 м^2	
А50-1000-0,8	0,8	7800	1440	10,87	3,02	3,02	39,10
А50-1000-1,0	1,0			13,60	3,78	3,78	48,80
А28-1200-0,8	0,8	6000	1420	11,36	3,11	2,47	10,17
А28-1200-1,0	1,0			14,20	3,89	3,09	12,72
СА20-280-0,8	0,8	6000	386	3,09	0,83	2,61	3,1
СА11-210-0,8	0,8	6000	256	2,05	0,55	2,52	-
СА11-210-1,0	1,0			2,56	0,69	3,15	-
СПА-1500*	1,0	6000	1440	14,20	3,85	-	47,85
	1,2			-	4,5	-	-
	1,5			21,60	5,71	-	67,85
	1,8			-	6,75	-	-
	2,0			28,13	7,62	-	92,3
СПА-1502*	1,0	6000	1250	12,33	3,34	-	2,16
А35-1000**	0,8	7000	1245	9,93	2,68	2,53	8,24
	1,0			12,41	3,35	3,16	10,32
А15-750	0,8	6000	1028	8,22	2,20	2,12	2,26
	1,0			10,28	2,78	3,65	2,94

* изготавливается на Видненском заводе алюминиевых конструкций Мосстройметаллоконструкция.

** изготавливается на Самарском металлургическом заводе.

При профилировании на многоклетьевых станах широкие плоские участки листа могут потерять устойчивость (дефект имеет вид поперечных волн, особенно явственно видных на кромках листов). Не рекомендуется оставлять по краям листа плоские поля, не подкрепленные отбортовкой, более 30 - 40 мм, а в средней части листа - более 350 - 400 мм (размеры даны для листов из алюминия марки АМг2Н2 толщиной 0,8 - 1,0 мм). Радиусы гиба листов из алюминия этой марки следует назначать не менее 2,0 - 2,5 толщин листа.

Таблица 8.3. Некоторые ограничительные размеры гибочных прессов (мм)

Характеристики	Модель пресса				
	И-1330 (РФ)	АПЛ160 (Германия)	МАРУ (Япония)	КОЛЛИ (Франция)	И-1330А (РФ)
Длина ползуна и стола (А)	2550	4000	6100	4050	4050
Расстояние между стойками в свету (а)	2050	2550	3940	3100	2550
Вылет консоли (в)	250	250	250	500	250
Ход ползуна	80	100	150	250	80
Наибольшее расстояние между столом и кромкой ножа в нижнем положении (Н)	320	400	300	250	320
Усилие (тс)	100	100	100	140	100

Для изготовления панелей подвесных потолков с отбортовкой по четырем сторонам применяют автоматизированные прессовые линии. Характеристики линий панельных подвесных потолков, установленных на Воронежском (линия № 1) и на Видненском (линия № 2) заводах алюминиевых конструкций, приведены в табл.8.4.

Таблица 8.4.

Номер линии	Усилие прессов (тс)	Производительность (шт./мин)	Размер панелей (мм)
1	200 + 200	3 - 4	1200×600
		6 - 8	600×600
2	150 + 200 + 150	5 - 6	500×500
			600×600

Профилированные элементы более сложной формы, в том числе объемно штампованные, изготавливают на прессах усилием 200 - 650 тс. Номенклатура объемно-штампованных изделий, выпускаемых заводами алюминиевых конструкций, в настоящее время ограничивается несколькими рисунками, что объясняется сложностью изготовления штампов.

Листовые отделения заготовительных цехов, помимо перечисленного оборудования, оснащаются также: листовыми ножницами для раскроя ленты на заготовки, подвергающиеся гибке на гибочных прессах и штамповке; мелкими механическими прессами для вырубки небольших фасонных деталей или образования соответствующей формы кромок на тетивах реечных подвесных потолков (защелкивающиеся или набираемые в шпунт рейки).

8.3. Защита алюминиевых сплавов от коррозии

Алюминий и его сплавы легко окисляются на воздухе, образуя на поверхности пленку окисла толщиной 0,01 - 0,02 микрона. Однако, она отличается высокой плотностью и прочностью. Это и определяет высокие коррозионные свойства

алюминия во многих средах. Являясь анодом, при контакте с другими металлами, обладающими положительным потенциалом, алюминий образует гальваническую пару и усиленно разрушается (во влажной среде). Электрохимическая (контактная коррозия) развивается тем сильнее, чем больше разность потенциалов двух соприкасающихся металлов.

Коррозионная стойкость алюминия зависит от характера агрессивной среды, температуры, структуры металла, внутренних напряжений и состояния поверхности. Чем чище алюминий и чем меньше его структурная неоднородность, тем выше коррозионная стойкость. На коррозионную стойкость алюминия отрицательно влияют все примеси, особенно медь и железо, имеющие положительный потенциал.

Легирование марганцем не снижает коррозионной стойкости алюминия во многих средах.

Содержание магния до 5,0% не снижает коррозионной стойкости алюминиевого сплава в морской воде. Также хорошо противостоит морской среде сплав Al-Zn-Mg. Содержание магния в сплаве более 5% может привести к межкристаллитной коррозии под напряжением. Большинство химических соединений, имеющих в своем составе хлор и фтор, приводят к язвенной (точечной) коррозии алюминия и его сплавов. Защита поверхности элементов анодной пленкой резко повышает их коррозионную стойкость.

Алюминий и его сплавы хорошо сопротивляются коррозии в следующих средах: в кислотах - азотной, серной, лимонной, молочной, муравьиной, уксусной, фосфорной, хромовой и некоторых других; в перекиси водорода, газообразном безводном аммиаке, ароматических углеводородах, бензоле, бензине, в средах большинства спиртов, питьевой соде, сероводороде, окиси и двуокиси углерода, феноле. Неудовлетворительно алюминиевые сплавы противостоят щелочной среде.

Конструкции из алюминия марок АД31, АМг2, АМц, АД1, эксплуатируемые в неагрессивной, слабоагрессивной и среднеагрессивной средах, то есть в подавляющем большинстве случаев, можно применять без специальной защиты от коррозии. Однако, практически все алюминиевые конструкции гражданских и значительная часть ограждающих конструкций промышленных зданий по эстетическим соображениям изготавливают с различного вида декоративными покрытиями (традиционно применяют термин - защитно-декоративные покрытия).

Основными видами защитно-декоративных покрытий, применяемыми в мировой практике, являются:

- химическое оксидирование (как самостоятельный вид покрытия в отечественной практике не применяется, служит подготовкой под лакокрасочные покрытия);
- электрохимическое оксидирование (анодирование);
- лакокрасочные покрытия;
- эмалирование (стеклоэмалями - на отечественных заводах не применяется, было применено лишь на нескольких объектах в качестве эксперимента);
- плакирование полимерными пленками (чаще всего - поливинилхлоридными, в отечественной практике пока не получили достаточного применения).

Основным видом защитно-декоративного покрытия изделий и полуфабрикатов из алюминиевых сплавов является анодное (электрохимическое) оксидирование. В результате анодного оксидирования изделие или полуфабрикат покрывается слоем твердой окиси алюминия - анодной пленкой, которая надежно защищает металл от коррозии. Толщина этой пленки во много раз больше, чем природная окисная пленка, толщина ее регулируется технологическим процессом. Пленка хорошо противостоит истиранию и механическим воздействиям. Хорошее сцепление ее с металлом и пористость используется для окрашивания пленки различными пиг-

ментами (от светло-золотистого коричневого до черного) или водой(в случае бесцветного анодирования). При заполнении пор водой из окиси алюминия образуется очень плотный и газонепроницаемый моногидрат $Al_2 \cdot O_3 \cdot H_2O$.

Анодная пленка является хорошей основой для лакокрасочных составов, которые также часто применяются в качестве защитно-декоративных покрытий. Электрохимическое анодирование и окраска осуществляются на заводах различных отраслей народного хозяйства, в том числе на заводах алюминиевых строительных конструкций.

8.4. Заводы строительных алюминиевых конструкций; номенклатура изделий

Основу промышленности строительных алюминиевых конструкций в России и странах СНГ составляют крупные специализированные заводы, работающие по полному технологическому циклу. Таких заводов, мощность которых колеблется от 10 до 24 тыс. тонн конструкций и изделий в год, в настоящее время насчитывается пять. На них изготавливается примерно половина применяемых в стране алюминиевых конструкций, остальные – на небольших заводах алюминиевых конструкций или в цехах заводов стройиндустрии и других отраслей промышленности.

Специализированные заводы расположены в городах Воронеже, Хабаровске, Санкт-Петербурге, в г. Видном (Московская область) и Броварах (на Украине).

Все крупные заводы и некоторые заводы небольшой мощности имеют собственные профильные цеха с линиями прессования на базе прессов усилием от 1250 тс до 2500 тс. Первоначально на заводах, работающих по полному циклу, было установлено по 2 или 3 линии прессования. В настоящее время производится реконструкция некоторых из заводов с увеличением на них количества этих линий.

Все заводы оснащены автоматизированными линиями анодирования (на Санкт-Петербургском заводе осуществлен монтаж линий анодирования с горизонтальной или вертикальной подвеской профилей). Малярно-окрасочные отделения цехов защитно-декоративных покрытий действуют на заводах в Видном и Воронеже, введены они также на других заводах.

На заводах в Видном, Воронеже и Хабаровске имеется оборудование для изготовления панелей с сердцевиной из жестких пенопластов, при этом завод в Видном выпускает на стендовом оборудовании трехслойные панели с теплоизоляцией из фенольно-резольного пенопласта, завод в Воронеже на аналогичном оборудовании выпускает панели с сердцевиной из пенополиуретана, а завод в Хабаровске – на непрерывной линии двухслойные панели (монопанели) с теплоизоляцией из пенополиуретана. Облицовка панелей – преимущественно из оцинкованной и окрашенной стали. На стендовом оборудовании выпускают в сравнительно небольшом объеме также панели с алюминиевыми облицовками.

Заводы в Видном и Воронеже изготавливают профилированные листы и реечные подвесные потолки; все заводы выпускают панельные подвесные потолки 600 ×600 мм.

На всех заводах изготавливают каркасно-филенчатые конструкции - окна, витражи, двери, перегородки. Четыре завода выпускают конструкции по единой номенклатуре, пятый - завод в Видном - имеет единую номенклатуру, ориентированную на строительство Москвы, практически полностью поглощающей его продукцию.

Наиболее обширна номенклатура Воронежского завода, освоившего окна с одинарным и двойным остеклением, переплетами из монолитных профилей, из комбинированных профилей с термовкладышами (остеклены стеклопакетами) и с

раздельными переплетами, а также значительное количество типов упомянутых профилированных листов и реечных подвесных потолков. В остальном номенклатура заводов в Воронеже, Видном, Хабаровске, Броварах и Санкт-Петербурге примерно одинакова.

Заводы алюминиевых конструкций своими силами производят значительную часть комплектующих изделий, в том числе приборы открывания, матричный инструмент и др., а заводы в Видном и Воронеже - также уплотняющие прокладки, спецкрепеж, термовкладыши для комбинированных профилей.

Номенклатура продукции каждого отдельного завода достаточно широка и в значительной мере сходна с продукцией других заводов. Специализация заводов на узкой номенклатуре не предусмотрена, так как количество таких заводов в настоящее время невелико и расположены они на значительном расстояния друг от друга. Ниже показаны основные виды серийной продукции конкретных заводов. При размещений заказов на конструкции следует иметь в виду, что номенклатура продукции завода достаточно часто претерпевает изменения и в каждом конкретном случае необходимо предварительное согласование с изготовителем.

Воронежский ЗСАК.

Окна и балконные двери общественных зданий с одинарным остеклением, с двойным остеклением стеклопакетами и листовым стеклом, с тройным остеклением. Каркасы окон одинарные из монолитных профилей, одинарные из комбинированных профилей, раздельные. Витражи и витрины с одинарным остеклением и двойным остеклением стеклопакетами в одинарном каркасе, с двойным остеклением листовым стеклом в раздельном каркасе. Двери распашные и качающееся отдельные и в составе тамбурных блоков. Подвесные потолки панельные (в том числе объемноштампованные) и реечные с перфорацией и без перфорации. Профилированные листы А26-1200-0,8(1,0), А50-1000-0,8(1,0), ПА6-1000-0,8(1,0). Трехслойные панели с сердцевиной из пенополиуретана.

Объединение «Мосметаллоконструкция» (г.Видное).

Окна и балконные двери общественных зданий с двойным остеклением стеклопакетами и листовым стеклом. Каркасы окон одинарные из комбинированных профилей и раздельные. Витражи и витрины с одинарным остеклением в одинарном каркасе и с двойным остеклением в раздельном каркасе. Двери распашные отдельные и в составе тамбурных блоков. Подвесные потолки панельные (в том числе объемноштампованные) и реечные с перфорацией и без перфорации. Профилированные листы А50-1000-0,8(1,0) и СПА-1502. Трехслойные панели с сердцевиной из фенольно-резольного пенопласта и обрамлением по контуру.

Хабаровский ЗСАК.

Окна и балконные двери общественных зданий с одинарным остеклением, с двойным остеклением стеклопакетами и листовым стеклом. Каркасы окон одинарные из монолитных и комбинированных профилей, раздельные. Витражи и витрины с одинарным остеклением в одинарном каркасе, с двойным остеклением в раздельном каркасе. Двери распашные отдельные и в составе тамбурных блоков. Подвесные потолки панельные с перфорацией и без перфорации. Трехслойные панели с сердцевиной из пенополиуретана.

Броварской ЗСАК (Украина).

Окна и балконные двери общественных зданий с одинарным и двойным остеклением листовым стеклом в одинарном монолитном и раздельном каркасах. Витражи и витрины с одинарным остеклением в одинарном каркасе и с двойным остеклением в раздельном каркасе. Двери распашные отдельные и в составе тамбурных блоков. Подвесные потолки панельные (в том числе объемноштампованные) с перфорацией и без перфорации.

Санкт-Петербургский ЗСАК.

Мощности завода введены не полностью. На ближайшие годы намечен выпуск сокращенной номенклатуры конструкций. Окна общественных зданий с одинарным и двойным остеклением. Каркасы окон одинарные из монолитных профилей и раздельные. Витражи и витрины с одинарным остеклением в одинарном каркасе и с двойным остеклением в раздельном каркасе. Двери распашные отдельные и в составе тамбурных блоков. Подвесные потолки панельные с перфорацией и без перфорации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Мельников Н.П.** Металлические конструкции за рубежом, М., Стройиздат, 1971 г.
2. Алуминиум-Трагеверке, Дюссельдорф, 1972г.
3. Реферативный сб. ЦИНИС. Строительные конструкции, строительная физика. Серия VIII, 1972 - 1988 гг.
4. **Трофимов В.И., Тарановский С.В., Дукарский Ю.М.** Алюминиевые конструкции в промышленном строительстве. М., Стройиздат, 1973г.
5. СНиП 2.03.06-85 Алюминиевые конструкции. Нормы проектирования.
6. СНиП II-23-81*, Стальные конструкции. Нормы проектирования.
7. **Кармилов С.С.** Экономичные строительные элементы из алюминиевых сплавов. Материалы межотраслевого семинара «Применение конструкций из алюминиевых сплавов при скоростном строительстве промышленных и гражданских зданий». М., изд. Металлургия, 1978 г.
8. Руководство по формообразованию (проектированию) строительных алюминиевых профилей. ЦНИИпроектстальконструкция, Москва-Ленинград, 1973 г.
9. Методические рекомендации по проектированию унифицированных ограждающих конструкций из алюминиевых сплавов. КиевЗНИИЭП, Киев, 1978 г.
10. Справочник по алюминиевым сплавам под ред. Елагина И.В., ВИЛС, 1978 г.
11. Алюминиевые сплавы. Том «Применение алюминиевых сплавов». Под ред. Р.Е.Шалина и Н.Д.Бобовникова. М., Металлургия, 1985 г.
12. **Артемьева И.Н.** Алюминий в строительстве. М., Стройиздат, 1985 г.
13. Алюминиевые сплавы (свойства, обработка, применение). Отв. ред. Х.Нильсен, Ф.Хуфнагель, Г.Ганулис. М., Металлургия,1979 г.
14. **Белов А.Ф., Локшин М.З.** Алюминий - основа новых решений в хранении зерна. В сб. Применение алюминиевых сплавов в сельском хозяйстве, ВИЛС, 1982 г.
15. История металлургии легких сплавов в СССР. 1945 - 1987. Под ред. Ф.И.Квасова и Н.К.Ламана, М., «Наука», 1988 г.
16. **Спиров В.Н.** Изготовление и монтаж алюминиевых конструкций. М., Стройиэдат, 1990 г.
17. **Спиров В.Н.** О концепции проектирования алюминиевых конструкций. Промышленное строительство, 1989 г., № 2.
18. **Спиров В.Н.** О развитии строительных алюминиевых конструкций. Жилищное строительство, 1988 г., № 4.
19. Энергоактивные здания. Под ред. Э.В.Сарнацкого и Н.П.Саливанова, М., Стройиздат, 1988 г.
20. Металловедение алюминиевых сплавов, М., изд. «Наука», 1985 г.
21. Алюминиевые сплавы. Справочник. Перевод с немецкого. Под ред. М.Е.Дрица и Л.Х.Райтбарга, М., Металлургия, 1979 г.
22. **Николаев Г.А., Фридляндер И.Н., Арбузов Ю.П.** Свариваемые алюминиевые сплавы. М., Металлургия, 1990 г.
23. Металлические конструкции. Специальный курс. М., Стройиздат. 1991 г.
24. Алюминиевые конструкции. Справочное пособие под ред. В.И.Трофимова. М., Стройиздат, 1978 г.

РАЗДЕЛ III

ТЕХНИЧЕСКАЯ ЭКСПЛУАТАЦИЯ, РЕКОНСТРУКЦИЯ, ОБСЛЕДОВАНИЕ, УСИЛЕНИЕ И ИСПЫТАНИЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

ГЛАВА 9

РЕКОНСТРУКЦИОННЫЕ РАБОТЫ И ТЕХНИЧЕСКАЯ ЭКСПЛУАТАЦИЯ

9.1. Общие положения

Подавляющее большинство зданий и сооружений, подвергающихся техническому перевооружению, усилению или реконструкции, имеют существенный физический износ, накопленный за годы предыдущей эксплуатации. При этом многие из них устаревают морально, не отвечают требованиям изменившейся технологии, современным санитарно-гигиеническим нормам, не соответствуют экологическим требованиям. Все эти обстоятельства вынуждают в процессе реконструкции выполнять ряд сопутствующих работ, напрямую не связанных с модернизацией технологии, но существенно влияющих на строительное обеспечение реконструкции.

Применительно к традиционным этапам реализации любой технической идеи в строительстве (разработка проекта, изготовление конструкций и возведение на монтаже) работы по реконструкции зданий и сооружений существенно отличаются от аналогичных работ при новом строительстве.

Наиболее характерные виды реконструкционных работ в производственных объектах, привязанные к основным элементам и частям каркаса зданий и сооружений приведены в табл.9.1.

Специфика проектирования реконструкции зданий и сооружений с целью максимально возможного использования эксплуатируемых конструкций заключается:

- в необходимости учета свойств материала и анализа особенностей конструктивных решений, не применяющихся в настоящее время (стали с непривычным составом и свойствами, стыковые сварные соединения с накладками, клепаные конструкции), для которых отсутствуют справочные данные и апробированные рекомендации по проектированию;
- в потребности тщательного учета физического состояния каждой конструкции и отдельного ее элемента, что невозможно без детального предпроектного обследования технического состояния конструкций и анализа условий их эксплуатации;
- в разнообразии фактически имеющихся в натурных конструкциях несовершенств, дефектов и повреждений, лишающих проектировщика возможности рассматривать только одну характерную конструкцию из группы однотипных по назначению (ферму, балку, стойку и т.п.), как это делается при новом проектировании;
- в поиске таких конструктивных решений, реализация которых осуществима в стесненных условиях действующего производства и, по возможности, без остановки технологических процессов;
- в необходимости разработки дополнительных мероприятий по обеспечению неразрушимости конструкций до их реконструкции (страховочные меры) и в процессе требуемого изменения конструктивной и расчетной схем сооружения.

Таблица 9.1. Виды реконструкционных работ

Реконструируемые элементы зданий и инженерных сооружений	Основные виды работ
Объемно-планировочные параметры	Увеличение высоты одноэтажных зданий или высоты верхнего этажа многоэтажных зданий; изменение сетки колонн; увеличение пролета
Подъемно-транспортное оборудование	Установка дополнительных кранов; замена мостовых кранов с увеличением грузоподъемности; устройство подвесного транспорта; строительство крановых эстакад внутри цехов
Покрытия, кровли	Замена плит покрытия и кровли; устройство легкосбрасываемых покрытий; устройство фонарей; установка дополнительных связей
Перекрытия	Усиление под увеличенную технологическую нагрузку; устройство дополнительных перекрытий
Колонны	Усиление и наращивание колонн; изменение системы связей
Вентиляционное оборудование	Устройство отверстий в плитах покрытий; строительство вентшахт; установка надкрышных вентиляторов и зонтов на кровле; подвеска трубопроводов
Инженерные коммуникации	Переустройство транспортерных галерей; пристройка лифтовых шахт; строительство эстакад для прокладки коммуникаций
Новые помещения	Пристройка и надстройка; устройство переходных галерей; переоборудование открытых крановых эстакад в производственные здания

При *заводском изготовлении* конструкций для целей реконструкции также проявляются специфические виды работ и обстоятельств, усложняющие производство:

- индивидуальный характер большинства конструктивных элементов затрудняет или делает невозможным индустриальное их изготовление;
- значительная доля элементов и, в первую очередь элементов усиления, должна изготавливаться с учетом подгонки по месту установки;
- практически исключается возможность проведения на заводе контрольной сборки.

Наконец, *монтажные работы* по реконструкции и усилению имеют следующие, характерные только для этого вида деятельности, особенности:

- необходимость проведения всего комплекса работ в условиях действующего производства или при его минимальных остановках создает трудно преодолеваемые стеснения монтажных работ в пространстве и во времени;
- монтажные операции, как правило, имеют рассредоточенный разовый характер, доступ к месту производства монтажных работ крайне затруднен, усложняются условия обеспечения безопасного проведения сборочных и сварочных работ на действующем предприятии;
- стесненность сказывается на ограничении или невозможности применения привычных и эффективных механизмов и методов производства работ (укрупнительная сборка, мощное крановое оборудование, крупноблочный монтаж и т.п.);
- появление операций и видов работ, не характерных для нового строительства (демонтаж, правка и усиление существующих конструкций в проектном положении, работа с клепаными конструкциями), которые требуют специальной подготовки, оснастки и обучения кадров.

Вышеприведенные особенности определяющим образом сказываются на всех стадиях строительного процесса. При этом положение усугубляется отсутствием или слабой разработанностью нормативных документов по проектированию и строительству в условиях реконструкции.

Катастрофическое ускорение старения металлофонда страны, являющееся следствием инвестиционного голода в последнее десятилетие, понуждает рассматривать реконструкционные работы как особую область деятельности в строительстве и даже как специфическую народнохозяйственную проблему. Актуальность этой задачи объясняет появление настоящего раздела справочника, в котором впервые сделана попытка обобщения имеющегося передового опыта, и приведен комплекс необходимых сведений для инженеров-проектировщиков и работников строительных организаций, специализирующихся на выполнении реконструкционных работ.

9.2. Техническая эксплуатация стальных конструкций

9.2.1. Основные положения. Техническая эксплуатация стальных конструкций производственных зданий и сооружений может рассматриваться как комплекс мероприятий, направленных на обеспечение безотказной их работы в течение нормативного срока эксплуатации по технологическому назначению, предусмотренному проектом. В этом комплексе следует отметить в первую очередь:

- периодические осмотры конструкций с целью выявления отклонений, дефектов и повреждений, вызванных условиями эксплуатации;
- контроль за недопустимостью превышения эксплуатационных нагрузок на конструкции по отношению к проектным;
- контроль температурного режима эксплуатации конструкций (недопущение перегрева при возможных нарушениях технологии или чрезмерного охлаждения при отключении отопления, а также при локальных повреждениях ограждающих конструкций и др.);
- контроль за изменением агрессивности среды;
- соблюдение сроков проведения текущих и капитальных ремонтов и обеспечение контроля за качеством работ;
- своевременное и качественное документальное оформление всех видов проводимых на объекте работ, начиная с приемки в эксплуатацию (акты сдачи-приемки, полный комплект чертежей проекта, акты на скрытые работы, журналы монтажных работ, журналы авторского надзора, паспорта зданий и сооружений объекта, акты об имевших место авариях и отказах, проведенных в прошлом ремонтах, усилениях и реконструкциях и т.п.).

Любые изменения, вносимые в конструкции зданий и сооружений в процессе эксплуатации могут осуществляться только при наличии проектной документации, оформленной и утвержденной в установленном порядке.

Все мероприятия по технической эксплуатации регламентируются соответствующими отраслевыми нормами и стандартами предприятия.

9.2.2. Условия эксплуатации стальных конструкций. Степень физического износа конструкций зависит в основном от условий и продолжительности эксплуатации здания или сооружения и определяется прежде всего величиной и интенсивностью нагрузок и воздействий.

Нагрузки. Фактические нагрузки могут существенно отличаться от предусмотренных проектом по величине, месту приложения и характеру. Уточнение нагрузок осуществляется анализом технической документации и параметров технологического процесса, а также путем натурного освидетельствования конструкций и изучения данных ближайших метеостанций.

При этом, кроме действительной величины нагрузки от собственной массы конструкций устанавливаются:

- место приложения и величина статических и динамических нагрузок от технологического оборудования;
- места складирования материалов, полуфабрикатов и готовой продукции и величины предельных нагрузок от них;
- грузоподъемность и режим работы мостовых, консольных, подвесных кранов и другого подъемно-транспортного оборудования;
- место, вес, состав и скорость накопления пылевых отложений;
- места повышенных снеговых и пылеснеговых отложений на покрытие и возможная скорость их накопления.

Воздействия. К эксплуатационным воздействиям относятся:

- температурный режим эксплуатации конструкций, определяемый как технологическими, так и природно-климатическими условиями;
- вертикальные и горизонтальные перемещения фундаментов, вызываемые общими или локальными изменениями гидрогеологических свойств основания (повышение уровня грунтовых вод, протечка в грунт химически активных жидкостей, рытье котлованов в непосредственной близости к фундаментам, прокладка подземных коммуникаций и др.);
- увеличение по сравнению с проектной степени агрессивности среды (содержание в воздухе агрессивных газов, жидкостей, пыли, увеличение абразивного воздействия сыпучих сред и др.).

На основании выверенных параметров нагрузок и воздействий осуществляется зонирование производственных зданий и сооружений. Цель зонирования заключается в систематизации условий фактической работы конструкций для установления регламента их содержания: периодичность осмотров и обследований, составление графика проведения планово-предупредительного, текущего и капитального ремонтов, которые должны быть включены в стандарт предприятия.

Зонирование по интенсивности нагрузок должно отражать:

- места установки технологического оборудования с указанием его габаритов и веса;
- зоны складирования материалов с указанием габаритов и предельной высоты штабеля;
- зоны проезда напольного транспорта с указанием габаритов и предельной грузоподъемности;
- зоны работы мостовых кранов легкого, среднего, тяжелого и весьма тяжелого режимов работы в соответствии с «Правилами устройства и безопасной эксплуатации грузоподъемных кранов» и по ГОСТ 25546-82*.

В общем случае интенсивность температурных воздействий зависит от типа здания (отапливаемое или неотапливаемое), его габаритов (объема внутреннего помещения, протяженности в плане и т.п.), вида технологических процессов и источников тепловыделения (мощность, открытый, закрытый и т.п.), системы вентиляции.

Зонирование по интенсивности температурных воздействий должно включать:

- интенсивность технологического нагрева конструкций, которую принято разделять на три типа: слабая с нагревом конструкций до 50°С, средняя – нагрев до 100°С и сильная – при нагреве свыше 100°С;

– минимальную эксплуатационную температуру конструкций, которая устанавливается путем фактических измерений в зимний период при остановке технологического процесса, отключении тепловыделяющих агрегатов и систем отопления.

Зонирование по степени агрессивности среды, включающее классификацию газовоздушной среды, места проливов технологических жидкостей и отложений химически активной пыли, осуществляется согласно СНиП 2.03.11-85 на основании натурных замеров. При этом выделяются зоны с нормальными условиями, со слабой (скорость коррозии 0,05 мм/год), средней (скорость коррозии до 0,1 мм/год) и сильной степени агрессивности среды (скорость коррозии металла 0,5 мм/год и более).

Зоны повышенных перемещений фундаментов вследствие значительных деформаций оснований выявляются посредством геодезической съемки оголовков фундаментов и систематическим наблюдением за их состоянием.

Зоны, выделенные по нагрузкам и воздействиям как особые, наносятся на план здания или сооружения; каждой зоне присваивается свой номер, она выделяется на чертежах окраской или штриховкой.

В соответствующем примечании приводятся численные величины параметров опасных нагрузок и воздействий, а также перечень характерных возможных повреждений элементов конструкций.

Наиболее действенным и мобильным способом создания, хранения и пополнения этой важнейшей информации о состоянии конструкций сегодня является компьютерная база данных. На каждое здание или сооружение в компьютере организуется отдельный файл, который пополняется новой информацией по мере ее появления.

9.2.3. Надзор за состоянием конструкций. Целью надзора за состоянием конструкций со стороны службы эксплуатации является создание достаточных условий для поддержания их в работоспособном состоянии, что достигается своевременным выявлением и оценкой дефектов и повреждений конструкций и их устранением. В способах освидетельствования несущих конструкций различают: а) периодические осмотры, частота которых устанавливается предприятием, исходя из интенсивности эксплуатации и предполагаемого технического состояния конструкций, и б) внеочередные осмотры, связанные с технологическими отказами и авариями на данном или подобных предприятиях, стихийными бедствиями, а также, когда техническое состояние конструкций вызывает нарушение технологического процесса (чрезмерные прогибы и перемещения, колебания и вибрации конструкций и т.п.).

Более основательное освидетельствование в виде обследования конструкций с привлечением специализированной организации необходимо:

– при длительных сроках эксплуатации здания или сооружения;
– при обнаружении во время осмотров опасных дефектов и повреждений конструкций, оценку которых не может дать служба технической эксплуатации предприятия;
– перед планируемой реконструкцией, техническим перевооружением или модернизацией, предопределяющими изменение условий эксплуатации и характера работы несущих и ограждающих конструкций обследуемого объекта.

Рекомендуемая периодичность проведения обследований металлоконструкций зданий и сооружений приведена в табл.9.2.

При осмотре металлических конструкций зданий и сооружений работникам службы эксплуатации необходимо обратить особое внимание на наиболее уязвимые для повреждений элементы и узлы соединений.

Таблица 9.2. Периодичность проведения обследований металлоконструкций производственных зданий

Конструкции и их элементы, подлежащие обследованию	Срок эксплуатации (лет), после которого рекомендуется проведение обследования			
	в зданиях с режимом работы	в среде		
		неагрессивной и слабоагрессивной	средне-агрессивной	сильно-агрессивной
Стропильные и подстропильные фермы	легким и средним	15	12	10
	тяжелым и особо тяжелым	12	10	10
Колонны	легким и средним	30	25	20
	тяжелым	25	20	18
	тяжелым и особо тяжелым	20	18	15
Подкрановые конструкции	легким и средним	18	12	12
	тяжелым	12	8	8
	особо тяжелым	8	5	5
Стальная кровля	Все режимы	10	5	5
Прочие элементы производственных зданий	—//—	30	25	20
Транспортерные галереи	—//—	15	10	10

В стальных конструкциях покрытий (кровля, прогоны, стропильные и подстропильные фермы и балки, связи по покрытию и светоаэрационные фонари) подлежат первоочередному контролю:

- целостность кровельного настила, наличие или отсутствие протечек, состояние крепления настила к прогонам или фермам;
- прямолинейность в плане и величина прогиба прогонов; состояние их крепления к стропильным конструкциям;
- прямолинейность в плане поясов стропильных ферм; искривление поясов и стержней решетки; внеузловое опирание прогонов и плит покрытия; наличие и степень затяжки болтов; целостность сварных швов, крепящих стержни решетки к фасонкам; целостность заклепок в клепаных фермах; состояние опорных и монтажных узлов, наличие соединительных прокладок в стержнях из парных уголков или швеллеров; наличие недопустимого сближения сварных швов; коррозионные повреждения;
- состояние конструкций аэрационных и светоаэрационных фонарей оценивается по тем же критериям, которые приведены для стропильных ферм.

В подкрановых конструкциях заслуживают особого внимания:

- трещины в поясных швах и околошовной зоне стенки балки (особенно под стыками рельс и у опор балок), трещины в сварных швах у ребер жесткости и в монтажных стыках поясов;

– трещины в швах крепления тормозных листов или раскосов тормозных ферм к подкрановым балкам и колоннам;
– смещение рельса с оси подкрановой балки и оси балки с оси колонны;
– состояние узлов крепления подкрановых балок к колоннам;
– трещины, изломы и износ головок рельсов;
– состояние креплений рельса к подкрановым балкам;
– узлы крепления ездовых балок подвесных кранов, прямолинейность в плане, прогибы, истирание полок и стенок.

В колоннах прежде всего необходимо выявлять:
– смещение осей колонн с разбивочных осей здания;
– степень натяжения анкерных болтов;
– сохранность необетонированной части базы колонны, степень ее коррозионного поражения;
– забоины, погнутости, коррозионный и абразивный износ ветвей колонн от ударов транспортных средств, перемещаемых грузов и воздействия складируемых материалов;
– искривление стержней решетки и целостность сварных швов;
– погнутости, коробления в местах воздействий высоких температур;
– разница в осадках и боковые перемещения фундаментов под колонны.

Осмотр *состояния связей*, обеспечивающих работу основных элементов и пространственную жесткость каркаса в целом, должен выявить:
– наличие и состояние распорок и связей по фонарной конструкции, по верхним и нижним поясам стропильных и подстропильных ферм, их искривление, состояние узлов крепления связей к несущим конструкциям;
– наличие и состояние вертикальных связей между колоннами, их повреждение коррозией, ударами внутрицехового транспорта и складируемыми материалами, состояние узлов крепления к колоннам во всех уровнях.

В конструкциях рабочих площадок нуждаются в первоочередном освидетельствовании:
– деформативность (зыбкость) конструкции рабочей площадки в целом;
– целостность и состояние крепления листов или плит настила к балкам;
– степень повреждений поясов и стенок главных и второстепенных балок воздействием транспортных средств, проливом металла, шлака, агрессивных жидкостей;
– наличие трещин в сварных швах и околошовной зоне балок и колонн;
– состояние сопряжения балок между собой и с колоннами;
– состояние колонн рабочих площадок, их искривление, скручивание, повреждения наземным транспортом, высокими температурами и коррозией;
– наличие и степень повреждений связей между колоннами рабочих площадок и узлов их крепления к колоннам;
– степень повреждения баз колонн, затяжка анкерных болтов, разница осадок фундаментов;
– состояние ограждений всех площадок, лестниц и их креплений.

При осмотре *конструкций транспортерных галерей*, кроме дефектов, характерных для стропильных ферм, должно быть обращено повышенное внимание на состояние конструкций, обеспечивающих свободу продольного перемещения в температурных швах (качающиеся стойки, катковые опоры), возможное скопление транспортируемого конвейером материала на полу, повреждения стоек и фундаментов наземным транспортом и агрессивными факторами среды.

Надзор за конструкциями технологических трубопроводов, резервуаров, газгольдеров, сооружений доменных комплексов, химических реакторов и др. должен осуществляться в соответствии со специальными правилами, утвержденными Госгортехнадзором либо другими ведомственными инструкциями и руководствами. При осмотрах конструкций необходимо широко применять для обмеров геодезические инструменты и приборы, дефектоскопы, деформометры, индикаторы, сигнальные маяки для выявления динамики раскрытия трещин и другую аппаратуру, описание которой приведено в гл.10 настоящего справочника.

9.2.4. Дополнительные требования по содержанию конструкции. Основные положения, обеспечивающие соответствие параметров эксплуатационных сред, нагрузок и воздействий величинам, предусмотренным проектом и предписанным нормативными документами, изложены в пп.9.2.2, 9.2.3. Здесь приводятся лишь некоторые дополнительные рекомендации для достижения надлежащей сохранности и надежности эксплуатируемых стальных конструкций каркасов зданий.

В целях предохранения конструкций от перегрузок не допускается:

- изменять конструктивную и расчетную схему каркаса, ослаблять сечения элементов отверстиями и вырезами;
- демонтировать или вырезать элементы (даже кратковременно) для установки оборудования, пропуска коммуникаций, устройства проходов и т.п.;
- устанавливать, подвешивать и крепить к конструкциям непредусмотренное проектом технологическое оборудование;
- использовать конструктивные элементы в качестве якорей, оттяжек или упоров, для подвески грузов при проведении монтажных операций и ремонтных работ.

Преждевременный износ подкрановых конструкций может быть устранен или существенно замедлен при безупречном выполнении надзора за состоянием крановых путей и при своевременном устранении отклонений от «Правил устройства и безопасной эксплуатации грузоподъемных кранов».

Разность отметок головок рельсов должна устраняться одновременно с горизонтальной рихтовкой подкрановых балок и установкой прокладок под опорные сечения. При систематически повторяющихся повреждениях крановых рельсов и их креплений следует проверять правильность геометрических размеров самого мостового крана и состояние его колес.

В пролетах, обслуживаемых кранами режима работы 7К-8К, ежегодно, а в остальных пролетах один раз в 2–3 года должна проводиться горизонтальная и вертикальная геодезическая съемка крановых путей.

В производственных зданиях с интенсивным использованием тяжелых кранов для сохранности подкрановых путей необходимо оснащение кранов устройством автоматического отключения питания при превышении расчетной скорости движения и резком торможении моста крана и грузовой тележки.

В местах сужения габаритов проезда в зонах прохода безрельсового транспорта стойки, колонны и связи следует защищать специальными ограждениями или амортизирующими элементами от локальных повреждений.

Для предохранения стальных конструкций от преждевременного коррозионного износа за счет агрессивных воздействий атмосферных вод, производственных жидкостей, газов, паров и пыли необходимо:

- содержать в исправном состоянии влагоизолирующие слои ограждающих конструкций и устройства для отвода атмосферных и талых вод (разжелобки, внутренние водостоки, ендовы, карнизы, сливы и т.п.);
- содержать в исправном состоянии вентиляцию и механизмы открывания фонарей;

– максимально возможно герметизировать аппаратуру, оборудование, соединения технологических трубопроводов с целью устранения течи и выбросов агрессивных веществ.

При местных повреждениях окраски необходим ремонт, а при неудовлетворительном общем состоянии защитных покрытий должна выполняться полная очистка дефектной окраски и нанесение нового покрытия. Ориентировочные сроки возобновления антикоррозионных покрытий устанавливаются в зависимости от степени агрессивности среды:

– в неагрессивной среде через 10 - 20 лет;
– в слабоагрессивной среде через 8 лет;
– в среднеагрессивной среде через 5 лет;
– в сильноагрессивной среде через 3 года.

В целях ослабления общего и местного нагрева несущих элементов конструкций при эксплуатации их в зданиях металлургических и им подобных производств рекомендуется:

– защищать конструкции огнеупорной футеровкой в тех случаях, когда возможно непосредственное воздействие горячего металла или шлака;
– использовать теплоизолирующие экраны, если нагрев конструкций превышает 100°С для конструкций, окрашенных масляными и перхлорвиниловыми красками, и 200°С для конструкций, окрашенных красителями на основе битумных лаков;
– не допускать приближения штабелей горячего металла (в пролетах складов заготовки, холодильников и готовой продукции) к стальным конструкциям ближе, чем на 2 м при температуре металла 600°С, на 3 м при температуре 800°С и на 4 м при температуре 1000°С.

9.3. Отклонения, дефекты и повреждения элементов металлических конструкций зданий и сооружений

9.3.1. Общая характеристика. Задачей обследования является выявление отклонений фактического состояния конструкций от предусмотренного проектом, стандартами и нормами. Различают отклонения проектных решений и отклонения действительного состояния конструкций. Отклонения проектных решений определяются как отличия конструктивных решений, принятых в проекте обследуемых конструкций, от требований современных норм и современной конструктивной формы.

Отклонения действительного состояния конструкций определяются как отличие от предусмотренных проектом: пространственного положения; геометрических размеров, формы и сплошности конструкций и их элементов; качества, размеров и размещения соединительных элементов; свойств стали конструктивных элементов и соединений.

Отклонения действительного состояния, возникшие на стадии изготовления и монтажа конструкций, принято называть дефектами, а возникшие в результате действия нагрузок и условий эксплуатации - повреждениями. Дефекты возможно классифицировать по стадиям создания конструкции: дефекты металлопроката; дефекты изготовления; дефекты транспортировки и монтажа.

Повреждения принято подразделять на группы в зависимости от причин их возникновения: повреждения от действия нагрузок; повреждения от температурных воздействий; повреждения от агрессивных воздействий; повреждения от наезда транспортных средств и случайных ударов.

Отклонения проектных решений могут быть следствием ошибок и просчетов, принятия неадекватной расчетной схемы, а также несовершенства нормативных документов периода проектирования.

Ошибки и просчеты связаны с ошибочными или безграмотными действиями при определении нагрузок, статическом расчете, подборе сечений, расчете и компоновке соединений, назначении расчетных схем, выборе схем связей и т.п.

Учет особенностей работы конструкции при выборе расчетной схемы является весьма ответственной задачей, требующей глубоких профессиональных знаний. Как правило, более точной расчетной схеме соответствуют более сложные расчеты, упрощение выполнения которых может явиться одной из причин появления ошибок.

Не менее важное значение имеет также и последующее конструирование, реализующее в чертежах все требования и особенности принятой расчетной схемы.

Нормативные документы периода проектирования отражали уровень научно-технических знаний того времени и , естественно, не могли учитывать достижений науки и практики последующих лет, отраженных в строительных нормах и правилах периода оценки технического состояния. Следствием этого является использование устаревших, несовершенных или отвергнутых практикой проектных решений. Среди примеров таких огрехов можно упомянуть применение кипящих сталей там, где они сегодня запрещены, выполнение расчета сжатых стержней решетки ферм с гибкостью более 60 без учета коэффициента условий работы γ_0^c, обварка торцов уголков в узлах стропильных ферм и др.

Повреждения конструкций от нагрузок могут быть условно представлены в виде трех подгрупп:

- повреждения от технологических, атмосферных и других нагрузок, предусмотренных проектом, но получивших перегрузки выше проектных значений;
- повреждения от случайных нагрузок, не предусмотренных проектом, в том числе монтажных - при ремонтах или заменах технологического оборудования;
- повреждения вследствие наличия дефектов металлопроката, ошибок и упущений проектирования, изготовления и монтажа.

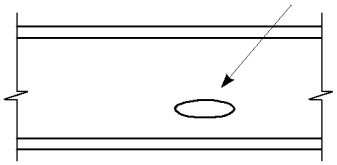
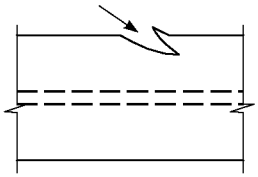
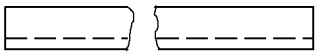
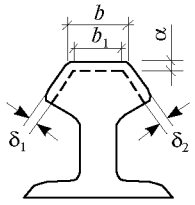
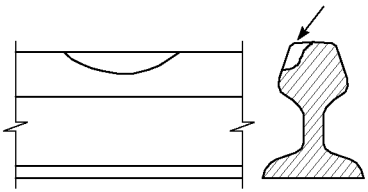
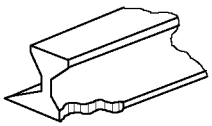
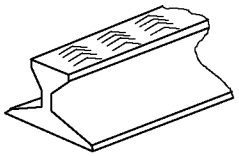
Повреждения от температурных воздействий проявляются при высоких температурах в виде разрушений лакокрасочных покрытий, коробления элементов, исчерпания несущей способности; а при низких температурах - в виде хрупких трещин. Кроме непосредственных воздействий на свойства металла изменение температуры нередко вызывает дополнительные напряжения в статически неопределимых системах.

Повреждения от химических воздействий заключаются в разрушении защитных покрытий и коррозии металла (уменьшении расчетной его толщины). Особенно опасно изменение микроструктуры металла с потерей пластичности, например, при насыщении водородом.

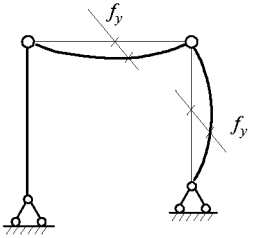
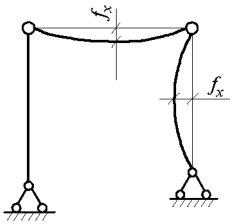
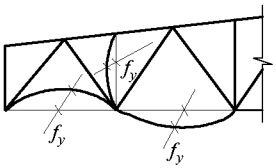
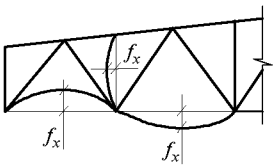
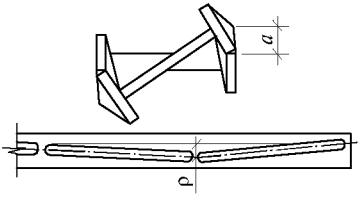
9.3.2. Дефекты и повреждения элементов строительных металлоконструкций. Наиболее распространенные дефекты и повреждения, выявляемые при проведении обследований элементов строительных металлических конструкций производственных зданий различного назначения, представлены в табл. 9.3.

При выполнении основной задачи - обнаружение и документальное описание каждого отклонения, дефекта и повреждения - специалисты, проводящие освидетельствование, должны обладать достаточной подготовкой и опытом для прогнозирования вероятного развития этих несовершенств и принимать своевременные меры по предупреждению опасных последствий.

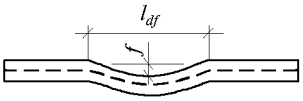
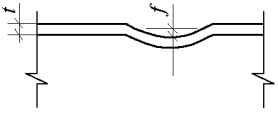
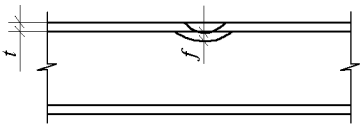
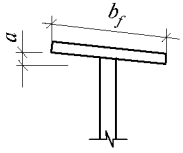
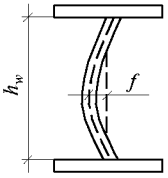
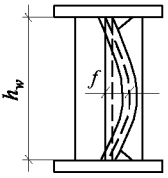
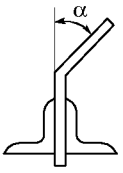
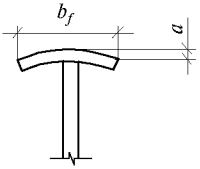
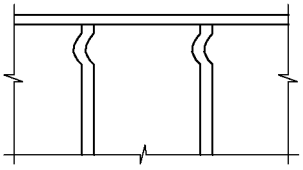
Таблица 9.3. Характерные дефекты и повреждения элементов металлоконструкций

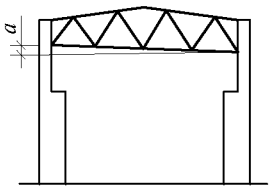
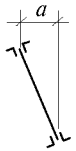
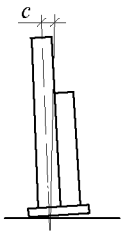
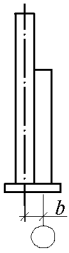
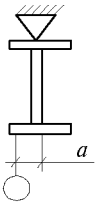
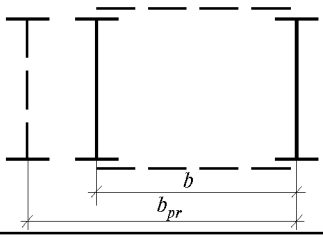
Номер группы	Наименование дефекта или повреждения	Эскиз дефекта или повреждения	Допускаемая величина	
			при приемке работ	при эксплуатации
1	2	3	4	5
1	Вырез в элементе конструкции		Не допускается	Проверяется расчетом
1	Вырыв в элементе конструкции		Не допускается	—//—
1	Отсутствие элемента		Не допускается	Не допускается
1	Разрыв элемента (излом)		Не допускается	Не допускается
1	Истирание верхней грани головки КР		—//—	$\delta \le 5$ мм
1	Истирание боковых граней головки КР		—//—	$b - b_1 = \delta$ $\delta_{1,2} \le 10$ мм
1	Выбоина и выкрашивание металла на поверхности катания головки рельса		—//—	Не допускается
1	Выколы и изломы в подошве рельса		—//—	Не допускаются
1	Короткие волнообразные неровности (рифли) на головке рельса		—//—	—//—

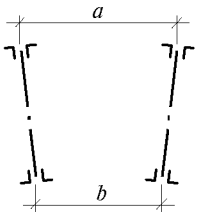
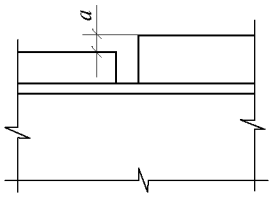
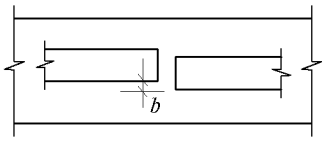
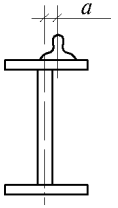
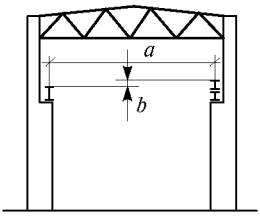
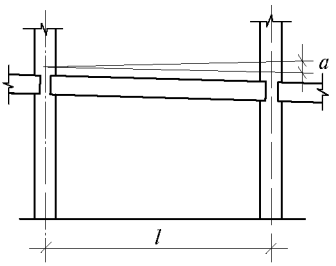
Продолжение табл.9.3

1	2	3	4	5
2	Трещина в основном металле элемента конструкции	Трещина в металле фасонок стержневых конструкций	Не допускаются	Не допускаются
		Трещина в стенках балок под ребрами жесткости	—//—	—//—
		Прочие трещины в стенках балок	—//—	—//—
2	Расслоение металла	Поперечная трещина в головке рельса	—//—	—//—
		Поперечная трещина в головке рельса	—//—	—//—
		Поперечная трещина в шейке рельса	—//—	—//—
2	Трещина в подошве рельса		—//—	—//—
5	Выгиб конструкции из плоскости рамы		$f_y \le \frac{1}{750} l^*$ но не >15 мм	Определяется расчетом
5	То же в плоскости рамы		$f_x \le \frac{1}{750} l^*$ но не >15 мм	
	То же в двух плоскостях		$f \le \frac{1}{750} l^*$ но не >15 мм	—//—
5	Выгиб отдельного элемента из плоскости конструкции		$f_y \le \frac{1}{750} l^*$ но не >15 мм	—//—
5	Выгиб отдельного элемента в плоскости конструкции		$f_x \le \frac{1}{750} l^*$ но не >15 мм	—//—
5	То же в двух плоскостях		$f \le \frac{1}{750} l^*$ но не >15 мм	—//—
5	Винтообразность элемента (длина элемента l)		$a \le 0{,}001l$ $a \le 10$ мм	$a \le 0{,}005l$ $a \le 20$ мм
	Искривление оси кранового рельса		$\rho \le 15$ мм на длине 40 мм	$\rho \le 20$ мм на длине 40 мм

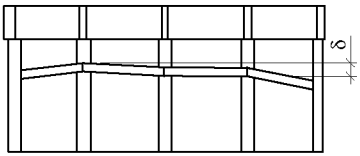
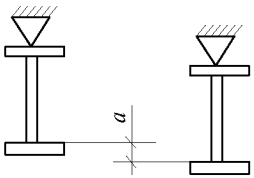
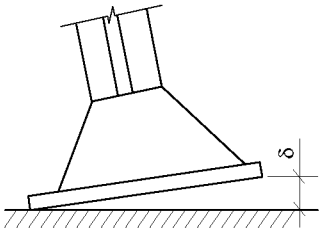
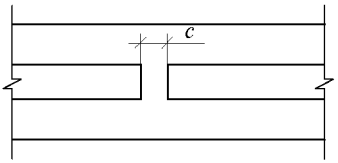
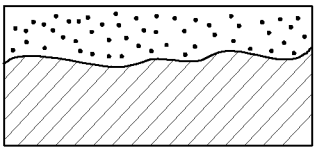
l^* – длина элемента (колонны, балки, ригеля)

1	2	3	4	5
6	Погнутость элементов		$f \le 0{,}001 l_{df}$ $f \le 10$ мм	Проверяется расчетом
6	Погнутость полок элементов		$f \le 0{,}1t$	$f \le 0{,}2t$
6	Вмятина		$f \le 0{,}1t$	$f \le 0{,}2t$
6	Перекос полок элементов таврового и двутаврового сечения в местах примыкания		$a \le 0{,}005 b_f$	$a \le 0{,}01 b_f$
6	Выгнутость стенки сплошной балки без вертикальных ребер жесткости		$f \le 0{,}003 h_w$	$f \le 0{,}01 h_w$
6	То же с вертикальными ребрами жесткости		$f \le 0{,}006 h_w$	—//—
6	Погнутость узловых фасонок. К фасонке примыкает сжатый элемент с напряжением в нем более половины расчетного сопротивления		$tg\alpha \le 0{,}01$	$tg\alpha \le 0{,}01$
6	Грибовидность полок элементов таврового и двутаврового сечения в местах примыканий и стыках		$a \le 0{,}005 b_f$	$a \le 0{,}01 b_f$
6	То же в остальных местах	—//—	$a \le 0{,}01 b_f$	$a \le 0{,}2 b_f$
6	Смятие ребер жесткости в местах примыкания к полкам		Не допускается	Не допускается

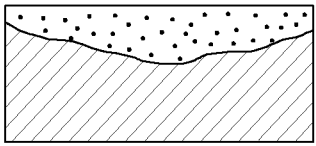
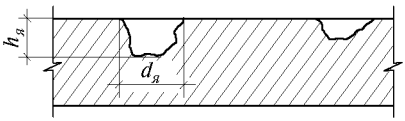
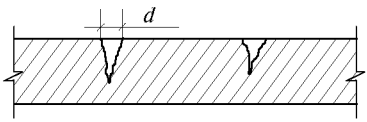
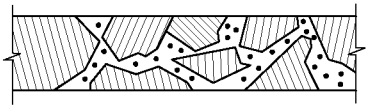
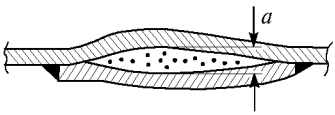
1	2	3	4	5
9	Смещение отметок опорных узлов ферм и ригелей для бескрановых зданий		$a \le \pm 20$ мм	$a \le \pm 40$ мм
9	То же для зданий с мостовыми кранами	—//—	$a \le \pm 15$ мм	$a \le \pm 30$ мм
9	Смещение верхнего пояса фермы в горизонтальной плоскости на опоре		$a \le \pm 5$ мм	$a \le \pm 10$ мм
9	То же в середине пролета	—//—	$a \le \pm 10$ мм	$a \le \pm 15$ мм
9	Смещение оси колонны от вертикали в верхнем сечении при высоте колонн до 15 м		$c \le \pm 15$ мм	$c \le \pm 20$ мм
9	То же при высоте колонн более 15 м	—//—	$c \le \pm 0{,}001l$	$c \le \pm 0{,}0015l$
9	Смещение оси колонны относительно разбивочной оси в нижнем сечении		$b \le \pm 5$ мм	$b \le \pm 10$ мм
9	Смещение осей ездовых балок для подвесных кранов с разбивочной оси пути		$a \le \pm 3$ мм	$a \le \pm 4$ мм
9	Смещение разбивочных осей стержней в элементах решетчатых конструкций от проектных (для сквозных колонн)		$\delta = b_{pr} - b$ $\delta \le \pm 3$ мм	—//—

1	2	3	4	5
10	Взаимное смещение верхних поясов ферм в горизонтальной плоскости		$\delta = a - b$ $\delta \le \pm 15$ мм	$\delta \le \pm 20$ мм
10	Взаимное смещение соседних торцов подкрановых рельсов по высоте		$a \le \pm 2$ мм	$a \le \pm 3$ мм
10	То же в плане		$b \le 2$ мм	$b \le 3$ мм
10	Смещение оси подкранового рельса с оси подкрановой балки		$a \le \pm 15$ мм	$a \le \pm 20$ мм
10	Взаимное смещение осей подкрановых рельсов относительно пролета		$\Delta a = a_{pr} - a$ $\Delta a \le \pm 10$ мм	$\Delta a \le \pm 15$ мм
			a_{pr} - расстояние между осями рельсов по проекту	
10	Разность отметок головок подкрановых рельсов в одном пролете здания (перекос кранового пути) на опоре	—//—	$b \le 15$ мм	$b \le 20$ мм
10	То же в пролете	—//—	$b \le 20$ мм	$b \le 25$ мм
10	Разность отметок подкрановых рельсов на соседних колоннах вдоль п/б при расстоянии между колоннами > 10 м		$a \le \frac{1}{1000} l$ но не более 15 мм	$a \le \frac{1}{750} l$ но не более 20 мм

Продолжение табл.9.3

1	2	3	4	5
10	То же при расстоянии между колоннами $l < 10$ м	—//—	$a \le 10$ мм	—//—
10	Наибольшая разность отметок головки КР на всей длине пути		δ ≤ 50 мм	δ ≤ 100 мм
10	Разность отметок нижних ездовых поясов подвесных путей в одном поперечном разрезе пролета здания при двух- и многоопорных подвесных кранах на опоре		$a \le \pm 6$ мм	$a \le \pm 10$ мм
10	То же в пролете	—//—	$a \le \pm 10$ мм	$a \le \pm 15$ мм
10	Разность отметок нижних ездовых поясов подвесных путей в одном поперечном разрезе пролета здания при подвесных кранах со стыковыми замками на опоре и в пролете	—//—	$a \le \pm 2$ мм	$a \le \pm 3$ мм
11	Зазор между базой колонны и фундаментом		$\delta \le \pm 5$ мм	$\delta \le \pm 7$ мм
11	Зазор в стыках подкрановых рельсов		$c \le 4$ мм (при t = 0 °C и длине рельса 12,5 м) при изменении на каждые 10 °C допуск на зазор изменяется на 1,5 мм	—//—
12	Сплошная коррозия. Равномерная коррозия		Не допускается	Не допускается

Продолжение табл.9.3

1	2	3	4	5
12	Неравномерная коррозия		Не допускается	Не допускается
12	Коррозия язвами		$h_я \le 0{,}5$ мм $d_я \le 2$ мм	—//—
12	Точечная (питтинговая) коррозия		$d \le 0{,}1$ мм	—//—
12	Межкристаллитная коррозия		Не допускается	—//—
12	Щелевая коррозия		То же	$a \le 2$ мм
13	Разрушение и выветривание слоя краски		То же	до 20% площади окраски
14	Несоответствие марки стали проектной, замена сечений, вида соединения		То же	Проверяется расчетом

Примечание: 1) В соответствии с отраслевым руководящим документом Минчермета СССР ОРД 00 000 89 «Техническая эксплуатация стальных конструкций производственных зданий», введенным в действие 03.08.1989г, дефекты и повреждения стальных конструкций в зависимости от вида дефекта и места нахождения разделены на 14 групп (Приложение 5): *1* – ослабление поперечного сечения, отсутствие или разрыв элемента; *2* – трещины в основном металле или в околошовной зоне; *3* – трещины в сварных швах; *4* – дефекты сварных швов или отсутствие шва; *5* – общее искривление элемента или конструкции по всей длине между точками закрепления; *6* – местные искривления на части длины или вмятины; *7* – ослабление или отсутствие болтов и заклепок; *8* – дефекты головок заклепок, смещения заклепок с разметочных рисок или осей; *9* – смещение конструкций относительно проектного положения; *10* – взаимные смещения конструкции; *11* – зазоры в местах сопряжения элементов или конструкций; *12* – коррозионные повреждения; *13* – разрушения защитных покрытий; *14* – прочие.

Удаление или повреждение элементов в ряде случаев может радикально изменить схему работы конструкции или даже каркаса в целом. Так, например, отсутствие даже одной распорки по верхнему поясу фермы на участке фонарной конструкции может вызвать потерю устойчивости пояса фермы и привести к обрушению покрытия. Общие и местные искривления стержней, а также искажения формы их поперечного сечения являются распространенными видами повреждений.

Искривления сжатых стержней, особенно в двух плоскостях, снижают их несущую способность вплоть до полного исключения из работы. Провисающие растянутые связи и распорки вибрируют при работе кранов, не обеспечивают простран-

ственную работу каркаса, увеличивают расчетную длину сжатых элементов, которые они по идее должны раскреплять.

В отличие от подобных сравнительно легко обнаруживаемых визуально дефектов, весьма трудоемкой является процедура выявления хрупких и усталостных трещин и особенно на ранних стадиях их возникновения и развития.

Исследованиями установлено, что порог хладноломкости стали зависит от многих факторов и в их числе от способа выплавки, степени раскисления, толщины металлопроката, термообработки. Наиболее значительным фактором, способствующим хрупкому разрушению стали, является возрастание величины локальных напряжений в месте резкого изменения сечения (искажение формы и толщины элемента, дефекты сварных швов, технологические повреждения структуры металла при правке, резке, продавливании отверстий, термическом воздействии сварки). В этих местах одноосное напряженное состояние переходит в двухосное и даже пространственное при одновременной концентрации местных напряжений на узком участке дефекта, что и способствует зарождению хрупкой трещины. Особую опасность представляют концентраторы, расположенные перпендикулярно направлению растягивающих усилий. Содействуют разрушению также начальные остаточные напряжения от прокатки и других процедур, связанных с неравномерными нагревом или остыванием металла.

Вероятность хрупких разрушений возрастает с увеличением геометрических размеров конструкций и толщин элементов.

Существенным в возникновении хрупких трещин является характер нагрузки. При ударных, циклических и переменных нагрузках напряжения возрастают от нуля до максимума в короткое время или мгновенно, в период, недостаточный для пластической релаксации напряжений. Вместе с тем создаются условия постепенного и скрытого накопления повреждений - зародышей хрупких разрушений.

Хрупкие разрушения чаще всего происходят при одновременном сочетании:

- резких концентраторов напряжений;
- высоких местных напряжений (остаточных или от действующих нагрузок на сооружение);
- отрицательной температуры, при которой данная марка стали переходит в хрупкое состояние.

Для стальных конструкций опасен и такой вид износа, как усталостный рост трещин, главным образом, в сварных швах. Под усталостью материала понимается изменение механических и физических свойств в результате действия циклически изменяющихся во времени напряжений. Сопротивление усталости характеризуется пределом выносливости - наибольшим напряжением, которое может выдержать материал без разрушения при заданном количестве циклов нагружения.

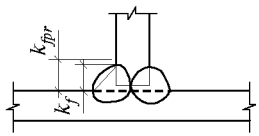
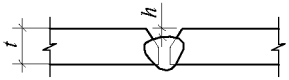
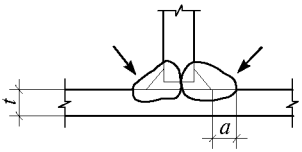
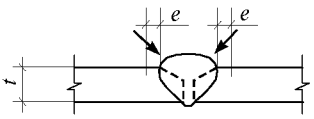
Усталостные трещины могут возникнуть в местах концентраторов в зоне как растягивающих, так и сдвиговых (касательных) напряжений. Зарождение этих трещин происходит в основном с поверхности металла. В сварных фланговых и стыковых соединениях появление трещин инициирует такой дефект как непровар. Период роста усталостных трещин до разрушения элемента в некоторых случаях измеряется месяцами и даже годами. Скорость роста зависит от уровня нагружения элемента с трещиной, частоты загружения, температуры эксплуатации и свойств металла. Процесс распространения усталостной трещины, а также ресурс эксплуатационной пригодности конструкции с трещиной может быть оценен расчетным путем на основе критериев механики разрушения с использованием кинетических зависимостей и характеристик трещиностойкости металла. Так, например, в работе [15] приведены основы инженерного расчета сосудов на циклическое подрастание трещин и определение критической длины трещин, грозящих аварией.

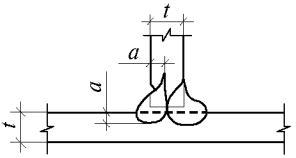
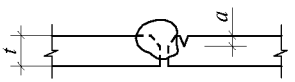
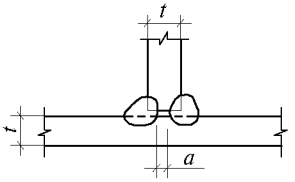
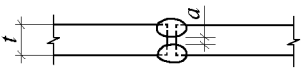
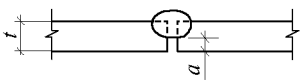
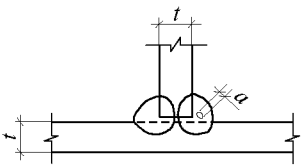
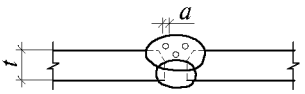
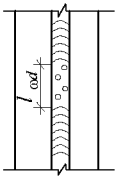
На усталостную прочность влияют такие факторы как химический состав стали, величина зерна и структура. С увеличением зерна предел усталости снижается; усталостная трещина в мелкозернистой стали распространяется медленнее. Концентраторы напряжений на различные стали при переменных нагрузках влияют неодинаково. Можно отметить, что у строительной стали повышенной прочности наблюдается более значительное понижение предела выносливости в связи с чувствительностью этих сталей к концентраторам напряжений, что приближает эти стали к пределу усталости обычной малоуглеродистой стали При этом следует иметь в виду, что сварной шов воздействует также как фактор, вызывающий образование неблагоприятной структуры в зоне термического влияния сварки.

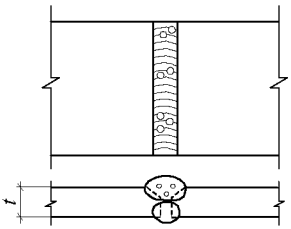
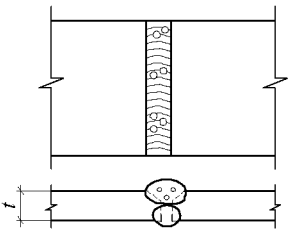
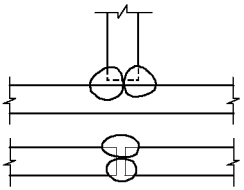
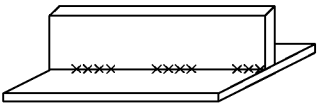
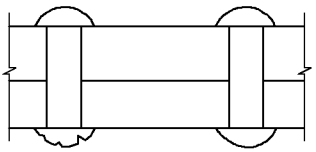
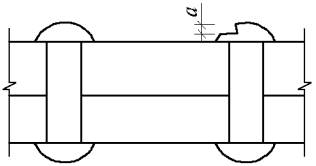
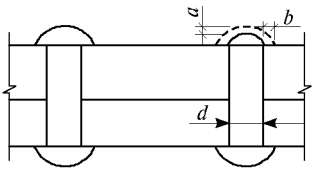
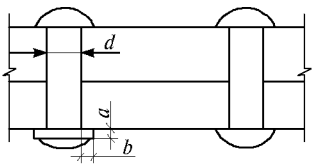
9.3.3. Характерные дефекты и повреждения соединений. В сварных, заклепочных и болтовых соединениях элементов конструкций встречаются дефекты, возникшие в процессе изготовления и монтажа конструкций. Появление этих дефектов связано с различного вида нарушениями технологии изготовления, низким качеством монтажных процедур и отсутствием надлежащего контроля качества работ.

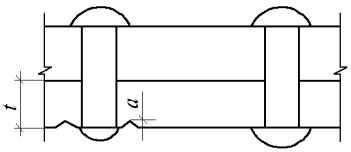
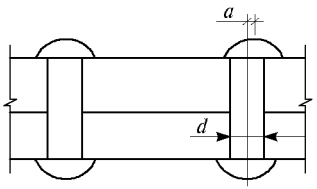
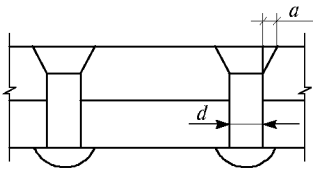
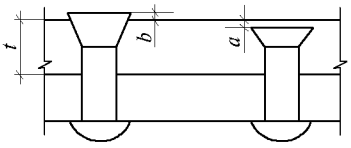
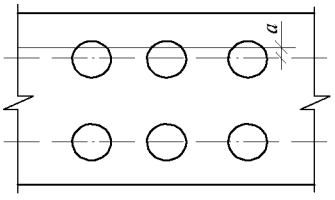
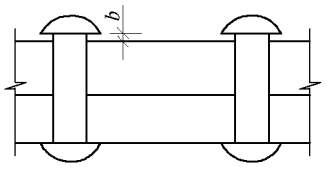
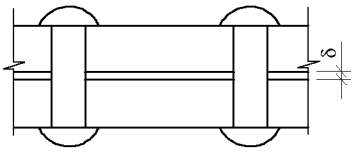
В сварных соединениях наиболее характерными дефектами являются: неполномерность швов, наплывы, подрезы основного металла, непровары в корне и по сечению шва, шлаковые включения, поры (табл.9.4). Основная причина возникновения этих дефектов связана с нарушением режимов сварки и неудовлетворительной подготовкой (очисткой, разделкой) кромок свариваемых элементов.

Таблица 9.4. Характерные дефекты и повреждения соединений

Номер группы	Наименование дефекта или повреждения	Эскиз дефекта или повреждения	Допускаемая величина	
			при приемке работ	при эксплуатации
1	2	3	4	5
3	Трещина в сварном шве	Продольная трещина в сварном шве или околошовной зоне Продольная трещина в сварном шве с выходом на основной металл Поперечная трещина в сварном шве	Не допускается —//— —//—	
4	Неполномерность угловых швов при ручной и полуавтоматической сварке		K_{fpr}-K_f Не допускается	
4	То же для стыковых швов		Не допускается	
4	Наплывы при ручной и полуавтоматической сварке угловых швов		при t=3÷15мм $a \le 2$ мм; при t=16÷40мм $a \le 3$ мм	
4	То же для стыковых швов		при t=3÷14мм $e = \pm 1$ мм; при t=15÷40мм $2e = \pm 3$ мм	

1	2	3	4	5
4	Подрезы основного металла при $t \le 20$ мм		$a \le 0{,}5$ мм	
4	То же при $t > 20$ мм		$a \le 1$ мм	
4	Непровар в корне шва при двусторонней сварке		$a \le 0{,}05t$ но не > 2 мм при длине непровара $l_{wd} \le 50$ мм	
4	То же для стыковой сварки		$a \le 0{,}05t$ но не > 2 мм при длине непровара $l_{wd} \le 50$ мм Общая длина непровара на 1.п.м шва ≤ 200 мм	
4	Непровар в корне шва в соединениях без подкладок, доступных сварке только с одной стороны при $t \le 20$ мм		$a \le 0{,}15t$ но не > 3 мм	
4	То же при $t \ge 20$ мм		$a \le 3$ мм	
4	Отдельные шлаковые включения или поры, либо их скопления при $t \le 20$ мм		$a \le 0{,}1t$ но не > 3 мм	
4	То же при $t \ge 20$ мм		$a \le 3$ мм	
4	Шлаковые включения, расположенные цепочкой или сплошной линией вдоль шва		Суммарная длина на 1 п.м. шва ≤ 200 мм	
4	Скопление газовых пор и шлаковых включений в отдельных участках шва	—//—	Не более 5 шт. на 1 см^2 площади шва при диаметре одного дефекта ≤ 1,5 мм	

1	2	3	4	5
4	Непровары, шлаковые включения и поры, расположенные отдельно цепочкой при двусторонней сварке		Не более 10% толщины свариваемого металла и не > 2 мм	
4	То же при односторонней сварке без подкладок		Не более 15% толщины свариваемого металла и не > 3 мм	
4	Резкие переходы от основного к наплавленному металлу, наплывы, натеки, сужения, кратеры, свищи		Не допускается	
4	Прожог сварного шва		Не допускается	
4	Прерывистость сварного шва		Не допускается	
8	Трещиноватость головки заклепки		Не допускается	
8	Зарубка головки заклепки		$a \le 2$ мм	
8	Маломерная и неоформленная головка		$a \le 0{,}05d$ $b \le 0{,}05d$	
8	Венчик вокруг головки		$b \le 3$ мм 3мм≥a≥1,5мм	

1	2	3	4	5
8	Зарубка металла обжимкой		Не допускается	
8	Смещение головки заклепки с оси стержня		$a \le 0{,}1d$	
8	Неполное заполнение потайной заклепки по диаметру		$a \le 0{,}1d$	
8	Избыток или недостаток по высоте потайной заклепки		$a \le 0{,}5$ мм $b \le 0{,}5$ мм если не мешают плотности прилегания другого элемента	
8	Смещение осей заклепочных рисок в конструкциях от проектного положения		$a \le 3$ мм	
8	Зазор между головкой заклепки и склепываемым пакетом		Щуп толщиной 0,2 мм не должен проходить вглубь под головку более чем на 3 мм	
7	Зазор между элементами склепываемого пакета		Щуп δ=0,5 мм не должен проходить вглубь между склепанными деталями более чем на 50 мм (вне зоны расположения заклепок)	$\delta \le 2$ мм
7	Дрожание или перемещение головки заклепки под ударом молотка массой 300–400 г		Не допускается	Допускается при количестве подвижных заклепок не более 10%

Примечание: смотри примечание 1 к таблице 9.3.

В заклепочных соединениях к наиболее распространенным дефектам относятся: ослабление или отсутствие заклепок, дрожание или перемещение заклепок при ударах контрольным молотком, разнообразные несовершенства головок заклепок, такие как трещиноватость, рябизна, неполномерность и др., неплотности склепываемого пакета, смещения заклепок с оси элемента. Перечисленные дефекты возникают как правило в результате нарушения технологических требований при изготовлении клепаных узлов и соединений.

В перечне наиболее часто встречающихся дефектов болтовых соединений можно указать следующие: отсутствие болтов, проворачивания от руки (кроме монтажных болтов), перекос болтов, дрожание или перемещение головки болта под ударом контрольного молотка.

К массовым повреждениям соединений могут быть отнесены: срез (или отрыв) заклепок и болтов, ослабление заклепок и болтов, хрупкие и усталостные трещины в сварных швах. Перечисленные повреждения могут развиваться как при имеющихся дефектах, так и в бездефектных соединениях в результате несоответствия расчетных предпосылок действительным условиям работы конструкций и их узлов и вызываться: ошибками проектирования, связанными с неправильным определением нагрузок и внутренних усилий; отличием фактического напряженного состояния в узлах конструкций от расчетного вследствие принятия неадекватных расчетных схем и действующих нагрузок; пониженными прочностными характеристиками основного и наплавленного металла (заклепок, болтов); изменением размеров сварных швов, числа заклепок и болтов при изготовлении и монтаже по сравнению с проектом; недопустимой перегрузкой при эксплуатации.

Необходимо иметь в виду что, как упоминалось ранее, в конструкциях, эксплуатирующихся при пониженных температурах, наличие концентраторов напряжений (дефектов) приводит к появлению хрупких трещин в сварных швах, причем трещины могут появляться при незначительном уровне рабочих напряжений.

К типичным повреждениям, вызванным химическим (электрохимическим) воздействием относятся отрыв головок заклепок, разрыв болтов и разрушение сварных швов в результате действия распирающих усилий между соединенными элементами, если в зазорах развивается щелевая коррозия.

9.3.4. Коррозионные повреждения. Ниже приводятся основные виды коррозионных повреждений стальных и алюминиевых строительных конструкций с указанием характерных признаков, по которым устанавливают виды коррозии на стадии предварительной оценки технического состояния конструкции.

Сплошная коррозия характерна для стали, алюминия, цинковых и алюминиевых защитных покрытий в любых средах, в которых коррозионная стойкость данного материала или металла покрытия недостаточно высока. Этот вид коррозии характеризуется относительно равномерным по всей поверхности постепенным проникновением в глубь металла, т.е. уменьшением толщины сечения элемента или толщины защитного металлического покрытия. После механического удаления продуктов коррозии до чистого металла поверхность конструкции оказывается шероховатой, но без очевидных язв, точек коррозии и трещин. Наиболее подверженными этому виду коррозии участками, как правило, являются узкие щели, зазоры, поверхности под головками болтов, гайками, другие участки скопления пыли и влаги.

Коррозия пятнами характерна для алюминия, алюминиевых и цинковых покрытий в средах, в которых их коррозионная стойкость близка к оптимальной и лишь случайные факторы могут вызвать местное нарушение состояния материала. Этот вид коррозии характеризуется небольшой глубиной проникновения коррозии. При его выявлении необходимо установить причины и источники временных местных повышений агрессивности среды за счет попадания на поверхность конст-

рукции жидких сред (конденсата, атмосферной влаги при протечках и т.п.), локального накопления или отложения солей, пыли и т.д.

Язвенная коррозия характерна в основном для углеродистой и низколегированной стали (в меньшей степени – для алюминия, алюминиевых и цинковых покрытий) при эксплуатации конструкций в жидких средах и грунтах. Язвенная коррозия характеризуется появлением на поверхности конструкции отдельных или множественных повреждений, глубина и поперечные размеры которых (от долей миллиметра до нескольких миллиметров) соизмеримы. Язвенная коррозия листовых конструкции, а также элементов конструкций из тонкостенных труб и прямоугольных элементов замкнутого сечения со временем переходит в сквозную с образованием отверстий в стенках толщиной до нескольких миллиметров. Язвы являются острыми концентраторами напряжений и могут оказаться инициаторами зарождения усталостных трещин и хрупких разрушений. Для оценки скорости язвенной коррозии и прогнозирования ее развития в последующий период определяют средние скорости проникновения коррозии в наиболее глубоких язвах и количество язв на единицу поверхности. Эти данные в дальнейшем следует использовать при расчете несущей способности элементов конструкций.

Точечная (питтинговая) коррозия характерна для алюминиевых сплавов, в том числе анодированных, и нержавеющей стали. При обнаружении питтинговой коррозии необходимо выявить источники хлоридов-возбудителей процесса и возможности исключения их воздействия на металл.

Питтинговая коррозия представляет собой разрушение в виде отдельных мелких (не более 1 ÷ 2 мм в диаметре) и глубоких (глубина больше поперечных размеров) язв. О скорости проникновения коррозии судят по тем же характеристикам, что и при язвенной коррозии. Глубину наиболее крупных питтингов можно измерить индикаторами часового типа со щупами в виде тонких прочных иголок, менее крупных питтингов – под оптическим микроскопом после отбора проб для лабораторного анализа.

Межкристаллитная коррозия. Характерна для нержавеющей стали и упрочненных алюминиевых сплавов, особенно на участках сварки, и характеризуется относительно равномерным распределением множественных трещин на больших участках поверхности конструкций. Глубина трещин обычно меньше, чем их размеры на поверхности. На каждом участке развития этого вида коррозии трещины практически одновременно зарождаются от многих источников, связь которых с внутренними или рабочими напряжениями не является обязательной. Под оптическим микроскопом на поперечных шлифах, изготавливаемых из отобранных проб, видно, что трещины распространяются только по границам зерен металла. Отдельные зерна и блоки могут выкрашиваться, в результате чего образуются язвы и поверхностное шелушение. Основной характеристикой межкристаллитной коррозии является средняя скорость проникновения коррозионных трещин в глубь металла, устанавливаемая в соответствии с ГОСТ 9.021-74* и ГОСТ 6032-84.

Коррозионное растрескивание – вид квазихрупкого разрушения стали и высокопрочных алюминиевых сплавов при одновременном воздействии статических напряжений растяжения и агрессивных сред; характеризуется образованием единичных и множественных трещин, связанных с концентрацией основных рабочих и внутренних напряжений. Трещины могут распространяться между кристаллами или по телу зерен, но с большей скоростью в плоскости, нормальной к действующим напряжениям, чем в плоскости поверхности.

Углеродистая и низколегированная сталь обычной и повышенной прочности (с $\sigma_т \geq 600$ МПа) подвергается этому виду коррозии в ограниченном количестве сред: горячих растворах щелочей и нитратов, смесях CO-CO_2-H_2-H_2O, жидком аммиаке и в средах, содержащих сероводород. Коррозионное растрескивание высокопрочной

стали, например высокопрочных болтов, и высокопрочных алюминиевых сплавов может развиваться как в атмосферных условиях, так и в различных жидких средах.

При установлении факта повреждения конструкции коррозионным растрескиванием необходимо убедиться в отсутствии признаков других форм квазихрупкого разрушения (хладноломкости, усталости). Для этого к проведению обследования необходимо привлекать специалистов в области металловедения, проводить фрактографический анализ проб, в некоторых случаях – химический анализ материалов на содержание водорода. Разрушение отдельных элементов конструкций (высокопрочных болтов, канатов и т.п.) в результате коррозионного растрескивания обычно происходит внезапно. Лишь в листовых конструкциях возможно постепенное развитие трещин, за которыми можно вести наблюдение. Тогда о степени интенсивности коррозионного растрескивания судят по средней скорости роста наиболее длинных трещин.

Коррозионная усталость – вид квазихрупкого разрушения материалов при одновременном воздействии циклических напряжений и жидких агрессивных сред. Она характеризуется теми же внешними признаками, что и коррозионное растрескивание. Об интенсивности коррозионной усталости судят по количеству циклов, которое элементы конструкций могут выдерживать до зарождения трещин, или по скорости роста наиболее длинных трещин в листовых конструкциях.

Расслаивающая коррозия присуща алюминиевым сплавам и характеризуется разделением металла по границам зерен в плоскостях, параллельных плоскости горячей деформации (прокатки, прессования, экструзии и т.д.). Внутри металла по плоскостям разделения образуются продукты коррозии алюминия. Расслаивание одновременно распространяется из нескольких источников и может происходить в нескольких параллельных плоскостях. Как частный случай расслаивающей коррозии можно рассматривать и поверхностное шелушение, описанное выше.

Контактная (гальваническая) коррозия выражается в резком, чаще всего местном, увеличении глубины проникновения сплошной коррозии одного из двух разнородных металлов или сплавов, между которыми существует электрический контакт за счет механической связи и одновременного воздействия одной и той же электропроводной среды (электролита) на оба металла или сплава. Зона распространения контактной коррозии определяется равномерностью распределения электролита на поверхности конструкций и его электропроводностью. При атмосферной коррозии сплошная пленка влаги (электролита) обычно очень тонка, не всегда равномерно распределяется по поверхности конструкций и, следовательно, характеризуется значительным электросопротивлением. В связи с этим протяженность зоны действия условий, способствующих протеканию контактной коррозии, составляет от десятых долей миллиметра до нескольких миллиметров от непосредственной границы контакта между разнородными металлами.

Зона контактной коррозии в сплошных электропроводных средах (природных и технических водах, грунтах и т.п.) может распространяться на расстоянии до нескольких десятков метров. В этом случае важнейшей характеристикой опасности контакта является соотношение площадей поверхности элементов из более благородного (катодного) металла или сплава и менее благородного (анодного). Чем больше отношение площади катода к площади анода, тем интенсивнее протекает разрушение элементов конструкций из менее благородного материала.

Щелевая коррозия в чистом виде присуща конструкциям из нержавеющей стали и других пассивирующихся материалов в агрессивных жидких средах, в которых материалы вне узких щелей и зазоров устойчивы благодаря пассивному состоянию, т.е. вследствие образования на их поверхности защитной пленки. Из-за недостаточного доступа кислорода в узкие щели и зазоры пассивное состояние стали в них неустойчиво, металл в щелях становится анодным по отношению к металлу вне

щелей и зазоров, и коррозия протекает, подобно контактной.

Коррозия в результате неравномерной аэрации характерна для протяженных стальных конструкций, подвергающихся воздействию жидких сред или грунтов с высокой электропроводностью. Связана с неравномерным доступом кислорода к различным участкам поверхности конструкций, например вследствие различной плотности грунтов, экранирования части поверхности неметаллами, в частности, отслаивающимися полимерными покрытиями, и т.п. Анодными становятся участки, доступ кислорода к которым наиболее ограничен, а доступ электролита обеспечен. Коррозия на этих участках протекает подобно контактной.

Коррозия, вызываемая токами от внешних источников, присуща конструкциям, описанным в предыдущем абзаце. Однако движущей силой процесса является не неравномерная аэрация, а постоянные токи от посторонних источников, случайно попадающие в протяженные конструкции вследствие отсутствия или неисправности электроизоляционных, заземлительных, электродренажных и т.п. устройств. Примерами таких источников являются рельсовый транспорт (для подземных конструкций), сварочные агрегаты, гальванические ванны и т.п. Коррозии подвергаются те участки конструкций, с которых стекают положительные заряды. Коррозия протекает подобно контактной.

Металлографическую оценку видов коррозии следует производить по СТ СЭВ «Защита от коррозии. Металлы, сплавы, покрытия металлические. Металлографический метод оценки коррозионного разрушения».

9.4. Подготовка и проведение обследований металлических конструкций

9.4.1. Общие положения. Обследование эксплуатируемых конструкций проводится с целью сбора необходимых данных для оценки технического состояния и принятия проектных решений по ремонту или реконструкции сооружения. Необходимость в проведении обследования возникает при длительный сроках эксплуатации зданий и сооружений, а также если:

- в процессе эксплуатации в конструкциях обнаружены существенные дефекты и повреждения, оценку которых не может дать служба эксплуатации предприятия;
- при реконструкции предполагается изменение объемно-планировочного решения (увеличение высоты, изменение шага колонн и т.д.) или повышение нагрузок и интенсивности эксплуатационных воздействий;
- имели место аварии аналогичных сооружений.

При обследовании выявляются дефекты и повреждения конструкций, уточняются конструктивная схема сооружения, а также сечения элементов и узлов, определяются нагрузки и воздействия и оценивается качество материалов.

В общем случае обследование включает в себя следующие этапы:

- подготовительные работы;
- натурное освидетельствование;
- уточнение фактических и прогнозирование новых нагрузок и воздействий;
- оценка качества материалов.

Обследование может быть выборочным или полным. Если конструкции находятся в удовлетворительном состоянии и не имеют существенных дефектов и повреждений, а при реконструкции не предполагается увеличение нагрузок, как показывает опыт достаточно обследовать детально 20% однотипных конструкций (балок, ферм, колонн и т.д.), находящихся в наиболее неблагоприятных условиях работы: в зонах повышенной вибрации, агрессивности среды и т.д.

Если при выборочном обследовании обнаружены существенные дефекты и повреждения, снижающие несущую способность конструкций или выявлены значи-

тельные отступления от проекта (замена сечений, марок стали, диаметров заклепок и болтов и т.д.), проводится полное обследование всех элементов.

9.4.2. Подготовительные работы. Подготовительные работы выполняются до начала работ непосредственно на объекте после поступления заявки (заказа) на обследование или реконструкцию здания или сооружения. Задачей подготовительных работ является возможно более точное определение объемов предстоящего обследования конструкций, а также условий его проведения. В итоге подготовительных работ оформляются соответствующие документы, являющиеся юридическим основанием на выполнение работ, регламентирующим их объем, сроки окончания и взаимоотношения между заказчиком и исполнителем на период работ.

Перед началом работ по обследованию необходимо оформить следующие документы:

- техническое задание на выполнение работы, выданное заказчиком в установленном порядке и содержащее необходимый перечень данных, достаточных для определения объема работ и их трудоемкости;
- договор на выполнение работы (договор подряда), заключенный между организацией-исполнителем и предприятием (организацией) - заказчиком, являющимся юридическим владельцем или пользователем объекта обследования;
- акт-допуск на проведение работ в условиях действующего предприятия с перечнем всех технических и организационных мероприятий, обеспечивающих доступ к обследуемым конструкциям с учетом требований техники безопасности;
- график выполнения работ в зданиях с непрерывным производством.

Техническое задание на проведение обследования конструкций является основанием для заключения договора и последующего проведения работы, а также основанием для оценки ее полноты и качества.

Техническое задание должно включать:

- перечень, содержащий наименование и указывающий объем в листах всех документов, входящих в задание;
- пояснительную записку;
- чертежи.

Пояснительная записка к техническому заданию должна содержать следующие данные:

- название предприятия-владельца или пользователя объекта работы, местонахождение объекта;
- наименование работы (например, обследование или реконструкция здания (сооружения) или его части с указанием пролетов, осей, отметок и других данных, ограничивающих объект работы);
- время строительства объекта с указанием проекта (рабочих чертежей марок АР, КЖ, КМ и КМД), по которому выполнялось строительство, время ввода объекта в эксплуатацию (если строительство выполнялось в несколько очередей, указываются точные границы каждой очереди и названные выше сведения приводятся для каждой очереди строительства);
- сведения о замене конструкций в процессе эксплуатации, их ремонте или усилении с указанием чертежей, по которым названные работы выполнялись, а также с указанием времени выполнения работ;
- эксплуатационный режим здания (сооружения) с указанием температурно-влажностных характеристик и степени агрессивности среды в зоне расположения конструкций, в том числе данные о максимальных значениях температуры в зонах избыточных тепловыделений, данные о категории пожарной опасности и взрывоопасности;

- сведения о предполагаемых изменениях эксплуатационного режима здания (например, в связи с техническим перевооружением);
- данные о нагрузках на обследуемые конструкции от веса опирающихся на них конструкций, снега, ветра, крановых нагрузках, сейсмических воздействиях, других видах нагрузок;
- схемы технологических нагрузок на обследуемые конструкции, в том числе сведения о наличии подъемно-транспортного оборудования, передающего подвижные нагрузки на обследуемые конструкции;
- сведения о предполагаемых изменениях величины или характера расположения на обследуемых конструкциях технологических нагрузок, нагрузок от подъемно-транспортного оборудования;
- характеристики металла, использованного при изготовлении обследуемых конструкций (на основании сертификатов заводов-изготовителей).

В комплект чертежей, кроме упомянутых в пояснительной записке к техническому заданию, должны быть включены:

- архитектурно-строительные чертежи комплектов АР и КЖ, в том числе заглавные листы с перечнем чертежей проекта и основными данными по проекту, планы, разрезы, чертежи всех конструктивных элементов, нагрузка от которых передается на обследуемые конструкции и на которые обследуемые конструкции опираются;
- чертежи металлических конструкций – полный комплект (если объект проектировался в несколько очередей, чертежи марки КМ прилагаются в полном комплекте по каждой очереди проектирования);
- чертежи металлоконструкций марки КМД – полный комплект;
- чертежи на замену конструкций в процессе эксплуатации, их ремонт или усиление (если ремонт, усиление или замена конструкций в процессе эксплуатация проводились);
- чертежи со схемами существующих технологических нагрузок;
- чертежи со схемами технологических нагрузок, приложение которых к существующим конструкциям предполагается (в соответствии с данными, приведенными в составе пояснительной записки);
- схемы размещения существующего подъемно-транспортного оборудования с габаритными размерами и весовыми характеристиками;
- схемы размещения подъемно-транспортного оборудования (с габаритными размерами и весовыми характеристиками), установка которого предполагается.

Техническое задание на выполнение обследования конструкции подписывается соответствующими должностными лицами предприятия (организации)-заказчика и направляется организации-исполнителю в установленном порядке.

Все данные, подлежащие включению в состав технического задания на обследование эксплуатируемых зданий или сооружений, должны быть получены из документов или являются документами, наличие которых у владельца (пользователя) здания или сооружения предусмотрено действующим законодательством.

9.4.3. Анализ технической документации. Анализ материалов, представленных в составе технического задания на проведение обследования, преследует цель обеспечить, в первую очередь, полноту и достоверность информации об объекте (чертежей, схем, паспортов, справок, актов, протоколов и т.д.) для определения состава и объема работ по обследованию.

На основании анализа технической документации определяются состав, объем работы по обследованию конструкций, ее трудоемкость и стоимость. С учетом трудоемкости работы составляется договор на ее выполнение в определяются сроки

окончания работы, а также разрабатываются необходимые мероприятия по обеспечению доступа к обследуемым конструкциям и обеспечению безопасных условий проведения работ.

Чертежи оснастки, необходимой для обеспечения доступа к конструкциям, выполняются специализированной организацией, проводящей обследование, а изготовление оснастки – предприятием-владельцем объекта.

Мероприятия по обеспечению доступа к обследуемым конструкциям и безопасным условиям ведения работ включаются в состав акта-допуска на проведение работ в условия действующего предприятия.

На этом этапе работы целесообразно оценить степень соответствия проектной документации, относящейся к объекту обследования, требованиям норм строительного проектирования, действующим на момент выполнения обследования. Такая оценка должна производиться как для проектной документации, по которой объект строился, так и для проектной документации, разрабатывавшейся для реконструкции объекта, ремонта, усиления или замены его конструкций.

Оценки степени соответствия проектной документации требованиям действующих норм, полученные на подготовительном этапе работы, на последующих ее этапах сопоставляются с оценками, полученным в процессе обмера, освидетельствования конструкций, испытания отобранных образцов металла, проверочного расчета. Отклонения от требований действующих норм, выявленные в проектной документации и обнаруженные затем при обследовании в конструкциях, фиксируются в выводах заключительной части работы.

На основании рассмотрения и анализа технической документации, представленной в составе задания на проведение обследования, целесообразно дать оценку степени соответствия требованиям действующих норм системы надзора за состоянием конструкций в процессе эксплуатации.

Окончательная оценка технического уровня системы надзора за состоянием конструкций и его соответствия требованиям действующих норм выполняется на основании данных обследования здания или сооружения.

Возможны ситуации, когда по тем или иным причинам задание на обследование представляется в неполном объеме (например, вследствие отсутствия у владельца объекта необходимой технической документации). В таких случаях весь объем данных и все оценки, получение которых обычно предусматривается на стадии подготовки работы, должны быть получены при освидетельствовании и обмере конструкций.

Следует однако учитывать, что при этом трудоемкость работ по обследованию конструкций существенно возрастает и сами работы значительно усложняются. В ряде случаев, когда здание или сооружение в течение времени эксплуатации подвергалось многократным ремонтам, усилениям, неоднократно реконструировалось и перестраивалось, отсутствие полного объема технической документации по такому объекту может обусловить невозможность обследования его конструкций на основе обычно применяемых статистических (выборочных) методов и потребовать сплошного обследования.

9.4.4. Состав натурного освидетельствования конструкций. Натурное освидетельствование включает в себя общий осмотр конструкций, геодезическую съемку положения конструкций, детальный осмотр с инструментальной проверкой состояния элементов и узлов, их обмер и фотографирование.

При общем осмотре уточняется конструктивная схема элементов и узлов и устанавливается ее соответствие проекту, определяется общее качественное состояние конструкций, характер повреждений и зоны наибольшей повреждаемости конструкций, выявляются отличные от принятых в проекте нагрузки и воздействия.

По результатам общего осмотра намечаются места для детальной проверки состояния конструкций и уточняется рабочая программа обследования.

При натурном освидетельствовании конструкций определяются их следующие характеристики:

- отклонения размеров между осями основных конструктивных элементов (пролет, шаг колонн, отметки характерных узлов конструкций, расстояния между узлами и т.д.);
- отклонения фактических осей элементов от проектных;
- отклонения габаритных размеров и длин конструктивных элементов;
- отклонения размеров поперечных сечений элементов и соответствие примененных профилей принятым в проекте;
- наличие и местоположение стыков, мест изменения сечений, ребер жесткости, соединительных элементов, связей, опорных частей;
- отклонения в длине, высоте и качестве сварных швов, размещении, количестве и диаметре заклепок и болтов;
- наличие специальной обработки и пригонки кромок и торцов;
- дефекты и повреждения элементов и узлов и т.п.

Особое внимание при освидетельствовании должно быть обращено на элементы и узлы, разрушение которых может привести к обрушению конструкции (например - пояса и опорные раскосы ферм, пояса балок, укрупнительные стыки и др.), а также на участки, где после реконструкции возрастет величина или интенсивность технологических нагрузок и воздействий.

Для доступа к конструкциям при освидетельствовании следует по возможности использовать имеющиеся в здании средства: мостовые и подвесные краны, переходные площадки и галереи, технологическое оборудование и т.д. Устройство специальных подмостей, лесов, площадок, настилов, люлек и т.д. требуется только тогда, когда нет возможности использовать вышеназванные средства. В отдельных случаях можно пользоваться легкими приставными или навесными лестницами, стремянками, если это не противоречит правилам техники безопасности.

9.4.5. Техника выявления отклонений, дефектов и повреждений. Выявление отклонений, дефектов и повреждений и измерение их величин производится путем осмотра и обмера конструкций с использованием измерительного инструмента. Приспособления, инструменты и приборы должны обеспечивать требуемую точность измерений и отвечать требованиям техники безопасности. Примерный перечень приборов и инструментов приводится далее в п.11.4 главы 11.

Для определения расстояний между характерными точками конструкций, выполняется геодезическая съемка. Она должна осуществляться преимущественно геодезической службой предприятия или специализированной организацией.

При производстве измерений геометрического положения колонн и подкрановых конструкций мостовые краны должны быть удалены за пределы обследуемой зоны, и их положение должно быть зафиксировано в документах по обследованию.

При нивелировке неразрезных подкрановых балок рекомендуется нагружать балки мостовым краном, устанавливаемым рядом с нивелирной рейкой для того, чтобы выбрать зазоры в сопряжениях. При этом давление колес крана должно быть минимальным.

Отклонения элементов от вертикали могут измеряться при помощи отвеса из стальной проволоки с грузом 1÷10 кг, демпфированного путем погружения его в сосуд с водой или маслом.

Измерения угловых отклонений элементов от горизонтали и вертикали можно производить при помощи геодезических инструментов, точных уровней и оптических квадрантов.

При измерении искривлений элементов конструкции определяется их длина, форма и наибольшая стрелка искривления. Для местных погнутостей и вмятин, кроме того, измеряется длина искривленной части и осуществляется ее привязка по длине элемента.

Для измерений искривлений элементов большой длины (пояса ферм, балок, прогонов и др.) применяют теодолит в комплекте с освещенной рейкой.

Определение степени коррозионного повреждения стальных конструкций производится в соответствии с Пособием к СНиП II-28-73 «Защита строительных конструкций от коррозии».

Контроль состояния заклепок и болтов нормальной и повышенной точности выполняется путем простукивания молотком массой 0,2÷0,5 кг. При ударе ослабленные заклепки и незатянутые болты издают глухой дребезжащий звук, а приложенный к ним палец ощущает дрожание. Наиболее ослабленные заклепки и болты проворачиваются от руки и смещаются от удара молотком. Неплотности прилегания головок к пакету и зазоры между листами в пакете проверяются с помощью набора щупов толщиной от 0,1 до 0,5 мм (см. табл.9.3).

Усилие натяжения высокопрочных болтов проверяется при помощи динамометрического ключа.

К дефектам и повреждениям сварных швов относятся: хрупкие трещины, несплавления кромок, непровары, газовые поры, незаваренные кратеры, неподваренный корень шва, подрезы и другие дефекты, более подробный перечень которых содержится в ГОСТ 2601-84* и табл.9.4.

Наиболее часто дефекты и повреждения сварных швов встречаются в конструкциях из кипящей стали в швах, выполненных электродами с ионизирующей (меловой) обмазкой. Такие швы отличаются тем, что имеют неровную, бугристую, сильно окисленную поверхность.

После тщательной очистки сварных швов осматривается вся поверхность шва и выявляются внешние дефекты сварки (подрезы, кратеры, переменное по длине сечение, наружные трещины, поры и т.д.). Для выявления мелких дефектов следует использовать лупы с 6÷8-кратным увеличением.

Для измерения катета шва применяются универсальные шаблоны конструкции Красовского, Ушерова-Маршака и наборы шаблонов. Измерение катетов сварных швов необходимо производить не менее, чем в трех местах по длине шва.

Для наиболее ответственных конструкций, работающих в тяжелых условиях: повышенные динамические нагрузки, низкая температура эксплуатации, а также в конструкциях из кипящей стали и в случае обнаружения трещин и других дефектов в швах аналогичных конструкций, следует определить степень провара угловых швов. Для этого по оси шва засверливается отверстие диаметром на 6 мм больше ширины наружной поверхности шва. Стенки отверстия протравливаются 20% спиртовым раствором азотной кислоты и осматриваются через лупу для обнаружения дефектов. После проведения исследования отверстие заваривается с применением электродов, соответствующих металлу конструкции и условиям эксплуатации, и зачищается наждачным кругом заподлицо с поверхностью шва.

Трещины, не выходящие на поверхность, и другие скрытые дефекты стыковых сварных швов обнаруживаются при помощи физических методов контроля: ультразвукового, магнитного порошкового, электромагнитного, а также при помощи гамма- и рентгенографии.

Выявление хрупких трещин при освидетельствовании конструкций следует начинать со сварных швов и прилегающих к ним зон. Сплошному контролю подвергаются сварные швы в тех случаях, когда:

- сталь, примененная в конструкциях, не обладает удовлетворительной свариваемостью (устанавливается на основании сертификата или по результатам анализа);
- отсутствуют сертификаты на сварочные материалы и номера паспортов сварщиков, а при осмотре обнаруживаются дефекты и трещины в швах и околошовной зоне;
- примененные типы электродов согласно СНиП II-23-81* не соответствуют маркам стали или группам конструкций для соответствующих климатических районов;
- при сварке применены электроды типа Э-38 с тонкой ионизирующей обмазкой (типа меловой);
- сварка применена в весьма ответственных конструкциях, разрушение которых может повлечь за собой человеческие жертвы, большой экономический, экологический и др. ущерб;
- проектом или действующими нормами предусмотрен контроль качества сварных швов при изготовлении и монтаже физическими методами, но документы о проведении такого контроля отсутствуют.

Выборочный контроль производится в тех случаях, когда высокое качество конструкций подтверждается соответствующей технической документацией. При этом проверке подвергаются сварные швы, в которых трещины визуально не обнаружены, но на возможность их наличия указывают внешние признаки, перечисленные выше. В случае же обнаружения трещин или других дефектов переходят к сплошному контролю. После выявления мест возможного расположения трещин в сварных швах, прилегающих к ним зонах и других участках конструкций, эти места должны быть отмечены, замаркированы и очищены от грязи и пыли. Крупные трещины (с раскрытием более 0,5 мм) легко обнаруживаются визуально. Более мелкие можно определить по потекам ржавчины на поверхности металла, растрескиванию и шелушению краски. Хорошо помогает выявлению мелких трещин применение лупы с 6-и - 8-ми кратным увеличением. Для определения ширины раскрытия и протяженности трещины участок металла или сварного шва необходимо зачистить напильником, шабером или наждачным кругом и протравить 20% спиртовым раствором азотной кислоты. После этого легко обнаруживаются трещины с раскрытием от 0,05 до 0,2 мм. При необходимости обнаружить окончание трещины в ее вершине рекомендуется снимать острым зубилом стружку вдоль трещины. Разделение стружки свидетельствует о наличии трещины.

Выявление трещин малого раскрытия местами можно производить при помощи индикаторного пенетранта (ТУ 10-750-74). Для этого на тщательно очищенную поверхность металла в месте предполагаемой трещины кистью наносятся три тонких слоя индикаторного пенетранта с интервалом в 3 минуты, просушиваются на воздухе до потери влажности, затем наносится еще один слой. После этого остатки пенетранта с поверхности удаляются очистителем, представляющим собой смесь керосина (30%) в трансформаторного масла (70%). Затем на поверхность наносится краскораспылителем проявитель П2 (ТУ-10-749-74) тонким равномерным без подтеков слоем. Через один час поверхность проверяется осмотром через четырехкратную лупу. Очертание трещины появляется на проявляющем слое.

Менее чувствительный и более доступный метод «керосиновой пробы» состоит в том, что зачищенную до металлического блеска и протравленную спиртовым раствором азотной кислоты поверхность металла промывают водой, просушивают и смазывают керосином. Через 30 - 40 секунд ветошью удаляют излишки керосина и протирают поверхность досуха. Затем поверхность равномерно зачерчивают мелом и наносят рядом с местом предполагаемой трещины 3 - 4 удара молотком массой 1 кг. На меловой поверхности возникают отпечатки трещин темного или красно-бурого цвета.

Трещины, не выходящие на поверхность, и другие скрытые дефекты стыковых швов обнаруживаются при помощи физических методов контроля: ультразвукового, магнитного, порошкового, электромагнитного, а также при помощи гамма- и рентгенографии и др. Наряду с физическими методами контроля для обнаружения трещин, несплавлений и других дефектов сварных швов можно использовать вышеописанный метод засверливания. В случае обнаружения трещин или других дефектов переходят к сплошному контролю.

При необходимости, для наблюдения за «дыханием» и динамикой развития обнаруженной трещины, поверх нее наносят марки на основе канифольных тензочувствительных (хрупких) лаков.

Упрощенным методом наблюдения за скоростью развития усталостных трещин является нанесение рисок рядом с видимой вершиной трещины через определенный интервал времени.

9.4.6. Особенности освидетельствования элементов каркаса зданий. При освидетельствовании конструкций *покрытия* - стропильных и подстропильных ферм необходимо проверить:

- соответствие фактических размеров, элементов и узлов проектным;
- прямолинейность стержней, наличие соединительных прокладок в сжатых стержнях;
- наличие остаточных прогибов конструкций;
- наличие трещин в стыковых накладках поясов, в фасонках, крепящих их, и сварных швах, особенно в местах сближения элементов с большими растягивающими усилиями и в местах сближения сварных швов;
- состояние опорных узлов ферм: наличие опорных столиков, плотность опирания опорных фланцев, наличие болтов, заклепок, сварных швов в т.д.;
- состояние укрупнительных узлов ферм: наличие и размеры монтажных накладок, качество соединительных элементов;
- состояние и характер обработки кромок растянутых элементов в зонах, где отсутствуют сварные швы;
- условия опирания панелей, плит покрытия, прогонов: эксцентриситеты в местах опирания прогонов и плит, площади опирания, наличие приварки плит покрытия или закрепления прогонов;
- степень коррозионного износа (особенно в узлах опирания фонарей и ендовах из-за возможных протечек кровли, в местах технологических выбросов), наличие щелевой коррозии между спаренными уголками и др.

При освидетельствовании связей по покрытию устанавливается:

- соответствие количества и расположения стержней связей проекту, особенно стержней, раскрепляющих сжатые элементы ферм;
- прямолинейность элементов и состояние узлов их закрепления.

При освидетельствовании прогонов следует проверить их прогибы в вертикальной плоскости и в плоскости ската, состояние связей (тяжей) по прогонам, а также условия закрепления прогонов и плит, опирающихся на них.

При освидетельствовании фонарных конструкций должно быть обращено внимание на прямолинейность элементов и состояние болтовых узлов (наличие болтов и степень их затяжки).

При освидетельствовании металлических кровель следует уделить внимание выявлению коррозионных повреждений и состоянию элементов крепления листов к несущим конструкциям (наличие сварных швов, количество и состояние самонарезающих болтов в т.д.)

Освидетельствование конструкций покрытия производится с мостовых или подвесных кранов, галерей для обслуживания светильников, с лестниц, устанавли-

ваемых на мосту крана и через проемы фонарей. Для осмотра опорных частей стропильных ферм используются тормозные конструкции. В бескрановых зданиях для осмотра конструкций покрытия используются телескопические вышки на автоходу, обеспечивающие доступ к конструкциям, расположенным на высоте до 20 м, и раздвижные лестницы.

При освидетельствования *колонн* внимание следует обращать на:

- соответствие фактического сечения элементов колонн проектному;
- обнаружение искривления колонн в плоскости и из плоскости поперечной рамы;
- определение отклонения колонн от вертикали (устанавливается по результатам геодезической съемки);
- обнаружение механических повреждений в местах проездов, зон складирования, погрузки и разгрузки, на участках работы кранов с грейферами и магнитными шайбами;
- состояние колонн в местах опирания подкрановых балок (смещение опорных ребер балки с оси колонн, качество выполнения и состояние швов и заклепок крепления подкрановых консолей, наличие необходимых зазоров между колонной и краном и т.д.);
- состояние элементов решетки (искривление стержней, узлов крепления стержней);
- состояние баз колонн и анкерных болтов;
- наличие коррозионных повреждений, особенно в узлах опирания конструкций покрытий, технологических площадок, подкрановых балок, в базах колонн, где возможно скопление мусора, пыли, увлажнение конструкций и утечка технологических жидкостей; в горячих цехах также следует обратить внимание на состояние колонн вблизи источников тепловыделений (коробление, искривление элементов, повреждение лакокрасочных покрытий и т.д.).

При освидетельствовании *связей по колоннам* следует выявлять:

- соответствие фактической схемы и места расположения связей проекту;
- наличие искривленных элементов;
- состояние узлов крепления связей, особенно в цехах с большими тепловыделениями.

Освидетельствование колонн и вертикальных связей по колоннам производится с пола цеха, рабочих площадок, переходных галерей и тормозных конструкций.

При освидетельствовании *подкрановых балок* необходимо выявить:

- соответствие сечения элементов подкрановых конструкций проекту и качество выполнения сварных швов;
- наличие трещин в верхних поясных швах и околошовной зоне (прежде всего под стыками рельсов и у опор балок); в балках с ребрами жесткости без вырезов трещины как правило, зарождаются в местах пересечения поясных швов и швов крепления ребер к верхнему поясу; при наличии в ребрах вырезов – трещины в стенке начинаются от конца выреза; трещины также вероятны в швах крепления ребер жесткости к верхнему поясу;
- наличие трещин в стенке под короткими ребрами;
- местные искривления, забоины и трещины верхнего пояса, развитию которых способствуют дефекты стыковых швов, отверстия и другие концентраторы напряжений;
- состояние сварных стыковых швов нижнего пояса, наличие в них непроваров, подрезов и других концентраторов напряжений, качество обработки кромок растянутого пояса;
- разность высот подкрановых балок в разрезных стыках;

– в клепаных подкрановых балках – состояние заклепок и наличие трещин в обушках уголков верхнего пояса;
– в решетчатых подкрановых балках (фермах) – состояние верхнего ездового пояса и наличие трещин в фасонках, швах крепления и элементах решетки, работающих на знакопеременные нагрузки.

При освидетельствовании узлов крепления балок к колоннам необходимо выявить:
– состояние крепления тормозного листа или фасонок тормозной фермы к верхнему поясу балки (трещины в швах, ослабление болтов или заклепок), необходимо обратить внимание на наличие подварки тормозного листа или фасонок снизу;
– состояние узлов крепления тормозной конструкции к колонне: трещины в накладках, разрушение швов крепления, ослабление болтов и т.д.;
– состояние листовых шарниров крепления подкрановых балок к колоннам в связевых панелях;
– наличие трещин, вырезов и местных искривлений в тормозном листе или тормозной ферме;
– состояние болтов крепления балок между собой и к колоннам;
– смятие опорных ребер;
– состояние сварных швов (болтов, заклепок) в узлах крепления балок к колоннам и наличие трещин в элементах крепления;
– степень обжатия мест контакта и наличие зазоров в узлах крепления балок к колоннам с передачей горизонтальных усилий через упорные планки;
– состояние температурных швов в подкрановых конструкциях, в особенности в неотапливаемых зданиях и цехах с избыточными тепловыделениями, величину зазора и возможность продольных перемещении при изменении температуры конструкции.

При освидетельствовании *крановых путей* необходимо выявить:
– состояние крановых рельсов и их стыков; степень износа головки, выбоины, трещины;
– смещение рельса относительно оси подкрановой балки; отклонения геометрического положения крановых путей в плане и по высоте по результатам геодезической съемки;
– наличие и состояние концевых упоров.

Осмотр подкрановых конструкций производится с тормозных площадок, с моста крана, с навесных лестниц и площадок, подвешиваемых к балкам. Освидетельствование балок и тормозных площадок необходимо производить с двух сторон, а для спаренных балок по средним рядам колонн – как снаружи, так и изнутри.

Освидетельствование *балок путей подвесных кранов и монорельсов* включает:
– выявление остаточных прогибов балок;
– определение степени абразивного износа по толщине и ширине ездовых полок и толщине стенки в местах касания колес крана при перекосе каретки;
– состояние узлов крепленая балок (состояние болтов, наличие трещин и т.д.);
– выявление отклонений положения путей в плане и по вертикали от проектных по результатам геодезической съемки. Замеры положения путей выполняются на опорах и в середине пролета балок; при этом определяется прямолинейность путей, расстояние между путями и перепады высот в одном створе и на соседних опорах.

При освидетельствовании *рабочих площадок* следует обратить внимание на:

- состояние верхней зоны балок, непосредственно воспринимающих нагрузку от подвижного состава, в этих балках могут возникнуть повреждения, аналогичные повреждениям подкрановых балок;
- состояние узлов крепления второстепенных и главных балок между собой и к колоннам;
- ослабление сечений балок и настила различными вырезами для пропуска коммуникаций;
- состояние стальных конструкций площадок, защитных экранов и футеровки в местах интенсивных тепловых воздействий;
- наличие механических повреждений в стойках, особенно в зонах проездов и проходов;
- состояние вертикальных связей, особенно в цехах о избыточными тепловыделениями;
- коррозионные повреждения баз колонн опорных узлов балок, а также балок и настилов в местах скопления мусора, пыли, влаги и возможных проливов технологических жидкостей.

Осмотр *несущих конструкций рабочих площадок* и вспомогательных конструкций выполняется главным образом снизу. Сверху осматриваются рельсовые пути и производится выборочное вскрытие пола для оценки состояния настила. Для доступа к несущим балкам площадок используются технологические коммуникации и оборудование, расположенное под площадкой. При наличии свободного пространства под площадкой для обследования могут использоваться переносные лестницы и телескопические вышки.

При освидетельствовании площадок для обслуживания оборудования, посадочных площадок и мостиков, лестниц и других вспомогательных конструкций необходимо произвести общий осмотр основных несущих элементов и узлов их крепления, обратив внимание на наличие дефектов изготовления и монтажа, а также механических и коррозионных повреждений; проверить состояние ограждений площадок, лестниц и их креплений.

Фиксирование результатов освидетельствования. Результаты освидетельствования фиксируются в специальных ведомостях дефектов и повреждений с необходимыми рисунками, схемами и фотографиям (таблица 11.5. и 11.6 гл.11).

Ведомости составляются по отдельным видам конструкций (подкрановые балки, колонны, стропильные фермы и т.д.) с указанием местоположения дефектного элемента конструкции (ряд, ось, пролет) и расположения дефекта на элементе (наименование элемента, панели, расстояния до узла и т.п.). Для облегчения пользования ведомостью она должна быть снабжена специальными схемами с нумерацией узлов, панелей и т.д. Дефект должен быть тщательно описан с указанием размеров и характеризующих его параметров.

Ведомости дефектов и повреждений должны составляться при обязательном использовании чертежей КМ или КМД, либо обмерочных чертежей для привязки результатов освидетельствования и последующего включения их в материалы обследования.

В целях сокращения времени нахождения персонала, проводящего освидетельствование на конструкциях, на высоте, в зонах загазованности, повышенной или пониженной температуры и других факторов риска, и для уменьшения времени вынужденной приостановки производства, отвлечения кранов и персонала заказчика, целесообразно максимально использовать в работе технические средства: магнитофоны и диктофоны, фото- и видеокамеры и др.

При производстве фотосъемки кадры нумеруются путем помещения в поле зрения фотоаппарата транспаранта с номером и названием кадра. Объекты следует мар-

кировать мелом или наклеиваемыми номерами, снабжать масштабными линейками, марками, пояснительными таблицами, стрелками-указателями; организовать подсветку, контрастный фон, зеркало для съемки обратной стороны объектов, указателей вертикали и горизонтали и т.д. Фотосъемка сопровождается покадровой ведомостью, отражающей содержание снимка и его привязку к конструкции и времени.

Кино- и видеосъемка производится для фиксации динамических процессов, колебаний и перемещений конструкций при прохождении кранов и других транспортных средств, при включении и работе технологических агрегатов и т.д. Съемка должна, как правило, сопровождаться синхронной магнитофонной записью словесного комментария к снимаемому процессу.

9.4.7. Оценка качества стали. Целью оценки качества стали, из которой изготовлены обследуемые конструкции, является установление ее марки, соответствия ее свойств данным стандартов на сталь этой марки и ее расчетных характеристик.

Для оценки качества стали необходимо установить следующие характеристики:

- марку стали или ее аналог в соответствии с действующими ГОСТ и ТУ на поставку металла;
- прочностные характеристики: предел текучести, временное сопротивление;
- пластичность: относительное удлинение и относительное сужение;
- склонность к хрупкому разрушению: величина ударной вязкости при различных температурах и после механического старения;
- в необходимых случаях - свариваемость.

Требуемый уровень свойств для каждой марки стали устанавливается в соответствии с действующими ГОСТ и ТУ на поставку стали.

Регламентируемый комплекс свойств стали, требуемый для группы конструкций и условий их эксплуатации, устанавливается согласно СНиП II-23-81* (табл.50*, 53).

Исходными материалами для оценки качества стали являются рабочие чертежи и сертификаты на металл, электроды, сварочную проволоку, метизы, а также нормативные документы, действовавшие в период возведения объекта.

При отсутствии рабочих чертежей или сертификатов, а также при недостаточности содержащихся в них сведений; при обнаружении в конструкциях повреждений, которые могли быть вызваны низким качеством стали (расслой, хрупкие трещины и т.д.), а также при изыскании резервов несущей способности конструкций, определение качества стали производится путем лабораторного исследования образцов, изготовленных из проб, отобранных из обследуемых конструкций.

При лабораторном исследовании образцов стали производятся:

- химический анализ с определением содержания: для углеродистой стали - углерода, кремния, марганца, серы, фосфора и азота; для низколегированной стали, кроме того, определяется содержание хрома, никеля, меди; а в необходимых случаях - ванадия, ниобия и молибдена;
- испытания на растяжение с определением временного сопротивления разрыву, предела текучести, относительного удлинения и относительного сужения;
- испытание на динамический изгиб с определением величины ударной вязкости и доли волокна в изломе;
- выявление распределения сернистых включений способом отпечатков по Бауману;
- металлографическое исследование с выявлением микроструктуры, ее фазового состава, размеров зерна, характеристик неметаллических включений металлургического происхождения, а также дефектов расслоя, грубых шлаковых включений, закатов, обезуглероживания; при этом может быть установлено, что металл претерпел пластические деформации или воздействия высоких температур (выше 720°С), оценено качество металла сварного шва и околошовной зоны, степень повреждения стали межкристаллитной коррозией.

Необходимость в проведении двух последних исследований устанавливается в каждом конкретном случае для уточнения характеристик стали.

9.4.7.1 *Факторы, определяющие свойства стали.* Важнейшими факторами, определяющими свойства стали являются способ выплавки, степень раскисления, химический состав и состояние поставки. По способу *выплавки* строительные стали подразделяются на несколько видов.

Мартеновская сталь обладает высокими качествами: однородностью состава, малым количеством неметаллических включений и вредных примесей. Эта сталь выплавляется с середины XIX в. по настоящее время. После 1960 года постепенно вытесняется кислородно-конвертерной.

Конвертерная сталь - подразделяется на бессемеровскую и томасовскую. Их отличие от мартеновской низкое содержание углерода (менее 0,12%), повышенное содержание азота (более 0,01% по массе), а также серы и фосфора. Особенно много фосфора в томасовской стали (0,06÷0,08%). Конверторная сталь применялась в строительстве в конце XIX - начале XX века.

Томасовская сталь часто встречается в импортных (германских) конструкциях довоенной поставки и в конструкциях, полученных по репарациям в послевоенный период. Что касается, кислородно-конверторной стали, то в настоящее время качество кислородно-конверторной стали не отличается от мартеновской, а в некоторых случаях даже превосходит ее. Эта сталь широко применяется в строительстве с 1960 года.

Электросталь - обладает наиболее высокими качествами, однако в строительстве практически не применяется.

Степень раскисления стали определяется количеством материала раскислителя (кремния или алюминия), вводимого в жидкую сталь перед разливкой. Чем выше степень раскисления, тем сталь более однородна, в ней меньше неметаллических включений, неоднородностей химического состава, меньше зерно, и она имеет более высокие механические характеристики. По степени раскисления углеродистую сталь подразделяют на кипящую, полуспокойную и спокойную.

Кипящая сталь характеризуется низким содержанием кремния (не более 0,03%), крупнозернистой (по сравнению со спокойной сталью) микроструктурой, часто с признаками структуры перегрева - «видманштетта», неметаллическими включениями в виде оксисульфидов марганца и силикатов, концентрирующихся в срединной поверхности поперечного сечения.

Спокойная сталь характеризуется содержанием кремния не менее 0,12%, значительно большей однородностью по химическому составу, микроструктуре и механическим свойствам. Количество вредных примесей и неметаллических включений незначительно.

Полуспокойная сталь содержит кремния в пределах 0,05÷0,15%, по однородности приближается к спокойной стали, а по остальным характеристикам близка к кипящей стали.

Низколегированные и высокопрочные стали обычно раскисляются до спокойного состояния и лишь некоторые марки низколегированной стали имеют полуспокойную модификацию.

По *химическому составу* строительные стали делятся на углеродистую, низколегированную и высокопрочную. Углеродистая сталь характеризуется содержанием углерода не более 0,25% и отсутствием специальных легирующих элементов, содержание которых обусловлено только способом и технологией выплавки. Это наиболее распространенная строительная сталь.

Низколегированная сталь - имеет как правило меньшее, чем у углеродистой стали содержание углерода и добавки одного или нескольких легирующих элементов (марганца, меди, никеля, хрома, бора, молибдена, ванадия и др.)

Высокопрочная сталь характеризуется повышенным содержанием легирующих элементов. Основные легирующие элементы те же, что в у низколегированных сталей.

Состояние поставки. Металлургическими заводами сталь поставляется непосредственно после горячей прокатки (горячекатаное состояние) или после термической обработки проката. Существуют два основных вида термической обработки: нормализация и термическое улучшение (закалка + отпуск). Термообработка повышает механические свойства стали (прочность, хладостойкость). Более подробные сведения о требованиях, предъявляемых к химическому составу и механическим свойствам строительных сталей приведены в гл.1 том 1 настоящего справочника.

9.4.7.2 *Опытное определение свойств стали конструктивных элементов.* Отбор проб для проведения химического анализа и механических испытаний производится отдельно для каждой партии металла. Размер партии металла, число проб и образцов от каждой партии устанавливается согласно приложения 8*а* СНиП II-23-81*.

Вырезка проб металла из конструкций, изготовление и испытание образцов стали с целью определения их характеристик производится, как правило, предприятием-заказчиком (при необходимости с привлечением специализированных организаций) в соответствии с заданием, разработанным организацией-исполнителем обследования.

Каждая из отобранных проб (заготовок) должна иметь размеры и ориентацию, допускающие изготовление из нее необходимого количества образцов с учетом их требуемого расположения по отношению к направлению прокатки или к направлению действующих в элементах конструкций усилий. В необходимых случаях размеры проб должны предусматривать также возможность изготовления и других образцов, например, для исследования свариваемости. При вырезке проб для изготовления образцов с целью механических испытаний и металлографического исследования должны быть обеспечены условия, предохраняющие образцы от влияния нагрева и наклепа. При вырезке проб огневым способом припуск от линии реза до края готового образца должен быть не менее 15 мм при толщине проката до 40 мм и не менее 20 мм при большей толщине. При использовании для вырезки проб ножниц, прессов и штампов припуск должен быть не менее:

5 мм – при толщине проката до 10 мм;

10 мм – при толщине проката от 10 до 20 мм;

15 мм – при толщине проката свыше 20 мм.

При вырезке проб способом холодной механической обработки (сверлением, абразивным кругом, фрезерованием и т.п.) припуск может составлять 1–3 мм. На отобранные пробы должны наноситься клейма (керном) или марки (краской) в виде буквенно-цифрового кода, обозначающего название сооружения, ряда, оси, характеристику элемента конструкции, тип профиля, место вырезки, назначение заготовки и т.п. Из элементов конструкций пробы отбираются в местах с наименьшим напряжением – из неприкрепленных полок уголков, полок на концевых участках балок и т.п. При отборе пробы должна быть обеспечена прочность данного элемента конструкции, в необходимых случаях ослабленные места должны быть усилены или устроены страхующие приспособления. Отбор проб (стружки) для определения химического состава производится в соответствии с ГОСТ 7565-81*. Стружка отбирается, как правило, сверлением по всей толщине проката и, по возможности, равномерно по всему поперечному сечению элемента в количестве не менее 50 г для одного анализа. Если взять стружку по всему поперечному сечению элемента невозможно, допускается отбор стружки в средней трети ширины элемента или полки профиля. Перед отбором стружки поверхность должна быть тщательно очищена от окалины, краски, грязи, ржавчины, масла и влаги до металлического блеска. Отобранная стружка должна быть упакована и замаркирована.

Химический анализ стали производится по ГОСТ 22536.1-88, ГОСТ 22536.6-88. Допускается определение химического состава стали методом фотоэлектрического спектрального анализа по ГОСТ 18895-81*. В этом случае пробами (образцами) для анализа служат темплеты с механически обработанной (шлифованной) поверхностью, отбираемые из проката в соответствии с требованиями ГОСТ 7565-81*.

Отбор проб для механических испытаний образцов производится в соответствии с ГОСТ 7564-73*. В элементах конструкций из сортового и фасонного проката образцы ориентируются вдоль направления прокатки, из листового и широкополосного - поперек направления прокатки. В листовых элементах, направление прокатки которых не установлено, образцы ориентируют по направлению действия наибольших растягивающих напряжений.

Изготовление образцов и их испытание на растяжение произоводится по ГОСТ 1497-84*.

Изготовление образцов и их испытание на динамический изгиб при комнатной и отрицательной температурах производится по ГОСТ 9454-78*. Долю волокна в изломе определяют в соответствии с ГОСТ 4543-71*. При этом используются образцы с V-образным надрезом типа 1 из проката толщиной более 10 мм и типа 3 из проката менее 10 мм, но не менее 5 мм.

Отбор проб (темплетов), обработка шлифов и снятие отпечатков по Бауману для выявления распределения сернистых включений производится в соответствии с ГОСТ 10243-75*.

Отбор проб (темплетов) для металлографического исследования производят в соответствии с ГОСТ 5639-82*и ГОСТ 1778-70*. Темплеты для шлифов вырезаются вдоль направления прокатки (или основного силового потока). Рабочая поверхность шлифов должна иметь размеры $30 \times \delta$ мм и лежать в плоскости, перпендикулярной плоскости проката. Подготовка и обработка шлифов, выявление и оценка микроструктуры, определение величины зерна и характеристик неметаллических включений должны осуществляться в соответствии с ГОСТ 5640-68, ГОСТ 5639-82* и ГОСТ 1778-70*.

9.4.7.3. *Опытное определение свойств стали соединений конструкций.* Для определения качества стали заклепок в заклепочных соединениях определяется химический состав металла заклепок и его временное сопротивление срезу.

Химический состав стали заклепок определяется так же, как и химический состав металлопроката, причем проба отбирается от заклепки в виде стружки сверлением, точением или фрезерованием. При этом устанавливается содержание углерода, кремния, марганца, серы, фосфора и меди.

Химическому анализу подвергаются не менее 2-х заклепок от условной партии, определению временного сопротивления срезу - не менее 5 заклепок от условной партии. Условную партию составляют заклепки одного типоразмера (диаметра и длины стержня - толщина пакета), установленные в одноименных конструкциях, одной очереди строительства, но не более 5000 заклепок.

Временное сопротивление срезу определяют испытаниями на срез изготовленных из заклепок цилиндрических образцов диаметром 10 мм. Испытание проводят на разрывной машине или прессе в приспособлении с вкладышами из высокопрочного материала (режущей инструментальной стали или твердого сплава с твердостью $R_z \geq 58$ HRC) по односрезной или двухсрезной схеме. Диаметр отверстия вкладышей должен соответствовать диаметру образца и выбираться из 2-го ряда по ГОСТ 11284-75*. Соприкасающиеся поверхности вкладышей должны быть плоско шлифованы, зазор между ними в нагруженном приспособлении не должен превышать 0,1 мм.

Временное сопротивление срезу подсчитывают по формуле

$$\tau_{вр} = 4P \cdot 10^{-3} / n\pi d^2 , \qquad (9.1)$$

где P – срезающее усилие; d – диаметр образца (см); n – число плоскостей среза.

Допускается определять временное сопротивление срезу материала заклепок по результатам испытаний на растяжение по ГОСТ 1497-84*, изготовленных из заклепок стандартных цилиндрических образцов диаметром 10 мм. При этом значение временного сопротивления срезу принимают равным произведению временного сопротивления разрыву на коэффициент 0,58.

Для определения качества стали крепежных изделий в болтовых соединениях определяется химический состав болтов и механические свойства болтов и гаек. Химический состав стали болтов определяется также, как и химический состав металлопроката, причем проба отбирается от болта в виде стружки точением или фрезерованием. Определяется содержание углерода, кремния, марганца, серы, фосфора, а для высокопрочных болтов еще и хрома, никеля, ванадия и молибдена.

При определении механических свойств стали болтов производится испытание болтов на разрыв, испытание образцов на растяжение, измерение твердости, в необходимых случаях определяется ударная вязкость. Для гаек измеряется твердость.

Химическому анализу подвергается не менее 2 болтов от условной партии, механическим испытаниям каждого вида – не менее 5 болтов и гаек от условной партии. Условную партию составляют болты (и гайки) одного типоразмера (номинального диаметра резьбы и длины стержня), одной формы исполнения и одного способа изготовления (точение, накатка, холодная высадка), одной партии поставки, установленные в одноименных конструкциях одной очереди строительства и одного назначения (в соединениях, рассчитываемых на срез, растяжение болтов, фрикционных соединениях), но не более 2000 болтов.

Испытание болтов на разрыв производится по ГОСТ 1759.0-87* с навинченной гайкой. Высота навинчиваемой гайки или другого приспособления, служащего для передачи усилия, должна быть не менее 0,8 номинального наружного диаметра резьбы; разрыв должен произойти в стержне или в резьбе (срез резьбы не допускается). Определяется временное сопротивление разрыву путем деления разрывного усилия на начальную площадь поперечного сечения болта. При разрыве по резьбе временное сопротивление разрыву должно вычисляться по площади сечения круга с диаметром, равным $(d_2 + d_3)/2$, где d_2 – номинальный средний диаметр резьбы; $d_3 = d_1 - h/6$, где d_1 – номинальный внутренний диаметр резьбы; h – теоретическая высота профиля резьбы.

Для болтов, размеры которых не позволяют испытывать их на разрыв, допускается ограничиться измерением твердости. Испытание на растяжение образцов следует проводить по ГОСТ 1497-84*. Испытанию подвергаются изготовленные из болтов короткие цилиндрические образцы диаметром 10 мм. Допускается испытывать образцы в виде болта с ослабленным (до размеров рабочей части стандартного цилиндрического образца) стержнем и передачей усилия через головку и навинченную гайку по ГОСТ 1759.0-87* и ГОСТ 22356-77*. Нагружая до разрушения, определяют временное сопротивление разрыву, предел текучести, относительное удлинение и относительное сужение.

Твердость должна определяться методами Бринелля, Роквелла или Виккерса по ГОСТ 9012-59*, ГОСТ 9013-59* или ГОСТ 2999-75*. Для болтов холодной высадки без термообработки, а также высокопрочных болтов твердость должна измеряться на торце или на гладкой части стержня. Твердость гаек должна проверяться на торцевой поверхности или на одной из граней.

Ударную вязкость определяют по ГОСТ 9454-78* на образцах типа 1, изготавливаемых из болтов с номинальным наружным диаметром резьбы 16 мм и более. Для высокопрочных болтов ударную вязкость определяют при нормальной температуре (плюс 20°С), для остальных болтов – при одной из отрицательных температур: минус 20 или минус 40°С.

При оценке качества стали сварных соединений по мере необходимости определяют механические свойства металла шва испытанием на растяжение цилиндрических образцов из сварного шва; ударную вязкость металла шва и околошовной зоны при одной из отрицательных температур: минус 20 или минус 40°С; прочность и пластичность стыковых сварных соединений – испытанием на растяжение и на изгиб в холодном состоянии плоских образцов сварных соединений. Требование к образцам, к их отбору и к методам испытаний при выявлении твердости металла шва и околошовной зоны должны соответствовать ГОСТ 6996-66*.

9.4.7.4. *Оценка качества стали и установление ее расчетных характеристик.* О качестве стали элементов металлоконструкций обследуемых зданий и сооружений судят на основание сопоставления имеющихся сертификатных данных и результатов проведенных испытаний с нормами химического состава и механических свойств действующих стандартов на сталь по каждому компоненту химического состава и по каждому показателю механических свойств, с учетом (при необходимости) результатов металлографического анализа микроструктуры неметаллических включений и распределения сернистых включений на отпечатках по Бауману.

Марку стали, к которой полностью или частично можно отнести рассматриваемый материал, устанавливают сопоставлением с нормами действующих стандартов. При этом сопоставление следует проводить: для углеродистых свариваемых сталей – с нормами ГОСТ 380-71*; для низколегированных сталей – с ГОСТ 19281-89* и ГОСТ 19282-73*; для конструкционной углеродистой и легированной – ГОСТ 1050-88* и ГОСТ 4543-71* – соответственно.

Для зданий и сооружений давних лет строительства марки стали устанавливаются в соответствии с действовавшими во время ее выплавке ОСТ, ГОСТ или ТУ на ее поставку.

Расчетные сопротивления проката и элементов соединений и отнесение к той или иной группе конструкций назначаются в соответствии с требованиями главы СНиП II-23-81* «Стальные конструкции» и ее 20*-го раздела: «Дополнительные требования по проектированию конструкций зданий и сооружений при реконструкции».

При необходимости усиления конструкций с помощью электросварки определяется свариваемость стали усиливаемых элементов путем определения эквивалентного содержания углерода по формуле:

$$C_э = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{N_i + Cu}{15}, \qquad (9.2)$$

где C, Mn, Cr, Mo, V, Ni, Cu – содержание соответствующих химических элементов в стали в % по массе. При $C_э \le 0{,}35 \div 0{,}4\%$ сварка стали не вызывает затруднений и может выполняться любыми способами в соответствии с действующими нормативными документами; при $0{,}4 \le C_э \le 0{,}55$ сварка возможна, но требует мер, предупреждающих образование трещин – тщательный подбор и контроль тепловых режимов сварки и сварочных материалов, технологии наложения швов, контроль чистоты кромок и присадочной проволоки, контроль отсутствия влаги в электродных покрытиях и флюсе, предварительный и сопутствующий подогрев и др. При $C_э > 0{,}55$ вероятность появления трещин опасно увеличивается.

Оценивать свариваемость не требуется, если сталь по химическому составу полностью удовлетворяет требованиям ГОСТ и одной из марок стали, предусмот-

ренной СНиП II-23-81* для изготовления сварных конструкций. В этом случае выбор технологии сварки производят в соответствии с требованиями СНиП III-18-75 «Правила производства и приемки работ. Металлические конструкции».

Результаты определения свойств стали оформляются в виде справки, содержащей таблицы данных механических испытаний (таблица 11.10, гл.11), химанализа (таблица 11.11, гл.11), наименование стали, ее расчетное сопротивление и свариваемость.

9.4.8. Определение нагрузок, воздействий и условий эксплуатации. Целью определения нагрузок и воздействий является получение информации о причинах повреждений конструкций, а также изыскание возможных резервов повышения их несущей способности. Фактические нагрузки могут существенно отличаться от проектных по величине и характеру.

При обследовании должны быть выявлены как фактические, так и прогнозируемые нагрузки, воздействия и условия эксплуатации.

Характеристики нагрузок и воздействий на обследуемые конструкции и условия их эксплуатации устанавливаются на основе представляемых заказчиком сведений и документов о характере технологического процесса, характеристик оборудования и кранов, виде сырья и полуфабрикатов, характеристик внутрицеховой среды, температурно-влажностных условиях и др. Кроме того используются данные метеостанций, санэпидстанций, а также данные непосредственных натурных наблюдений и измерений, проводимых при обследовании.

Использование для определения расчетных нагрузок данных СНиП без соответствующей корректировки допускается только в тех случаях, когда в конструкциях отсутствуют повреждения, вызванные перегрузкой и нагрузки не будут меняться в сторону увеличения.

При обследовании определяются нагрузки: от собственного веса конструкций и стационарного оборудования; от веса ограждающих конструкций стен и покрытия, опирающихся на каркас; от веса людей и ремонтных материалов; вертикальные и горизонтальные нагрузки, передаваемые на каркас кранами, транспортными средствами и технологическим оборудованием; от веса складируемых материалов и полуфабрикатов; от веса снега; от веса пыли, скапливающейся на конструкциях; от ветра и др.

Определяются воздействия: неравномерные осадки фундаментов; температурные; агрессивные; абразивные.

Условия эксплуатации: состояние антикоррозионной защиты и загрязненности конструкций; периодичность осмотров и проведение текущих ремонтов; следы использования конструкций в несвойственных им функциях и др.

Определение нагрузок. Нагрузки от собственного веса конструкции и стационарного оборудования определяются на основании чертежей КМД или обмерочных чертежей и паспортных данных стационарного оборудования. Коэффициент надежности по нагрузке может быть при этом принят равным единице.

Собственный вес металлических конструкций может определяться по результатам обмеров основных элементов. К основным элементам относятся: в фермах – пояса и стержни решетки; в балках и сплошностенчатых колоннах – пояса и стенка; в сквозных колоннах – пояса; в связях – пояса и элементы решетки.

Полный вес конструкций определяется умножением собственного веса основных деталей на строительный коэффициент веса, принимаемый по таблицам приложения 17 «Рекомендаций по обследованию стальных конструкций производственных зданий» ЦНИИ Проектстальконструкция им. Мельникова, Москва 1988 г.

На основании анализа технической документации, дополненного результатами натурного освидетельствования, составляется схема расположения стационарного оборудования, с привязкой к разбивочным осям здания и указанием способа опирания на конструкции.

Фактический вес принимается по паспортам на оборудование. В необходимых случаях на схему дополнительно наносится расположение коммуникаций с указанием мест их крепления к конструкциям и веса участков коммуникаций.

Нагрузки и места расположения оборудования и коммуникаций согласовываются с техническими службами цеха предприятия.

Нагрузки от веса ограждающих конструкций стен и покрытия, опирающихся на каркас (железобетонных плит и настилов, асбестоцементных и армоцементных листов, плит и т.д.), определяются по чертежам и каталогам, действовавшим в период строительства обследуемого объекта и проведением выборочного контроля. Коэффициенты надежности по нагрузке принимаются по СНиП 2.01.07-85.

При отсутствии технической документации или при обнаружении во время обследования элементов, отличающихся от указанных в технической документации, производится обмер конструкций и определение средней плотности материала. Для однородного участка покрытия площадью до 5000 м^2 одной очереди строительства отбирается не менее 3-х проб; на каждые следующие 5000 м^2 отбирается по одной дополнительной пробе.

Вес утеплителя, выравнивающей стяжки и гидроизолирующего ковра является наиболее изменчивой частью нагрузки от веса ограждающих конструкций и может значительно отличаться от принятого при проектировании, поэтому даже при наличии технической документации необходимо произвести вскрытие кровли. В месте вскрытия вырезается проба размером в плане не менее 10×10 см, определяется толщина каждого слоя и плотность материалов. Плотность материалов может приниматься по справочникам. В качестве нормативной нагрузки принимается максимальная из полученных. Коэффициенты надежности по нагрузке принимаются по СНиП 2.01.07-85.

В случае, если внешний вид проб и косвенные данные о состоянии конструкций позволяют предполагать существенное превышение плотности материалов кровли, производится лабораторное определение их плотности.

Вес 1 м^2 кровли определяется по формуле:

$$q_{кр} = 98\sum p_i t_i \quad \left[\text{кН}/\text{м}^2\right], \tag{9.3}$$

где p_i, t_i – плотность и толщина отдельного слоя (в кг/м^3 и в м).

Если разделить слои и определить толщину и плотность каждого слоя в отдельности не представляется возможным, необходимо вырезать участок кровли площадью 0,25÷0,5 м^2, выбрать все слои кровли и взвесить их, не разделяя. Определив площадь выбранной пробы и ее вес, определяют вес 1 м^2 кровли.

Для однородного участка покрытия одной очереди строительства площадью до 3000 м^2 вскрытие кровли производится не менее чем в 3-х местах. На каждые следующие 1000 м^2 производится дополнительное вскрытие. Для кровель с насыпным утеплителем, который, как правило, укладывается неровно, дополнительно следует определить толщину утеплителя в ендовах и вблизи конька. Коэффициенты надежности по нагрузке принимаются согласно СНиП 2.01.07-85.

Нагрузки от веса людей и ремонтных материалов определяются согласно СНиП 2.01.07-85. В тех случаях, когда имеются сведения о том, что при ремонте оборудования складирование материалов на конструкциях или подвеска талей, блоков и полиспастов привели к повреждению конструкций, следует путем ознакомления с документацией и опроса сотрудников, участвовавших в ремонтных работах, уточнить величину этих нагрузок для проведения проверочного расчета.

Вертикальные и горизонтальные нагрузки на каркас, создаваемые кранами, транспортными средствами и технологическим оборудованием, определяются по данным, полученным из паспортов на соответствующее оборудование.

При отсутствии паспортов на оборудование их веса могут быть определены путем взвешивания. Коэффициент надежности по нагрузке γ_f для вертикальной крановой нагрузки определяется:

- при определении нормативного давления колеса по паспортным данным - в соответствии со СНиП 2.01.07-85;
- при определении весовых характеристик крана путем взвешивания - по формуле:

$$n = \frac{G^{н}_{с.в} + G^{н}_{гр} \cdot n_{гр}}{G^{н}}, \qquad (9.4)$$

где $G^{н}_{с.в}$ - вес крана, $G^{н}_{гр}$ - вес поднимаемого груза, $G^{н}$ - вес крана + вес груза, $n_{гр}$ - коэффициент перегрузки поднимаемого груза, принимаемый равным для магнитно-грейферных кранов 1,3, для остальных - 1,2.

Нормативные и расчетные горизонтальные продольные и поперечные нагрузки определяются на основании СНиП 2.01.07-85. Если при обследовании установлено, что нагрузки от технологического оборудования имеют динамический характер, величина коэффициента динамичности определяется на основе экспериментального определения частот, ускорений и декрементов затухания колебаний.

Фактические и прогнозируемые нагрузки от веса складируемых материалов и полуфабрикатов определяются на основе результатов обследования и анализа технической документации. Зоны складирования и нагрузки от складируемых материалов устанавливаются по данным технических служб. В необходимых случаях они уточняются путем обмеров и контрольного взвешивания, либо с привлечением экспериментальных методов.

Уточнение нагрузок от веса снега требуется производить в тех случаях, когда есть основания предполагать, что причиной обнаруженных повреждений конструкций является увеличение снеговой нагрузки. В этом случае величина фактической снеговой нагрузки определяется по данным статистической обработки результатов наблюдений за состоянием снегового покрова ближайших к объекту обследования метеостанций, имеющих наиболее длительный период наблюдений. При обследованиях, проводимых в зимний период, с целью выявления характера и объема снегоотложений и сопоставления их с данными метеостанций, определяются места и величины их наибольших значений, наличие и размеры наледей на кровле, карнизах, в ендовах и у водосточных воронок. Плотность снега определяется при помощи снегомера или путем взвешивания снега, собранного с 1 м^2 площади крыши. Плотность снега может резко возрастать при конденсации на нем пара, выбрасываемого из вентиляционной системы, или при оседании на снег технологической пыли. Методика уточнения снеговой нагрузки содержится в Пособии к 20 разделу СНиП II-23-81*.

Коэффициенты надежности по нагрузке для снеговой нагрузки принимаются согласно СНиП 2.01.07.85. На предприятиях, имеющих производства с источниками пылевыделений (сталеплавильные, литейные производства, цементные заводы, аглофабрики и т.д.), отложения пыли на кровле могут давать нагрузку на кровлю до 2 кН/м^2 и более. Плотность пылевых отложений колеблется от 900 до 2400 кг/м^3, скорость накопления в отдельных случаях достигает 3 см/сутки.

При обследовании устанавливаются характер пылевых отложений (рыхлый, твердый), их плотность и толщина, скорость накопления и источники. Для оценки степени влияния пыли как агрессивного фактора следует также определить состав пыли, ее гигроскопические свойства и степень растворимости в воде, которые устанавливаются путем лабораторных испытаний по стандартным методикам. На каждом характерном участке покрытия (у фонарей, ветроотбойных щитов, у перепада высот, в ендовах) отбирается по 2 пробы массой от 100 до 250 г. При разли-

чии в получаемых результатах свыше 10% количество проб удваивается. Толщина слоя пыли замеряется с помощью заостренного стержня с делениями. Для каждого пролета обследуемого здания с шагом 12 м строится поперечный профиль пылеотложений. Для каждого профиля замеры толщины проводятся не реже, чем через 50 см. При равномерном характере пылеотложений количество замеров может быть сокращено. Для определения скорости накопления пыли через некоторое время проводится повторный замер толщины ее слоя. За расчетную скорость накопления пыли следует принять среднюю из максимальных скоростей, вычисленных для разных участков. Результаты оформляются как ведомость параметров воздушной среды и исследования свойств пыли (табл.11.7; 11.8. гл.11).

Определение прочих нагрузок производится следующим образом:

- нагрузки от ветра согласно СНиП 2.01.07.85 при этом тип местности определяется на основании анализа застройки территории; в отдельных случаях, когда повреждения конструкции вызваны ветром, следует для уточнения величины нормативного ветрового давления также использовать данные ближайших метеостанций;
- дополнительные нагрузки на конструкции, возникающие при реконструкции, определяются в соответствии с технологическим проектом реконструкции.

Температурные воздействия могут вызвать в стальных конструкциях дополнительные напряжения, а также привести к изменению физических характеристик стали. Температурные воздействия делятся на технологические, обусловленные выделением тепла при технологических процессах, и климатические, обусловленные сезонным изменением температуры наружного воздуха. Источниками информации дня определения изменения температуры конструкций во времени могут служить: СНиП 2.01.07.85; данные ближайших метеостанций; результаты непосредственных (дискретных или непрерывных записей) изменений температуры конструкций и т.п.

При отсутствии технологических тепловыделений для уточнения температурных воздействий достаточно провести дискретные измерения температуры наружного воздуха и непосредственно конструкций в самое холодное время года. Замеры следует проводить в уровне стропильной фермы не менее чем в трех точках по длине температурного блока.

Сопоставляя данные о полученной разности температур наружного воздуха и конструкций с данными ближайшей метеостанции о минимальной температуре наружного воздуха зимой, можно получить минимальную температуру конструкций. Максимальную температуру конструкций допускается принимать равной максимальной температуре наружного воздуха летом. В зданиях с технологическими тепловыделениями, с резко неравномерным характером распределения температуры по высоте и длине цеха, измерение температуры конструкций следует производить в виде непрерывных записей, охватывающих не менее 5 - 6 технологических циклов в летнее время.

Характеристикой уровня нагрева металлоконструкций каркаса в таких зданиях может служить температура средней часта стенки подкрановых балок. В зоне горячего участка (длина которого включает технологический участок с тепловыделениями плюс по 10 метров с обеих сторон) количество точек измерения должно быть не менее шести.

Степень агрессивности внутрицеховой среды определяет характер и величину коррозионного износа металлических конструкций. Она устанавливается по СНиП 2-03.11-85 в зависимости от температурно-влажностного состояния воздуха и содержащихся в нем химических реагентов.

В общем случае для оценки степени агрессивности среды измеряются: температура, влажность, состав и концентрация газов, агрессивных по отношению к металлу,

степень запыленности воздушной среды и количество осевшей на конструкции пыли, ее состав и свойства; проводится химический анализ проб жидкости, определяются зоны и участки возможного увлажнения металлических конструкций и т.п.

Полученные в результате проведенной работы данные о нагрузках, воздействиях и условиях эксплуатации конструкций должны содержать сведения, необходимые для проведения расчетов конструкций на прочность и деформативность, а также для оценки возможного ресурса конструкций при установленных условиях эксплуатации. По результатам проведенной работы составляется справка, содержащая следующие данные:

- дата ввода объекта в эксплуатацию, даты и характер проведения ремонтов, усиления и реконструкции металлоконструкций;
- даты ввода в действие технологического оборудования и кранов и связанные с этим изменения нагрузок и режимов работы;
- величина расчетных нагрузок от собственного веса конструкций, веса ограждений, пыли, снега и ветра;
- величина фактических и прогнозируемых расчетных нагрузок от технологического оборудования, складируемых материалов, транспортных средств и людей;
- температурный режим конструкций;
- данные о степени агрессивности среды;
- наличие факторов, способствующих хрупкому разрушению металла.

9.5. Оценка технического состояния конструкций

Оценка технического состояния конструкций выполняется по данным обследования конструкций на основании результатов проверочного расчета, анализа опыта эксплуатации и (в случае необходимости) специально поставленных натурных испытаний. Однако, основным методом оценки является расчетный.

9.5.1. Выбор адекватной расчетной схемы. Статический расчет конструкций следует выполнять с учетом выявленного фактического состояния элементов и соединений. В сомнительных случаях следует выполнять расчеты с использованием крайних реализованных значений жесткостей или других параметров расчетной схемы и выбирать наименее благоприятный вариант результатов расчета.

Ниже приводятся сведения о возможном влиянии факторов износа, особенностей эксплуатации и особенностей конструктивных решений на элементы и параметры расчетной схемы.

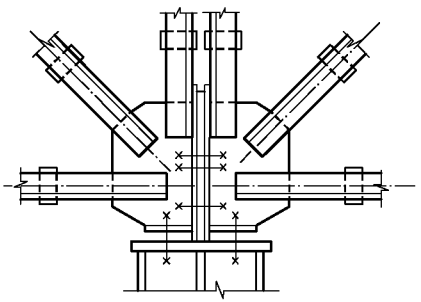
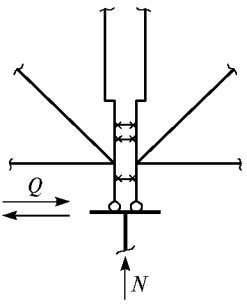
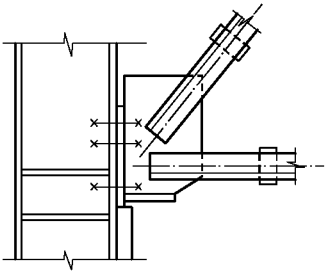
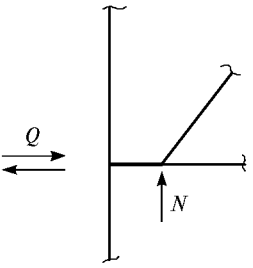
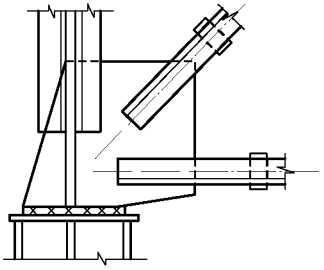
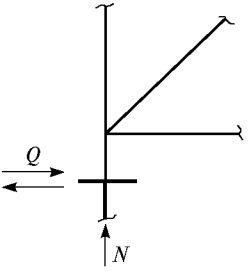
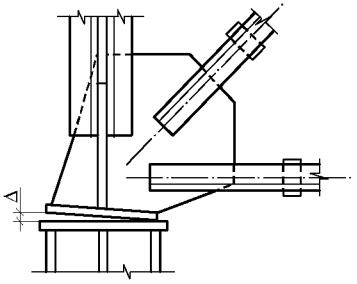
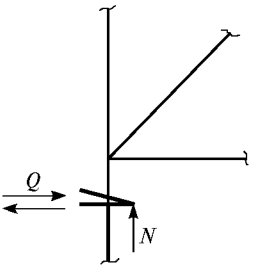
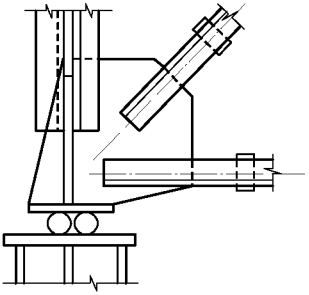
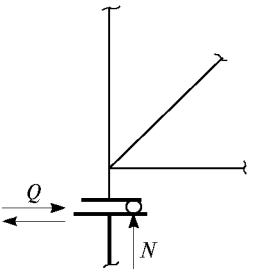
Опорные закрепления. Обычно узлы опирания конструкций на фундаменты в расчетной схеме отображаются как абсолютно неподвижные. Однако, во многих случаях необходимо считаться с их возможной податливостью.

Вертикальная податливость опор (например, колонн каркаса) может проявиться при повышении уровня грунтовых вод, при расположении фундаментов на слабых грунтовых основаниях и в других случаях. Горизонтальная податливость зависит от отпорности грунта засыпок. В указанных условиях необходимо выполнение вариантных расчетов.

При расчете конструкций с катковыми опорами (например, транспортерных галерей) необходимо считаться с возможностью заклинивания катков.

Условия опирания по возможному углу поворота (защемление, шарнир, другие варианты) должны тесно увязываться с конструктивным оформлением опорного узла. Необходимо также учитывать степень затяжки анкерных болтов, качество подливки под башмаками и другие факторы. Примером детального анализа условий опирания стропильной фермы на колонны и влияния особенностей конструкции на расчетную модель может служить табл.9.5.

Таблица 9.5. Варианты опорных узлов ферм

NN п/п	Конструктивное оформление	Расчетная схема	Примечания
1			Изгиб элементов ферм от: а) горизонтальных усилий б) скрепления опорных ребер
2			Изгиб элементов ферм от защемления опорного узла
3			То же
4			Изгиб элементов ферм от общей деформации ферм и от возможных неплотностей ($\Delta \neq 0$)
5			1. $Q = Nf_{mp}$ 2. В случае одного катка учитывать его максимальное смещение

Необходимо в некоторых случаях учитывать податливость болтов соединений, работающих на сдвиг, возникающую за счет «черноты» отверстий. В соединениях, подверженных циклическим нагружениям, нередко наблюдается увеличение податливости узла за счет обмятия контактных поверхностей и вытяжки болтов. Это явление характерно для узлов соединения подкрановых балок между собой и с колонной (особенно для кранов режимной группы 7К и 8К), и оно подлежит учету при назначении расчетной длины подкрановой ветви колонны при проверке ее устойчивости из плоскости.

Жесткость элементов. Жесткости элементов определяются по фактическим размерам поперечных сечений элементов с учетом имеющегося коррозионного износа. При этом для составных элементов необходимо, чтобы выполнялись требования по раскреплению составных частей прокладками, планками и решетками, предусмотренными нормами. Для всех элементов следует также проверить, соблюдаются ли ограничения норм по относительным толщинам пластин, свесам полок и т.п.

При общем искривлении стержней, принимаемых в расчетной схеме прямолинейными, необходимо скорректировать значение жесткости на растяжение-сжатие EA путем введения поправок:

$$EA' = \Theta' EA,\ EA'' = \Theta'' EA \tag{9.5}$$

где Θ' – поправка, отражающая повышенную деформативность искривленного элемента и используемая при статическом расчете; Θ'' – поправка, учитывающая пониженную отпорность искривленного элемента при проверке устойчивости.

Значения Θ' и Θ'' принимаются по формуле 9.5 в зависимости от относительного искривления $\beta = f_0 / i_0$ (f_0 – стрелка искривления, i_0 – радиус инерции поперечного сечения в плоскости искривления) и ожидаемого уровня нагруженности $\alpha = N / N_э$, где N – усилие, $N_э = \pi^2 EJ / (\mu l)^2$ – Эйлерова критическая сила:

$$\Theta' = \frac{1}{1 + \frac{\beta^2}{4} \cdot \frac{(2+\alpha)}{(1+\alpha)^2}};\ \Theta'' = \frac{1}{1 + \frac{\beta^2}{2} \cdot \frac{1}{(1+\alpha)^3}}; \tag{9.6}$$

Знак α в формуле 9.6 определяется знаком силы N (положительна при растяжении, отрицательна при сжатии).

При замене решетчатых изгибаемых элементов в расчетной схеме сплошностенчатыми стержнями следует учитывать их дополнительную податливость за счет работы решетки.

Кровельный диск. Ограждающие конструкции здания принимают участие в работе силового каркаса и могут существенно влиять на перераспределение усилий в его элементах. Особенно большую роль может играть кровельный диск, жесткость которого должна быть учтена в пространственном расчете.

Рекомендуется принимать изгибную жесткость кровельного диска (в плоскости кровли) бесконечно большой, а его податливость учитывается введением сдвиговой жесткости GA, которая вычисляется по следующим формулам.

Для кровли из крупноразмерных железобетонных плит

$$GA = 19000 \cdot k_2 \cdot b \tag{9.7}$$

где k_2 – коэффициент, учитывающий ширину плит ($k_2 = 1$ для плит $1{,}5 \times 6$ м и $k_2 = 1{,}3$ для плит 3×6 м); b – ширина кровельного диска, м.

Для кровли из мелкоразмерных плит

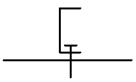
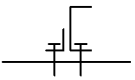
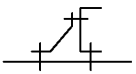
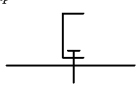
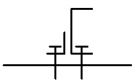
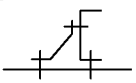
$$GA = 7000 b, \tag{9.8}$$

а для кровли из стального листа, уложенного по прогонам

$$GA = a \Big/ \left(\frac{a}{Gtb} + \frac{2S_{пр}}{n_{пр}} \right); \qquad (9.9)$$

В формуле (9.9) обозначено:
a – шаг ферм; b – ширина кровельного диска; t – толщина листа; G – модуль сдвига (для стали $G = 81$ кН/мм^2); $n_{пр}$ – количество прогонов по ширине b; $S_{пр}$ – податливость крепления прогонов в зависимости от конструктивного решения их опирания. Значения $S_{пр}$, а также некоторые справочные сведения приведены в табл.9.6.

Таблица 9.6. Сдвиговая жесткость кровельных настилов GA (10^3 кН/м^2)

Схема крепления		Ширина диска, м			
Настила к прогонам	Прогонов к ферме	18	24	36	36
	$S_{пр}$= 0,6 мм/кН 	25	32	40	48
	$S_{пр}$= 0,35 мм/кН 	30	39	50	60
	$S_{пр}$= 0,23 мм/кН 	33	44	56	57
	$S_{пр}$= 0,6 мм/кН 	15	24	30	36
	$S_{пр}$= 0,35 мм/кН 	17	27	34	42
	$S_{пр}$= 0,23 мм/кН 	18	29	37	46
Покрытия из мелкоразмерных железобетонных плит по прогонам		130	170	210	280
Покрытия из сборных железобетонных плит с шириной:					
1,5 м		1200	1600	2000	2400
3 м		1600	2100	2600	3100

9.5.2. Назначение расчетного сопротивления стали. Переход от значений предела текучести $\sigma_т$ и временного сопротивления $\sigma_{вр}$, определенных способами по п.9.4.7, к значению расчетных сопротивлений R_y или R_u осуществляется в соответствии с методикой норм путем деления на коэффициент надежности по материалу γ_m. Последний принимается в соответствии с указаниями раздела 20 СНиП II-23-81* для конструкций зданий и сооружений, изготовленных после 1982г. Для конструкций, изготовленных до 1932 года, а также для сталей с пределом текучести ниже 215 МПа

(2200 кг/см^2) рекомендуется принимать $\gamma_m = 1{,}2$. Для конструкций, изготовленных в период с 1932 года по 1982 год γ_m принимается равным 1,1, если предел текучести стали ниже 380 МПа (3850 кг/см^2), и равным 1,15 для сталей с более высоким пределом текучести. Эти указания относятся к элементам конструкции, не слишком сильно пораженным коррозией. Если же коррозионный износ связан с потерей более чем 25% площади поперечного сечения элемента или остаточная (после очистки от коррозии) толщина элемента равна 5 мм или менее, то расчетные сопротивления снижаются путем умножения на коэффициент γ_α, который принимается равным:

0,95 для слабоагрессивной среды;
0,90 для среднеагрессивной среды;
0,85 для сильноагрессивной среды;

9.5.3. Установление расчетных значений и сочетаний фактических и прогнозируемых нагрузок. При оценке технического состояния конструкций нагрузки от собственного веса, от существующего технологического оборудования и от других реализованных в существующей конструкции воздействий принимаются по их уточненным значениям (см.п.9.4). Другие нагрузки и воздействия (например, от вновь устанавливаемого оборудования) могут только прогнозироваться и принимаются по указаниям норм. Как правило, при уточнении значений нагрузок и воздействий по данным натурных обследований могут быть найдены нормативные значения нагрузок. Переход к расчетным значениям осуществляется путем умножения на коэффициент надежности по нагрузке γ_f. Ниже приводятся сведения о способах назначения γ_f для наиболее распространенных случаев.

Нагрузки от собственного веса. Для собственного веса стальных конструкций, если он определен по данным обмеров или по рабочим чертежам КМД с контрольными замерами, можно принять $\gamma_f = 1$. То же относится к нагрузкам от веса стационарно установленного технологического оборудования.

Для постоянных нагрузок от собственного веса покрытий и перекрытий значение γ_f рекомендуется определять по нормам. При этом, если во время вскрытия и взвешивания многослойных конструкций покрытия (перекрытия) отдельно определялись нормативные значения нагрузок от веса отдельных слоев, то приведенный коэффициент надежности определяется по формуле:

$$\gamma_{f.\text{пр}} = 1 + \sqrt{\sum_{i=1}^{m} C_i (\gamma_{f,i} - 1)^2} \qquad (9.10)$$

Здесь $\gamma_{f,i}$ - коэффициент надежности по нагрузке для i-го слоя, принимаемый по табл.1 СНиП 2.01.07-85; C_i - доля веса i-го слоя в суммарном весе конструкций покрытия (перекрытия).

Крановые нагрузки. При взвешивании кранов или при определении веса по данным заводской технической документации коэффициент надежности по собственному весу тележки и моста $\gamma_{f,\kappa} = 1{,}05$. Коэффициент надежности по поднимаемому грузу $\gamma_{f,Q}$ принимается по данным таблиц 9.7*а*,*б* в зависимости от типа крана и характера груза.

При определении вертикальных крановых нагрузок допускается учитывать фактическое приближение тележки к ряду колонн лишь в том случае, когда установлены ограничители перемещений тележки по мосту крана или же габариты установленного оборудования таковы, что груз физически невозможно переместить.

Сочетания нагрузок. Расчетные усилия в элементах (продольная или поперечная сила, изгибающий момент, крутящий момент) от одновременного действия снеговой, ветровой и крановой нагрузок рекомендуется определять по формуле

$$X = \psi(X_c + X_в + X_к) \tag{9.11}$$

где X_c, $X_в$ и $X_к$ - усилия от неблагоприятно действующих значений снеговой, ветровой и крановых нагрузок, определяемые с учетом указаний СНиП 2.01.07-85, а ψ - коэффициент сочетаний, вычисляемый по формуле

$$\psi = \frac{C_c}{1{,}45 - 0{,}45C_c} + \frac{C_в}{1{,}45 - 0{,}45C_в} + \frac{C_к}{1{,}85 - 0{,}85C_к} \tag{9.12}$$

Коэффициенты C определяют долю усилий от соответствующей нагрузки

$$C_c = \frac{X_c}{X_c + X_в + X_к};\ C_в = \frac{X_в}{X_c + X_в + X_к};\ C_к = \frac{X_к}{X_c + X_в + X_к}; \tag{9.13}$$

При сложном напряженном состоянии, когда в сечении действуют несколько разнородных силовых факторов, в формулах 9.11 - 9.13 вместо усилий X следует подставлять максимальные значения фибровых напряжений.

При расчете на другие виды нагрузок и воздействий коэффициенты сочетаний принимаются по нормам.

Таблица 9.7 *а*. Значения $\gamma_{f,Q}$ для мостовых кранов общего назначения

Грузоподъемность крана, тс	Режимная группа			
	1К, 2К	3К, 4К	5К	6К, 7К
До 5 включительно	1,15	1,25	1,35	1,50
От 5 до 12,5 включительно	1,10	1,20	1,25	1,50
От 12,5 до 20 включительно	1,10	1,15	1,20	1,40
Свыше 20	1,10	1,10	1,15	1,30

Таблица 9.7 *б*. Значения $\gamma_{f,Q}$ для грейферных и магнитных кранов

Вид грузозахватного органа	Вид груза	Условия нагрузки	Режимная группа	
			3К-5К	6К-8К
Грейфер	Щебень, уголь, окалина и другие нелипкие и необладающие повышенной связностью сыпучие материалы	Из штабеля	1,1	1,1
		Из приямка или емкости заполненной водой	1,4	1,4
Подъемный электромагнит	Скрап стальной, чугун в чушках	С неметаллического основания	1,3	1,5
		С металлического основания	1,5	1,7
	Стальной прокат	С решетчатого основания	1,4	1,6
		Со сплошного металлического основания	1,6	1,8

9.5.4. Проверочный расчет конструкций. Проверочный расчет конструкций с учетом влияния дефектов выполняется с целью оценки:

- возможности дальнейшей эксплуатации конструкций без каких-либо ограничений;
- необходимости усиления конструкций;
- возможности ограничений эксплуатации конструкций до плановых ремонтно-восстановительных работ;
- необходимости немедленного прекращения эксплуатации для ликвидации аварийной ситуации.

Расчет на прочность элементов стальных конструкций, имеющих дефекты или повреждения, уменьшающие рабочую площадь сечения (вырез, прожог, истирание и др.), следует выполнять по рекомендациям СНиП II-23-81*, при этом геометрические характеристики должны определяться по ослабленному сечению.

Проверку прочности элементов, имеющих ослабления в виде вырезов и т.п., в том числе и нарушающие симметричность ослабленного сечения, можно выполнять по формуле

$$\left(\frac{N+N^{oc}}{AR_{y_0}\gamma_c}\right)^n+\frac{\left(M_x+M_x^{oc}\right)y_c}{C_xJ_xR_{y_0}\gamma_c}+\frac{\left(M_y+M_y^{oc}\right)x_c}{C_yJ_yR_{y_0}\gamma_c}\le 1; \qquad (9.14)$$

где $N^{oc}=\sigma^{oc}A^{oc}$; $M_x^{oc}=N^{oc}y^{oc}$; $M_y^{oc}=N^{oc}x^{oc}$; $\sigma^{oc}=\sigma_F\left(1-\frac{A^{oc}}{A}-\frac{J_x^{oc}}{J_x}-\frac{J_y^{oc}}{J_y}\right)$;

Принятые обозначения:

x_c; y_c – координаты наиболее напряженной точки реального поперечного сечения, составленные относительно главных осей X и Y неослабленного сечения; A, J_x, J_y – геометрические характеристики неослабленного сечения; x^{oc}, y^{oc} – координаты центра тяжести площади ослабления в осях X, Y; J_x^{oc}, J_y^{oc} – моменты инерции ослабления; σ_F – напряжение в центре тяжести площади ослабления A^{oc}, вычисленное для неослабленного сечения при действии заданных усилий.

Учет влияния коррозионных повреждений следует производить уменьшением расчетной площади поперечного сечения.

Сплошностенчатые элементы металлических конструкций, центрально-сжатые в идеальной расчетной схеме, в случае их общего искривления следует рассчитывать как внецентренно сжатые. Отличие работы искривленных стержней от внецентренно сжатых рекомендуется учитывать умножением приведенного относительного эксцентриситета (вычисленного в предположении равенства эксцентриситета величине максимальной стрелки искривления в ненагруженном состоянии) на поправочный коэффициент k перехода от максимальной стрелки искривления к эквивалентному эксцентриситету, т.е. принимать $m_{ef}=k\eta m$. Коэффициент k вычисляется по формуле

$$k=0{,}82+0{,}1\sqrt{\eta m/\bar{\lambda}^2}; \qquad (9.15)$$

где $\bar{\lambda}$ – условная гибкость стержня в плоскости искривления; $m=f_0A/W_c$ – относительная стрелка искривления ненагруженного стержня; η – коэффициент влияния формы сечения.

Стрелка искривления стержня в ненагруженном состоянии определяется по формуле

$$f_0=\psi_0 f_{изм}; \qquad (9.16)$$

где $f_{изм}$ – полная стрелка искривления, замеренная под нагрузкой; ψ_0 – поправочный коэффициент ($0\le\psi_0\le 1$), вычисляемый по формуле

$$\psi_0=1-0{,}1\bar{\lambda}^2\sigma/R_{y_0}; \qquad (9.17)$$

$\sigma=N_0/A_0$ – напряжения в стержне в момент замера стрелки $f_{изм}$; R_{y_0} – расчетное сопротивление стали.

Расчет на устойчивость сжатых стержней из двух спаренных уголков, расположенных в тавр и имеющих искривление в двух плоскостях следует выполнять по формуле

$$\frac{N}{\varphi_{uv}A_0}\le R_{y_0}\gamma_c; \qquad (9.18)$$

где γ_c – коэффициент условий работы; φ_{uv} – коэффициент снижения несущей способности, определяемый в зависимости от условной гибкости в плоскости симметрии сечения

$$\bar{\lambda}_x = \frac{l_0}{r_x}\sqrt{\frac{R_{y_0}}{E}}\ ; \tag{9.19}$$

и условных относительных стрелок искривления в двух плоскостях

$$\overline{u_0} = \frac{f_{x_0}}{l_0}\sqrt{\frac{R_{y_0}}{E}}\ ;\quad \overline{v_0} = \frac{f_{y_0}}{l_0}\sqrt{\frac{R_{y_0}}{E}}\ ; \tag{9.20}$$

Проверку устойчивости стержней из спаренных равнополочных уголков, имеющих кроме пространственного искривления оси еще и местные дефекты в виде вырезов или локальных погибей полок рекомендуется выполнять по формуле

$$\frac{N}{\varphi_{uv}\cdot k_{ey}\cdot k_{осл}\cdot A_0} \le R_{y_0}\gamma_c \tag{9.21}$$

Здесь k_{ey} – коэффициент, учитывающий наличие эксцентриситетов (вызванных, например, расцентровкой в узлах) по концам стержня; $k_{осл}$ – коэффициент, учитывающий влияние местного выреза в полке уголка.

Значения φ_{uv}; k_{ey} и $k_{осл}$ приведены в таблицах 9.8÷9.12.

Для стержней, не имеющих местных дефектов или повреждений в пределах средней трети длины стержня, принимается $k_{осл}=1$, а для стержней, не загруженных концевыми моментами, принимается $k_{ey}=1$. Если местные дефекты имеют вид локального искривления полки, то осуществляется переход к эквивалентному вырезу с параметрами $l_{осл}$ и $b_{осл}$, определяемыми по параметрам искривления полки $l_м$ и $f_{ом}$ по данным табл.9.13.

Расчет сквозных стержней на устойчивость в плоскости соединительной решетки при наличии дефектов и повреждений выполняется по формуле

$$\frac{N}{\varphi_{ст}\cdot\varphi_{вет}\cdot A_0} \le R_{y_0}\gamma_c \tag{9.22}$$

где $\varphi_{ст}$ и $\varphi_{вет}$ – коэффициенты, характеризующие устойчивость стержня в целом и его отдельной ветви соответственно.

Влияние дефектов и повреждений сквозного стержня в целом, в частности его общего искривления, учитывается при определении коэффициента $\varphi_{ст}$, который принимается по указаниям СНиП II-23-81*:

а) при центральном сжатии в функции от условной приведенной гибкости

$$\bar{\lambda}_{ef} = \lambda_{ef}\sqrt{\varphi_{вет}R_{y_0}/E} \tag{9.23}$$

б) при внецентренном сжатии – в функции от условной приведенной гибкости, вычисляемой по формуле (9.24) и относительного эксцентриситета

$$m = e\frac{A_0 a_c}{J} \tag{9.24}$$

где a_c – расстояние от главной оси сечения, перпендикулярной плоскости изгиба, до оси наиболее сжатой ветви.

Влияние локальных дефектов и повреждений, изменяющих условия работы отдельных ветвей, учитывается при определении коэффициента $\varphi_{вет}$, который следует принимать по СНиП II-23-81* в зависимости от гибкости отдельной ветви на участке между узлами соединительной решетки в случае, если ветвь работает на центральное сжатие, и в функции от условной гибкости $\bar{\lambda}_{вет}$ и приведенного относительного эксцентриситета m_{ef}, для ветви, работающей на сжатие с изгибом.

Для двухветвевых колонн с ветвями двутаврового и швеллерного сечения, работающими на центральное сжатие, значение коэффициента $\varphi_{вет}$, вычисленного по СНиП II-23-81*, следует умножать на поправочный коэффициент, принимаемый равным

$$1+0{,}004\ \bar{\lambda}_{вет} \text{ при } \bar{\lambda}_{вет} \le 2{,}5 \qquad (9.25)$$

$$1 \text{ при } \bar{\lambda}_{вет} > 2{,}5$$

где $\bar{\lambda}_{вет}$ – условная гибкость ветви на участке между узлами соединительной решетки.

Для решетчатых колонн производственных зданий при отсутствии повреждений элементов решетки допускается принимать $\varphi_{вет}=1$.

Сжатые сквозные элементы стальных конструкций в случае их общего искривления в плоскости соединительной решетки следует рассчитывать по аналогии со сплошностенчатыми, но вычисляя поправочный коэффициент k к относительному эксцентриситету по формуле

$$k = 0{,}8 + 0{,}25\sqrt{\eta m/\bar{\lambda}_{ef}^{2}} \qquad (9.26)$$

Несущая способность сквозного стержня с дефектами или повреждениями раскосов оценивается проверкой устойчивости сквозного стержня в целом и дополнительной проверкой несущей способности поврежденного (дефектного) раскоса.

В случае невыполнения условий устойчивости для поврежденного раскоса следует считать, что он выключается из работы, и поперечная сила воспринимается ветвями, работающими на изгиб, при этом коэффициент $\varphi_{вет}$ в формуле 9.22 должен определяться как для сжато-изогнутого элемента с соответственно увеличившейся свободной длиной элемента. Приведенный относительный эксцентриситет для определения $\varphi_{вет}$ допускается находить в зависимости от максимального изгибающего момента в ветви $M_{вет}$, вычисляемого по формуле

$$M_{вет} = Q \cdot l_{в}/4\ ; \qquad (9.27)$$

где Q – величина поперечной силы в сквозном стержне; $l_{в}$ – длина ветви, принимаемая равной расстоянию между узлами соединительной решетки.

Устойчивость сквозных стержней с дефектами в виде расцентровки раскосов следует проверять по формуле 9.22, при этом коэффициент $\varphi_{вет}$ должен определяться как для сжато-изогнутого элемента с учетом изгибающего момента $M_{вет}$, вычисляемого по формуле

$$M_{вет} = Q \cdot t \cdot k_{p}/k_{ж} \qquad (9.28)$$

где t – величина расцентровки раскосов, равная половине расстояния между соседними пересечениями осей раскосов с осью ветви; k_{p} – коэффициент, учитывающий влияние степени расцентровки $\chi=t/l_1$ (l_1 – проекция раскоса на ветвь) и принимаемый равным

$$k_{p} = 1+\chi \qquad (9.29)$$

$k_{ж}$ – коэффициент, учитывающий влияние жесткости примыкающих раскосов.

Значение коэффициента $k_{ж}$ определяется по формуле

$$k_{ж} = 1+\left(\sum I\right)/\left(2I_{в}\right) \qquad (9.30)$$

где $\sum I$ – сумма погонных жесткостей элементов решетки, примыкающих к узлу; $I_{в}$ – погонная жесткость ветви.

Для колонн каркаса промышленных зданий допускается принимать отношение $k_{p}/k_{ж}=1$.

При определении коэффициентов $\varphi_{вет}$ следует учитывать форму эпюры изгибающих моментов по длине ветви между узлами соединительной решетки.

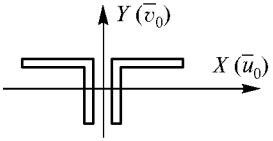


Таблица 9.8. Коэффициенты φ_{uv} для стержней из равнополочных уголков шарнирно закрепленных в двух главных плоскостях ($\mu_x = 1$, $\mu_y = 1$)

$\bar{\lambda}_x$	$\bar{u}_0$	Коэффициенты φ_{uv} при $\bar{v}_0$ равном										
		–0,5	–0,4	–0,3	–0,2	–0,1	0	+0,1	+0,2	+0,3	+0,4	+0,5
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
	0,05	860	883	906	928	952	957	925	872	825	783	744
	0,1	851	871	893	917	939	951	927	872	825	783	744
0,5	0,2	829	852	871	894	915	924	931	874	826	784	745
	0,3	810	828	848	868	887	900	932	876	828	784	746
	0,4	792	810	826	848	861	871	903	881	830	786	748
	0,5	772	792	804	822	843	846	875	891	833	789	749
	0,05	725	761	799	842	889	896	842	752	680	620	571
	0,1	709	744	780	820	864	885	843	753	680	620	571
1,0	0,2	682	710	743	779	846	835	852	756	682	622	572
	0,3	652	680	708	740	772	790	843	762	685	624	574
	0,4	625	649	678	705	734	747	792	774	690	628	576
	0,5	604	625	651	675	698	711	752	681	699	632	580
	0,05	602	644	688	726	814	824	754	640	558	496	447
	0,1	586	624	664	718	774	810	755	641	558	496	447
1,5	0,2	555	588	624	666	712	734	768	644	561	498	448
	0,3	526	555	586	620	642	674	745	653	565	501	450
	0,4	500	525	551	567	611	628	680	673	571	504	453
	0,5	475	498	521	545	571	585	627	659	582	510	456
	0,05	494	541	591	653	712	753	661	538	459	402	359
	0,1	480	521	567	621	688	729	664	540	460	402	359
	0,2	451	485	522	564	613	641	676	544	462	403	359
2,0	0,3	425	453	483	504	542	563	648	552	466	406	361
	0,4	401	425	450	476	507	523	577	575	472	409	363
	0,5	379	400	421	444	465	480	510	545	482	414	366
	0,05	404	451	502	563	647	667	569	451	380	330	293
	0,1	395	434	479	532	598	628	572	452	380	330	293
2,5	0,2	370	402	437	477	524	550	585	458	382	331	294
	0,3	347	374	402	533	468	487	559	464	385	333	295
	0,4	327	348	372	397	423	438	486	482	390	336	297
	0,5	308	326	346	366	386	397	429	454	399	340	299
	0,05	331	361	422	481	562	580	481	379	317	275	243
	0,1	323	350	404	454	517	559	486	380	317	275	243
3,0	0,2	306	335	368	405	447	473	497	383	319	276	244
	0,3	288	312	337	563	587	404	483	388	322	277	245
	0,4	270	290	311	333	355	369	413	400	325	279	246
	0,5	255	271	288	306	323	333	361	379	331	282	248
	0,05	270	307	352	409	482	481	408	320	268	232	205
	0,1	266	300	340	387	446	485	412	320	268	232	205
3,5	0,2	255	282	312	346	383	421	418	323	269	233	206
	0,3	241	263	286	311	331	354	421	328	271	234	207
	0,4	227	245	263	283	303	315	354	334	274	235	208
	0,5	214	229	244	260	275	284	309	323	277	237	209
	0,05	223	253	293	342	411	416	338	272	228	198	176
	0,1	221	250	285	329	383	418	347	272	228	198	176
	0,2	214	238	266	297	332	354	354	274	229	198	176
4,0	0,3	204	224	245	267	292	302	363	277	230	199	177
	0,4	194	209	226	243	257	267	308	278	232	200	177
	0,5	183	196	209	218	232	240	266	277	233	201	178

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
	0,05	186	211	244	288	349	351	295	233	196	171	152
	0,1	185	209	240	280	321	353	295	233	196	171	152
	0,2	181	202	227	256	288	307	299	235	297	171	152
4,5	0,3	174	192	211	232	254	267	308	236	198	172	153
	0,4	166	181	196	207	228	236	269	238	199	172	153
	0,5	158	170	182	193	206	213	233	238	199	173	153
	0,05	158	178	205	242	295	298	246	202	171	149	133
	0,1	157	177	203	238	283	299	254	202	171	149	133
5,0	0,2	155	173	195	222	251	268	256	203	171	149	133
	0,3	150	166	184	202	223	234	259	204	172	149	133
	0,4	144	157	171	185	200	204	233	204	172	150	133
	0,5	138	148	159	170	181	187	205	202	172	150	133
	0,05	136	152	175	205	249	255	218	176	150	131	117
	0,1	135	151	174	203	243	256	219	176	150	131	117
5,5	0,2	134	149	169	192	220	230	220	176	150	131	117
	0,3	131	144	160	178	196	206	221	177	150	131	117
	0,4	126	138	150	163	177	184	212	177	150	131	117
	0,5	121	131	140	150	160	166	182	174	149	131	117
	0,05	118	132	151	176	212	220	190	155	132	116	104
	0,1	118	132	150	175	209	221	190	155	132	116	104
6,0	0,2	117	130	147	168	193	207	190	155	132	116	104
	0,3	115	127	141	157	170	183	191	155	132	116	104
	0,4	111	122	133	145	157	163	188	154	132	116	104
	0,5	107	116	126	134	143	148	163	149	131	116	104

Примечание. Значения коэффициента φ_{uv} в таблице увеличены в 1000 раз.

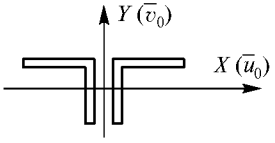


Таблица 9.9. Коэффициенты $\varphi_{u\bar{v}}$ для стержней из равнополочных уголков шарнирно закрепленных в двух главных плоскостях ($\mu_x = 0{,}8$, $\mu_y = 1$)

$\bar{\lambda}_x$	$\bar{u}_0$	Коэффициенты φ_{uv} при $\bar{v}_0$ равном										
		–0,5	–0,4	–0,3	–0,2	–0,1	0	+0,1	+0,2	+0,3	+0,4	+0,5
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
	0,05	830	854	880	910	938	945	907	944	789	740	698
	0,1	818	841	868	894	923	936	908	944	789	741	698
0,5	0,2	791	819	839	865	890	903	914	945	790	742	699
	0,3	767	789	815	839	681	871	911	850	792	743	700
	0,4	748	768	787	811	829	845	877	856	796	745	701
	0,5	723	744	760	782	806	812	844	872	801	749	704
	0,05	674	713	756	804	854	871	809	707	629	566	515
	0,1	657	693	732	777	826	852	811	708	630	566	515
1,0	0,2	623	656	691	727	768	789	825	712	631	568	516
	0,3	593	620	652	684	718	735	793	721	636	571	518
	0,4	565	592	618	645	674	689	737	745	645	575	521
	0,5	543	564	587	611	635	648	688	717	654	581	525
	0,05	546	590	640	699	772	799	715	591	506	444	396
	0,1	528	567	612	664	725	759	717	593	507	445	396
1,5	0,2	493	525	562	602	647	672	755	598	510	446	697
	0,3	462	491	520	552	587	606	654	610	515	449	400
	0,4	435	459	484	510	538	553	586	633	523	454	403
	0,5	411	431	452	474	494	506	534	568	542	460	406

Продолжение табл. 9.9

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
	0,05	443	478	541	604	638	704	623	494	413	357	315
	0,1	428	468	512	531	627	646	626	496	414	357	315
	0,2	395	427	461	498	541	562	647	502	417	359	316
2,0	0,3	367	383	420	448	480	497	552	515	422	362	318
	0,4	343	364	386	408	423	445	475	511	431	366	321
	0,5	321	399	357	375	392	402	420	440	460	373	325
	0,05	360	406	457	517	596	643	526	413	343	293	256
	0,1	349	287	430	478	535	571	542	416	343	293	257
2,5	0,2	322	351	382	415	445	473	548	422	345	295	258
	0,3	298	321	344	367	394	403	456	436	350	298	260
	0,4	277	295	314	333	352	362	386	413	358	301	262
	0,5	259	274	289	303	318	325	341	358	366	306	265
	0,05	294	337	386	433	514	560	459	450	287	245	215
	0,1	286	322	361	406	450	489	465	361	287	245	215
3,0	0,2	266	293	320	349	331	392	457	357	290	246	215
	0,3	247	266	287	307	324	342	374	340	294	249	217
	0,4	229	245	260	277	287	301	325	338	300	252	219
	0,5	213	226	239	251	262	269	284	293	295	255	220
	0,05	240	278	325	377	433	482	393	298	244	208	182
	0,1	236	269	306	347	392	419	396	299	244	208	182
3,5	0,2	223	247	271	297	324	338	392	303	246	209	183
	0,3	207	225	243	261	275	289	320	312	250	211	184
	0,4	193	206	220	234	247	254	272	281	253	213	185
	0,5	180	191	201	208	221	226	238	243	243	215	186
	0,05	200	231	272	322	379	412	336	255	209	179	157
	0,1	197	226	260	291	330	359	339	251	205	179	157
	0,2	188	210	233	250	273	319	335	260	212	180	157
4,0	0,3	177	193	208	224	235	248	276	266	214	181	158
	0,4	165	177	185	199	212	213	232	237	216	183	159
	0,5	154	163	172	181	190	193	202	206	204	183	160
	0,05	168	194	229	268	324	343	287	216	182	156	136
	0,1	166	191	222	256	290	310	290	221	182	156	136
	0,2	161	180	201	221	240	251	286	224	183	156	137
4,5	0,3	152	167	181	194	203	214	230	227	185	157	138
	0,4	143	153	164	174	183	188	200	202	185	158	138
	0,5	133	142	150	157	164	167	174	177	174	157	138
	0,05	143	164	193	233	275	298	248	192	159	137	120
	0,1	142	163	190	221	252	268	250	193	159	137	120
5,0	0,2	139	156	175	193	209	218	247	195	160	137	120
	0,3	132	145	158	169	181	184	203	196	161	138	121
	0,4	125	134	143	152	157	164	171	175	160	138	121
	0,5	117	124	131	137	144	146	150	154	150	137	121
	0,05	124	142	166	198	242	255	215	168	140	121	107
	0,1	123	141	164	192	220	230	217	169	140	121	107
5,5	0,2	121	136	153	170	184	192	214	171	138	121	107
	0,3	116	128	139	150	160	165	178	170	142	122	107
	0,4	110	119	127	134	139	144	152	153	140	122	107
	0,5	104	110	116	121	125	129	134	135	131	120	107
	0,05	108	123	114	117	209	220	188	149	125	108	095
	0,1	108	123	142	167	192	205	189	149	125	108	095
6,0	0,2	107	120	135	150	163	169	187	150	125	108	095
	0,3	103	113	124	133	142	146	156	149	126	108	096
	0,4	098	106	113	120	123	129	135	135	123	108	096
	0,5	092	098	104	109	113	115	119	120	116	106	095

Примечание. Значения коэффициента φ_{uv} в таблице увеличены в 1000 раз.

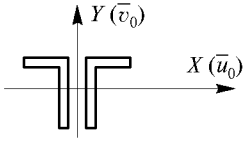


Таблица 9.10. Коэффициенты φ_{uv} для стержней из неравнополочных уголков шарнирно закрепленных в двух главных плоскостях ($\mu_x = 1$, $\mu_y = 1$)

$\bar{\lambda}_x$	$\bar{u}_0$	Коэффициенты φ_{uv} при $\bar{v}_0$ равном										
		–0,5	–0,4	–0,3	–0,2	–0,1	0	+0,1	+0,2	+0,3	+0,4	+0,5
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
	0,05	840	862	887	909	933	945	936	890	848	810	775
	0,1	825	845	866	889	911	922	939	890	848	810	775
0,5	0,2	793	807	827	849	867	878	907	893	850	811	776
	0,3	760	776	789	813	826	837	863	882	853	812	777
	0,4	729	745	761	778	789	801	823	840	856	816	779
	0,5	707	718	732	744	756	760	787	800	866	830	785
	0,05	680	714	751	788	833	821	860	778	711	655	608
	0,1	655	685	717	753	790	806	872	779	712	656	607
1,0	0,2	609	633	659	868	714	725	768	796	716	658	609
	0,3	569	589	610	631	653	663	696	719	734	662	612
	0,4	533	551	568	584	601	609	620	649	663	678	618
	0,5	501	515	529	542	555	561	577	590	600	608	614
	0,05	543	577	621	667	726	757	776	670	591	530	481
	0,1	514	545	564	614	660	679	753	671	592	530	482
1,5	0,2	466	489	514	540	565	566	622	652	597	533	484
	0,3	427	445	453	482	490	508	526	557	568	541	488
	0,4	393	408	422	435	439	454	473	485	493	494	487
	0,5	364	375	385	395	404	407	419	429	435	435	432
	0,05	437	458	508	554	609	640	686	568	489	432	388
	0,2	407	434	464	500	539	558	624	570	490	432	388
2,0	0,3	363	382	404	415	446	430	495	514	498	436	390
	0,4	300	304	322	332	338	339	358	365	367	364	355
	0,5	275	283	291	299	305	308	316	320	321	329	314
	0,05	355	384	418	459	506	532	598	478	406	355	317
	0,1	330	351	370	406	439	454	490	482	407	356	318
2,5	0,2	290	305	323	332	357	368	391	401	395	358	319
	0,3	255	271	284	288	307	312	324	330	329	320	305
	0,4	237	245	253	262	268	270	277	282	291	277	270
	0,5	216	223	229	234	236	240	243	246	246	244	239
	0,05	293	319	346	379	415	424	480	402	330	296	264
	0,1	271	289	311	334	357	369	403	401	341	297	264
3,0	0,2	236	250	262	269	290	290	313	317	309	289	262
	0,3	211	221	230	239	248	251	252	262	259	251	240
	0,4	192	199	205	211	216	217	221	224	222	218	211
	0,5	175	180	185	189	192	192	193	196	195	193	189
	0,05	244	261	290	316	337	358	383	338	285	249	222
	0,1	221	239	254	276	289	305	326	321	285	249	222
3,5	0,2	196	206	213	229	240	244	255	255	247	233	215
	0,3	176	183	187	198	203	206	211	212	209	202	190
	0,4	159	165	170	174	178	179	182	182	181	177	172
	0,5	145	149	152	154	158	155	160	160	157	157	154
	0,05	207	225	245	265	287	295	312	287	244	213	190
	0,1	191	204	218	232	246	254	266	260	239	212	190
	0,2	166	175	183	192	196	203	210	209	202	192	179
4,0	0,3	148	154	157	166	171	172	175	175	172	167	167
	0,4	135	139	143	147	149	150	152	152	150	147	142
	0,5	123	126	129	131	131	131	131	131	133	131	128

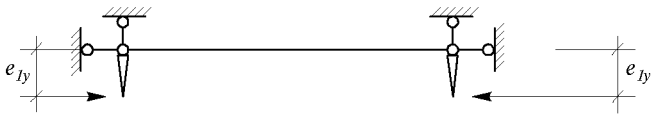
Продолжение табл. 9.10

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
	0,05	173	192	204	220	240	241	256	235	209	183	164
	0,1	163	163	185	193	207	213	220	215	199	175	163
	0,2	139	146	156	164	170	172	177	175	169	160	150
4,5	0,3	127	132	137	141	145	146	149	148	145	140	134
	0,4	115	119	122	125	127	128	128	129	127	124	120
	0,5	105	108	110	112	113	111	112	114	112	101	106
	0,05	158	163	175	188	204	209	214	200	180	160	143
	0,1	141	147	156	168	173	171	186	180	168	154	142
5,0	0,2	123	129	135	140	146	148	149	147	143	135	125
	0,3	110	112	119	122	122	126	127	126	123	119	115
	0,4	096	103	106	106	108	110	111	110	109	103	100
	0,5	092	093	095	097	098	098	098	097	096	094	093
	0,05	133	144	155	165	174	178	180	170	156	139	129
	0,1	123	131	139	146	158	155	159	153	144	133	121
5,5	0,2	105	110	117	122	127	128	130	127	123	117	108
	0,3	097	100	101	107	109	109	110	109	107	108	099
	0,4	088	090	098	095	096	096	097	096	094	092	089
	0,5	080	082	082	085	086	086	086	086	085	083	081
	0,05	117	123	135	144	147	153	154	143	135	121	111
	0,1	108	115	122	127	133	135	136	132	121	116	107
6,0	0,2	095	099	108	107	111	112	113	110	106	102	096
	0,3	084	088	091	094	094	096	096	095	093	090	086
	0,4	077	078	082	084	085	085	085	084	083	081	078
	0,5	071	072	074	075	075	075	076	076	075	073	072

Примечание. Значения коэффициента φ_{uv} в таблице увеличены в 1000 раз.

Таблица 9.11. Коэффициенты k_{ey}, обеспечивающие переход от $\bar{v}_0$ и $\tilde{e}_y$.

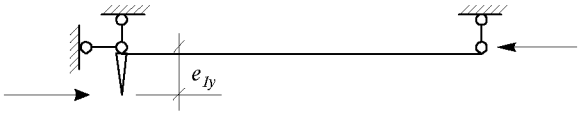
Схема загружения:



Гибкость $\bar{\lambda}_x$	$\tilde{u}$	Коэффициенты k_{ey} при e_{1y} равном					
		0,5	0,3	0,1	–0,1	–0,3	–0,5
	0,1	0,99	0,99	1,00	1,00	0,98	0,98
1	0,3	0,98	0,98	0,99	1,00	0,98	0,98
	0,5	0,96	0,97	0,98	0,98	0,98	0,98
	0,1	0,96	0,97	1,00	0,97	0,96	0,96
2	0,3	0,97	0,98	1,00	1,00	0,96	0,96
	0,5	0,97	0,99	1,00	1,00	0,96	0,97
	0,1	0,94	0,96	0,98	0,96	0,95	0,94
3	0,3	0,96	0,98	0,98	1,00	1,00	0,95
	0,5	0,97	1,00	1,00	1,00	1,00	0,96
	0,1	0,93	0,94	0,98	1,00	0,94	0,94
4	0,3	0,95	0,97	1,00	1,00	0,97	0,94
	0,5	0,97	1,00	1,00	1,00	1,00	0,95
	0,1	0,93	0,96	0,97	1,00	0,94	0,93
5	0,3	0,95	0,96	1,00	1,00	0,95	0,95
	0,5	0,96	0,99	1,00	1,00	1,00	0,95
	0,1	0,92	0,95	0,99	1,00	0,94	0,94
6	0,3	0,95	0,96	1,00	0,93	0,94	0,94
	0,5	0,96	0,96	1,00	0,99	0,98	0,95

Продолжение табл.9.11

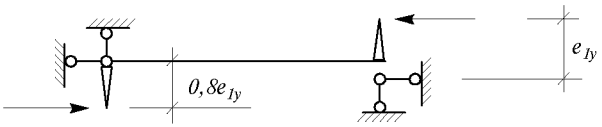
Схема загружения:



Гибкость $\bar{\lambda}_x$	$\bar{u}_0$	Коэффициенты k_{ey} при e_{1y} равном					
		0,5	0,3	0,1	–0,1	–0,3	–0,5
1	0,1	1,08	1,06	1,02	1,05	1,06	1,05
	0,3	1,08	1,06	1,02	0,99	1,04	1,05
	0,5	1,06	1,03	1,00	0,96	1,03	1,04
2	0,1	1,18	1,12	1,06	1,11	1,20	1,18
	0,3	1,14	1,10	1,07	0,97	1,19	1,18
	0,5	1,12	1,08	1,03	0,98	1,10	1,16
3	0,1	1,23	1,15	1,09	1,23	1,31	1,29
	0,3	1,18	1,13	1,10	0,98	1,23	1,31
	0,5	1,16	1,11	1,06	0,98	1,14	1,32
4	0,1	1,27	1,19	1,08	1,25	1,32	1,28
	0,3	1,21	1,18	1,18	1,10	1,33	1,28
	0,5	1,18	1,13	1,09	1,00	1,19	1,28
5	0,1	1,29	1,22	1,10	1,20	1,27	1,28
	0,3	1,24	1,16	1,15	1,17	1,23	1,27
	0,5	1,18	1,13	1,08	1,02	1,23	1,27
6	0,1	1,27	1,24	1,11	1,18	1,22	1,25
	0,3	1,25	1,16	1,15	1,17	1,22	1,26
	0,5	1,21	1,14	1,08	1,01	1,21	1,26

Продолжение табл.9.11

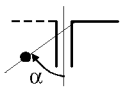
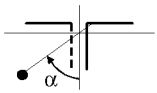
Схема загружения:



Гибкость $\bar{\lambda}_x$	$\bar{u}_0$	Коэффициенты k_{ey} при e_{1y} равном					
		0,5	0,3	0,1	–0,1	–0,3	–0,5
1	0,1	0,92	0,98	1,04	1,05	1,05	1,05
	0,3	1,00	1,08	1,03	0,96	1,04	1,05
	0,5	1,06	1,03	1,00	0,96	1,03	1,04
2	0,1	1,00	1,08	1,11	1,16	1,20	1,19
	0,3	1,13	1,20	1,11	0,94	1,20	1,18
	0,5	1,24	1,14	1,05	0,98	1,06	1,16
3	0,1	1,18	1,26	1,24	1,27	1,42	1,35
	0,3	1,32	1,27	1,14	0,93	1,36	1,44
	0,5	1,31	1,20	1,11	0,97	1,04	1,32
4	0,1	1,42	1,52	1,39	1,52	1,67	1,51
	0,3	1,50	1,42	1,14	0,93	1,48	1,50
	0,5	1,36	1,22	1,16	0,97	1,13	1,44
5	0,1	1,69	1,61	1,32	1,43	1,78	1,67
	0,3	1,71	1,49	1,16	1,04	1,60	1,67
	0,5	1,40	1,25	1,10	0,94	1,19	1,50
6	0,1	1,96	1,63	1,27	1,37	1,92	1,80
	0,3	1,81	1,57	1,21	1,28	1,73	1,73
	0,5	1,44	1,26	1,11	0,98	1,59	1,57

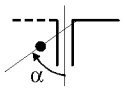
Таблица 9.12. Коэффициент $k_{осл}$, учитывающий влияние краевого выреза на устойчивость шарнирно закрепленного стержня из спаренных уголков ($\mu_x = 1$, $\mu_y = 1$)

$\bar{f}_0 = \sqrt{\bar{u}_0^2 + \bar{v}_0^2}$ Параметры выреза $b_{осл} = 0{,}3b$, $l_{осл} = 0{,}5b$

$\bar{\lambda}_x$	$\bar{f}_0$	Значения $k_{осл}$ при α равном							
		0	$\pi/4$	$\pi/2$	$3\pi/4$	π	$5\pi/4$	$3\pi/2$	$7\pi/4$
		Место выреза: 							
1	0,1	0,78	0,84	0,89	0,93	0,93	0,81	0,77	0,73
	0,3	0,78	0,99	1,00	1,00	1,00	0,98	0,76	0,76
	0,5	0,77	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,74	0,76
3	0,1	0,88	1,00	1,00	0,95	0,90	1,00	0,81	0,84
	0,3	0,87	1,00	0,96	1,00	1,00	1,00	0,89	0,85
	0,5	0,85	1,00	0,94	1,00	1,00	1,00	0,82	0,83
5	0,1	0,97	1,00	0,92	0,95	0,96	0,93	0,90	0,93
	0,3	0,97	1,00	0,86	1,00	1,00	1,00	0,86	0,92
	0,5	0,98	1,00	0,93	1,00	1,00	1,00	0,92	0,91
		Место выреза: 							
1	0,1	0,92	0,85	0,79	0,75	0,74	0,75	0,79	0,83
	0,3	0,99	1,00	0,89	0,74	0,74	0,74	0,89	1,00
	0,5	0,99	1,00	0,93	0,73	0,73	0,73	0,93	1,00
3	0,1	1,00	1,00	0,97	0,79	0,84	0,79	0,96	1,00
	0,3	0,95	1,00	1,00	0,80	0,84	0,80	1,00	1,00
	0,5	0,91	1,00	1,00	0,84	0,82	0,84	1,00	1,00
5	0,1	0,98	0,97	0,91	0,85	0,85	0,85	0,90	0,97
	0,3	1,00	0,98	0,92	0,90	1,91	0,90	0,95	1,00
	0,5	0,96	0,99	1,00	0,91	0,89	0,91	1,00	0,99

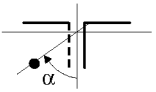
Продолжение табл. 9.12

$b_{осл} = 0{,}6b$, $l_{осл} = 0{,}5b$

$\bar{\lambda}_x$	$\bar{f}_0$	Значения $k_{осл}$ при α равном							
		0	$\pi/4$	$\pi/2$	$3\pi/4$	π	$5\pi/4$	$3\pi/2$	$7\pi/4$
		Место выреза: 							
1	0,1	0,58	0,63	0,66	0,71	0,70	0,64	0,58	0,57
	0,3	0,58	0,73	0,84	1,00	1,00	0,74	0,58	0,57
	0,5	0,60	0,84	0,97	1,00	1,00	0,81	0,57	0,57
3	0,1	0,69	0,84	1,00	1,00	1,00	0,93	0,68	0,69
	0,3	0,70	1,00	0,91	1,00	1,00	1,00	0,66	0,66
	0,5	0,71	1,00	0,80	1,00	1,00	1,00	0,65	0,65
5	0,1	0,86	0,93	0,92	0,93	0,91	0,91	0,87	0,82
	0,3	0,86	1,00	0,75	0,98	1,00	0,09	0,66	0,77
	0,5	0,82	1,00	0,78	0,96	1,00	1,00	0,70	0,75

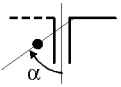
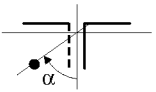
Продолжение табл. 9.12

$b_{осл} = 0{,}6b$, $l_{осл} = 0{,}5b$

$\bar{\lambda}_x$	$\bar{f}_0$	Значения $k_{осл}$ при α равном							
		0	π/4	π/2	3π/4	π	5π/4	3π/2	7π/4
Место выреза: 									
1	0,1	0,71	0,69	0,61	0,57	0,57	0,57	0,61	0,69
	0,3	0,99	1,00	0,69	0,56	0,56	0,56	0,69	1,00
	0,5	0,97	1,00	0,78	0,57	0,56	0,57	0,78	1,00
3	0,1	1,00	1,00	1,79	0,64	0,68	0,64	0,79	1,00
	0,3	0,93	1,00	1,00	0,68	0,67	0,68	1,00	1,00
	0,5	0,82	0,98	1,00	0,66	0,64	0,66	1,00	1,00
5	0,1	0,97	0,95	0,87	0,76	0,75	0,76	0,87	0,95
	0,3	0,89	0,94	0,88	0,78	0,74	0,78	0,87	0,94
	0,5	0,82	0,91	1,00	0,75	0,71	0,75	1,00	0,91

Продолжение табл. 9.12

$b_{осл} = 0{,}9b$, $l_{осл} = 0{,}5b$

$\bar{\lambda}_x$	$\bar{f}_0$	Значения $k_{осл}$ при α равном							
		0	π/4	π/2	3π/4	π	5π/4	3π/2	7π/4
Место выреза: 									
1	0,1	0,44	0,47	0,49	0,53	0,53	0,48	0,44	0,43
	0,3	0,44	0,55	0,65	0,75	0,75	0,56	0,44	0,43
	0,5	0,44	0,63	0,81	1,00	1,00	0,62	0,44	0,43
3	0,1	0,54	0,67	0,82	0,96	0,91	0,70	0,52	0,53
	0,3	0,55	0,78	0,84	0,99	1,00	0,95	0,52	0,52
	0,5	0,56	0,98	0,72	0,87	0,99	0,94	0,50	0,51
5	0,1	0,74	0,86	0,90	0,90	0,85	0,96	0,66	0,68
	0,3	0,71	0,95	0,66	0,87	0,95	0,97	0,51	0,62
	0,5	0,72	1,00	0,67	0,80	0,93	1,00	0,56	0,60
Место выреза: 									
1	0,1	0,63	0,60	0,54	0,51	0,50	0,51	0,54	0,60
	0,3	0,87	0,93	0,62	0,51	0,51	0,50	0,62	0,88
	0,5	0,89	0,94	0,70	0,50	0,51	0,50	0,68	0,90
3	0,1	0,96	1,00	0,75	0,58	0,63	0,58	0,75	1,00
	0,3	0,89	1,00	0,93	0,62	0,62	0,62	0,90	1,00
	0,5	0,81	0,96	1,00	0,61	0,60	0,61	1,00	0,89
5	0,1	0,96	0,95	0,87	0,73	0,71	0,73	0,86	0,95
	0,3	0,87	0,92	0,84	0,73	0,71	0,73	0,86	0,94
	0,5	0,80	0,88	1,00	0,70	0,67	0,70	1,00	0,89

Продолжение табл. 9.12

$\bar{f}_0 = \sqrt{\bar{u}_0^2 + \bar{v}_0^2}$ $b_{осл} = 0{,}3b$, $l_{осл} = 1b$

Гибкость $\bar{\lambda}_x$	$\bar{f}_0$	Значения $k_{осл}$ при α равном							
		0	π/4	π/2	3π/4	π	5π/4	3π/2	7π/4
	0,05	0,97	0,94	0,81	0,77	0,79	0,77	0,81	0,94
	0,1	0,97	1,00	0,86	0,78	0,79	0,78	0,86	1,00
2	0,2	0,97	1,00	0,95	0,78	0,76	0,78	0,95	1,00
	0,3	0,96	1,00	1,00	0,75	0,78	0,75	1,00	1,00
	0,5	0,91	1,00	0,98	0,74	0,75	0,74	1,00	1,00
	0,05	0,98	1,00	0,86	0,75	0,83	0,75	0,87	0,98
	0,1	0,95	0,97	0,93	0,77	0,82	0,77	0,91	1,00
3	0,2	0,95	1,00	1,00	0,82	0,78	0,82	0,93	0,98
	0,3	0,92	0,94	0,97	0,79	0,78	0,80	1,00	1,00
	0,5	0,95	0,93	0,91	0,81	0,81	0,81	0,90	0,94
	0,05	0,95	0,93	0,91	0,81	0,81	0,81	0,90	0,94
	0,1	0,95	0,93	0,92	0,80	0,81	0,81	0,90	0,97
4	0,2	0,94	1,00	0,92	0,78	0,80	0,78	0,89	0,92
	0,3	0,92	0,99	1,00	0,82	0,84	0,82	1,00	1,00
	0,5	0,89	0,98	1,00	0,84	0,83	0,84	1,00	0,99
	0,05	0,95	0,95	0,94	0,87	0,85	0,87	0,94	0,95
	0,1	0,94	0,92	0,87	0,82	0,82	0,82	0,88	0,92
5	0,2	0,91	0,94	0,80	0,83	0,87	0,83	0,77	0,94
	0,3	0,87	0,94	0,82	0,84	0,84	0,84	0,80	0,95
	0,5	0,85	0,95	1,00	0,86	0,80	0,86	1,00	0,95

Продолжение табл. 9.12

$\bar{f}_0 = \sqrt{\bar{u}_0^2 + \bar{\alpha}_0^2}$ $b_{осл} = 0{,}6b$, $l_{осл} = 1b$

Гибкость $\tilde{\lambda}_x$	$\bar{f}_0$	Значения $k_{осл}$ при α равном							
		0	π/4	π/2	3π/4	π	5π/4	3π/2	7π/4
	0,05	0,77	0,73	0,63	0,59	0,60	0,59	0,63	0,73
	0,1	1,00	0,95	0,68	0,59	0,60	0,59	0,63	0,98
2	0,2	0,97	1,00	0,77	0,60	0,60	0,60	0,77	1,00
	0,3	0,95	1,00	0,86	0,60	0,60	0,60	0,86	0,95
	0,5	0,91	1,00	0,88	0,59	0,59	0,59	0,88	1,00
	0,05	0,97	1,00	0,69	0,58	0,65	0,58	0,69	1,00
	0,1	0,95	1,00	0,77	0,62	0,66	0,62	0,77	1,00
3	0,2	0,95	1,00	0,88	0,66	0,64	0,66	0,86	1,00
	0,3	0,89	1,00	0,87	0,65	0,65	0,65	0,86	1,00
	0,5	0,80	0,96	1,00	0,64	0,64	0,64	1,00	0,99
	0,05	0,95	0,92	0,75	0,68	0,68	0,68	0,75	0,92
	0,1	0,95	0,92	0,82	0,68	0,69	0,68	0,80	0,94
4	0,2	0,92	0,97	0,80	0,66	0,67	0,66	0,82	0,97
	0,3	0,87	0,95	0,97	0,71	0,69	0,71	0,99	0,97
	0,5	0,75	0,89	1,00	0,70	0,67	0,70	1,00	0,93
	0,05	0,94	0,94	0,89	0,77	0,76	0,77	0,89	0,94
	0,1	0,92	0,91	0,84	0,73	0,73	0,73	0,84	0,92
5	0,2	0,86	0,89	0,78	0,73	0,76	0,73	0,78	0,90
	0,3	0,83	0,88	0,81	0,75	0,73	0,75	0,81	0,89
	0,5	0,77	0,86	1,00	0,72	0,70	0,72	1,00	0,86

Продолжение табл. 9.12

$b_{осл} = 0{,}9b$, $l_{осл} = 1b$

Гибкость $\tilde{\lambda}_x$	$\tilde{f}_0$	Значения $k_{осл}$ при α равном							
		0	π/4	π/2	3π/4	π	5π/4	3π/2	7π/4
	0,05	0,67	0,65	0,56	0,53	0,54	0,53	0,55	0,65
	0,1	0,93	0,81	0,61	0,54	0,54	0,54	0,61	0,82
2	0,2	0,90	0,99	0,69	0,54	0,54	0,54	0,69	0,94
	0,3	0,89	0,97	0,79	0,54	0,54	0,54	0,80	0,94
	0,5	0,87	0,97	0,89	0,54	0,54	0,54	0,86	0,95
	0,05	0,94	0,96	0,63	0,53	0,60	0,53	0,62	0,97
	0,1	0,91	0,95	0,74	0,56	0,61	0,56	0,73	0,94
3	0,2	0,91	1,00	0,85	0,61	0,59	0,61	0,84	0,99
	0,3	0,88	0,96	0,89	0,60	0,60	0,60	0,83	0,98
	0,5	0,78	0,94	1,00	0,60	0,59	0,59	0,96	0,96
	0,05	0,95	0,92	0,70	0,64	0,63	0,64	0,70	0,92
	0,1	0,95	0,97	0,77	0,63	0,63	0,63	0,77	0,94
4	0,2	0,89	0,96	0,80	0,62	0,61	0,62	0,80	0,96
	0,3	0,83	0,94	0,94	0,67	0,65	0,67	0,92	0,96
	0,5	0,74	0,91	1,00	0,65	0,61	0,65	1,00	0,92
	0,05	0,64	0,94	0,87	0,74	0,72	0,73	0,88	0,94
	0,1	0,90	0,91	0,83	0,70	0,68	0,70	0,83	0,92
5	0,2	0,85	0,88	0,80	0,70	0,72	0,70	0,80	0,90
	0,3	0,82	0,88	0,80	0,72	0,69	0,72	0,80	0,89
	0,5	0,75	0,84	1,00	0,68	0,65	0,68	1,00	0,84

Продолжение табл. 9.12

$b_{осл} = 0{,}9b$, $l_{осл} = 1b$

Гибкость $\bar{\lambda}_x$	$\bar{f}_0$	Значения $k_{осл}$ при α равном							
		0	π/4	π/2	3π/4	π	5π/4	3π/2	7π/4
	0,05	0,45	0,48	0,52	0,55	0,56	0,50	0,45	0,44
	0,1	0,46	0,53	0,60	0,70	0,70	0,55	0,46	0,44
2	0,2	0,46	0,62	0,77	1,00	0,92	0,64	0,46	0,45
	0,3	0,47	0,69	0,78	1,00	1,00	0,70	0,46	0,45
	0,5	0,48	0,77	0,79	0,85	0,99	0,74	0,46	0,46
	0,05	0,49	0,58	0,59	0,65	0,73	0,55	0,47	0,49
	0,1	0,51	0,63	0,77	0,95	0,92	0,65	0,49	0,50
3	0,2	0,52	0,77	0,89	0,90	0,96	0,84	0,50	0,50
	0,3	0,52	0,77	0,83	0,93	0,98	0,82	0,50	0,50
	0,5	0,54	0,93	0,69	0,80	0,92	0,92	0,49	0,49
	0,05	0,59	0,65	0,69	0,89	0,86	0,74	0,51	0,56
	0,1	0,60	0,73	0,83	0,82	0,84	0,90	0,52	0,57
4	0,2	0,59	0,85	0,76	0,85	0,83	0,91	0,51	0,56
	0,3	0,61	0,88	0,76	0,82	0,90	1,00	0,53	0,54
	0,5	0,62	0,98	0,66	0,78	0,84	1,00	0,52	0,54
	0,05	0,71	0,77	0,90	0,91	0,89	0,93	0,67	0,67
	0,1	0,69	0,80	0,87	0,84	0,84	0,93	0,60	0,64
5	0,2	0,68	0,87	0,71	0,84	0,87	0,96	0,51	0,61
	0,3	0,69	0,89	0,63	0,84	0,85	1,00	0,49	0,59
	0,5	0,68	0,95	0,65	0,78	0,83	1,00	0,54	0,58

Продолжение табл. 9.12

$b_{осл} = 0{,}3b$, $l_{осл} = 2b$

Гибкость $\tilde{\lambda}_x$	$\tilde{f}_0$	Значения $k_{осл}$ при α равном							
		0	π/4	π/2	3π/4	π	5π/4	3π/2	7π/4
	0,05	0,79	0,84	0,91	0,99	1,00	0,90	0,78	0,76
	0,1	0,80	0,89	0,99	0,99	1,00	0,96	0,78	0,76
2	0,2	0,79	0,92	0,96	0,99	1,00	1,00	0,78	0,76
	0,3	0,80	0,97	0,86	0,99	1,00	1,00	0,77	0,75
	0,5	0,80	0,98	0,85	0,98	0,99	0,98	0,77	0,76
	0,05	0,82	0,88	1,00	0,89	0,98	0,93	0,79	0,79
	0,1	0,83	0,98	0,99	0,90	0,97	0,94	0,78	0,78
3	0,2	0,83	1,00	0,96	0,88	0,99	0,98	0,78	0,79
	0,3	0,83	1,00	0,89	0,86	1,00	0,96	0,77	0,80
	0,5	0,82	0,98	0,86	0,86	1,00	0,95	0,76	0,80
	0,05	0,86	0,89	0,92	0,92	0,85	0,94	0,80	0,82
	0,1	0,86	0,97	1,00	0,90	0,89	0,89	0,78	0,84
4	0,2	0,86	1,00	0,88	0,92	0,92	0,83	0,74	0,81
	0,3	0,85	0,98	0,88	1,00	0,99	0,89	0,78	0,80
	0,5	0,83	0,99	0,88	0,98	0,95	1,00	0,72	0,81
	0,05	0,90	0,91	0,92	0,87	0,87	0,87	0,90	0,87
	0,1	0,90	0,94	0,90	0,83	0,84	0,87	0,87	0,86
5	0,2	0,87	0,90	0,75	0,89	0,98	0,85	0,71	0,84
	0,3	0,87	0,96	0,77	0,95	0,96	0,98	0,69	0,82
	0,5	0,86	0,99	0,87	0,94	0,97	1,00	0,77	0,82

Продолжение табл. 9.12

$b_{осл} = 0{,}6b$, $l_{осл} = 2b$

Гибкость $\tilde{\lambda}_x$	$\tilde{f}_0$	Значения $k_{осл}$ при α равном							
		0	π/4	π/2	3π/4	π	5π/4	3π/2	7π/4
	0,05	0,57	0,62	0,66	0,71	0,73	0,65	0,60	0,56
	0,1	0,58	0,68	0,80	0,91	0,89	0,71	0,57	0,57
2	0,2	0,59	0,78	0,91	0,92	1,00	0,82	0,58	0,57
	0,3	0,59	0,85	0,88	0,98	0,98	0,88	0,58	0,57
	0,5	0,60	1,00	0,78	0,93	0,98	0,97	0,57	0,57
	0,05	0,61	0,68	0,73	0,83	0,93	0,68	0,58	0,61
	0,1	0,62	0,77	0,97	0,94	1,00	0,83	0,60	0,62
3	0,2	0,63	0,88	0,97	0,85	0,94	0,96	0,61	0,62
	0,3	0,64	0,97	0,79	0,83	0,98	1,00	0,61	0,62
	0,5	0,66	0,99	0,74	0,89	0,95	1,00	0,60	0,61
	0,05	0,68	0,75	0,81	0,85	0,87	0,99	0,61	0,66
	0,1	0,70	0,84	0,92	0,84	0,88	0,84	0,62	0,67
4	0,2	0,70	0,91	0,78	0,84	0,84	0,88	0,61	0,67
	0,3	0,72	0,98	0,78	0,92	0,90	1,00	0,64	0,66
	0,5	0,74	1,00	0,71	0,87	0,90	1,00	0,62	0,65
	0,05	0,77	0,81	0,80	0,95	0,86	0,89	0,75	0,74
	0,1	0,76	0,86	0,89	0,82	0,83	0,88	0,72	0,72
5	0,2	0,76	0,88	0,73	0,84	0,92	0,88	0,61	0,70
	0,3	0,79	0,95	0,70	0,87	0,92	0,90	0,68	0,71
	0,5	0,78	1,00	0,73	0,82	0,92	1,00	0,65	0,69

Продолжение табл. 9.12

$b_{осл} = 0{,}9b$, $l_{осл} = 2b$

Гибкость $\tilde{\lambda}_x$	$\tilde{f}_0$	Значения $k_{осл}$ при α равном							
		0	π/4	π/2	3π/4	π	5π/4	3π/2	7π/4
	0,05	0,42	0,45	0,48	0,52	0,52	0,47	0,42	0,41
	0,1	0,43	0,50	0,55	0,64	0,64	0,51	0,42	0,42
2	0,2	0,44	0,58	0,74	1,00	0,91	0,59	0,43	0,43
	0,3	0,44	0,64	0,93	0,94	1,00	0,65	0,43	0,43
	0,5	0,45	0,74	0,73	0,83	0,94	0,73	0,43	0,43
	0,05	0,45	0,50	0,52	0,56	0,65	0,48	0,43	0,44
	0,1	0,46	0,57	0,69	0,97	0,90	0,58	0,44	0,46
3	0,2	0,48	0,69	0,82	0,84	0,93	0,75	0,46	0,47
	0,3	0,49	0,77	0,73	0,86	0,90	0,82	0,46	0,47
	0,5	0,51	0,86	0,65	0,75	0,88	0,84	0,46	0,46
	0,05	0,53	0,58	0,59	0,90	0,87	0,63	0,45	0,51
	0,1	0,53	0,64	0,83	0,81	0,87	0,75	0,47	0,51
4	0,2	0,55	0,75	0,74	0,75	0,79	0,85	0,46	0,51
	0,3	0,57	0,80	0,72	0,80	0,86	0,95	0,48	0,50
	0,5	0,57	0,89	0,63	0,74	0,83	0,93	0,48	0,50
	0,05	0,62	0,67	0,76	0,87	0,88	0,84	0,58	0,59
	0,1	0,62	0,71	0,82	0,80	0,82	0,86	0,53	0,58
5	0,2	0,62	0,79	0,66	0,80	0,85	0,96	0,46	0,55
	0,3	0,63	0,84	0,60	0,79	0,84	0,95	0,44	0,55
	0,5	0,65	0,89	0,61	0,75	0,81	0,90	0,49	0,55

Продолжение табл. 9.12

$b_{осл} = 0{,}3b$, $l_{осл} = 2b$

Гибкость $\tilde{\lambda}_x$	$\tilde{f}_0$	Значения $k_{осл}$ при α равном							
		0	π/4	π/2	3π/4	π	5π/4	3π/2	7π/4
	0,05	0,97	0,89	0,82	0,77	0,76	0,77	0,82	0,88
	0,1	0,98	1,00	0,84	0,75	0,77	0,75	0,85	1,00
2	0,2	0,97	0,99	0,90	0,74	0,73	0,74	0,89	1,00
	0,3	0,91	0,97	0,96	0,73	0,74	0,73	0,95	0,99
	0,5	0,91	0,98	0,93	0,73	0,74	0,73	0,91	0,98
	0,05	0,95	0,97	0,85	0,70	0,78	0,70	0,85	0,98
	0,1	0,34	0,96	0,91	0,73	0,78	0,73	0,91	0,97
3	0,2	0,90	0,98	0,96	0,77	0,75	0,77	0,96	1,00
	0,3	0,88	0,96	0,99	0,76	0,76	0,76	0,97	0,98
	0,5	0,85	0,94	0,90	0,76	0,77	0,76	0,90	0,95
	0,05	0,91	0,91	0,82	0,76	0,78	0,76	0,81	0,91
	0,1	0,90	0,92	0,91	0,76	0,77	0,76	0,91	0,92
4	0,2	0,89	0,91	0,84	0,75	0,74	0,75	0,85	0,92
	0,3	0,87	0,90	0,93	0,80	0,79	0,80	0,63	0,89
	0,5	0,83	0,90	1,00	0,78	0,77	0,78	1,00	0,91
	0,05	0,90	0,91	0,88	0,81	0,81	0,81	0,87	0,91
	0,1	0,90	0,88	0,83	0,78	0,78	0,78	0,84	0,89
5	0,2	0,86	0,87	0,78	0,80	0,83	0,80	0,79	0,88
	0,3	0,84	0,87	0,80	0,81	0,81	0,81	0,80	0,88
	0,5	0,82	0,88	0,98	0,78	0,80	0,80	0,99	0,89

Продолжение табл. 9.12

$b_{осл} = 0{,}6b$, $l_{осл} = 2b$

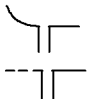
Гибкость $\tilde{\lambda}_x$	$\tilde{f}_0$	Значения $k_{осл}$ при α равном							
		0	π/4	π/2	3π/4	π	5π/4	3π/2	7π/4
	0,05	0,73	0,70	0,60	0,56	0,57	0,56	0,60	0,70
	0,1	0,97	0,90	0,65	0,57	0,57	0,57	0,65	0,92
2	0,2	0,93	1,00	0,74	0,57	0,58	0,58	0,74	0,97
	0,3	0,90	0,97	0,87	0,57	0,59	0,57	0,86	0,95
	0,5	0,87	0,94	0,90	0,58	0,57	0,58	0,88	0,98
	0,05	0,96	0,95	0,64	0,55	0,61	0,54	0,63	0,89
	0,1	0,93	0,96	0,74	0,57	0,63	0,57	0,74	0,87
3	0,2	0,89	0,96	0,83	0,63	0,61	0,61	0,83	1,00
	0,3	0,85	0,95	0,89	0,63	0,62	0,63	0,89	0,97
	0,5	0,75	0,90	0,90	0,62	0,61	0,62	0,79	0,86
	0,05	0,91	0,89	0,67	0,63	0,62	0,63	0,67	0,89
	0,1	0,89	0,90	0,76	0,63	0,63	0,63	0,75	0,92
4	0,2	0,88	0,94	0,79	0,62	0,62	0,62	0,80	0,91
	0,3	0,78	0,85	0,85	0,68	0,68	0,68	0,82	0,87
	0,5	0,72	0,85	0,91	0,66	0,65	0,66	0,91	0,87
	0,05	0,87	0,88	0,84	0,70	0,69	0,70	0,76	0,89
	0,1	0,86	0,88	0,80	0,68	0,67	0,68	0,80	0,88
5	0,2	0,84	0,84	0,78	0,70	0,72	0,70	0,76	0,84
	0,3	0,78	0,82	0,78	0,72	0,71	0,72	0,74	0,82
	0,5	0,72	0,78	0,98	0,70	0,67	0,70	0,98	0,80

Продолжение табл. 9.12

$b_{осл} = 0{,}9b$, $l_{осл} = 2b$

Гибкость $\tilde{\lambda}_x$	$\tilde{f}_0$	Значения $k_{осл}$ при α равном							
		0	π/4	π/2	3π/4	π	5π/4	3π/2	7π/4
	0,05	0,65	0,62	0,54	0,51	0,51	0,51	0,54	0,62
	0,1	0,91	0,80	0,58	0,52	0,52	0,52	0,58	0,80
2	0,2	0,91	0,94	0,67	0,52	0,53	0,52	0,67	0,90
	0,3	0,90	0,92	0,78	0,53	0,53	0,53	0,78	0,90
	0,5	0,86	0,91	0,77	0,53	0,53	0,52	0,80	0,93
	0,05	0,93	0,97	0,58	0,51	0,57	0,50	0,58	0,92
	0,1	0,91	0,93	0,67	0,53	0,58	0,53	0,66	0,93
3	0,2	0,88	0,94	0,85	0,59	0,56	0,59	0,85	0,94
	0,3	0,85	0,92	0,79	0,59	0,58	0,58	0,84	0,93
	0,5	0,74	0,89	0,74	0,58	0,57	0,57	0,81	0,91
	0,05	0,91	0,89	0,63	0,59	0,59	0,59	0,63	0,89
	0,1	0,89	0,90	0,73	0,59	0,60	0,59	0,73	0,90
4	0,2	0,88	0,93	0,77	0,59	0,59	0,59	0,77	0,90
	0,3	0,77	0,85	0,81	0,63	0,62	0,63	0,79	0,87
	0,5	0,70	0,83	0,92	0,62	0,60	0,62	0,96	0,87
	0,05	0,87	0,88	0,78	0,69	0,67	0,69	0,77	0,89
	0,1	0,86	0,88	0,79	0,65	0,65	0,65	0,80	0,88
5	0,2	0,84	0,84	0,75	0,66	0,67	0,66	0,70	0,84
	0,3	0,77	0,82	0,76	0,67	0,67	0,67	0,73	0,82
	0,5	0,70	0,78	0,98	0,66	0,62	0,66	0,97	0,80

Таблица 9.13. Эквивалентный переход от сечения с местной погибью (с параметрами погиби $f_{ом}$, $l_м$) к сечению с краевым вырезом (с параметрами $b_{осл}$, $l_{осл}$).



Длина местного ослабления погибью $\bar{l}_м = l_м/b$	Параметры выреза: $\bar{l}_{осл} = l_{осл}/b$ $\bar{b}_{осл} = b_{осл}/b$	Стрелка местной погиби $\bar{f}_о = f_{ом}/b$								
		0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
0,5	$\bar{l}_{осл}$	0,37	0,32	0,30	0,26	–	–	–	–	–
	$\bar{b}_{осл}$	0,20	0,40	0,50	0,60	–	–	–	–	–
1,0	$\bar{l}_{осл}$	0,71	0,63	0,60	0,72	0,59	0,52	0,54	0,50	0,47
	$\bar{b}_{осл}$	0,20	0,40	0,50	0,50	0,60	0,70	0,70	0,80	0,90
1,5	$\bar{l}_{осл}$	0,94	0,91	0,88	1,07	0,87	0,77	0,80	0,74	0,70
	$\bar{b}_{осл}$	0,20	0,40	0,50	0,50	0,60	0,70	0,70	0,80	0,90
2,0	$\bar{l}_{осл}$	1,57	1,57	1,58	1,38	1,14	1,26	1,06	0,99	0,94
	$\bar{b}_{осл}$	0,10	0,30	0,40	0,50	0,60	0,60	0,70	0,80	0,90
2,5	$\bar{l}_{осл}$	0,0	1,55	1,77	1,61	1,35	1,52	1,31	1,35	1,25
	$\bar{b}_{осл}$	0,0	0,30	0,40	0,50	0,60	0,60	0,70	0,70	0,80
3,0	$\bar{l}_{осл}$	0,0	0,0	0,30	0,40	0,50	0,50	0,60	0,70	0,70
	$\bar{b}_{осл}$	0,0	0,0	2,01	2,19	1,97	2,30	1,84	1,56	1,62

9.5.5. Результаты оценки технического состояния конструкций. По результатам освидетельствования и проверочного расчета конструкций оценивается их техническое состояние. Оценка должна отнести техническое состояние здания или сооружения, а также его отдельные конструктивные элементы, узлы и соединения к одному из следующих типов:

- работоспособное – несмотря на имеющиеся отступления от норм, государственных стандартов и технической документации, нормальная эксплуатация конструкций обеспечивается в конкретных условиях рассматриваемого здания или сооружения;
- ограниченно работоспособное – для обеспечения функционирования конструкций необходимо проведение специальных (допустимых условиями эксплуатации) мероприятий по контролю за состоянием конструкций, параметрами технологического процесса, нагрузками и другими условиями эксплуатации (возможно с ограничениями по продолжительности и зонам функционирования);
- неработоспособное (недопустимое) – существующее или прогнозируемое по расчету состояние конструкции является одним из предельных состояний по классификации СТ СЭВ 3972-83 и без усиления не может быть допущено к эксплуатации.

Конструкции, находящиеся в неработоспособном состоянии должны быть усилены или заменены.

Проектом должно быть предусмотрено восстановление работоспособного состояния всех сохраняемых конструкций. При этом:

- отклонения от геометрической формы, размеров элементов и соединений от номинальных (предусмотренных проектом), превышающие допустимые СНиП III-18-75, но не препятствующие нормальной эксплуатации, могут не устраняться, если несущая способность конструкций обеспечивается;

- допускается не усиливать элементы конструкций, имеющие гибкость, превышающую предельные значения, установленные в пп.6.15 и 6.16 СНиП II-23-81*, если эти элементы не имеют искривлений, превышающих установленные СНиП III-18-75 допуски, и усилия в этих элементах не будут возрастать, а также в тех случаях, когда возможность их использования проверена расчетом;
- допускается не усиливать конструкции, выполненные с отступлениями от требований пп.12.8, 12.3, 12.19*, 13.5, 13.6, 13.9*, 13.14, 13.16, 13.19*, 13.25, 13.27, 13.46*, 15.13, 16.15*–16.18 и 16.23 СНиП II-23-81*, если отсутствуют вызванные этими отступлениями повреждения элементов конструкций, включая изменения в неблагоприятную сторону условий эксплуатации конструкций и их несущая способность обоснована расчетом.

Для существующих конструкций допускается использовать без усиления элементы, прогибы которых превышают предельные значения по пп.13.1* СНиП II-23-81*, но не препятствуют нормальной эксплуатации (передвижению мостовых и подвесных кранов, обеспечению надежной работы ограждающих конструкций, бесперебойной эксплуатации установленного на конструкциях оборудования и т.п.)

9.6. Проектирование восстановления, усиления и реконструкции строительных металлоконструкций

9.6.1. Общие положения. Необходимость ремонта или усиления возникает при обнаружении ограниченно работоспособного или неработоспособного технического состояния конструкции и определяется:
- наличием недопустимых дефектов и повреждений (см.п.9.3), в результате чего не обеспечиваются требования прочности, жесткости и соответствия условиям эксплуатации;
- повреждением воздействиями стихийного характера;
- изменением условий эксплуатации (п.9.2), связанных с изменением габаритов здания, нагрузок, расположения оборудования, интенсификацией технологического процесса при реконструкции и др.

При производстве работ по восстановлению несущей способности либо других качеств конструкции или работ по усилению, как правило, неизбежны некоторые ограничения технологического процесса и даже его остановка, что приводит к определенным экономическим потерям. Поэтому усиление или восстановление первоначальной проектной несущей способности конструкций является крайним средством достижения нормальных условий эксплуатации, когда этой цели нельзя достичь ни за счет выявленных резервов несущей способности, ни путем уменьшения постоянных или временных нагрузок, действующих на конструкцию (замена ограждающих конструкций на более легкие, ограничение грузоподъемности кранов, хода тележки, сближения кранов, изменения расположений кранов в пролетах цеха).

Выбор оптимального варианта усиления производится на основании сравнения нескольких конкурентноспособных вариантов с учетом возможного экономического ущерба от помех технологическому процессу, а также по критерию технологичности и сроков производства работ. Усиление может быть аварийным, временным, капитальным, перспективным. *Аварийное усиление* производится в экстремальных ситуациях для срочного восстановления несущей способности, принимая при этом наиболее простые конструктивные и технологические решения, рассчитанные на короткий срок эксплуатации до капитального восстановления. *Временное усиление* осуществляется в том случае, если необходимо обеспечить в плановом порядке нормальную эксплуатацию до начала капитального усиления. *Капитальное усиление* применяется для решения текущих задач при реконструкции зданий и сооружений. *Перспективное усиление* необходимо в тех случаях, когда на конструкцию в период

ее эксплуатации предполагается увеличение технологической нагрузки и другие изменения условий эксплуатации.

Способы усиления разделяются по степени нагруженности и по конструктивному признаку.

По степени нагруженности усиление конструкции может производится: под полной нагрузкой, с частичной разгрузкой, с полной разгрузкой.

Первый способ является наиболее сложным и ответственным видом усиления, требует детального обследования сохраняемой конструкции, надежной оценки ее напряженного состояния и специальных приемов усиления, позволяющих эффективно включить элементы усиления в работу существующей конструкции.

Второй способ наиболее распространен и предполагает отсутствие во время усиления какой-либо временной нагрузки, например, снеговой, крановой и т.п.

Усиление с полным снятием временной нагрузки (с полной разгрузкой) применяется либо при аварийно-восстановительных работах, либо для конструкций (например, подкрановых), для которых основной является полезная нагрузка.

Классификация основных способов усиления приведена в табл.9.14.

Усиление конструкций может быть выполнено одним или одновременно несколькими способами.

Соединения элементов усиления с существующими конструкциями выполняются на сварке или болтах, в том числе высокопрочных.

В конструкциях, работающих в условиях низких климатических температур на циклические или динамические нагрузки, присоединение элементов предпочтительно осуществлять с помощью болтов.

Сталь для элементов усиления следует назначать по СНиП [1] с учетом механических характеристик стали усиливаемой конструкции. Качество новой стали не должно быть ниже качества старой.

Проектирование усиления должно обязательно производится с учетом монтажной технологичности, что обусловлено стесненностью пространства из-за наличия существующих конструкций, коммуникаций, оборудования, необходимостью совмещать монтажные работы с технологическим процессом предприятия, сжатыми сроками работ по усилению, ограниченным выбором монтажных механизмов и др.

Разработке проекта восстановления, усиления или реконструкции зданий и сооружений должна предшествовать оценка технического состояния существующих конструкций (п.9.5).

В случае, если материалов обследования конструкции недостаточно для оценки ее технического состояния, необходимо проводить испытание фрагментов или всего каркаса здания (сооружения).

Кроме того при проектировании усиления необходимо учитывать следующие особенности:

I. Усиление конструкции под нагрузкой с помощью сварки возможно в том случае, если абсолютное значение напряжений в усиляемом элементе σ_0 не будет превышать следующих величин:

- для I группы сварных конструкций, работающих в особо тяжелых условиях [1] $\sigma_0 \le 0{,}2R_{y0}$ (R_{y0} - расчетное значение предела текучести усиливаемого элемента);
- для элементов сварных конструкций, непосредственно воспринимающих подвижные и динамические нагрузки, но не входящие в I группу (подкрановые балки для кранов с группой режимов работы 1К...6К, пролетные строения галерей, балки соответствующих рабочих площадок и т.п.) $\sigma_0 \le 0{,}4R_{y0}$;
- для всех остальных сварных конструкций, работающих на статические нагрузки $\sigma_0 \le 0{,}8R_{y0}$.

Если эти условия не выдерживаются, то перед началом усиления нужна разгрузка конструкции до соответствующего уровня.

Таблица 9.14. Способы усиления строительных металлоконструкций

№№ п/п	Наименование способа усиления	Методы реализации усиления
1	Косвенное усиление или изменение условий эксплуатации	1.1. Использование резервов несущей способности за счет: а. Перерасчета по современным нормам; б. Учета фактической геометрии конструкции, элемента; в. Учета фактических механических характеристик стали; г. Учета фактических постоянных и временных нагрузок и воздействий; д. Уточнение расчетной схемы несущих конструкций (учет действительной работы узлов сопряжений элементов, колонн с фундаментами, действительной работы оснований и др.); е. Учета эффекта от пространственной работы каркаса и поддерживающего влияния менее нагруженных элементов; ж. Уточнения схемы работы элементов конструкции (например, уменьшение расчетной длины сжатых стержней решетки ферм при наличии фасонок и т.п.); з. Учета совместной работы несущих и ограждающих конструкций. 1.2. Ограничение работы технологического оборудования или замена его на новое с меньшим воздействием. Контроль за состоянием конструкций, в т.ч. с использованием контрольно-сигнальных устройств; 1.3. Замена существующих ограждающих конструкций на другие с меньшей массой; 1.4. Снижение природно-климатических и геологических воздействий (например, устройство навесов, скатов для снижения снеговых нагрузок; установка ветровых гасителей динамики; установка энергопоглотителей в условиях сейсмики и т.п.); 1.5. Подведение дополнительных промежуточных несущих и ограждающих, а также страховочных конструкций (например, подведение новых прогонов; установка упругих прокладок, экранов и т.п.) (рис.9.1)
2	Изменение статической схемы конструкций с рациональной технологией производства работ	2.1. Подведение или установка дополнительных опор, подкосов или подвесок; 2.2. Постановка дополнительных связей, распределительных систем; 2.3. Превращение разрезных систем в неразрезные и наоборот; 2.4. Введение новых стержневых элементов и систем для рационального изменения статической схемы; 2.5. Введение шарниров, создание заданной жесткости; 2.6. Предварительное напряжение конструкций
3	Увеличение площади сечения	Присоединение к существующему элементу дополнительного элемента, увеличивающего площадь первого
4	Местное усиление	4.1. Установка элементов, перекрывающих местные дефекты (накладки, дополнительные фасонки и т.п.); 4.2. Установка дополнительных скреплений элементов: прокладки между спаренными элементами, планки и решетки между ветвями двухплоскостных элементов и т.п.; 4.3. Установка дополнительных ребер жесткости; 4.4. Заделка пазух, проемов, герметизация полостей клепаных и болтовых стыков и т.п.
5	Усиление соединений	5.1. Увеличение катета и длины сварных швов; 5.2. Постановка дополнительных болтов, замена заклепок болтами для болтовых и заклепочных соединений
6	Повышение ресурса по выносливости	Постановка дополнительных элементов; применение специальных конструктивно-технологических методов; деконцентрация напряжений
7	Повышение хладостойкости конструкций	Деконцентрация напряжений

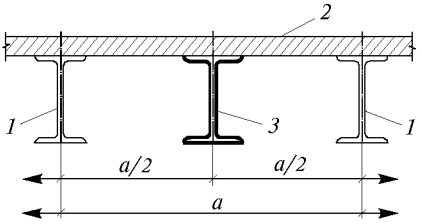


Рис.9.1. Косвенное усиление балок (ферм)
1 – усиливаемые балки (фермы); *2* – плиты покрытия (перекрытия рабочей площадки); *3* – балка (ферма) усиления

При конструктивном оформлении усиления необходимо обеспечить надежную совместную работу основных элементов и элементов усиления, их общую и местную устойчивость, неизменяемость сечения (установкой прокладок, диафрагм), исключить возможность появления резких концентраторов напряжений. Принятая конструктивная форма усиления не должна препятствовать качественной антикоррозийной защите.

При пректировании и проведении восстановительных работ или работ по повышению несущей способности должны соблюдаться следующие требования:

1. Элементы усиления необходимо располагать таким образом, чтобы не нарушать центровку элементов в узлах стержневых систем, а также не изменять положения центра тяжести основного элемента;
2. При усилении под нагрузкой запрещается накладывать сварные швы поперек растянутых усиливающих и усиливаемых элементов, катет сварного шва при одном проходе должен быть не более 6 мм;
3. При наплавке дополнительных слоев на существующие швы необходимо ограничить нагрев усиливаемых элементов, для чего применять электроды диаметром 3 – 4 мм, наплавлять швы слоями по 2 мм при сварочном токе 200...220 А участками по 50...70 мм, сварку вести с перерывами для остывания;
4. Сварку сталей производить с учетом температуры окружающего воздуха в соответствии с нормами [4]. Сварка нагруженных конструкций должна производиться при температурах окружающего воздуха на 15°С выше указанных в нормах.
5. Для снижения опасности хрупкого разрушения сварных соединений при пониженных температурах новые швы следует располагать возможно дальше от мест с существующими концентраторами напряжений (резкое изменение сечений, вырезы, ребра, фасонки и т.п.); расстояние между параллельными угловыми швами должно быть не менее 100 мм, такое же расстояние должно быть между новыми стыковыми швами и швами крепления ребер, фасонок, накладок и т.п.); в остальных случаях следует выдерживать расстояние между швами не менее 8...18 катетов швов, которыми привариваются новые детали;
6. При производстве сварочных работ по усилению балок и ферм в первую очередь выполняются швы, крепящие детали усиления к нижнему поясу и, в последнюю – к верхнему;
7. Присоединение новых элементов сваркой производить в следующей последовательности: установка нового элемента и крепление его к существующему с помощью струбцин; приварка на сварных прихватках длиной 10...20 мм через 300...500 мм; сварка окончательная от концевых участков к середине;
8. Присоединение элементов усиления на болтах проводят с минимальным ослаблением сечения основного элемента, для чего сначала крепят болтами концы деталей усиления, затем выполняются промежуточные соединения, причем сверлить каждое следующее отверстие можно только после установки болта в предыдущее;
9. Комбинированные соединения разной жесткости, например, болтовое (заклепочное) в комбинации со сварными, применять запрещается.
10. Применение высокопрочных болтов в узлах с передачей на них одновременно сдвигающих и растягивающих усилий не допускается.

Технические решения должны учитывать индустриальные технологии применительно к конкретным условиям и предполагаемым исполнителям. При реконструкции каркасов и их частей следует ориентироваться на конвейерно-блочный монтаж, обстройку существующих зданий и сооружений с ее последующим демонтажом, блочно-агрегатную замену конструкций, включая надвижку готовых сооружений и блоков.

Основные требования монтажной технологичности:

- необходимость обеспечения беспрепятственной заводки деталей усиления при их установке в проектное положение;
- оснащение монтажными временными креплениями;
- доступность рабочих мест для выполнения всех технологических процессов и операций и контроля их качества;
- обеспечение собираемости традиционными конструктивными приемами.

Рекомендуемая последовательность выполнения проектов восстановления, усиления и реконструкции металлических каркасов приведена в таблице 9.15.

Таблица 9.15. Схема разработки и реализации проекта реконструкции или усиления

Этапы	Содержание этапов	Примечания
1.	Подготовка исходных данных – проектно-изыскательские работы	Выполнятся либо специализированной изыскательской организацией, либо соответствующим отделом проектной организации, имеющим лицензию на право проведения обследовательских работ.
1.1.	Ознакомление с объектом и формулирование задачи	
1.2.	Заключение договора	
1.3.	Сбор и анализ технической документации	
1.4.	Натурное освидетельствование конструкций	
1.5.	Определение фактических нагрузок и воздействий	
1.6.	Определение фактических свойств стали	
1.7.	Проверочный расчет конструкций	
1.8.	Оценка технического состояния конструкций	
1.9.	Разработка конструктивных решений по реконструкции и усилению	
2.	Выполнение проекта	
2.1.	Заключение договора	
2.2.	Оценка предложенных и разработанных альтернативных конструктивных решений	
2.3.	Согласование основных технических решений. Совмещение их с технологическим процессом предприятия	
2.4.	Выполнение расчетов	
2.5.	Выполнение рабочих чертежей	
2.6.	Определение экономических показателей проекта	
3.	Утверждение и реализация проекта	
3.1.	Подбор подрядной организации для выполнения работ по реконструкции и усилению	
3.2.	Согласование проекта с технологическими возможностями подрядной организации и условиями выполнения работ на реконструируемом предприятии	Совместно с заказчиком работы.
3.3.	Осуществление авторского надзора в процессе производства работ	
3.4.	Оценка технико-экономической эффективности принятых в проекте решений	

9.6.2. Усиление конструкций путем изменения их конструктивной схемы. Схему конструкций рекомендуется изменять при необходимости повышения несущей способности и других эксплуатационных характеристик конструкций в целом. При

этом необходимо иметь в виду, что этот способ приводит к изменению расчетной схемы, перераспределению усилий, и в том числе к перегрузке отдельных элементов конструкции.

Изменение конструктивной схемы может осуществляться, например, следующими способами:

1. Подведением дополнительных опор, подкосов, подвесок (рис.9.2), что позволяет повысить несущую способность балочных систем в 2...4 раза, снизить прогибы в несколько раз. Этот способ усиления возможен при наличии свободного пространства под усиливаемой конструкцией, и при условии удовлетворительного состояния фундаментов и грунтов оснований. Рекомендуется применять при аварийном усилении.

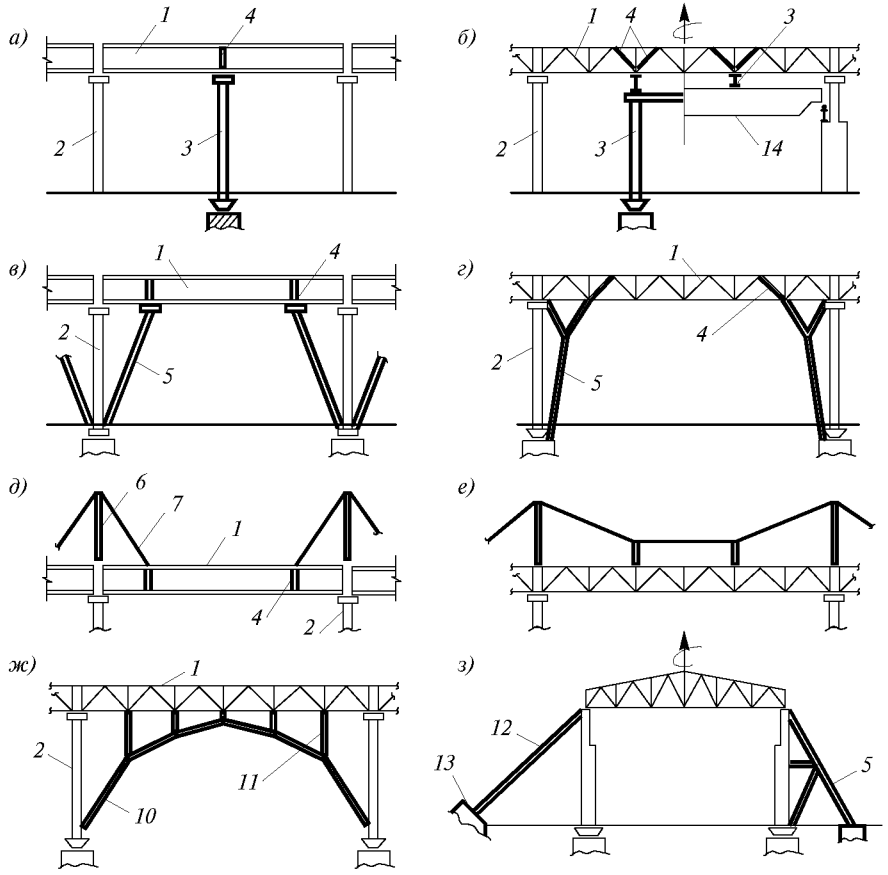


Рис.9.2. Усиление конструкций подведением (установкой) дополнительных опор
1 – усиливаемая конструкция; *2* – существующая опора; *3* – новая опора; *4* – элемент местного усиления; *5* – новый подкос; *6*, *7*, *8*, *9* – соответственно дополнительные пилон, вант, несущий трос, подвеска; *10*, *11* – дополнительные арка и стойка; *12*, *13* – соответственно новые оттяжка и фундамент; *14* – мостовой кран

2. Постановкой дополнительных распределительных систем, связей (рис.9.3). Распределительные системы – продольные вертикальные связевые фермы, горизонтальные продольные связи в плоскости нижних поясов ферм покрытия (если их не было) – применяются соответственно для повышения несущей способности стропильных ферм, повышения жесткости каркаса в целом и косвенно приводят к усилению колонн.

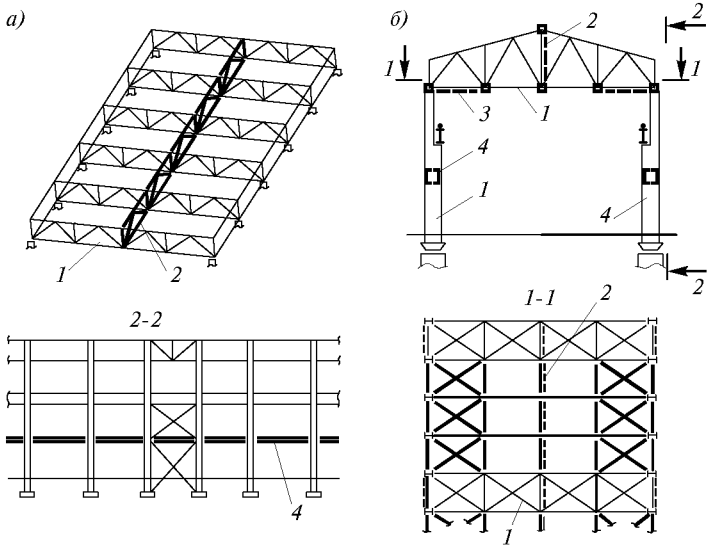


Рис.9.3. Усиление путем введения распределительных систем связей
а – постановка продольной распределительной связевой фермы; *б* – постановка горизонтальных связевых продольных ферм; *1* – существующие сохраняемые конструкции; *2* – продольная дополнительная вертикальная ферма; *3* – продольная дополнительная горизонтальная ферма; *4* – дополнительная распорка

Статический расчет распределительной системы в виде продольных вертикальных ферм следует выполнять как неразрезной системы на упруго-податливых опорах, стропильных ферм – как систему с дополнительной упругой опорой [3]. Перерасчет поперечной рамы после постановки продольных горизонтальных связевых ферм целесообразно осуществлять, пользуясь рекомендациями [2], усиление производить при отсутствии снеговой и крановой нагрузок.

В ряде случаев для усиления колонн возможна постановка продольных дополнительных распорок, если гибкость колонн из плоскости поперечных рам составляет более 80.

3. Превращением статически определимых однопролетных балочных систем в неразрезные многопролетные или в однопролетные статически неопределимые системы (рис.9.4*а,б*), или превращением шарнирного опирания колонны на фундаменты в заделку (рис.9.4*в*). Этим способом можно повысить несущую способность усиляемой системы на 15...20%. Процесс усиления должен производиться при полной или частичной разгрузке усиляемых конструкций. Может выполняться также и противоположное изменение схемы путем превращения статически неопределимых систем в определимые, либо в неопределимые с меньшей степенью статической неопределимости.

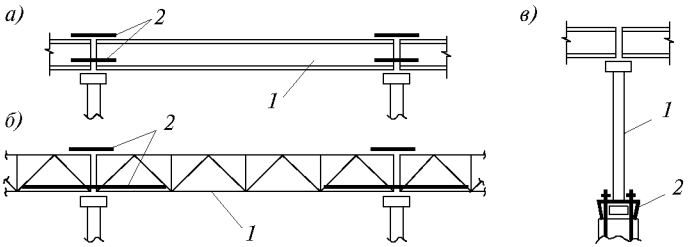


Рис.9.4. Усиление путем превращения шарнирного опирания конструкции в жесткое
1 – усиливаемая балка (ферма, колонна); *2* – детали местного усиления опорных узлов

4. Введением новых стержневых элементов для изменения статической схемы (рис.9.4; 9.5) и превращением ее в шпренгельную систему, что дает возможность повысить несущую способность на 40...60%; постановкой местных шпренгельных элементов в фермах с целью уменьшения расчетных длин сжатых элементов и восприятия местной нагрузки; включением существующих или новых фонарей в работу стропильных ферм; введением новых элементов решетки ферм, колонн; постановкой дополнительных стержней усиления в опорные узлы поперечных рам для изменения статической схемы.

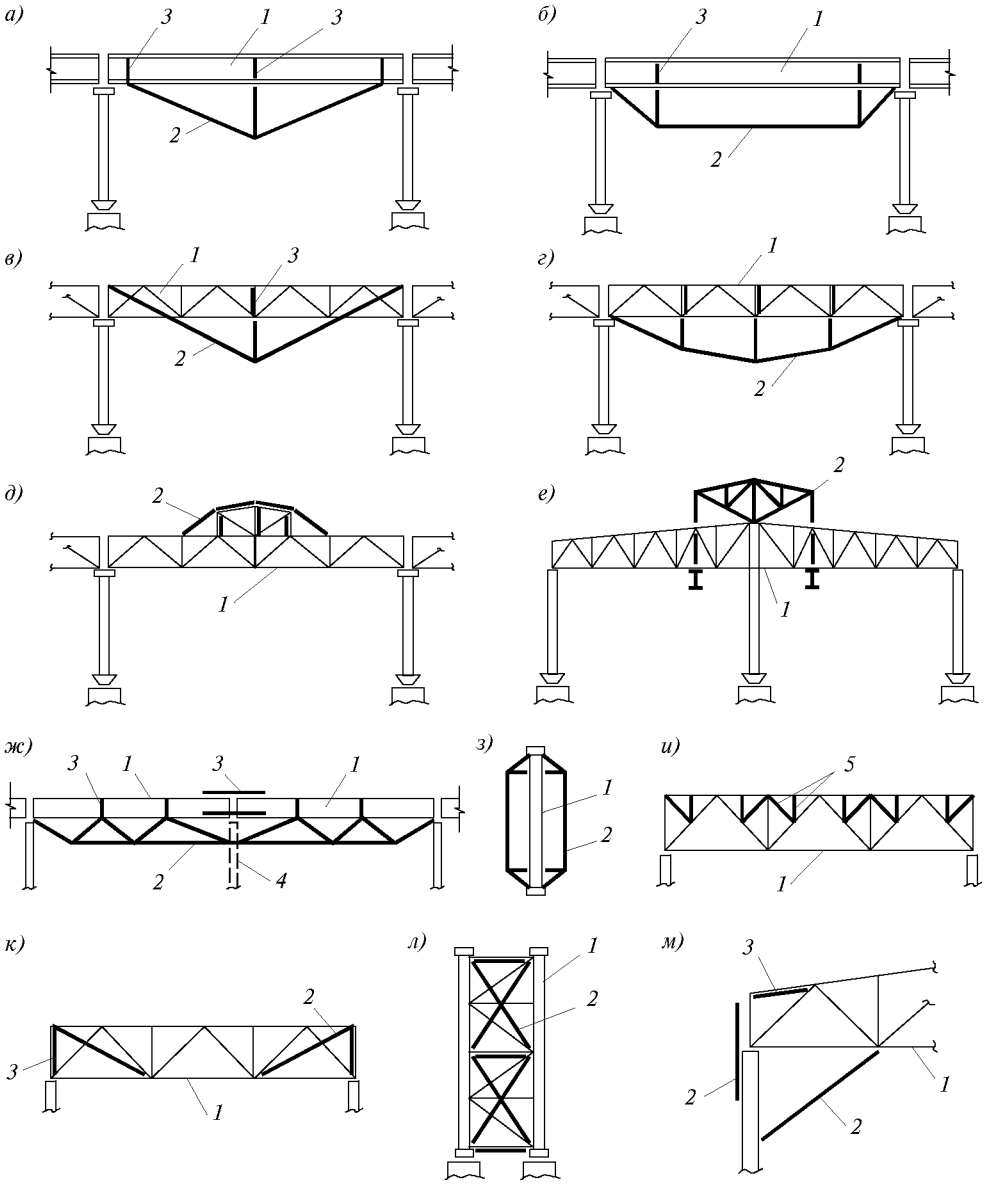


Рис.9.5. Усиление путем введения новых стержней, изменяющих внешнюю или внутреннюю статическую неопределимость

1 – усиливаемая балка (ферма, колонна); *2* – новые стержни; *3* – детали местного усиления; *4* – демонтируемая опора; *5* – шпренгели

Особенность данного метода усиления заключается в необходимости полной, либо в крайнем случае, частичной разгрузки конструкции перед усилением; чем больше степень разгрузки, тем выше эффективность этого способа усиления.

5. Введением шарниров или устройством сечений с заданной жесткостью в рамные и неразрезные балочные системы (рис.9.6), что дает возможность разгрузить зоны примыкания ригелей к стойкам в случае появления значительных осадок фундаментов. Введение шарниров в рамах приводит к уменьшению жесткости последних, что в ряде случаев требует компенсации постановкой дополнительных связей, а изменение статической схемы ригеля, как правило, требует его усиления, (например, по рис.9.6*б*).

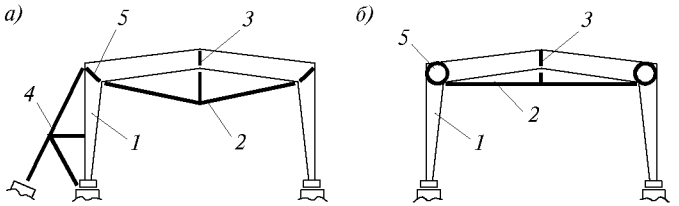


Рис.9.6. Усиление путем введения шарниров вместо жестких узлов в рамах (балках)
1 – усиливаемая конструкция; *2* – элемент усиления; *3* – деталь местного усиления; *4* – новая опора; *5* – новые шарниры вместо жестких узлов

6. Введением затяжек в распорные системы (рис.9.7) и подвески к стойкам рам ограждающих конструкций для создания разгружающего изгибающего момента в пролете ригеля рамы, арки. Для более эффективного включения в работу усиляемой конструкции затяжка должна предварительно напрягаться.

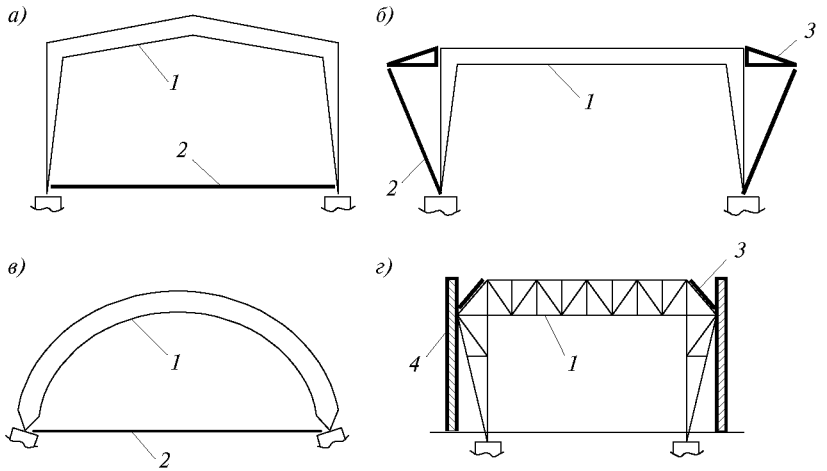


Рис.9.7. Усиление рам и арок путем введения затяжек, подвески стенового ограждения
1 – усиливаемая конструкция; *2* – затяжка; *3* – новая консоль; *4* – стеновое ограждение

7. Предварительного напряжения конструкций, которое в свою очередь может осуществляться путем:

а. *Пригруза конструкций* или использования контргруза (рис.9.8). В первом случае к консоли балки, фермы или рамы с вылетом «а» подвешивается груз с массой Q, в результате изгибающий момент в пролете уменьшается на величину $\Delta M = Qa$; разгрузка главных балок балочной клетки или подкрановых балок

может быть выполнена с помощью распорного устройства с контргрузом Q, в результате к нижним поясам балок прикладывается продольное усилие S, выгибающее каждую балку вверх (рис.9.8 *а*) [2]. В этом случае между балками устанавливаются специальные вкладыши, обеспечивающие передачу усилий, а в крайних панелях – новые связи.

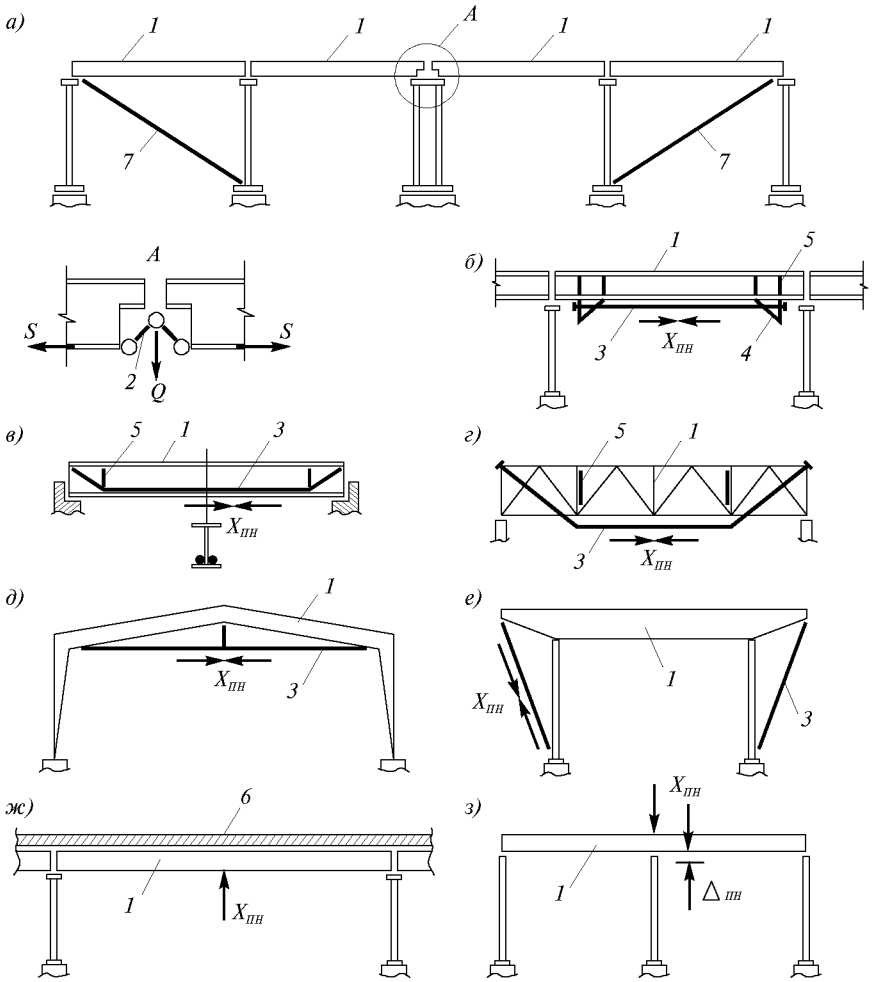


Рис.9.8. Усиление путем предварительного напряжения конструкций
1 – усиливаемая конструкция; *2* – распорное устройство; *3* – предварительно натянутая высокопрочная затяжка; *4* – новый столик; *5* – детали местного усиления; *6* – плиты настила; *7* – новые связи

б. *Введением предварительно напряженных высокопрочных затяжек* (рис.9.8 *б*, *в*, *г*, *д*, *е*), функцию которых могут выполнять также шпренгели и ванты. В балках, фермах, рамах затяжки, как правило, ставятся вдоль нижнего пояса. Благодаря их натяжению создается изгибающий момент, противоположный по знаку моменту от постоянных и временных нагрузок, затяжки могут иметь ломаное очертание и для удобства натяжения выводиться на верхний пояс. В фермах могут размещаться по бокам или между двумя фермами в блоке (рис.9.17).

Своеобразным шпренгелем являются ванты, размещаемые над усиливаемой конструкцией (рис.9.2).

в. *Предварительным выгибом (деформацией) конструкции* (рис.9.8 *ж*). Этот прием может применяться для включения в совместную работу настила с несущей конструкцией. Так, если снять с поддерживающей несущей конструкции временную нагрузку и, поддомкратив ее (приложив усилие $X_{ПН}$), затем либо уложить новый (дополнительный) настил, либо надежно прикрепить плиты настила, обеспечив плотное касание друг с другом, то настил, включаясь в совместную работу с несущей конструкцией, образует с последней комбинированную систему. Теперь масса плит и вся временная нагрузка будет восприниматься этой системой, а не одной несущей конструкцией (балкой, фермой, ригелем рамы).

С помощью предварительной деформации дополнительных усиливающих стержней можно добиться разгрузки сжатых стоек [2]. Для этого можно, например, использовать распорные усиливающие стержни и стянуть их с помощью домкратов или тяжей (рис.9.9) или с помощью трубы с затяжкой (рис.9.9*а*).

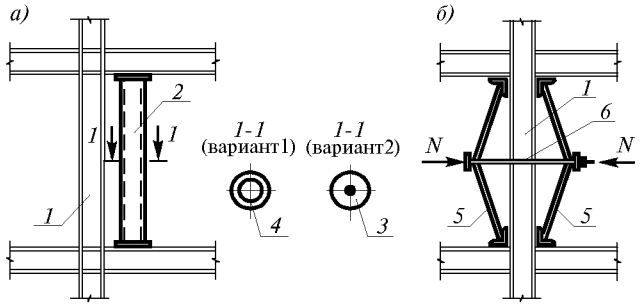


Рис.9.9. Усиление (разгрузка) сжатых стоек (колонн)
1 – усиливаемая колонна; *2* – элемент усиления из трубы; *3* – предварительно натянутая затяжка; *4* – нагреваемая внутренняя труба; *5* – распорные усиливающие стержни; *6* – тяж для стягивания стоек усиления

г. *Регулированием усилий в неразрезной системе* путем изменения уровня опор (рис.9.8 *з*). При этом в балочной системе создаются изгибающие моменты, обратные по знаку моментам от эксплуатационной нагрузки, в результате чего можно уменьшить в наиболее напряженных сечениях расчетный момент для балок или расчетное усилие для ферм.

Здесь упомянуты лишь некоторые приемы использования эффекта предварительного напряжения. Более подробные сведения о конструктивных решениях и расчете подобных конструкций приведены в гл.13 «Предварительно напряженные элементы и конструкции» первого тома настоящего Справочника.

9.6.3. Усиление конструкций путем увеличения сечения элементов. Этот метод усиления применяется в тех случаях, когда несущая способность конструкции определяется одним или несколькими элементами, например прочностью или устойчивостью нескольких стержней. При этом целесообразно увеличить сечение перегруженных элементов.

В настоящем методе к усиливаемому элементу с площадью сечения A_0 и расчетным сопротивлением стали R_y присоединяется дополнительный элемент с площадью A_τ с расчетным сопротивлением R_y, при этом одновременно увеличиваются и другие геометрические характеристики сечения усиливаемого элемента (J, W, i).

Эффективность усиления может быть оценена по величине коэффициента κ_y для изгибаемых элементов $\kappa_y = (G/G_0)(M/M_0)$;
для центрально растянутых элементов

$$\kappa_y = (G/G_0)(N/N_0); \tag{9.31}$$

для центрально сжатых элементов

$$\kappa_y = (G/G_0)(J_x/J_{x0})^{0,5}(A/A_0)^{0,5} \tag{9.32}$$

для внецентренно-сжатых элементов при необходимости повышения устойчивости в плоскости действия изгибающего момента

$$\kappa_y = (G/G_0)(e/e_0)(A/A_0)^{1,5}(J_x/J_{x0})^{1,5}(W_x/W_{x0}); \quad (9.33)$$

то же, при необходимости повышения устойчивости элемента из плоскости действия изгибающего момента

$$\kappa_y = (G/G_0)(c/c_0)(J_x/J_{x0})^{0,5}(A/A_0)^{0,5}. \quad (9.34)$$

В приведенных формулах A; A_0; W_x; W_{x0}; J_x; J_{x0}; G; G_0; e; e_0; c; c_0 – соответственно площади сечения, моменты сопротивления, моменты инерции, масса элементов, эксцентриситеты продольных сил, значения коэффициентов в формуле (56) СНиП [1] до и после усиления.

Чем больше значение коэффициента κ_y, тем эффективнее усиление с данным типом усиляющего элемента.

Усиление изгибаемых элементов. При усилении изгибаемых элементов наиболее рациональным по расходу стали являются схемы (рис.9.10 *в*...*с*), предусматривающие симметричное или близкое к симметричному усиление с расположением усиливающих элементов по возможности дальше от центра тяжести сечений усиливаемого элемента.

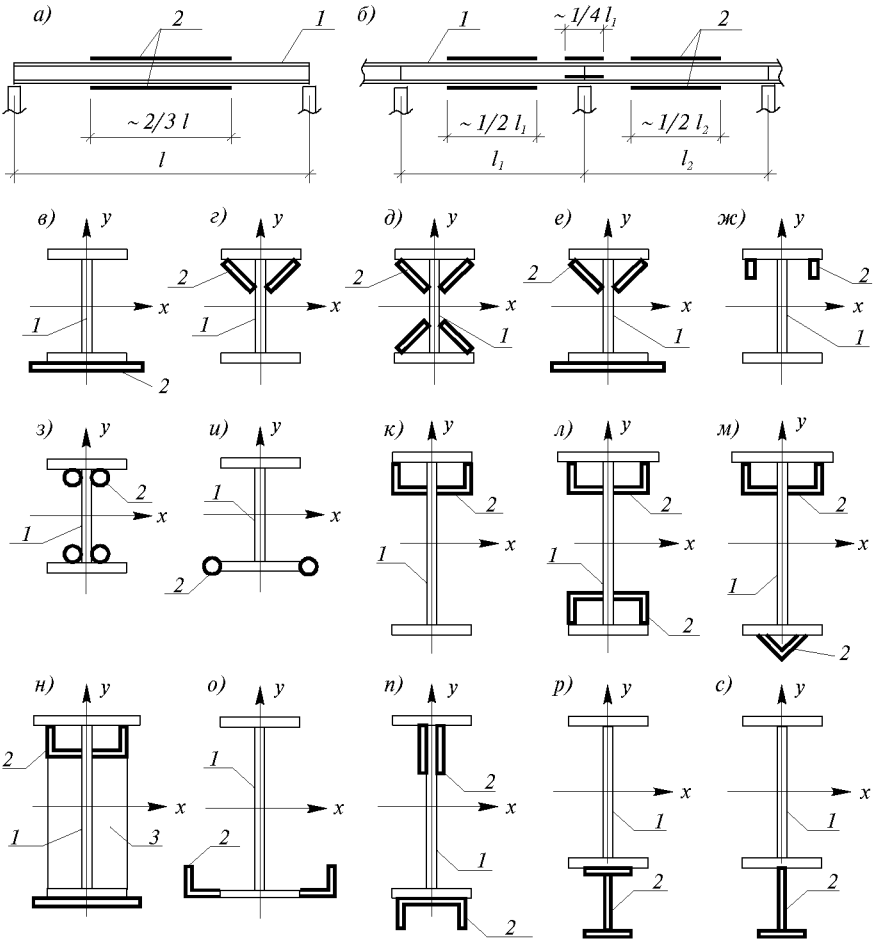


Рис.9.10. Усиление изгибаемых элементов путем изменения сечения
1 – усиливаемый изгибаемый элемент; *2* – дополнительные усиливающие элементы; *3* – поперечные ребра жесткости

При усилении балок, как правило, нет необходимости располагать элементы по всей длине усиляемого элемента, а можно ограничиться только участком с максимальным изгибающим моментом (рис.9.10 *а*, *б*). Расчет усиления изгибаемых элементов увеличением сечения приведен в [2; 5]. Крепление дополнительных элементов усиления для конструкций, работающих на циклические, динамические нагрузки и в условиях низких температур, производится только сплошными швами или болтами, в остальных случаях допускается применение прерывистых швов.

Усиление центрально-растянутых элементов осуществляется по схемам рис.9.11 *а*...*э*. Необходимо стремиться к сохранению положения центра тяжести сечения после усиления. Крепление элементов усиления для конструкций производится так же, как в балках. При креплении дополнительного элемента прерывистыми швами, предельное расстояние в свету между швами должно быть не более $80 i_{\min}$, где $i_{\min}$ – минимальное значение радиуса инерции основного или дополнительного элементов.

Усиление центрально-сжатых элементов выполняется по схемам рис.9.11 *д*, *е*, *ж*, *з*, *к*, *л*, *м*, *п*, *с*, *у*, *ф*, *х*, ... *э*. Необходимо при этом также сохранять по возможности положение центра тяжести после усиления. Требования к креплениям дополнительных элементов такие же, как в растянутых. При использовании прерывистых швов предельное расстояние в свету между швами должно быть более $40 i_{\min}$.

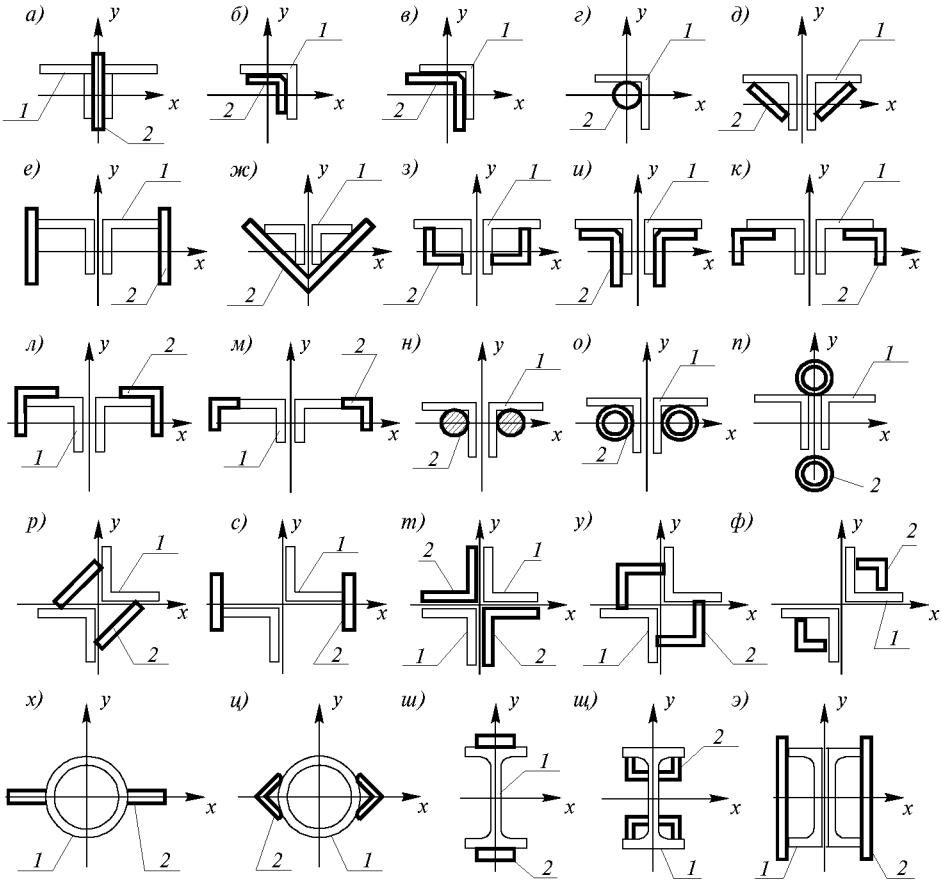


Рис.9.11. Усиление центрально-растянутых и центрально-сжатых элементов путем изменения сечения

1 – усиливаемый элемент; *2* – дополнительный присоединяемый элемент

Усиление внецентрально-сжатых или сжато-изогнутых стержней. При усилении таких стержней необходимо увеличивать одновременно их площадь сечения и момент инерции. Учитывая существенное влияние эксцентриситета продольной силы на несущую способность таких элементов следует использовать способы усиления, которые либо проводят к уменьшению эксцентриситета или хотя бы не увеличивают его. Это достигается, как правило, несимметричным усилением (рис.9.12 *а* ... *ю*).

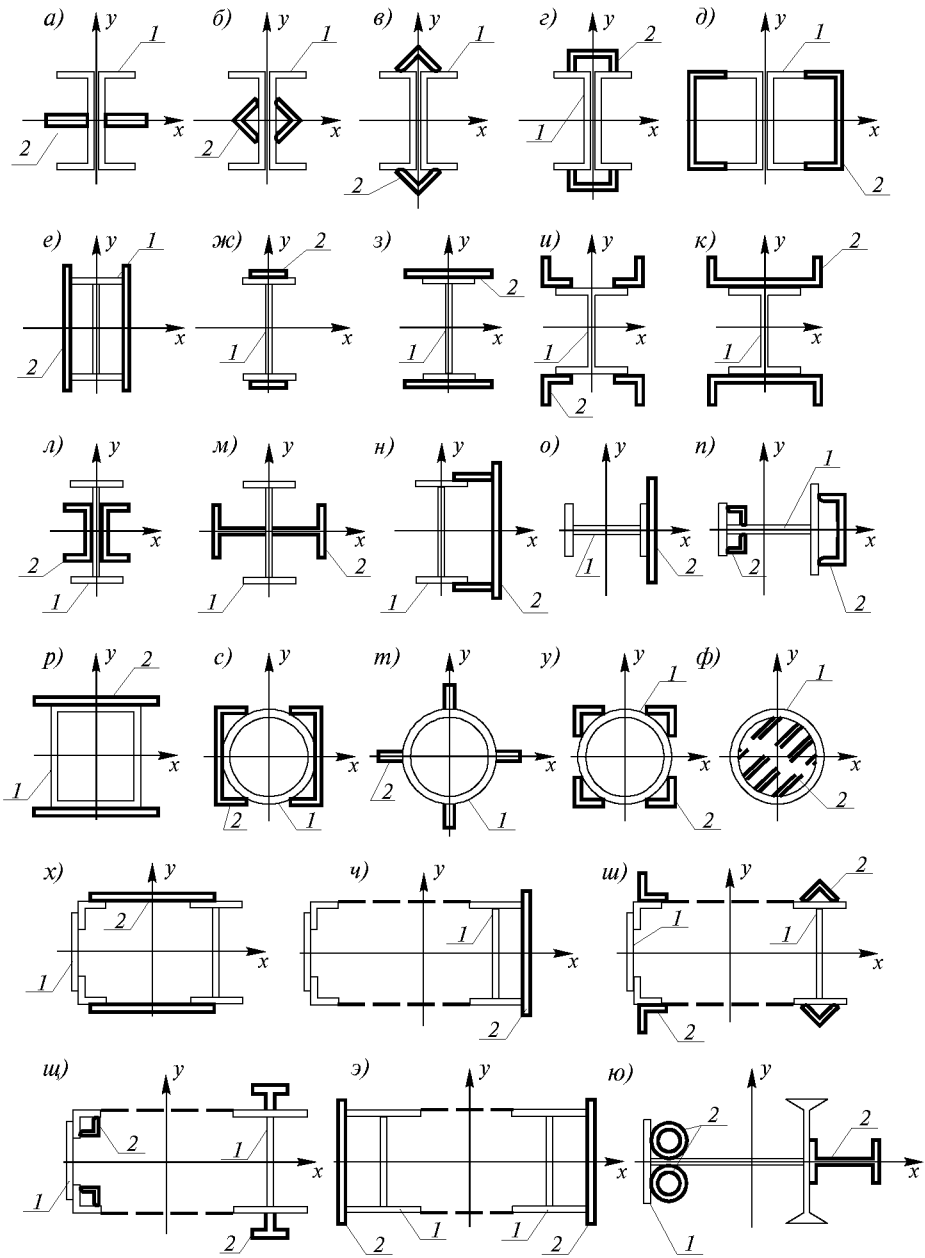


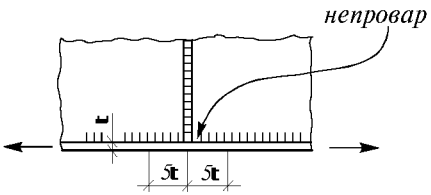
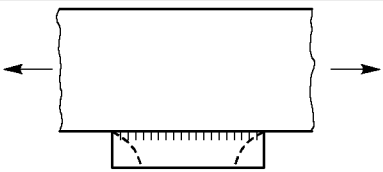
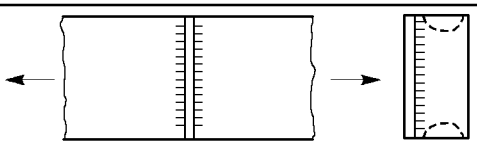
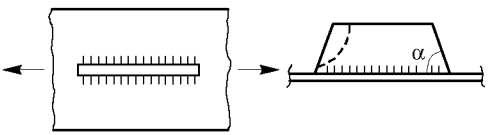
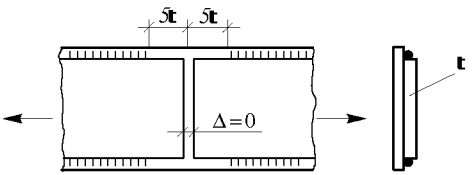
Рис.9.12. Усиление внецентренно-сжатых стержней путем изменения сечения
1 – усиливаемый стержень; *2* – дополнительно присоединяемый стержень

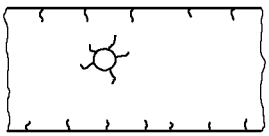
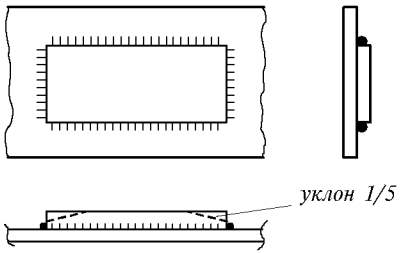
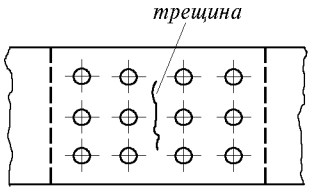
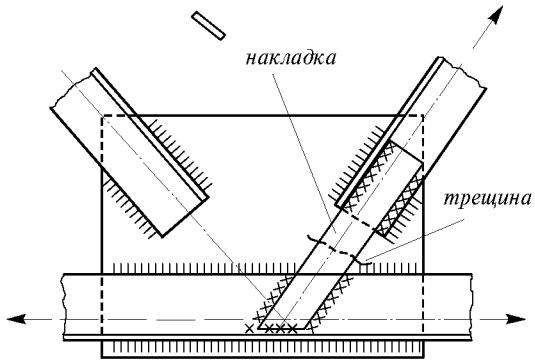
Требования к креплению дополнительных элементов не отличаются от требований, предъявляемых при усилении центрально-сжатых стержней.

9.6.4. Способы снижения концентрации напряжений. Во всех конструкциях присутствуют концентраторы напряжений, имеющие конструктивно-технологическую природу (резкое изменение сечения, отверстия для болтов, сварные швы, кромки, образованные гильотинной резкой и т.п.). Особенно опасны концентраторы в зонах термического влияния сварки. В районе концентраторов напряжений исходная пластичность резко снижена либо исчерпана еще до нагружения, что опасно при действии ударных, циклических нагрузок, снижении климатической температуры.

Упомянутые факторы еще более ограничивают развитие пластических деформаций и потенциально создают условия образования хрупкой либо усталостной трещины. Одним из эффективных методов борьбы с этим является деконцентрация, то есть сглаживание концентратора (снижение коэффициента концентрации напряжений). В табл.9.16 приведены наиболее рациональные приемы деконцентрации.

Таблица 9.16. Некоторые приемы деконцентрации напряжений

№№ п/п	Конструктивно-технологические формы	Группа элементов по нормам		Рекомендации
		до деконцентрации	после деконцентрации	
1	2	3	4	5
1		ориентировочно 5	2	Убрать поясные швы по $5t$
2		7	2	Закруглить торцы $r \geq 50$ мм
3		4	2	Выполнить закругления $r \geq 50$ мм
4		при $\alpha \leq 45°$ 4 при $\alpha \leq 90°$ 7	1...3	Закруглить торцы $r \geq 50$ мм Зачистить концы швов
5		недопустимо	8	Снять швы по 5t Зачистить концы швов

1	2	3	4	5
6		ориентировочно 7	1,2	Фрезеровать или срезать газом до 3 мм; отверстие рассверлить на 5–6 мм Установить высокопрочные болты
7		7	ориентировочно 6	Поперечные швы зачистить. Снять фаски по торцам с уклоном 1/5
8		недопустимо	1	Засверлить вершины трещины сверлом с диаметром, равным толщине листа, ось сверла на расстоянии 0,5 толщины от вершины. Затем перекрыть накладкой на высокопрочных болтах
9		недопустимо	4	Трещину обработать (см п.8) Установить и приварить накладки

9.6.5. Усиление соединений. Стыковые швы, выполненные на всю толщину соединяемых элементов, усилению не подлежат, так как наплавка металла не увеличивает расчетную высоту шва, а создает только дополнительную концентрацию напряжения. При необходимости усиления таких швов нужно переходить на другие виды соединений. Усиление угловых швов, находящихся под нагрузкой, возможно при выполнении условий: для шва $\tau_w \le 0{,}6R_{wf} \cdot \gamma_{wf}$; для основного металла $\sigma \le 0{,}6R_{y0}$; где R_{wf}, γ_{wf} по [1].

Усиление этих швов производится путем увеличения катета шва или увеличения их длины. При увеличении длины швов может возникнуть необходимость введения дополнительных элементов (рис.9.13 *а, б*). Если удлинение швов не дает нужного результата, следует увеличивать катет углового шва. При этом необходимо иметь в виду, что во время наплавки из работы выключается участок шва, разогретого до температуры 550°С и выше. Учет этого фактора может производится по указаниям [4]. Усиление обычных болтовых соединений возможно путем замены болтов нормальной прочности (классы 4.6; 4.8; 5.6; 5.8; 6.6) на высокопрочные (классы 8.8; 10.9) с предварительным натяжением, или на болты той же прочности, но большего диаметра, либо постановки дополнительных болтов (рис.9.13 *в, г*).

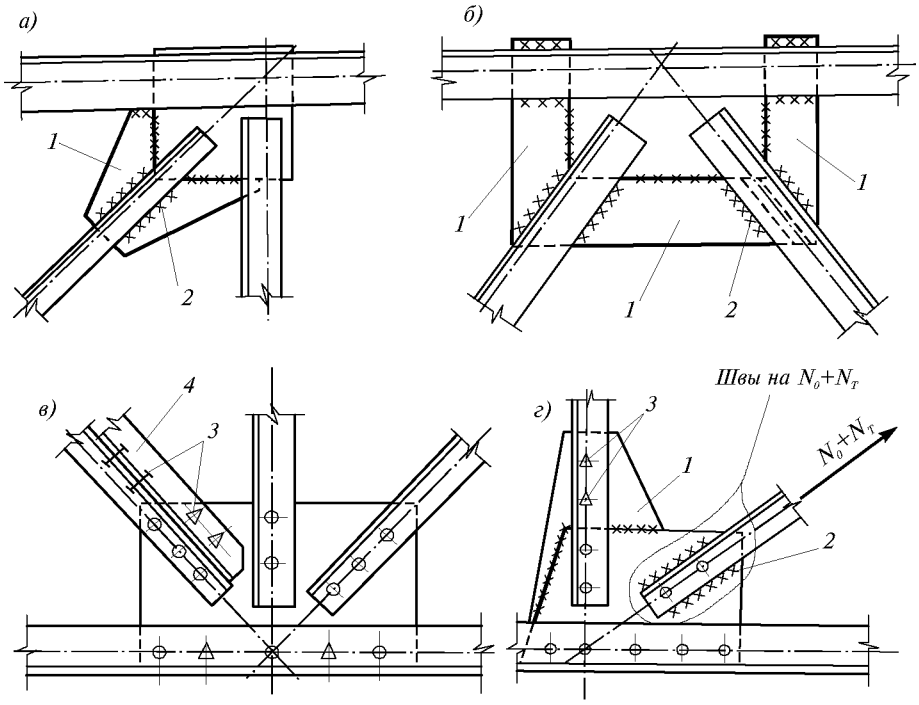


Рис.9.13. Усиление соединений

1 – дополнительная фасонка; *2* – новые сварные швы; *3, 4* – дополнительные болты, уголки

Усиление клепаных соединений производится путем замены высокопрочными болтами (класса 8.8; 10.9) диаметром 20...27 мм с предварительным натяжением (рис.9.13 *в, г*). При частичной замене заклепок не допускается создание смешанного клепано-болтового соединения, в котором болты располагались бы по одну сторону от продольной оси симметрии усиляемых элементов. Замену можно производить только полностью для одного или нескольких поперечных рядов (по отношению к оси действующего усилия) заклепок.

Усиление болтовых или заклепочных соединений с помощью сварных швов не рекомендуется из-за разных жесткостных характеристик этих соединений; оно может применяться, как исключение в тех случаях, когда сварные швы усилений будут расчитаны на восприятие всего усилия в элементе (рис.9.13 *г*).

9.6.6. Реконструкция и усиление каркасов зданий и сооружений. В зависимости от объема работ и характера поставленной задачи реконструкция может быть общей и локальной [8].

Общая реконструкция производится в случае необходимости:

1. Увеличения размеров пролетов и высоты цехов, осуществляемых способом «объемного каркаса», при котором действующий цех оказывается внутри возводимого каркаса. Может быть выполнено без остановки производства;
2. Увеличения высоты здания с подкрановыми путями, выполняемого методом подъема всего каркаса с подведением снизу под колонны новых участков колонн (способ подращивания);
3. Увеличения жесткости поперечных рам каркаса (рис.9.2*к*, 9.3), за счет установки внутренних подкосов и стоек (рис.9.14), пристройки наружной жесткой этажерки, устройства внутренних этажерок, сопряжения с существующей железобетонной этажеркой, замыкания температурного шва.

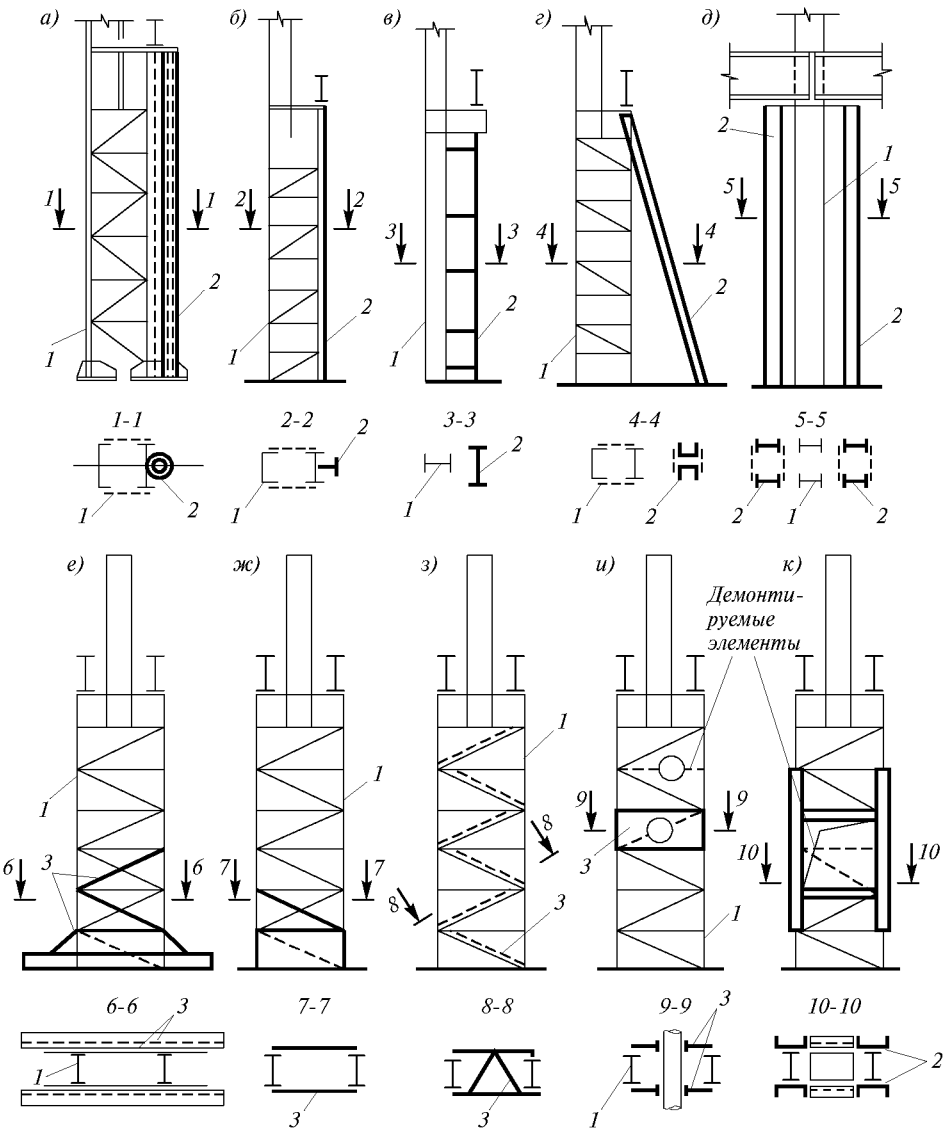


Рис.9.14. Усиление колонн
1 – усиливаемая колонна; *2* – дополнительный элемент усиления;
3 – деталь местного усиления

4. Увеличения пространственной жесткости каркаса, осуществляемого по рис.9.2 или путем включения в работу соседних поперечных рам горизонтальными связями покрытия; включением в работу соседних поперечных рам конструкций рабочей площадки; включением в работу соседних поперечных рам по длине цеха путем устройства переходных площадок вдоль колонн; передачей горизонтальных нагрузок, например, крановых и других воздействий на жесткие торцы или промежуточные вертикальные диафрагмы с помощью горизонтальных связей покрытия.
5. Увеличения жесткости открытых крановых эстакад путем замыкания свободно стоящих колонн в рамную систему с помощью распорки; замыкания с помощью дополнительных стоек и ригеля; с помощью надкрановой надстройки.

Локальная реконструкция выполняется при необходимости:

1. Увеличения нагрузок на покрытие от новых подвесных кранов, ремонтных монорельсов в межферменном пространстве, подвески трубопроводов, установки на покрытие венткамер, насосов, блоков и т.п.; устройства светоаэрационных фонарей; увеличения снеговых нагрузок из-за пристройки более высокого пролета и т.п. Во всех случаях возможно использование усиления по схемам, описанным в пп. 9.2.6.; 9.6.3.; 9.6.4; 9.6.5.;
2. Увеличения нагрузок на подкрановые пути при увеличении грузоподъемности кранов, их количества; подвески к подкрановым конструкциям трубопроводов или оборудования; опирания на них несущих конструкций шатра. Усиление производится по рекомендациям пп.9.6.2; 9.6.3;
3. Увеличения надкрановых габаритов в связи с установкой кранов большей грузоподъемности, что может быть выполнено подрезкой опорных частей балок; подрезкой подкрановых траверс ступенчатых колонн; изменением схемы ферм покрытия (уменьшение высоты ферм); установкой новых отдельностоящих подкрановых стоек; подъемом всего покрытия;
4. Установки мостовых кранов в бескрановых зданиях или установки дополнительного яруса кранов, что выполняется путем устройства новых консолей на существующих колоннах или за счет установки приставных стоек;
5. Увеличения шага существующих колонн, что может осуществляться по схеме рис.9.5*ж* или постановкой отдельной поддерживающей портальной рамы с пролетом, равным увеличенному шагу колонн;
6. Увеличения пролета здания с использованием существующих конструкций покрытия, которое может быть выполнено путем раздвижки существующего покрытия и установки новой вставки.

Достаточно часто общая реконструкция выполняется в комбинации с локальной. Локальная реконструкция, как правило, подразумевает усиление одного или нескольких элементов каркаса: колонн, прогонов, балок, в т.ч. подкрановых, выполняемых по пп.9.6.2, 9.6.3, 9.6.4, 9.6.5.

9.6.6.1. *Усиление колонн.* Усиление колонн производственных зданий с изменением их конструктивных схем показано на рис.9.4; 9.5; 9.14; [10]. При присоединении к усиляемой колонне дополнительных ветвей или усилении их дополнительными стержнями с опиранием на фундаменты (рис.9.14*а*...*д*), а также при развитии опорных частей колонн (рис.9.14*е*) важно обеспечить эффективное включение в работу новых элементов и неизменяемость их положения во времени. Фундаменты существующей и дополнительной частей колонн должны быть едиными, а в анкерах необходимо создать усилия, близкие к расчетным значениям, согласно указаний СНиП [4]. При соединении ветвей колонн необходимо учитывать последующее их деформированное состояние под нагрузкой. Наклонные ветви (рис.9.14*г*) при вертикальных нагрузках ограничивают горизонтальные перемещения колонн. Установка новых колонн или ветвей может частично разгрузить каркас от крановых нагрузок.

Усиление колонн и решеток путем увеличения сечений элементов может быть выполнено по решениям, приведенным в п.9.6.3 и в работе [10]. При этом целесообразно усиление ветвей производить только на участках с недостаточной несущей способностью. Необходимо иметь в виду, что двухплоскостные решетки и диафрагмы повышают эффект совместной работы ветвей при потере ими устойчивости из плоскости решетки. Восстановление или установка диафрагм производится с целью использования этого полезного эффекта или при наличии явного кручения колонн. Местные усиления колонн производятся при ремонте или повышении (рис.9.14*е*...*к*, и [10]) несущей способности отдельных узлов, участков колонн и особенно в случаях выявления недопустимых повреждений (коррозийных, вырезов, вмятин), а также при необходимости изменения схемы поперечной рамы или пропуска через колонну инженерных коммуникаций.

9.6.6.2. *Усиление прогонов и балок в балочных клетках.* В зависимости от степени повреждения усиление прогонов может производится: путем замены существующего кровельного настила на более легкий; путем косвенного усиления (рис.9.1); изменения схемы прогона (рис.9.4, 9.8, 9.15); увеличением сечения (рис.9.10).

Для включения элементов усиления в работу прогона последний необходимо максимально разгрузить. Расчет усиления приведен в [5].

Усиление балок в балочных клетках в зависимости от конкретной задачи может производится любым из приведенных выше способов (рис.9.1, 9.2, 9.4, 9.5, 9.8, 9.10).

Особенностью усиления балок в балочных клетках является ограниченный доступ к верхнему поясу из-за наличия настила. Расчет усиления балок приведен в [5].

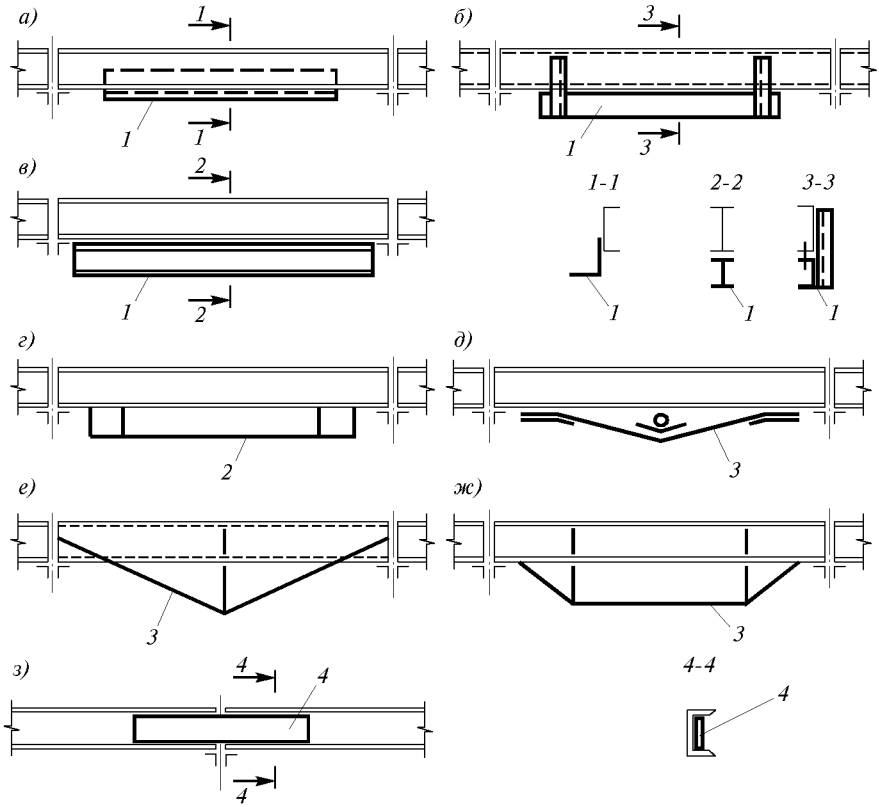


Рис.9.15. Усиление прогонов
1 – элементы усиления; *2* – затяжка; *3* – шпренгель; *4* – накладка

9.6.6.3. *Ремонт и усиление подкрановых балок.* Необходимость в ремонтах подкрановых балок возникает, как правило, при появлении и накоплении в них недопустимых повреждений коррозионного, механического или усталостного характера.

При коррозионном износе уменьшается сечение балки, и для восстановления ее несущей способности для кранов группы режимов работы 1К...5К применимы методы усиления, приведенные выше (пп.9.6.2, 9.6.3 и рис.9.10). При кранах режимов 6К–8К предпочтительны методы ремонта и усиления, приведенные на рис.9.16 *г*... *и* и описанные ниже.

При механических повреждениях, вызвавших потерю местной устойчивости свеса полки или участка стенки, рекомендуется применять приемы, приведенные на рис.9.16 *а*, *б*, *в* и в работе [9].

При наличии дефектов и повреждений в виде отклонения балок от проектного положения, перепада высот подкрановых балок на опорах в разрезных стыках, смещения оси рельса с оси балки более 20 мм, зазорах в примыкании ребер к верхним поясам, ремонт осуществляют по указаниям руководства [6].

В случае выявления усталостных трещин в сварных балках рекомендуются следующие способы ремонта:

1. Трещины в поясах подкрановых балок недопустимы, их необходимо устранить путем заварки по технологии, приведенной в [6]; Одновременно целесообразно сечение пояса с заваренной трещиной разгрузить путем постановки «силовых мостиков» в виде накладок. Продольный сварной шов накладок не доводить до заваренного стыкового шва на 25 – 30 мм. Поперечные швы в накладках не допускаются.
2. Заварка трещин в верхней зоне стенки балок, даже выполненная по указаниям руководства [6], не исключает повторного появления их в тех же местах через 0,5...2,0 месяца работы кранов, если не приняты меры по снижению уровня напряжений в опасных зонах.

Ремонт участков с трещинами приведен на рис.9.16 *г*... *д*.

Способ, изображенный на (рис.9.16 *г*), эффективен при наличии в стенке непротяженной трещины (до 150 мм) в зоне ребра жесткости; если трещина имеет большую длину или расположена в средней трети панели стенки, то предпочтительны способы, приведенные на рис.9.16 *д*... *и*. Если нет возможности при рихтовке обеспечить проектное положение рельса относительно оси стенки ($e \leq$ 15 мм), то рекомендуется применять способы указанные на рис.9.16 *д*, *ж*, *з*.

Снизить воздействие местных сжимающих напряжений от колес кранов можно способом, приведенным на рис.9.16 *и*, путем установки под рельс прокатного колонного или широкополочного двутавра, соединенного с поясом сваркой или на болтах (если позволяют габариты крана по высоте [2]), а также установкой тангенциальных или низкомодульных прокладок под подошву рельса из армированной транспортерной ленты [5, 6].

Другим способом косвенного ремонта балок с усталостными трещинами и снижения их напряженного состояния является ограничение грузоподъемности кранов, недопущения их сближения и т.п.

При необходимости повышения несущей способности подкрановых балок во время реконструкции здания и сооружения применимы способы, описанные в пп.9.6.2, 9.6.3 и в разработках [8, 9]. Усиление балок под краны режимов работы 6К–8К должно производится с учетом возможного усталостного разрушения мест крепления дополнительных элементов, например, по рис.9.4 *а*; 9.5 *а*, *б*; 9.8 *а*, *б*, *в*; 9.10; узлы крепления в этих случаях необходимо проектировать с минимальной концентрацией напряжения.

В клепаных балках наиболее массовыми повреждениями являются ослабления заклепок и усталостные трещины в поясных уголках и листах. При ослаблении заклепок они заменяются на высокопрочные предварительно напряженные болты.

Трещины в поясных уголках и листах необходимо заварить по технологии, приведенной в [6]. Расчет усиления подкрановых балок изложен в пособии [5].

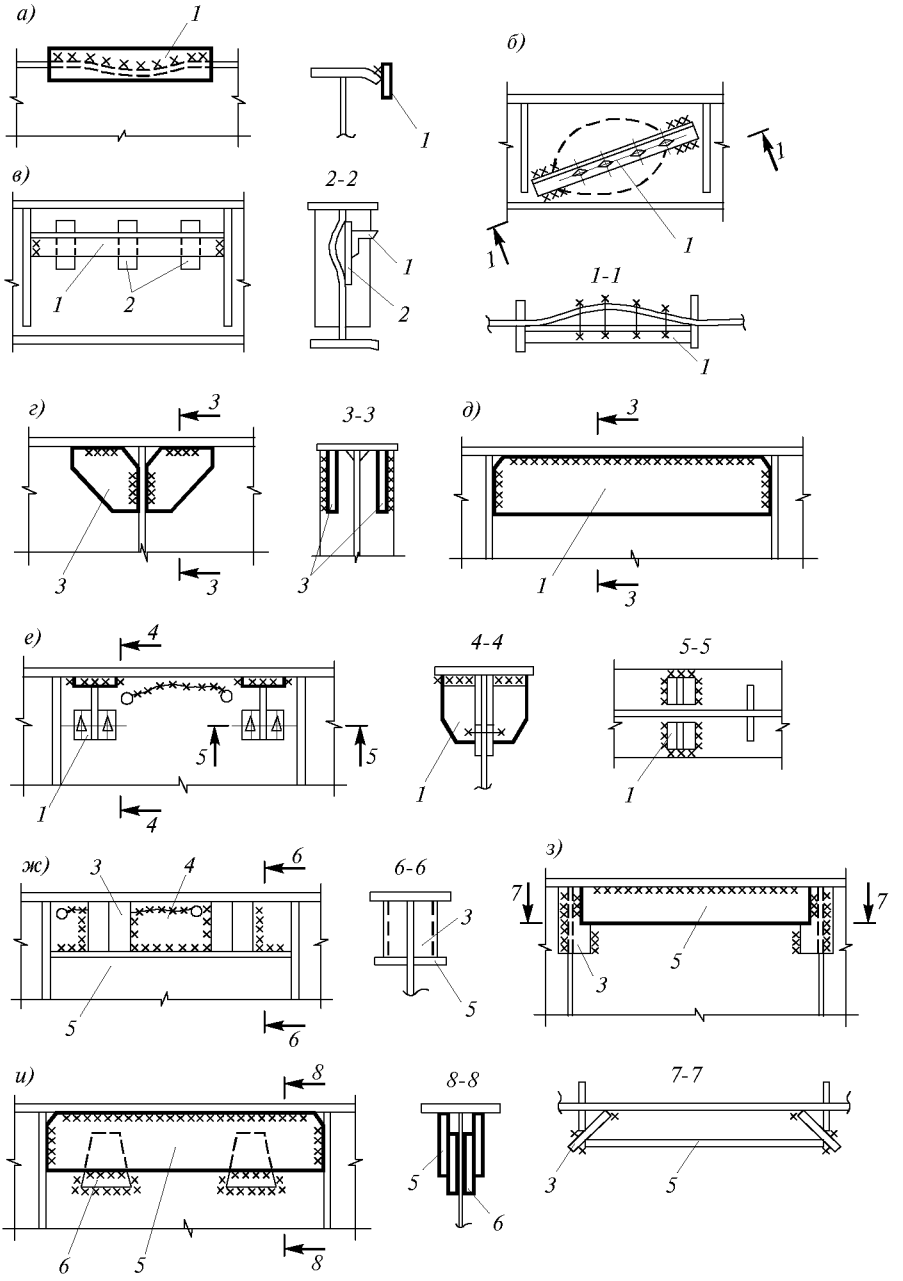


Рис.9.16. Ремонт и усиление подкрановых балок
1 – элемент усиления; *2* – клинья; *3* – короткие ребра; *4* – трещина; *5* – продольное ребро; *6* – прокладки

9.6.6.4. *Усиление стропильных ферм*. Необходимость усиления ферм может возникнуть при локальной реконструкции каркаса (п.9.6.6), а также при ремонтных работах по восстановлению несущей способности ферм.

Алгоритм проектирования усиления ферм при локальной реконструкции и восстановление несущей способности может быть следующим:

1. Выявление резервов несущей способности (п.9.6.1);
2. Установление возможности снижения нагрузок на ферму путем уменьшения постоянной и временной нагрузок;
3. Уточнение расчетной схемы фермы путем включения в работу кровельного настила [2], и учетом фактической расчетной длины сжатых стержней ферм за счет длины фасонок [13];
4. Изменение схемы ферм (п.9.6.2, а также рис.9.17);

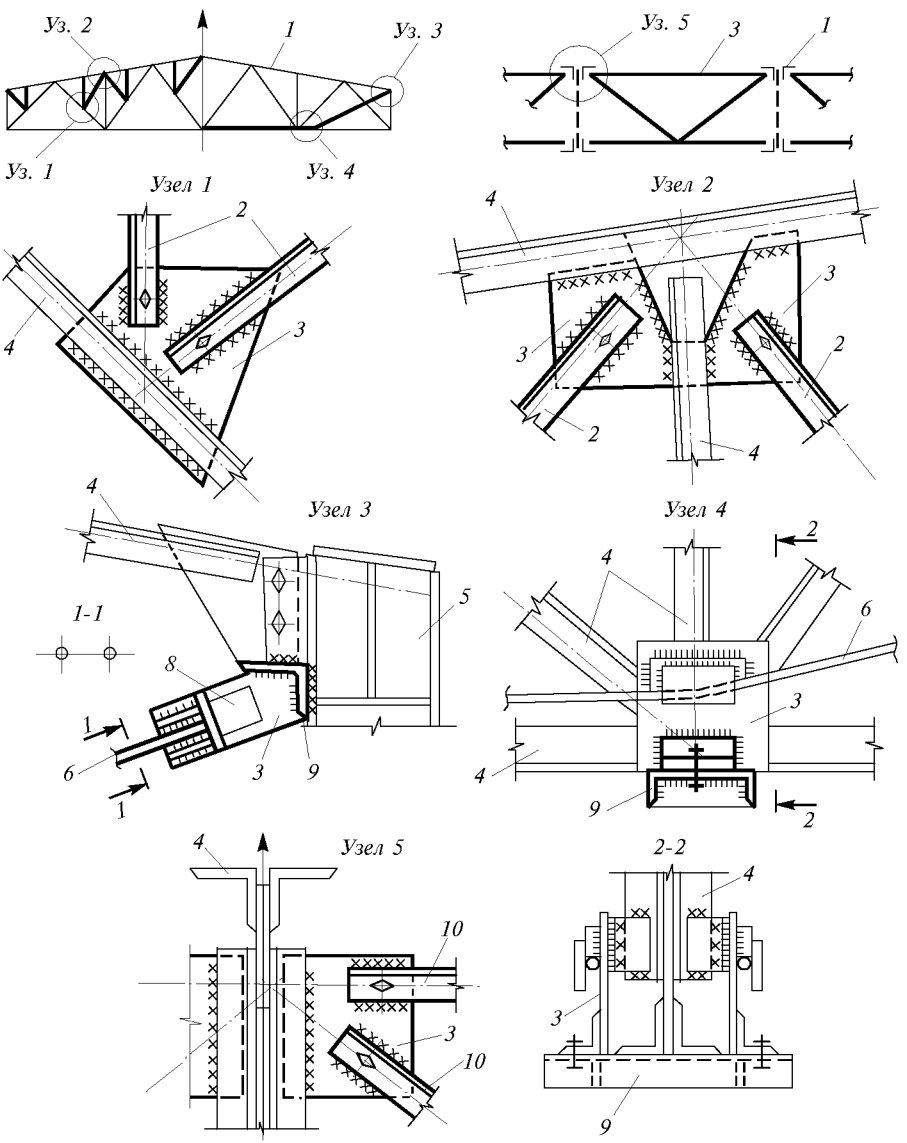


Рис.9.17. Усиление стропильных ферм изменением их схемы

1 – усиливаемая ферма; *2* – дополнительные шпренгели; *3* – новая фасонка; *4* – стержни усиливаемой фермы; *5* – колонна (надопорная стойка); *6* – преднапряженные тяжи; *7* – столик; *8* – анкерное устройство; *9* – деталь усиления; *10* – стержни новой продольной распределительной фермы

5. Увеличение сечения стержней (см.9.6.3, а также рис.9.18 и рекомендации [2; 11; 12]).

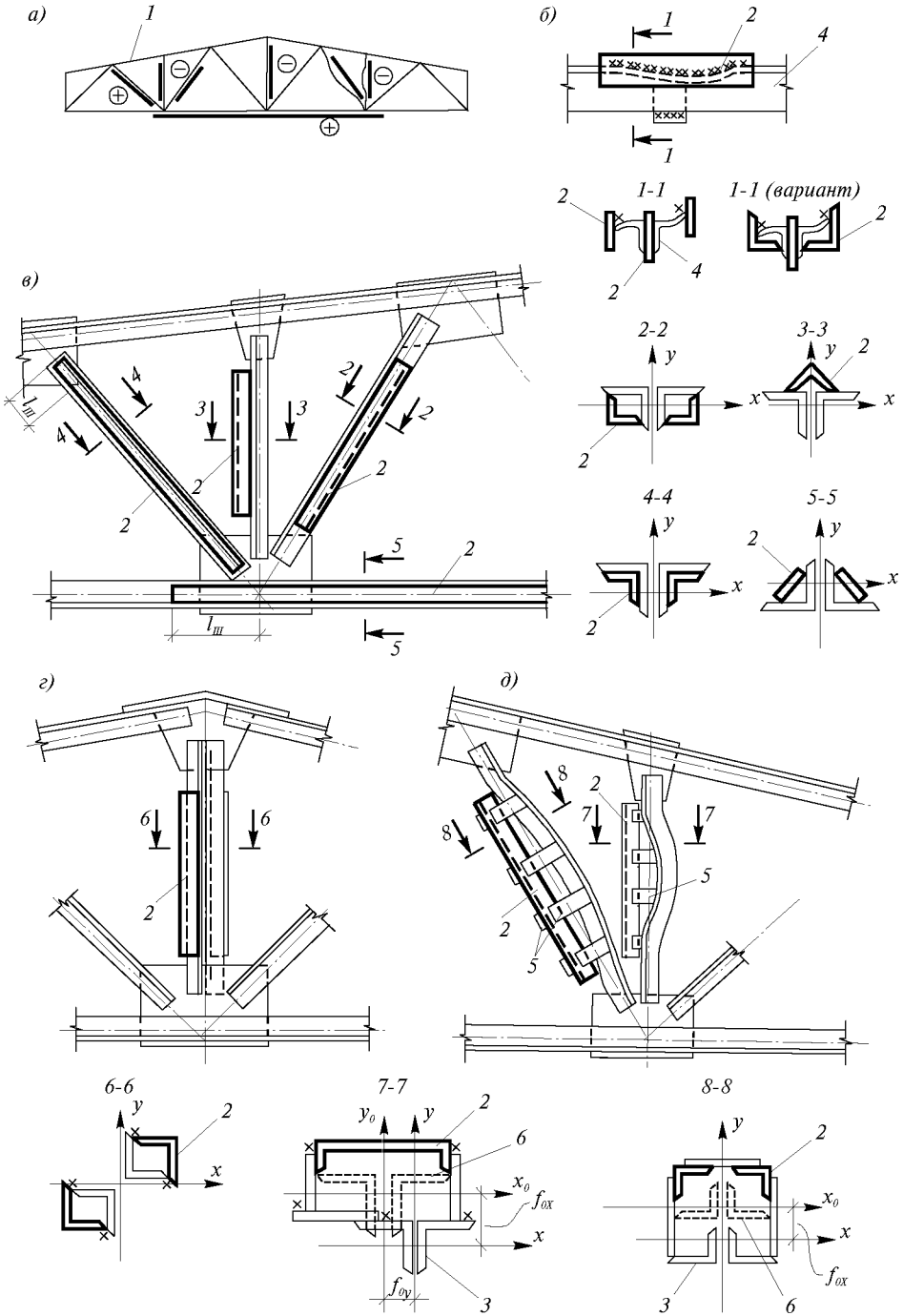


Рис.9.18. Усиление стропильных ферм увеличением сечения

1 – усиливаемая ферма; *2* – усиливающий стержень; *3* – стержень с недопустимыми общими искривлениями; *4* – стержень с местными погибами; *5* – детали крепления усиливающих стержней; *6* – проектное положение стержня

Особенностью восстановительных работ является значительный их объем по нейтрализации местных погибей сжатых стержней (опасных, если они располагаются в средней трети длины сжатого стержня, рис.9.18, б) и общих искривлений в одной плоскости или одновременно в 2-х плоскостях. Некоторые рекомендации по усилению таких стержней даны на рис.9.18 *в, г*. Расстояние между деталями крепления дополнительных усиливающих элементов к основному должно быть не более $40\,i_{\min}$. Усиливающий стержень растянутого элемента фермы должен заводиться на узловую фасонку на длину l_w, достаточную, чтобы воспринять сварными швами (или болтами) полное усилие.

9.6.7. **Усиление транспортерных галерей.** Особенностями эксплуатируемых галерей являются: использование в конструкциях пролетных строений кипящих сталей; размещение ферм пролетных строений либо внутри утепленных галерей, либо с нижним поясом и прогоном – снаружи. Для этих конструкций характерны динамические нагрузки от работы конвейеров, вызывающие в ряде случаев резонансные колебания.

Основные причины усиления: увеличение нагрузок и их несоответствие первоначальным проектным решениям; изменение сейсмического районирования; увеличение ширины и высоты галерей; необходимость удаления промежуточных опор или их разрушение, а также вибрации пролетных строений при работе конвейеров, переходящие в ряде случаев в резонансные колебания.

При усилении несущих конструкций галерей применимы: способы косвенного усиления путем изыскания резервов несущей способности, снижения нагрузок (п.9.6.1); приемы усиления пролетных строений и опор с изменением их конструктивных схем (рис.9.4, 9.5, 9.8, 9.9, 9.15, 9.19).

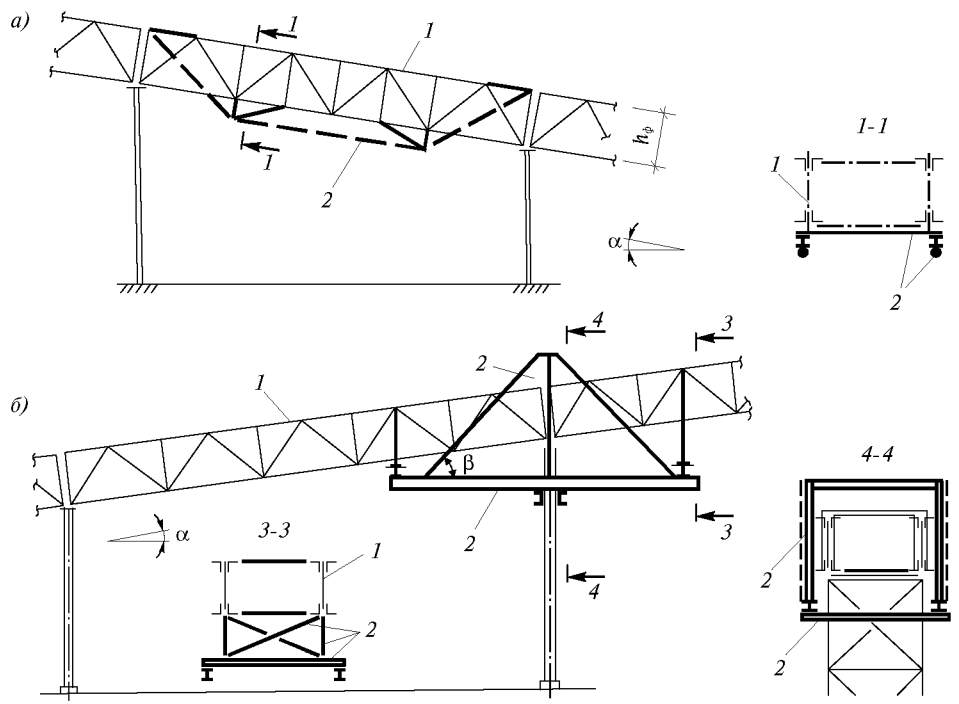


Рис.9.19 *а,б*. Усиление пролетных строений галерей
1 – усиливаемая конструкция; *2* – усиливающая конструкция (элемент)

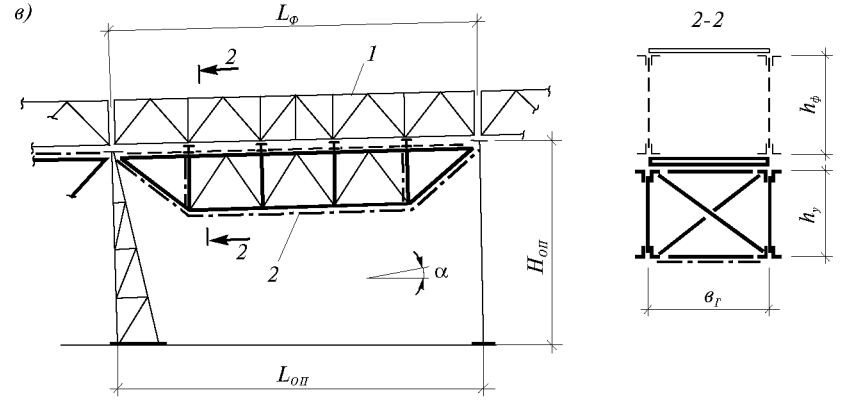


Рис.9.19*в*. Усиление пролетных строений галерей
1 – усиливаемая конструкция; *2* – усиливающая конструкция (элемент)

Во всех случаях требуется тщательный анализ напряженно-деформированного состояния при последующей эксплуатации, в т.ч. учет температурных деформаций многопролетных галерей, возможные осадки опор.

Усиление пролетных строений путем подведения дополнительных опор целесообразно при наличии достаточных строительных габаритов и возможности устройства фундаментов. Однако при этом необходимо учитывать неизбежность осадок новых фундаментов (имеются случаи зависания новых опор над фундаментами). Наиболее целесообразна для этой цели установка в опорные узлы тарельчатых пружин по ГОСТ.

Дублирование пролетных строений с использованием существующих опор имеют различное конструктивное исполнение.

Монтаж пролетных строений рационально выполнять путем их надвижки поперек или вдоль пролетных строений.

Усиление опор конвейерных галерей с изменением конструктивных схем показано на рис.9.20 Усиление может быть проведено на нижних частях ветвей, как наиболее нагруженных. Целесообразна установка новых элементов решеток крестовых схем, которые снижают усилия в ветвях.

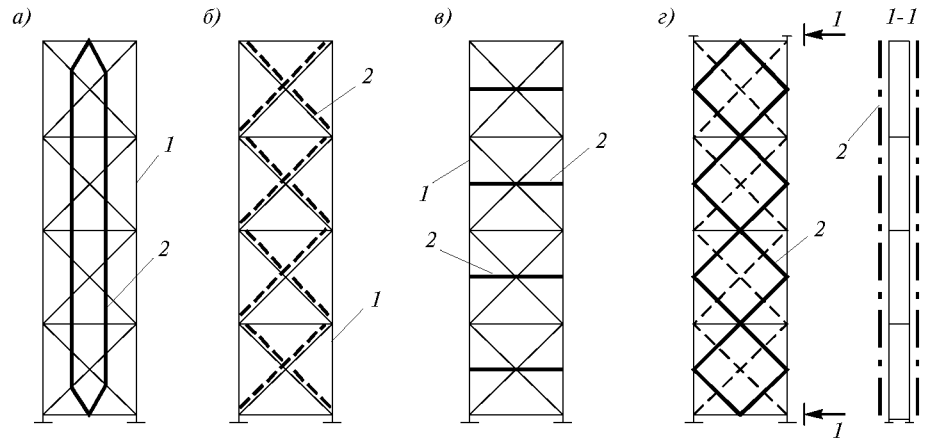


Рис.9.20*а–г*. Усиление опор галерей
1 – усиливаемая опора; *2* – усиливающий элемент

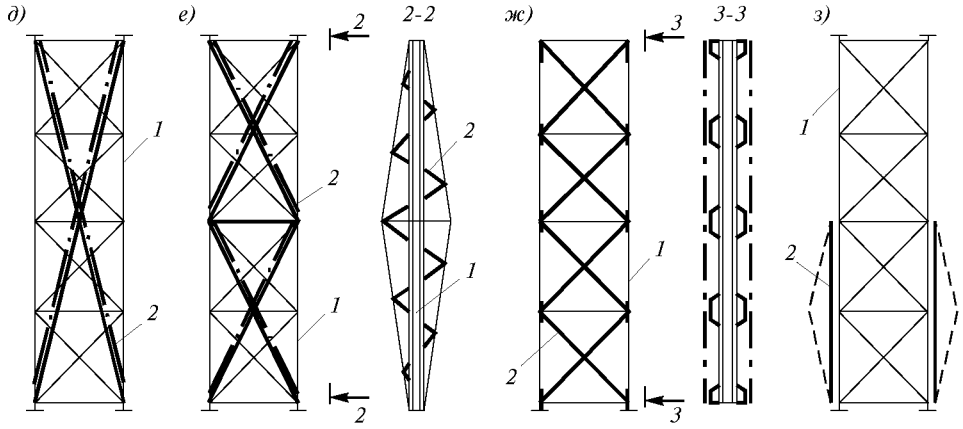


Рис.9.20 *д – з*. Усиление опор галерей
1 – усиливаемая опора; *2* – усиливающий элемент

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. СНиП II-23-81*. Стальные конструкции. Нормы проектирования. М., 1995.
2. **Бирюлев В.В., Кошин И.И., Крылов И.И., Сильвестров А.В.** Проектирование металлических конструкций. Спецкурс. Л., Стройиздат, 1990.
3. Справочник проектировщика. Расчетно-теоретический. Том I, под ред. Уманского А.А. М., Стройиздат, 1972.
4. СНиП 3.03.01-87. Несущие и ограждающие конструкции /Госстрой СССР, М., 1988.
5. Пособие по проектированию усиления стальных конструкций (к СНиП II-23-81*), Госстрой СССР, М., 1989.
6. Руководство по восстановительному ремонту подкрановых конструкций. Мин. Металлургии. М., 1991.
7. **Конаков А.И., Махов А.П.** Отказы и усиление строительных металлических конструкций //Обз.инф.ВНИИИС. Сер.8, 1981. Вып.4.
8. Серия 1.420.2-28. Реконструкция стальных каркасов производственных зданий. Примеры решений схем и узлов.
   Выпуск 0. «Материалы для проектирования». УкрНИИпроектстальконструкция, 1991.
   Выпуск 1. «Примеры решений локальной реконструкции элементов стальных каркасов». Ленпроектстальконструкция, 1991.
   Выпуск 2. «Примеры решений общей реконструкции стальных каркасов». УкрНИИпроектстальконструкция, 1991.
9. Варианты типовых решений по усилению конструкций металлических каркасов одноэтажных производственных зданий при реконструкции.
   Выпуск IV. Реконструкция каркасов. Альбом 0. Принципиальные схемы возможных приемов усиления металлокаркасов. Шифр 8702-ОТ, тема И-22-83, Ленпроектстальконструкция, 1985.
   Выпуск I. Подкрановые конструкции. Тема И-22-83.
10. Варианты типовых решений по усилению металлических каркасов одноэтажных производственных зданий. Колонны. Альбом I. Технические решения по устранению дефектов и усилению стальных колонн одноэтажных промзданий. ОИСИ-334, Днепрпроектстальконструкция, 1985.
11. Варианты типовых решений по усилению металлических каркасов одноэтажных производственных зданий. Сварные фермы. Альбом I. Технические решения по усилению металлоконструкций стропильных ферм при реконструкции производственных зданий: Шифр 556/17; 680/17. Сибпроектстальконструкция, 1985.
12. **Валь В.Н., Горохов Е.В., Уваров Б.Ю.** Усиление стальных конструкций одноэтажных производственных зданий при их реконструкции. М.: Стройиздат, 1987.
13. **Грудев И.Д., Филиппов В.В.** и др. Учет габаритов фасонок при определении расчетных длин сжатых стержней стальных стропильных ферм. Изв.вузов. Стр. и арх., №5, 1990.
14. Техническая эксплуатация стальных конструкций производственных зданий, ОРД 00 000 89, Минчермет СССР, М., 1989.
15. Рекомендации по расчету усталостной долговечности вертикальных цилиндрических резервуаров. ЦНИИПСК, М., 1987.

ГЛАВА 10

ИСПЫТАНИЯ, ДЛИТЕЛЬНЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ

10.1. Общие положения

10.1.1. Обоснование необходимости проведения испытаний. Основная масса строительных металлоконструкций, функционирующих в народном хозяйстве, не нуждается в проведении испытаний поскольку при их расчете, конструировании, изготовлении, монтаже и эксплуатации использован закрепленный в нормативных документах длительный опыт их успешного применения. Вместе с тем непрерывное совершенствование марок сталей, профилей, методов соединений диктует появление новых конструктивных форм, широкое внедрение которых невозможно без экспериментальной их проверки.

Подобным единственно возможным путем нередко решаются и более сложные технические задачи, например, уточнение истинных резервов несущей способности конструкций, находящихся в длительной интенсивной эксплуатации, или подтверждение надежности нетрадиционных, уникальных и особо ответственных зданий и сооружений и т.п.

10.1.2. Цели проведения испытаний. Экспериментальные исследования строительных металлических конструкций, как правило, осуществляют в случаях:

- Приемо-сдаточных испытаний ответственных, нетрадиционных и уникальных зданий и вооружений (мосты, высотные сооружения, радиотелескопы, крупные резервуары и газгольдеры, большепролетные здания и сооружения и др.).
- Испытаний головных образцов серийной продукции заводов строительных металлоконструкций (типовые подкрановые балки, стропильные фермы, колонны, структурные конструкции и др.).
- Длительных наблюдений за особо опасными зданиями и сооружениями в натурных условиях с целью обеспечения высокой надежности их эксплуатации в тех случаях, когда их авария может вызвать гибель людей, тяжелые материальные, экономические или экологические последствия (АЭС, ГЭС, большепролетные надводные газо- и аммиакопроводы, крытые стадионы и т.п.).
- Экспериментальных исследований, осуществляемых с целью углубленного изучения действительной работы конструкций, совершенствования методики их расчета, конструирования и возведения. Эти исследования могут проводиться как в лабораторных, так и в натурных условиях и выполняются либо на натурных образцах, либо на конструктивно подобных моделях.

10.1.3. Виды испытаний по характеру воздействий. По виду испытательных нагрузок и воздействий испытания можно подразделить на статические и динамические.

10.1.3.1. *Статические испытания* имеют целью изучение напряженно-деформированного состояния конструкций под действием статических нагрузок. Статическими считаются нагрузки, величина и направление которых за время испытания либо не меняется, либо это изменение настолько мало, что возникающими при этом инерционными силами можно пренебречь. Большинство нагрузок, воздействующих при эксплуатации на здания и сооружения, может быть отнесено к статическим (собственный вес, вес оборудования и материалов, давление грунта и т.д.). Однако существенно и значение нагрузок, отличающихся динамической составляющей (ветровая нагрузка, нагрузка от кранов, транспортных средств, некоторых видов технологического оборудования).

При лабораторных испытаниях конструкции исследуются, как правило, раздельно на статические и динамические нагрузки.

10.1.3.2. *Динамические испытания* предназначаются для изучения напряженно-деформированного состояния конструкций, возникающего под воздействием динамических нагрузок. Динамические нагрузки являются переменными во времени и пространстве и вызывают в конструкции колебательные движения и инерционные силы. Динамические нагрузки могут быть ударного, импульсного и вибрационного происхождения.

Под *ударной нагрузкой* подразумевается силовое воздействие, возникающее при столкновении движущихся твердых тел. Промежуток времени, в течение которого длится удар, обычно весьма мал – до миллионных долей секунды, – а развивающиеся на площадках контакта соударяющихся тел силы очень велики.

Импульсной нагрузкой принято считать однократное внезапно появляющееся и быстро исчезающее повышение давления на конструкцию.

Примерами подобного являются воздействие ударной волны взрыва или обрыв тяжа.

Вибрационной называют нагрузку, воздействие которой на сооружение или отдельные его элементы подчиняется некоторому гармоническому закону. Наиболее опасна вибрационная нагрузка, частота которой совпадает с одной из собственных частот несущей конструкции.

10.1.4. Виды испытаний по месту их проведения

10.1.4.1. *Лабораторные (стендовые) испытания*. В лабораторных условиях обычно проводят исследования отдельных конструкций, их фрагментов, элементов, узлов и соединений в натуральную величину или их моделей, изготовленных в определенном масштабе.

Для закрепления испытываемой конструкции, последующего приложения к ней нагрузок и воздействий и измерения ее напряженно-деформированного состояния в помещении лаборатории (испытательного зала или открытой площадки под навесом) сооружаются специальные стенды, оснащенные системой силовозбуждения (гидродомкраты, рычажные системы, пневмокамеры) и системой измерения усилий, перемещений и деформаций (манометры, динамометры, оптические приборы, прогибомеры, тензометры и т.д.). По сравнению с натурными испытаниями лабораторные испытания обеспечивают ряд преимуществ и в том числе возможности:

- изучения работы конструкций на всех стадиях загружения вплоть до разрушения;
- испытания любого количества образцов, что позволяет исключить влияние случайных и субъективных факторов;
- в процессе испытаний корректировки конструктивных решений, изменяя сечения и форму элементов и соединений в целях оптимизации конструкции;
- испытания уменьшенной модели в случае, если объект испытания по нагрузкам и габаритам превосходит возможности экспериментального оборудования стенда.

В разряд лабораторных испытаний могут быть отнесены также испытания, проводимые с использованием аналоговых и цифровых моделей.

10.1.4.2. *Натурные испытания*. Натурные испытания зданий, сооружений и их фрагментов, проводимые при приемке в эксплуатацию или в процессе естественного функционирования, позволяют наиболее точно изучить действительную работу конструкций и сделать достоверный вывод о пригодности объекта к безопасному проектному нагружению и дальнейшей эксплуатации. Однако, в ряде случаев натурные испытания оказываются не столь результативными. Так, в отличие от практики проведения стендовых испытаний, при натурных испытаниях изучаемые конструкции должны сохранить работоспособность и поэтому не доводятся до предельного состояния или тем более до разрушения. В то же время давно установлено, что величина разрушающей нагрузки и характер разрушения обеспечивают

более половины наиболее ценной информации о действительной работе и уязвимых деталях конструкции.

Одной из сложных проблем натурных испытаний является поиск приемлемого способа имитации редко возникающих, но важнейших для оценки надежности и долговечности конструкций экстремальных значений нагрузок и их сочетаний, предусмотренных СНиП.

Здесь трудности проведения эксперимента отягощаются обязательными условиями: минимальных помех производственным процессам объекта, доступа к зонам размещения испытательной аппаратуры, возможности беспрепятственного осуществления визуальных и приборных наблюдений, обеспечения надежной подстраховки опытных и смежных с ними конструкций, безопасности для сотрудников предприятия и участников испытаний и др.

Принимая во внимание продолжительность, техническую сложность, значительность материальных и финансовых затрат, вызываемых проведением экспериментальных исследований натурной конструкции, решение об их необходимости должно приниматься после тщательного анализа и обоснования.

В ряде случаев проведение таких испытаний является обязательным. Так, например, испытания перед сдачей-приемкой в эксплуатацию обязательны для множества сооружений и предписаны строительными нормами и правилами (кожухи доменных печей, воздухонагревателей, мостовые сооружения, трубопроводы, резервуары, газгольдеры).

10.2. Средства проведения статических испытаний

10.2.1. Способы закрепления конструкций при испытании

10.2.1.1. *Стендовое оборудование*. Наибольшую гибкость в приспособлении испытательных средств к форме и размерам исследуемых объектов достигают на стендовом оборудовании. В состав стендового оборудования обычно входят:

- собственно стенд (специальная установка для испытания конструкций) с силовым полом и комплектом крепежных и опорно-захватных элементов;
- система силовозбуждения;
- система измерения усилий, перемещений, деформаций, напряжений с запоминающими и обрабатывающими устройствами;
- система управления, включая автоматические задающие устройства, блоки сравнения, калибровки сигнала;
- вспомогательные устройства и приспособления, включая грузоподъемную и монтажную технику, технику связи и другие службы.

Стендовое оборудование за рубежом выпускают многие фирмы. Некоторое представление о продукции этих фирм дает схема стендового оборудования фирмы MFL в Германии (рис.10.1).

В России разработано три поколения стендового оборудования общего назначения типов ПГС100, 2СО, ОИС и др.

В силовую оснастку отечественных стендов ПГС-100, 2СО, ОИС и др. входят жесткие стойки каркаса высотой до 8 м, рассчитанные на продольную вертикальную нагрузку 500 кН, четырехметровые ригели, способные воспринимать 500 кН в середине пролета или две вертикальные нагрузки до 500 кН на расстоянии 1 м от стоек. Хребтовые балки длиной 8 м при трех связях могут воспринимать два вертикальных груза до 500 кН каждый. Для приложения горизонтальных и наклонных нагрузок служат контрфорсы, рассчитанные на восприятии момента 1,5 МНм и поперечной силы 500 кН. Высота контрфорсов 5 м. Они предназначены не только для непосредственного закрепления нагружающих цилиндров, но также и для под-

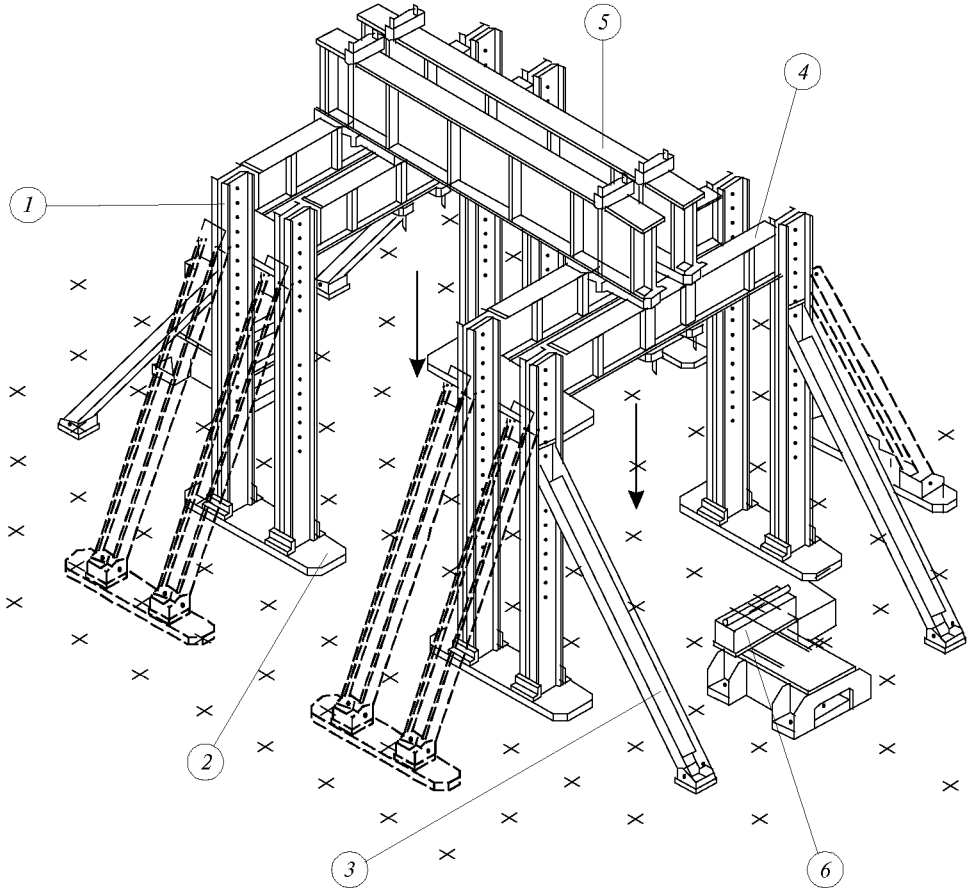


Рис.10.1. Комплект инвентарного каркаса стенда фирмы MFL
1 – стойки; *2* – анкерные болты; *3* – подкосы; *4* – ригели; *5* – хребтовые балки; *6* – опоры

крепления пространственного каркаса в горизонтальном направлении. Помимо сборного каркаса, в наборе силовых элементов отечественной оснастки имеются двухколонные порталы с передвижной поперечиной. Пролет порталов 2 м, рассчитаны они на восприятие нагрузки 500 кН в середине пролета траверсы.

Для испытания протяженных конструкций типа балок, плит, ферм применяют многопозиционные стенды, содержащие систему отдельных нагружающих рам, закрепленных через требуемое расстояние на силовом полу.

В отечественных стендах промежуточной формы СГС-40 и СГС-60 применен секционный принцип. Каждую из секций пресса монтируют на собственном основании, которое рассчитано на восприятие полной нагрузки этой секции. При необходимости увеличения длины рабочего пространства секции пресса сочленяют между собой и крепят анкерами к силовому полу с метровым шагом между ручьями. В секциях СГС-40 используют двухколонные передвижные порталы с перемещаемой по резьбовым колоннам траверсой с гидроцилиндром. В секциях СГС-60 используют неподвижные резьбовые колонны, по которым перемещаются траверсы. По траверсам в поперечном направлении можно перемещать хребтовые балки с подвешенными к ним гидроцилиндрами. В оснастке стендов предусмотрены ножевые поворотные и глухие опоры, а также распределительные балки, устанавливаемые на плунжера цилиндров. Основные технические характеристики стендов СГС-40 и СГС-60 приведены в табл.10.1.

Таблица 10.1. Технические характеристики секционных стендов СГС-40 и СГС-60

Характеристика	Тип стенда	
	СГС-40	СГС-60
Грузоподъемность цилиндра, кН	30; 100	100
Число цилиндров на секцию	4	6
Габариты рабочего пространства секции, мм:		
длина	1600	4500
ширина	600	6000
высота	2500	2000
Масса секции, т	17,2	25

10.2.1.2. *Силовой пол*. Применительно к задачам испытания строительных конструкций широкое распространение получили железобетонные силовые полы. Их изготавливают глухими монолитными с Т-образными пазами или анкерными с различной конструкцией крепления анкеров.

На рис.10.2 представлено наиболее универсальное приспособление для закрепления конструкций при помощи Т-образных анкеров. Силовой пол изготовлен из железобетона толщиной от 700 до 2000 мм и снабжен так называемыми ручьями, в которые входят анкера для фиксации испытываемой конструкции. Ручьи в нижней части имеют уширения, в которых размещаются траверсы анкеров. Основной характеристикой силового пола служит его анкерующая способность, то есть величина отрывающей силы, которую он может воспринимать в точке анкеровки, обычно составляющая 20, 50, 100, 200 т. Расстояния между ручьями составляют, как правило, 800÷1500 мм.

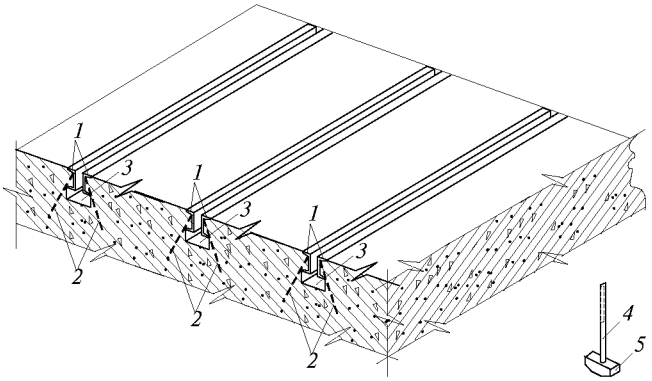


Рис.10.2. Конструкции силового пола
1 – обрамляющие щвеллера; *2* – анкерующие стержни; *3* – канал; *4* – анкер; *5* – траверса анкера

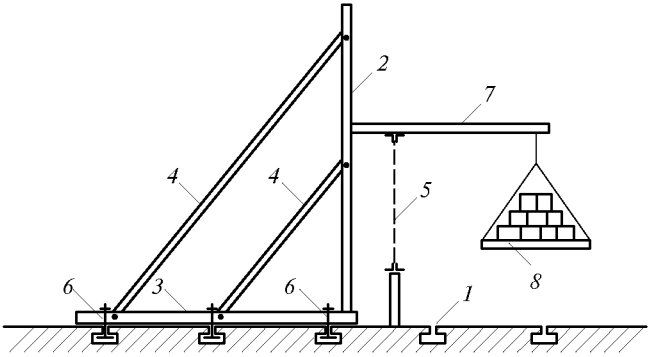


Рис.10.3. Конструкция, установленная на испытательном стенде
1 – ручей силового пола; *2* – стойка; *3* – лежень; *4* – подкосы; *5* – испытываемая конструкция; *6* – анкера; *7* – рычаг; *8* – грузовая платформа

10.2.1.3. *Оснастка для закрепления*. Закрепление конструкций по высоте осуществляется с помощью силовой стены. Силовые стены могут быть временными разборными, устраиваемыми на силовом полу (рис.10.3),

или стационарными, представляющими собой усиленную стену корпуса, способную воспринимать значительные усилия при испытании конструкций. В отдельных случаях при разработке уникальных стендовых установок для испытания в натуральную величину особо крупных объектов изготавливают не только силовые пол и стены, но и силовые потолки. Для закрепления конструкций на силовом полу и стенах используется инвентарная оснастка, состоящая из упоров, опорных тумб, балок, стоек и тяжей, соединяемых на болтах и шпильках (рис.10.4).

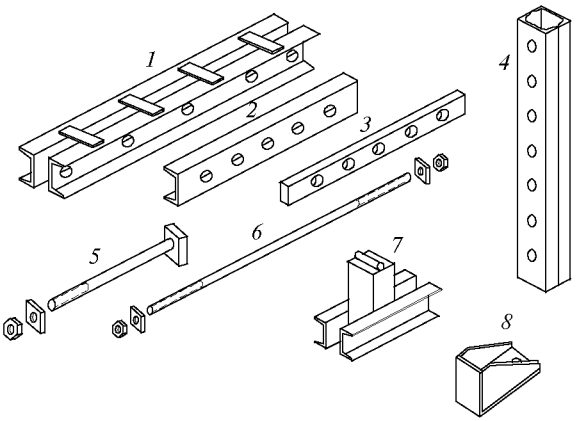


Рис.10.4. Испытательная оснастка для закрепления конструкции
1 – лежень; *2* – распорка; *3* – подкос; *4* – стойка; *5* – шпилька; *6* – тяж; *7* – опора; *8* – упор

10.2.1.4. *Установка конструкций на стендах.* Наиболее распространенные способы закрепления и нагружения конструкций на силовом полу показаны на рис.10.5–10.7. В отдельных случаях экономичным оказывается испытание конструкций в непроектном их положении. Так, например, можно исследовать колонну, закрепленную на стенде в лежачем положении при ее размерах, превышающих высоту испытательного зала (рис.10.7) или две фермы, соединенные попарно также в лежачем положении, с размещением домкратов между ними (рис.10.5).

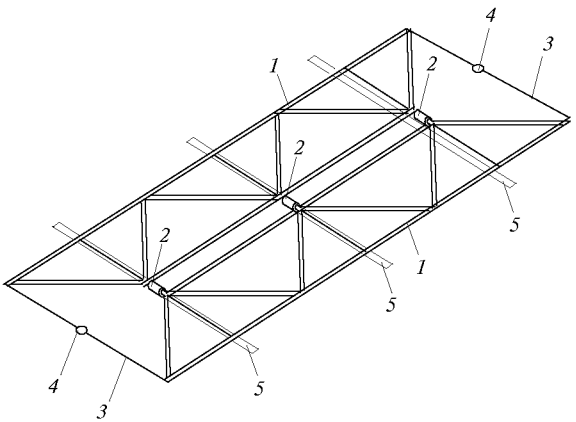


Рис.10.5. Установка ферм для испытания попарно
1 – фермы; *2* – гидродомкраты; *3* – тяжи; *4* – динамометры растяжения; *5* – лежни

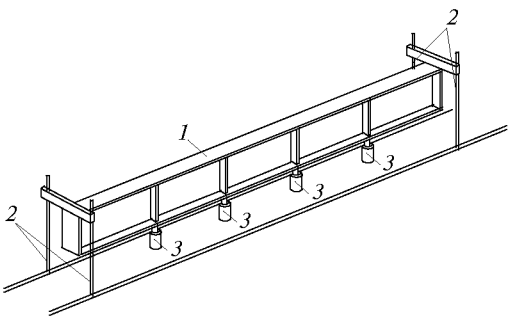


Рис.10.6. Установка балки для испытания в перевернутом положении
1 – балка; *2* – тяжи; *3* – гидродомкраты

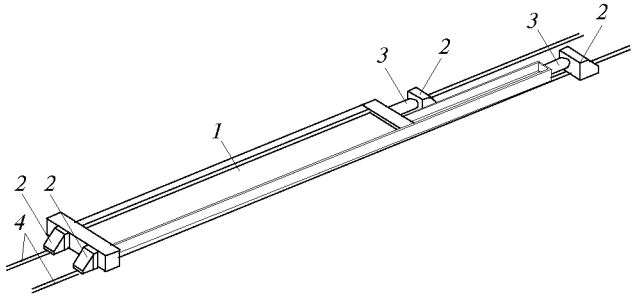


Рис.10.7. Установка колонны промышленного здания для испытания в лежачем положении
1 – колонна; *2* – упоры; *3* – гидродомкраты; *4* – ручьи силового пола

Возможные варианты закрепления испытываемой конструкции при наличии силового пола приведенными примерами, разумеется, не исчерпываются.

10.2.2. Средства силовозбуждения

10.2.2.1. *Прессы и испытательные машины.* Для испытания и исследования механических свойств образцов металлов и сплавов, полуфабрикатов (проволока, арматура, канаты, пряди), сварных соединений, деталей и изделий выпускается широкая номенклатура разрывных и универсальных (сжатие, растяжение, изгиб) машин с механическим и гидравлическим возбуждением. В современных испытательных машинах применяют в основном двухколонную схему возбуждения с перемещаемой траверсой, расположенной в средней части рамы. Такая схема позволяет выбирать для проведения испытаний верхнюю или нижнюю зону рабочего пространства. Обычный диапазон предельных нагрузок не превышает 100 – 200 кН. Наряду со статическими испытаниями на таких машинах предусматривается возможность проведения малоцикловых усталостных испытаний с предельной частотой до 1 Гц. Для этого, как правило, применяются испытательные машины с гидропульсатором. Машины с гидравлическим возбуждением в серийном исполнении выпускают до предельных нагрузок 1 – 2 МН. Для больших нагрузок машины изготавливают по индивидуальным заказам.

Некоторое представление об устройстве прессов и испытательных машин дают рис.10.8, 10.9.

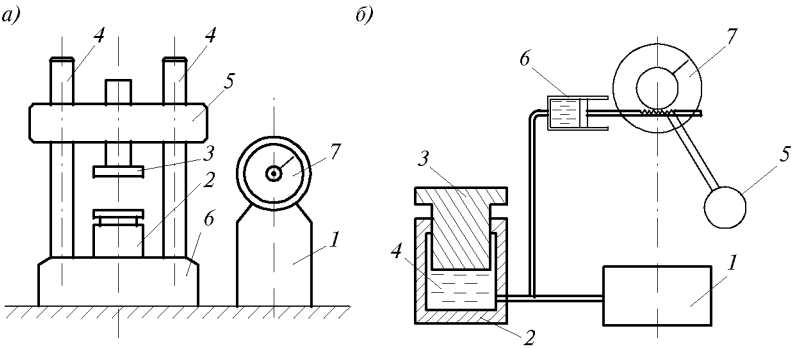


Рис.10.8. Гидравлический пресс
а – устройство гидравлического пресса; *1* – насосная станция с пультом управления; *2* – гидроцилиндр; *3* – верхняя перемещаемая опора; *4* – винтовые опоры траверсы; *5* – траверса; *6* – база пресса; *7* – шкала силоизмерителя
б – схема гидропресса; *1* – насосная станция; *2* – гидроцилиндр; *3* – плунжер; *4* – рабочая жидкость; *5* – маятник силоизмерителя; *6* – гидроцилиндр силоизмерителя; *7* – шкала силоизмерителя

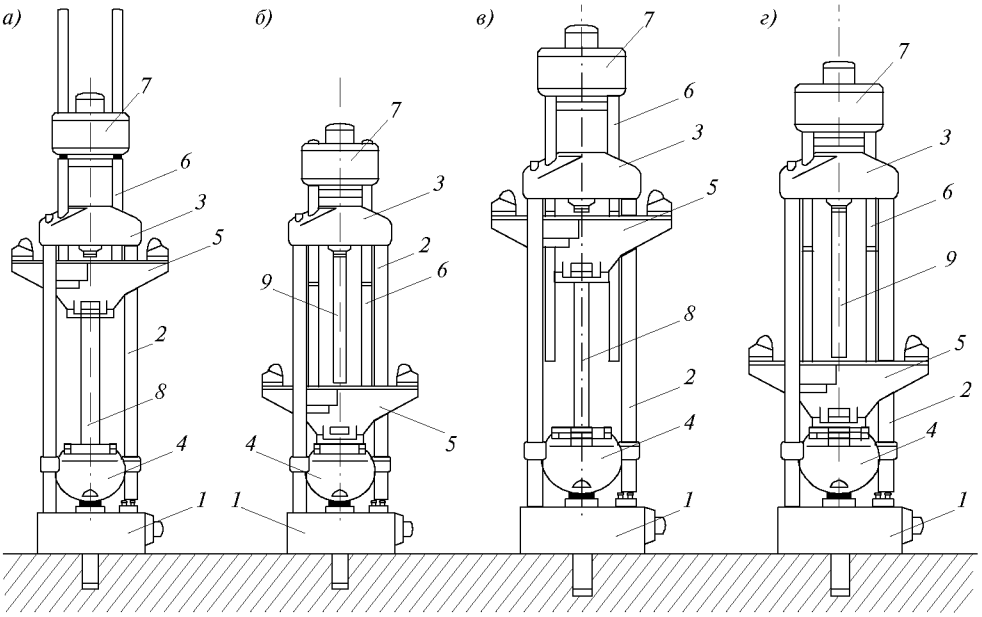


Рис.10.9. Схема универсальных гидравлических испытательных машин
1 – база машины; *2* – винтовые колонны; *3* – траверса цилиндровая; *4* – пассивный захват; *5* – активный захват; *6* – колонны реверсивной рамы; *7* – траверса реверсивной рамы; *8* – зона растяжения; *9* – зона сжатия

Механические прессы и испытательные машины имеют нагрузочный механизм в виде пропорциональной рычажной системы. Схема разрывной испытательной машины приведена на рис.10.10. По этому принципу устроена испытательная машина для испытания малых образцов металла на разрыв (так называемый гагаринский пресс). К механическим испытательным машинам можно также отнести маятниковый копер (рис.10.11), который применяется для определения величины ударной вязкости – работы, потребной для ударного разрушения образца стали, имеющего надрез специальной формы, характеризующей склонность стали к хрупкому разрушению.

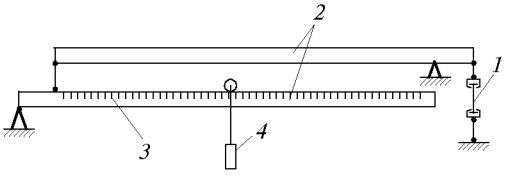


Рис.10.10. Кинематическая схема механической разрывной машины
1 – испытываемый образец; *2* – рычажная система; *3* – шкала; *4* – груз

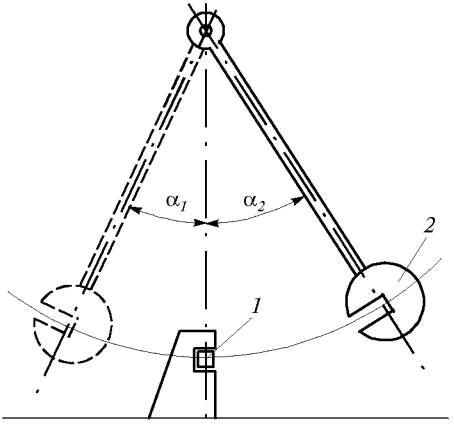


Рис.10.11. Схема маятникового ударного копра
1 – образец; *2* – ударный маятник

10.2.2.2. *Гидравлические домкраты*. При испытаниях конструкций широко используются гидродомкраты с усилиями от 5÷2500 кН. Силовозбуждение передается на конструкцию либо непосредственно, либо через рычажную систему. Гидродомкраты приводятся в действие от ручных или электрических насосных станций и могут включаться в общую гидросистему либо иметь индивидуальный привод.

Величину усилия, развиваемого домкратом, контролируют при помощи манометра, измеряющего давление в гидросистеме

$$N = PF \text{ [кН]} , \qquad (10.1)$$

где P – давление в гидросистеме, кН/см^2; F – площадь плунжера домкрата, см^2.

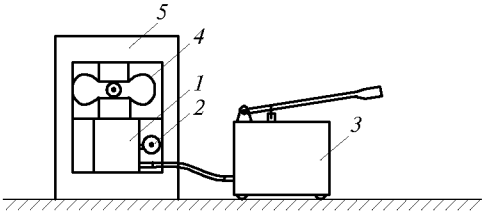


Рис.10.12. Схема тарировки гидродомкрата
1 – гидродомкрат; *2* – манометр; *3* – ручная насосная станция; *4* – динамометр сжатия; *5* – рама

Для повышения точности измерения усилия, развиваемого домкратом, его подвергают тарировке (рис.10.12). Полученную при этом величину усилия, соответствующего единице шкалы манометра, заносят в паспорт домкрата.

При нагружении конструкций могут использоваться гидродомкраты и домкраты механические с малым усилием (до 70 кН), например, автомобильные. Однако, в этом случае между домкратом и нагружаемой конструкцией должен размещаться динамометр для измерения усилия. Во всех случаях домкраты должны подвергаться периодической вневедомственной поверке и иметь индивидуальный паспорт, куда заносятся данные тарировки.

10.2.2.3. *Нагружение тарированными грузами, жидкостями и сыпучими материалами*. Распространенным способом контролируемого нагружения конструкций является использование тарированных грузов в виде чугунных чушек, бетонных блоков, кирпичей и т.п. Каждый груз должен быть предварительно взвешен и на нем наносится несмываемой краской или выбивается клеймом его вес. Грузы могут либо укладываться непосредственно на исследуемую конструкцию – при испытании плит, оболочек и других пространственных конструкций, либо располагаться на специальных грузовых платформах, подвешиваемых напрямую к конструкции, или через рычажную и распределительную системы.

Нагружение можно также осуществлять весом жидких сред (воды, раствора бентонитовой глины и т.п.).

Вода, например, может наливаться непосредственно на специально подготовленную пространственную конструкцию с водонепроницаемым покрытием с бортами, разделяющими поверхность на отдельные ячейки (отсеки), в которые поступает заранее отмеренное количество воды. Необходимым условием таких испытаний является обеспечение возможности быстрого аварийного слива жидкости.

В случае необходимости имитации сосредоточенной нагрузки вода заливается в емкости, соответствующие величине испытательной нагрузки, которые подвешиваются к конструкции так же, как грузовые платформы. Вместо воды возможно использование сыпучих материалов: песка, гравия, железорудных окатышей, стальной или чугунной дроби, употребляемой обычно для очистки литья и упрочнения поверхности металла.

В этом случае обязательным условием является обеспечение стабильности объемного веса сыпучего материала, а также возможность аварийного сброса нагрузки.

10.2.2.4. *Нагружение с использованием пневмокамер (баллонов)*. Для воспроизведения равномерно распределенной нагрузки, произвольно ориентированной в

пространстве, нередко используют пневмокамеры. Пневмокамеры предварительно склеивают из прорезиненной ткани в соответствии с формой нагружаемой конструкции и помещают между поверхностью конструкции и специальным щитом, закрепленным на небольшом расстоянии от нее (рис.10.13). Подобным приемом можно имитировать как равномерные, так и неравномерные нагрузки, применяя большое количество пневмокамер, разделенных глухими перегородками. Усилие, развиваемое пневмокамерой, определяют измеряя давление воздуха в ней при помощи высокоточного манометра либо пьезометра. Нагнетание воздуха в камеры осуществляется небольшим компрессором через ресивер. В качестве ресивера возможно использование автомобильных или тракторных камер.

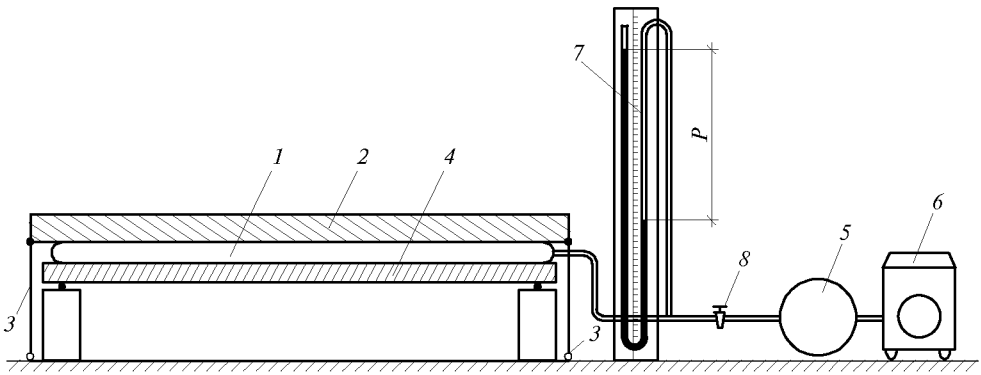


Рис.10.13. Нагружение с помощью пневмокамер
1 – пневмокамера; *2* – щит; *3* – анкерные крепления щита; *4* – испытываемая конструкция; *5* – ресивер; *6* – компрессор; *7* – пьезометр; *8* – кран

10.2.3. Системы измерения перемещений

10.2.3.1. *Геодезические методы*. При измерении вертикальных и горизонтальных перемещений крупногабаритных конструкций традиционно широко используются геодезические приборы – нивелиры и теодолиты. Измерение вертикальных перемещений осуществляется нивелирами. Перед снятием отсчетов на конструкции закрепляются (подвешиваются) рейки с миллиметровыми делениями, а на заведомо неподвижный репер, расположенный вне конструкции. устанавливается реперная рейка. Отсчеты снимаются до нагружения и после каждого этапа нагружения. Абсолютная величина прогибов вычисляется как разница отсчетов по рабочим и реперным рейкам. При испытании большеразмерных конструкций (стропильных ферм, колонн, балок) точность измерения, составляющая ±0,5 мм, оказывается в большинстве случаев достаточной.

Для измерения горизонтальных перемещений крупных конструкций применяется теодолит. Для проведения замеров на конструкции закрепляют в одной плоскости по вертикали рейки с миллиметровыми делениями. Теодолит устанавливают в плоскости измерения, закрепляют горизонтальный круг и визируя на рейки, берут отсчеты. Этот метод иногда называют «боковым нивелированием». Если не представляется возможным закрепление реек в одной плоскости из-за особенностей конструкции, на объект испытания закрепляют марки в виде белых или желтых картонных или пластмассовых квадратов 5×5 см, на которых черной краской нанесен круг диаметром 10 мм. Рейка с миллиметровыми делениями укладывается горизонтально внизу у основания испытываемой конструкции. Необходимо, чтобы проекции всех марок с учетом ожидаемого перемещения от нагрузки приходились на рейку.

При необходимости может быть уложено две рейки и более. В ходе испытания рейки должны быть неподвижны. До нагружения и после каждого этапа нагружения осуществ-

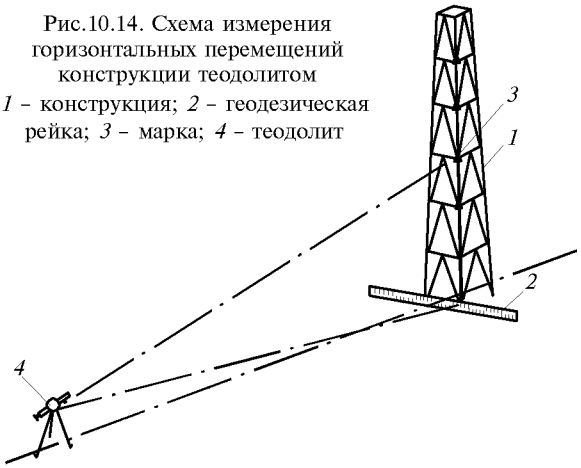


Рис.10.14. Схема измерения горизонтальных перемещений конструкции теодолитом
1 – конструкция; *2* – геодезическая рейка; *3* – марка; *4* – теодолит

ляется визирование на каждую марку, совмещая вертикальную нить трубы теодолита в каждом замере с одним краем круга марки, а затем, поворачивая трубу вниз, производят отсчет по рейке (рис.10.14). Перемещение точек измерения вычисляют как разность *i*-го и нулевого отсчетов.

10.2.3.2. *Методы фотограмметрии и стереофотограмметрии*. Эти методы также могут быть отнесены к геодезическим. Они возникли как развитие методов аэрофотосъемки применительно к измерениям в строительстве. Суть их заключается в том, что при помощи прецизионной крупноформатной фотокамеры выполняют фотосъемку конструкции до нагружения и под нагрузкой. Пользуясь специальной аппаратурой, вычисляют с высокой точностью положение характерных точек конструкции. Разность координат под нагрузкой и без нее дает величину перемещений в плоскости, перпендикулярной оптической оси фотокамеры.

Стереофотограмметрический метод заключается в том, что съемку объекта производят двумя фотокамерами, расположенными на точно измеренном расстоянии одна от другой (база съемки). Их оптические оси могут быть либо перпендикулярны базе, либо направлены под определенным углом к ней (рис.10.15). Результаты фотосъемки обрабатываются также на специальном приборе (стереофотокомпараторе), в результате обработки появляется возможность определить три координаты любой из характерных точек конструкции.

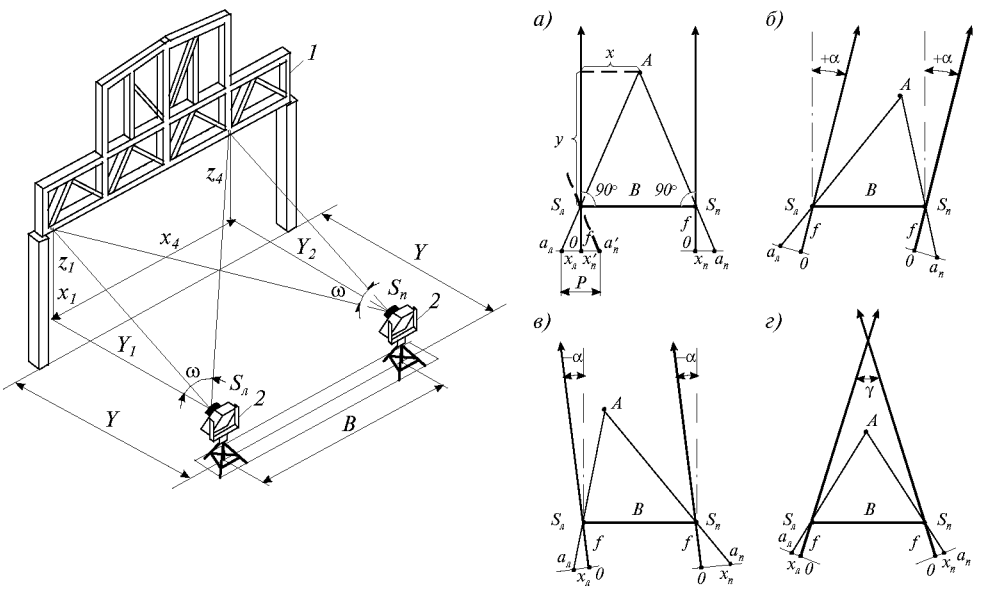


Рис.10.15. Схема измерения перемещений конструкции способом стереофотограмметрии
1 – конструкция; *2* – фотокамеры; *B* – база съемки; *Y* – расстояние съемки

Для повышения точности метода, на конструкции часто предварительно закрепляют марки в виде черных треугольников или ромбов, изображенных на белых карточках. К достоинствам этих методов следует отнести их быстроту и возможность получения информации практически о любой точке конструкции. Недостатком их является сложность и высокая стоимость аппаратуры.

10.2.3.3. *Прогибомеры, индикаторы*. Перемещения точек конструкции в процессе испытаний измеряют при помощи индикаторов (мессур) и прогибомеров, а углы поворота – клинометрами. По принципу действия прогибомеры и индикаторы выпускаются как механическими, так и электрическими (датчики перемещений). Индикаторы закрепляют на неподвижной опоре (штативе, струбцине) вблизи поверхности испытываемой конструкции и опираются на нее своим штоком (рис.10.16). В отдельных случаях для обеспечения контакта с контролируемой поверхностью индикатор оснащается дополнительной вставкой (рис.10.17).

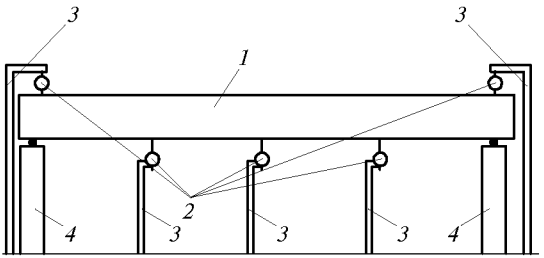


Рис.10.16. Схема измерения прогибов испытываемой балки при помощи индикаторов
1 – балка; *2* – индикаторы; *3* – опоры индикаторов; *4* – опоры балки

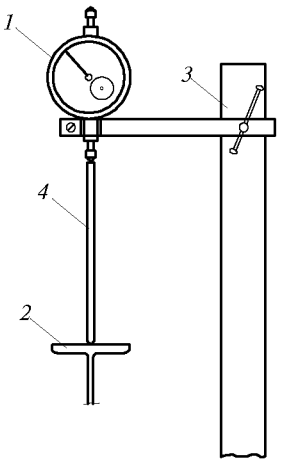


Рис.10.17. Установка индикатора для измерения со вставкой-штоком
1 – индикатор; *2* – испытываемая конструкция; *3* – опора индикатора со струбциной; *4* – вставка-шток

В отечественной практике используются три основных типа механических индикаторов с ценой деления 0,01 мм, 0,001 мм, 0,002 мм и диапазонами соответственно 10 мм, 1 мм и 2 мм.

Прогибомеры представляют собой приборы, в которых перемещения контролируемых точек объекта испытания передаются с помощью тонкой (0,1 мм) стальной проволоки. Прогибомер может быть установлен на неподвижной опоре на некотором удалении от испытываемой конструкции и соединен проволокой с точкой, подлежащей контролю.

Допускается также крепление прогибомера на конструкции при условии соединения его проволокой с неподвижными опорами (рис.10.18). Наиболее часто в отечественной практике используются прогибомеры Максимова с ценой деления 0,1 мм и прогибомеры Аистова с ценой деления 0,01 мм.

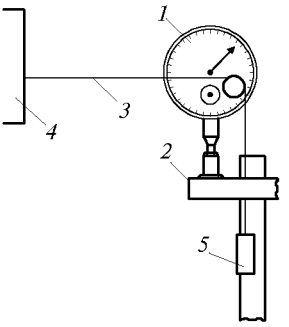


Рис.10.18. Установка прогибомера для измерения горизонтальных перемещений
1 – прогибомер; *2* – опора со струбциной; *3* – проволока, передающая перемещения; *4* – испытываемая конструкция; *5* – груз

Электрические индикаторы и прогибомеры изготавливаются с использованием тензорезисторов и прецизионных потенциометров малыми сериями на заводе ЗОКИО ЦНИИСК им. Кучеренко (г.Москва), а также кустарным способом в мастерских различных научно-исследовательских институтов (рис.10.19, 10.20). Сведения о предприятиях-поставщиках различных систем измерителей деформаций приведены в табл.11.24 гл.11 настоящего справочника.

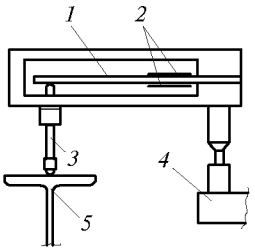


Рис.10.19. Электроиндикатор с использованием тензисторов
1 – балочка; *2* – тензисторы; *3* – шток; *4* – опора со струбциной; *5* – испытываемая конструкция

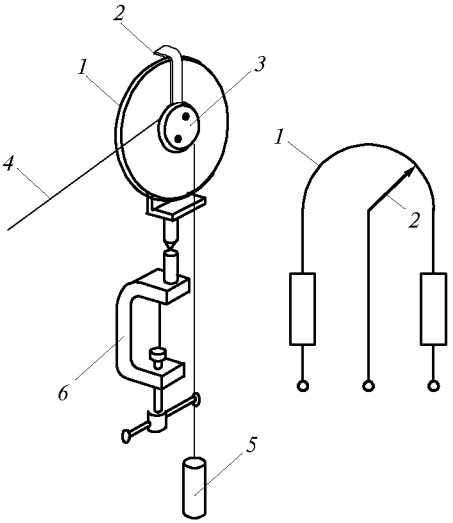


Рис.10.20. Электропрогибомер реохордного типа
1 – реохорд; *2* – ползунок; *3* – шкив; *4* – проволока; *5* – груз; *6* – струбцина

Клинометры применяются для измерения приращения углов наклона сечений испытываемых конструкций. Наиболее распространен клинометр системы Стоппани, в котором для этой цели используется прецизионный жидкостный уровень (рис.10.21). Цена деления прибора составляет 1 угловая секунда. Угловые перемещения конструкций можно также измерять при помощи штанги и двух индикаторов по схеме на рис.10.22.

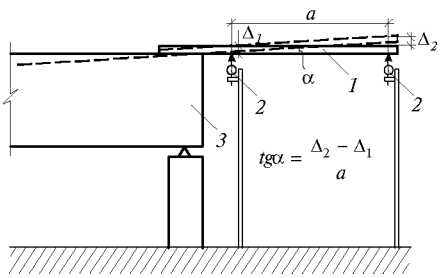


Рис.10.22. Схема измерения углов наклона балки при помощи рейки и индикаторов
1 – рейка; *2* – индикатор; *3* – балка

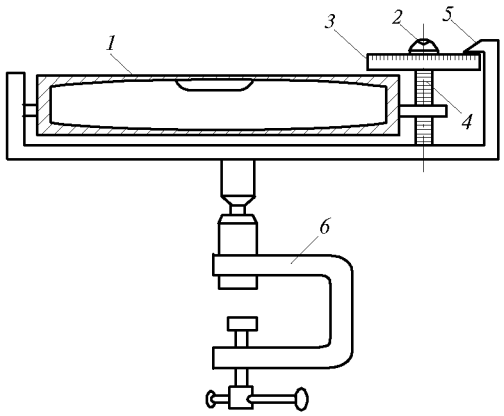


Рис.10.21. Схема устройства клинометра Стоппани
1 – прецизионный уровень; *2* – шаровой уровень; *3* – лимб; *4* – микрометренный винт; *5* – нониус; *6* – струбцина

10.2.3.4. *Приборы для измерения динамических перемещений*. Для измерения перемещений динамического происхождения используются как механические виброметры (ВЛ-1, виброграф Гейгера), так и электрические датчики перемещений. Наиболее простым в использовании является вибродатчик, представляющий собой инерционную массу, закрепленную на плоской пружине, на которую наклеиваются два тензистора (рис.10.23). Собственная частота этой колебательной системы должна быть примерно в 10 раз меньше измеряемой частоты. Вибродатчик предварительно тарируется для получения зависимости

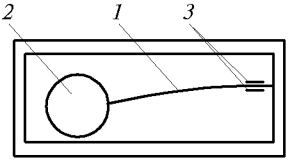


Рис.10.23. Схема тензометрического вибродатчика

1 – плоская пружина; *2* – инертная масса; *3* – тензисторы

$$\Delta J = k\Delta f \ , \qquad (10.2)$$

где ΔJ – приращение силы тока в измерительной диагонали моста Уитстона; Δf – амплитуда колебаний, измеряемых вибродатчиком; k – коэффициент пропорциональности, определяемый при тарировании.

Необходимо принимать во внимание, что этот вибродатчик имеет довольно ограниченный по частоте и амплитуде диапазон измерений.

Динамические перемещения возможно также измерять путем соответствующей обработки результатов измерений по датчикам ускорений – акселерометров.

10.2.4. Средства измерения усилий (динамометры). По принципу действия динамометров, широко используемых при измерении усилий, различают динамометры механические (пружинные), гидравлические (манометрические) и электрические (тензометрические и магнитострикционные). *Механические (пружинные) динамометры* подразделяются на динамометры растяжения и динамометры сжатия. В них могут применяться плоские, кольцевые и спиральные пружины, деформации которых под нагрузкой обычно измеряют при помощи индикаторов. Схемы механических динамометров представлены на рис.10.24. *Гидравлические динамометры* представляют собой манометрические датчики, как правило, совмещенные с гидродомкратами. *Электрические динамометры* могут изготавливаться с использованием тензорезисторов, а также с применением магнитострикционных материалов. Наиболее распространенные схемы электрических динамометров приведены на рис.10.25 – 10.27. *Магнитострикционные динамометры* имеют в качестве чувствительного элемента кольцо из магнитострикционного материала (феррита, пермаллоя и др.), на котором выполнена обмотка (рис.10.28). Под действием нагрузки P изменяется магнитная проницаемость материала кольца и, следовательно индуктивное сопротивление обмотки. В качестве вторичного прибора используется измеритель индуктивности.

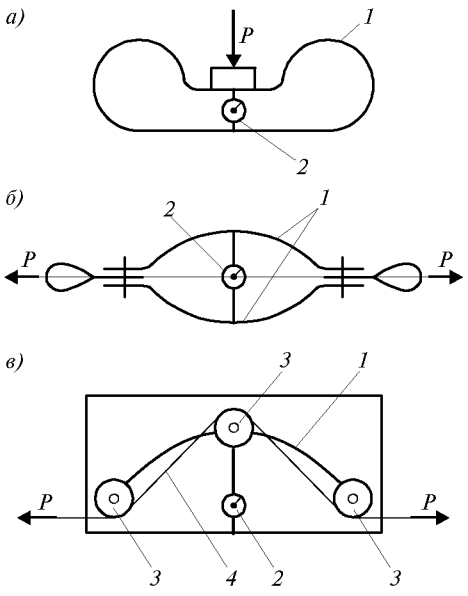


Рис.10.24. Схемы пружинных динамометров

а – динамометр сжатия: *1* – пружина; *2* – индикатор; *б* – динамометр растяжения: *1* – пружина; *2* – индикатор; *в* – динамометр для измерения усилия в тросе: *1* – пружина; *2* – индикатор; *3* – ролики; *4* – трос

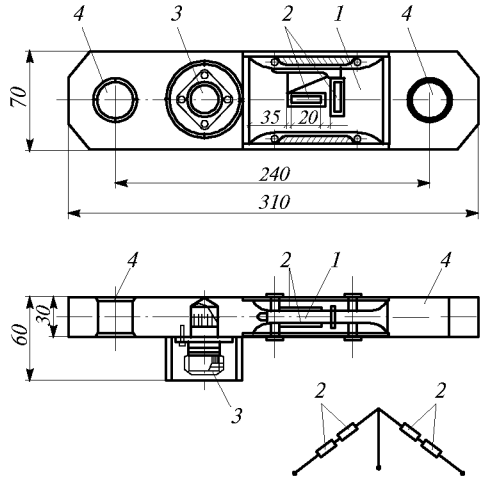


Рис.10.25. Тензометрический динамометр растяжения

1 – рабочий участок динамометра; *2* – тензисторы; *3* – электроразъем; *4* – крепежные отверстия

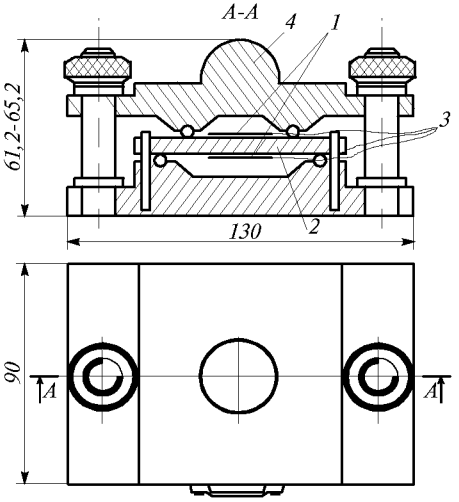


Рис.10.26. Тензометрический динамометр сжатия

1 – тензисторы; *2* – балочка; *3* – электроприводы; *4* – опора

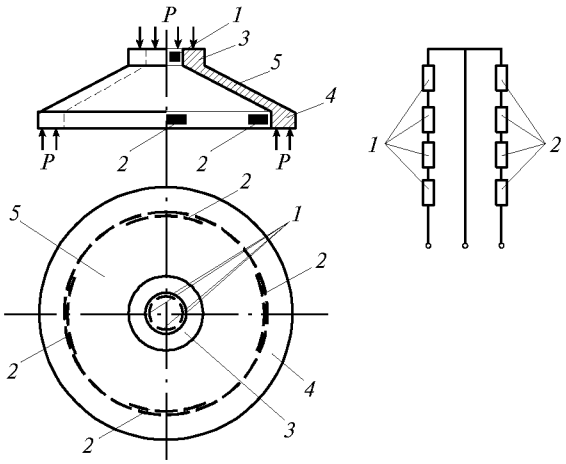


Рис.10.27. Тензисторная динамометрическая муфта

1 – тензисторы, работающие на сжатие; *2* – тензисторы, работающие на растяжение; *3* – кольцо сжатия; *4* – кольцо растяжения; *5* – конус

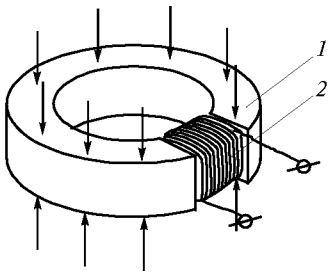


Рис.10.28. Магнитострикционный динамометр сжатия

1 – кольцо из магнитострикционного материала; *2* – обмотка

Эти динамометры отличаются весьма малыми габаритами, высокой чувствительностью и жесткостью, однако требуют индивидуальной тарировки вследствие нестабильности физических свойств феррита.

10.2.5. Средства измерения деформаций (тензометры). Для измерения деформаций конструкций применяются главным образом *механические и электрические тензометры*. К наиболее распространенным механическим относятся рычажные тензометры Гугенбергера типа ТР-1, ТР-2 (рис.10.29) и тензометры с индикатором (типа Манэ-Рабю и НИИЖБ) (рис.10.30). Цена деления тензометра определяется коэффициентом увеличения измерителя и величиной базы. Чем больше коэффициент увеличения измерителя и величина базы, тем меньше цена деления и, следовательно выше точность измерения.

При чрезмерно большой базе измерение деформаций осредняется на участке измерения и искусственно сглаживаются пиковые значения. При слишком большом увеличении измерителя велико значение помех (влияние температуры, случайных сотрясений и т.д.). Обычно параметры тензометра выбирают такими, при которых величина единицы измерения равна 1 ЕОД, что соответствует $\varepsilon_0 = 1 \cdot 10^{-5}$.

Для тензометра Гугенбергера это соответствует коэффициенту увеличения измерителя K=1000 при базе 100 мм, а для тензометра Манэ-Рабю и НИИЖБ с использованием индикатора с ценой деления 1/100 мм – K = 100; l = 1000 мм.

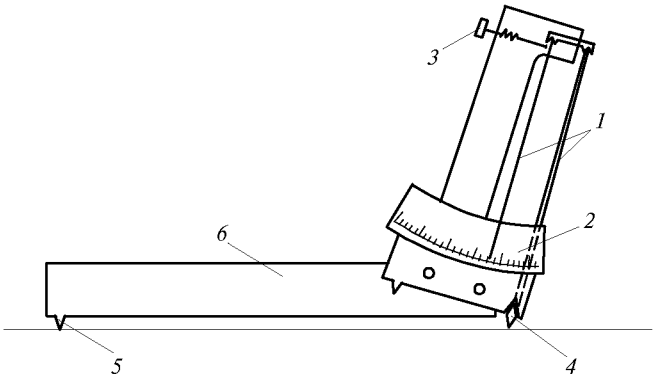


Рис.10.29. Рычажный тензометр Гугенбергера
1 – рычажная система; *2* – шкала; *3* – винт установки нуля; *4* – подвижная опора; *5* – неподвижная опора; *6* – удлинитель базы

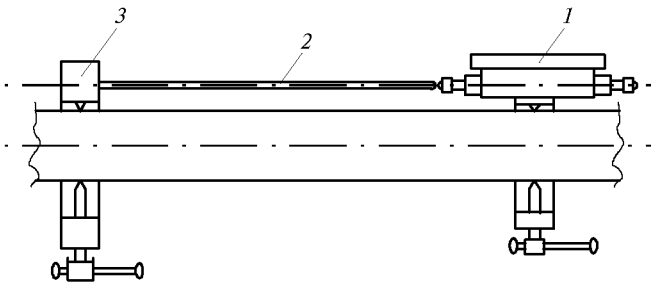


Рис.10.30. Тензометр на основе индикатора
1 – индикатор; *2* – шток; *3* – неподвижная опора

Тензометры струнноакустические представляют собой особую группу приборов, работа которых основана на использовании зависимости между силой натяжения струны и частотой ее колебаний.

$$f = \frac{1}{2l}\sqrt{\frac{\sigma}{\rho}}, \qquad (10.3)$$

где l – длина струны; σ – напряжение в струне; ρ – плотность материала струны.

На рис.10.31 изображена схема устройства струнноакустического тензометра. В электромагнит посылают электрический импульс, вызывающий свободные колебания струны. Колебания струны вблизи полюсов электромагнита возбуждают в его обмотке переменный ток, по частоте совпадающий с частотой колебаний струны. Частоту тока измеряют при помощи частотомеров и по тарировочной кривой определяют величину приращения деформации.

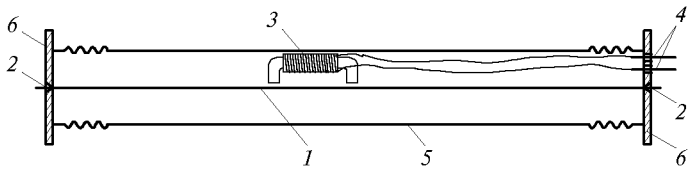


Рис.10.31. Схема устройства струнноакустического тензометра
1 – струна; *2* – анкерные закрепления струны; *3* – электромагнит; *4* – электровыводы; *5* – корпус; *6* – анкерные устройства тензометра

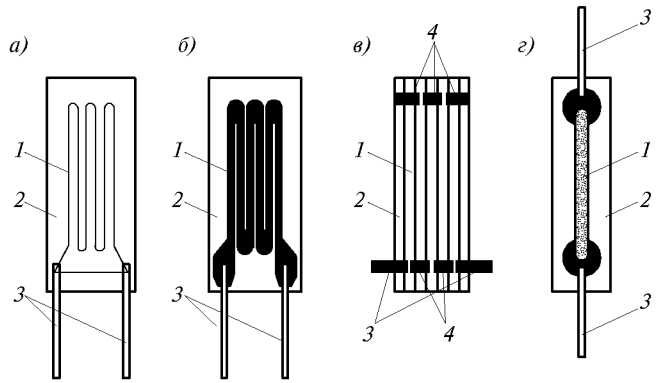


Рис.10.32. Конструкции тензисторов
а – проволочный петлевой; *б* – фольговый петлевой;
в – проволочный без поперечной чувствительности;
г – полупроводниковый напыляемый; *1* – тензорешетка;
2 – основа; *3* – выводы; *4* – перемычка

Тензометры сопротивления (тензисторы) конструктивно выполняются в виде прямого или многопетлевого проводника (проволоки, фольги, напыленного слоя), приклеенного на основание, изготовленное из специальной бумаги или пластмассовой пленки. Принцип их работы состоит в том, что при растяжении или сжатии проводника, его сопротивление изменяется как за счет изменения длины, так и за счет изменения площади сечения (рис.10.32).

Тензорешетка обычно изготавливается из константана. Проволока имеет диаметр 10 – 30 мкм, тензофольга выполняется толщиной 5÷20 мкм.

Полупроводниковые тензисторы в большинстве случаев изготавливают из висмута путем напыления в вакууме через маску.

Тензистор наклеивается на очищенную и обезжиренную поверхность конструкции специальным клеем. После отверждения клея выводы тензистора присоединяются к проводам, связывающим его со вторичным прибором, а сам тензистор, как правило, покрывается слоем гидроизоляционной обмазки. При деформации поверхности конструкции, последняя через слой клея и основу передается на тензорешетку, которая, деформируясь, изменяет сопротивление, фиксируемое при помощи регистрирующего прибора.

При натурных испытаниях часто применяют тензисторы, предварительно наклеенные на тонкую стальную фольгу и гидроизолированные. Фольга вместе с наклеенными тензисторами приваривается точечной сваркой к поверхности стальной конструкции и, деформируясь вместе с ней, позволяет измерять ее деформации. Основной характеристикой тензистора является коэффициент тензочувствительности

$$k_{\text{т}} = \frac{\Delta R}{\Delta \varepsilon}, \qquad (10.4)$$

где $\Delta\varepsilon$ – измеряемое приращение деформации; ΔR – приращение сопротивления, соответствующее измеряемому приращению деформации.

Для проволочных и фольговых тензисторов значения $k_{\text{т}}$ находятся в пределах 1,8÷2,2. Это значение наносится на упаковку тензисторов. При измерениях необходимо на регистрирующем приборе установить значение тензочувствительности применяемых тензисторов. Важной характеристикой тензисторов является диапазон измерений. Для проволочных и фольговых тензисторов с константановой тензорешеткой он составляет порядка $\varepsilon = 0{,}2 \div 1{,}0\%$. Не менее важной метрологической характеристикой тензисторов является также «сопротивление утечки» $R_{\text{у}}$, т.е. сопротивление изоляции между деталью, на которую он наклеен, и тензорешеткой.

Сопротивление утечки измеряют после наклейки тензистора и полного отверждения клея. Для этого используется ламповый или транзисторный мегомметр. Ни в коем случае нельзя применять высоковольтный мегомметр, предназначенный для

измерения сопротивления изоляции сильноточного промышленного электрооборудования. Нормальные значения сопротивления утечки не должны быть ниже 18÷20 мегом. При планировании эксперимента следует подобрать тензисторы по сопротивлению и базе. Малобазные тензисторы с базой 5–10 мм применяются, как правило, для измерения полей деформаций с большими градиентами. Однако они имеют обычно малое сопротивление (что требует специального регистрирующего прибора с низким напряжением питания и, следовательно, пониженной чувствительностью) и повышенное значение поперечной чувствительности, что вносит погрешности в результаты измерения. Тензисторы с большой базой 25÷50 мм и более и сопротивлением 50÷120 ом наиболее употребительны в практике экспериментальных исследований. Количество их в группе должно равняться количеству активных, обслуживаемых одной распаечной колодкой, плюс компенсационные – 1÷2, плюс контрольные – 1÷2. Разброс тензисторов по сопротивлению внутри группы не должен превышать 0,1%.

Регистрирующие приборы для измерения по тензисторам основаны, как правило, на принципе моста Уитстона. Уравновешивание моста осуществляется либо вручную (прибор ИСД-2), либо автоматически за счет перемещения реохорда реверсивным двигателем (приборы АИ-1, АИ-2, ТК-1 и ТК-2), либо путем электронной шаговой компенсации (приборы СИИТ-2, СИИТ-3). Питание измерительного моста может осуществляться постоянным или переменным током. У приборов с реохордным уравновешиванием съем осуществляется по шкале реохорда, а у приборов с электронной шаговой компенсацией в цифровом виде на табло (СИИТ-2, СИИТ-3, ТК-1, ТК-2). В приборных системах СИИТ-2 и СИИТ-3 предусмотрена возможность непосредственной передачи отсчетов в компьютер и обработки их параллельно измерениям.

Тензометрическая аппаратура для динамических испытаний снабжена усилителями для усиления сигналов, снятых с измерительной диагонали моста, их детектирования и регистрации при помощи шлейфного осциллографа или магнитографа. Количество каналов усиления-регистрации равняется количеству точек измерения. Некоторые данные об упомянутой ранее тензометрической аппаратуре приведены в табл.11.23 настоящего справочника.

Тензометрическая сеть обычно состоит из нескольких групп тензисторов, наклеенных на поверхность испытываемой конструкции. Объем группы обычно определяется количеством тензисторов, подключаемых к одной распаечной колодке. Из них 12÷16 шт., так называемых активных, измеряют непосредственно деформации конструкции, 1–2 тензистора выполняют функции схемной термокомпенсации и включаются во второе плечо внешнего полумоста. Они наклеиваются на пластинки из того же материала, что и конструкция и помещаются в те же температурные условия, что и активные. Изменения сопротивления активных и компенсационных тензисторов, вызванные изменением температуры, взаимно компенсируются и не влияют на результаты измерений.

Как уже упоминалось ранее, кроме активных и компенсационных тензисторов в каждой группе выделяют 1–2 контрольных. Они включаются в «активное» плечо полумоста, но наклеиваются на те же пластинки, что и компенсационные. При помощи контрольных тензисторов отслеживается «дрейф нуля», который служит показателем стабильности результатов измерений. Группа тензисторов, объединенная одной распаечной колодкой, располагается, как правило, компактно и при помощи многожильного кабеля присоединяется к коммутатору. Один или несколько коммутаторов подключают к регистрирующему прибору. Коммутаторы используются с ручным или дистанционным управлением. Некоторые регистрирующие приборы могут работать по полумостовой схеме (СИИТ-3), когда на каж-

дый активный тензистор приходится свой компенсационный. Пример тензометрической сети приведен на рис.10.33.

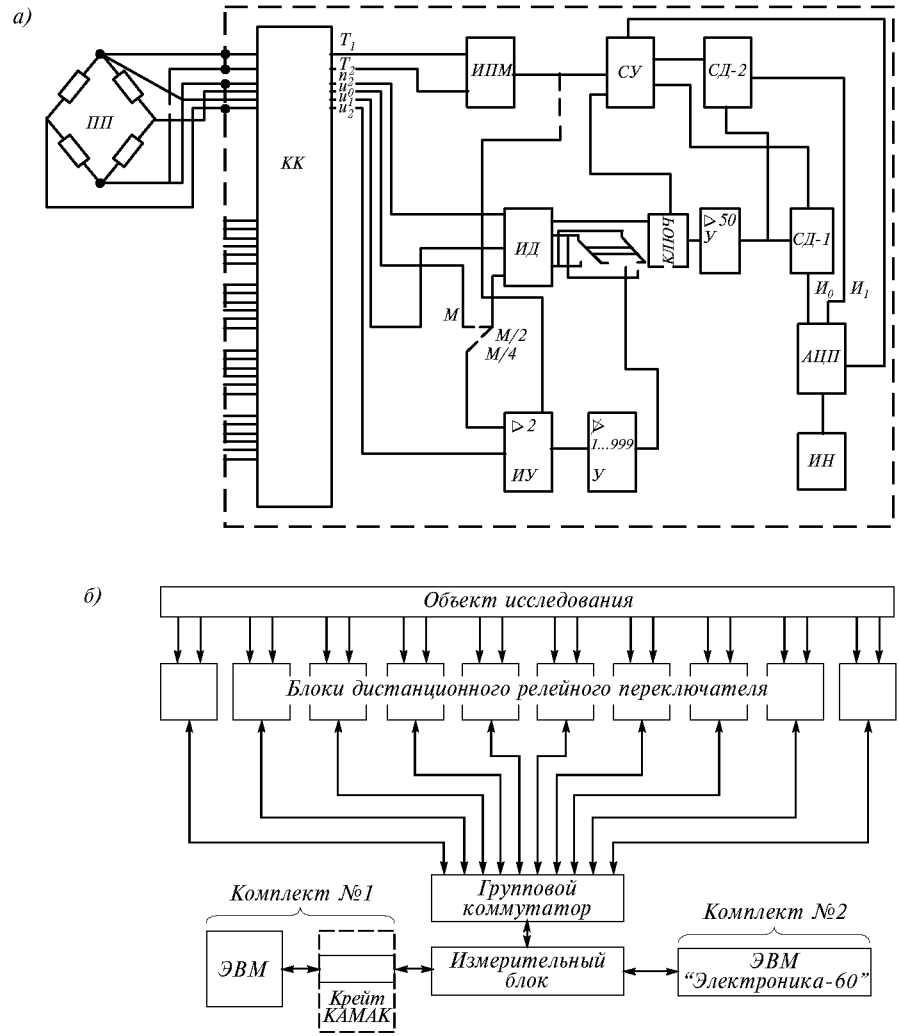


Рис.10.33. Схемы тензометрических сетей

а – схема тензосети с групповой коммутацией (функциональная схема ЦТИ–1); *ПП* – первичные преобразователи; КК – коммутатор каналов; ИПМ – источник питания моста; СУ – усилитель сигналов; ИУ – импульсный усилитель; СД-1, СД-2 – демодуляторы; *б* – схема тензосети с полумостовой коммутацией (структурная схема СИИТ–2)

10.3. Методика проведения лабораторных (стендовых) испытаний

10.3.1. Программа испытаний. Здесь рассматривается случай проведения испытаний полномасштабной конструкции – фермы, рамы, балки, панели – в условиях испытательного корпуса. Все упомянутые далее этапы испытаний в том или ином виде характерны для любого их вида.

При планировании проведения испытания в первую очередь должна быть разработана его программа.

Программа непременно должна включать:

- Обмерочные чертежи испытываемой конструкции с фактическими геометрическими размерами, жесткостными характеристиками, ведомостями дефектов и повреждений.
- Результаты проверочного расчета конструкции на испытательные нагрузки с учетом фактических размеров элементов. При этом необходимо вычислить ожидаемые величины перемещений, усилий, моментов и деформаций в точках их измерения. Необходимо также определение величины нагрузки, при которой начинается нелинейный характер работы конструкции, и величину разрушающей нагрузки.
- Установление количества ступеней нагружения и разгрузки и величин приращения измеряемых при испытании параметров, определение безопасных способов силовозбуждения.
- Установление элементов, сечений, узлов и конкретных точек, в которых будут осуществлены измерения.
- Определение требуемой точности измерения и подбор аппаратуры с необходимыми параметрами точности и диапазона.
- Мероприятия по технике безопасности, которые обязательно должны включать:

1. Инструкцию по проведению испытаний, в которой четко расписаны обязанности и способ взаимодействия членов испытательной бригады.

2. План испытательного стенда с указанием размещения всех агрегатов, пульта измерительной аппаратуры, опасных зон и др.

3. Страхующие устройства, предотвращающие обрушение испытываемой конструкции, падение грузов и разрушение силовых элементов стенда.

4. Устройства аварийного сброса нагрузки.

5. Способ нагружения и разгрузки, исключающий возможность травмирования персонала.

Руководитель испытания обязан перед началом испытания провести со всеми членами бригады инструктаж и получить расписку каждого из них в журнале по технике безопасности.

Состав бригады. Бригада обычно включает в себя руководителя испытаний, бригадира, техников и операторов. Руководитель испытания формулирует задачу испытаний, инструктирует всех членов бригады о конкретных их обязанностях, руководит испытаниями и обработкой результатов. Бригадир должен профессионально знать и оперировать всем набором оборудования, приборов и аппаратуры и отвечает за их работоспособность. Техники и операторы должны уметь грамотно пользоваться всем спектром оборудования и приборного оснащения, применяемого при испытаниях.

Специалисты, осуществляющие стендовые испытания, должны обеспечить:

- экспресс-обработку и контроль характерных параметров измерений, оперативное сопоставление их с расчетными, нормативными и экспертными предполагаемыми данными, своевременную корректировку методики загружения и т.п.;
- периодический осмотр опытных образцов в процессе испытаний как на промежуточных, так и на завершающей стадиях (осмотр производится только при низких нагрузках или при полной разгрузке);
- на ранних стадиях нагружения особого внимания заслуживает анализ причин «дрейфа нуля» за счет различных неупругих обмятий, сдвигов, проработки местных остаточных напряжений и т.п.;
- безупречное знание инструкций, технических условий, норм и других обязательных документов по эффективному и безопасному проведению испытательных работ.

Подготовительные работы в общем случае содержат:

- монтаж испытательного стенда;
- установку и закрепление испытываемой конструкции;
- установку измерительной аппаратуры, наклейку тензисторов;
- установку средств силовозбуждения;
- проверку работоспособности системы силовозбуждения и измерения (в необходимых случаях ремонт и наладка);
- снятие нулевых отсчетов для установления величины «дрейфа нуля»;
- подготовку бланков ведомостей для регистрации результатов измерений;
- защиту конструкции от прямых солнечных лучей и сквозняков, провоцирующих «дрейф нуля».

При визуальном снятии отсчетов по приборам регистрация результатов производится обычно путем записей в ведомостях испытаний. Форма такой ведомости приведена в табл.10.2.

При применении современных измерительных комплексов данные измерений передаются непосредственно в компьютер и обрабатываются по специальной программе.

Результаты динамических испытаний представляют собой, как правило, осциллограммы, записанные на светочувствительной ленте.

10.3.2. Проведение испытаний. После проверки работоспособности нагрузочной и силоизмерительной систем стенда проводят пробное нагружение конструкции нагрузкой, не превышающей 25 - 30% расчетной и осуществляемой в 2 - 3 этапа. Целью пробного нагружения является изучение поведения конструкции под нагрузкой и первичная проверка соответствия величин измеряемых параметров ожидаемым расчетным. После необходимой выдержки под нагрузкой конструкция также поэтапно разгружается до нуля. Результаты пробного нагружения проходят экспресс-обработку. что в случае необходимости дает возможность внесения своевременных коррективов в программу испытаний. Обычно уже при пробном загружении обнаруживается нелинейное следование деформаций испытываемой конструкции росту нагрузок, что является следствием выборки люфтов, зазоров, развития местной ползучести в узлах, соединениях, зонах концентрации пиковых напряжений и т.п. Эта нелинейность, как правило, затухает на начальных этапах. Поэтому при основном испытании нулевой точкой отсчета принимается состояние параметров конструкции при нагрузке, составляющей 1 - 5% от расчетной. Количество этапов нагружения до достижения расчетной нагрузки обычно принимают 4÷5, и один из них должен соответствовать нормативной нагрузке.

Если программой испытаний предусматривается доведение конструкции до разрушения, то после достижения уровня расчетной нагрузки, величина последующих ступеней нагружения должна быть уменьшена в 2 - 3 раза, а состояние конструкции должно строго отслеживаться по величине прогибов. В случае обнаружения резкого нарастания прогибов при неизменной величине нагрузки фиксируется наступление предельного состояния и включаются средства предупреждения аварийного обрушения.

В случаях, когда программа испытаний предусматривает несколько циклов нагружение-разгрузка, разгрузку, после достижения значения запланированной максимальной нагрузки, следует производить более крупными ступенями в 2 - 3 раза большими, чем при нагружении.

Время выдержки на каждом этапе определяется, как правило, временем снятия отсчетов по всем приборам. В любом случае оно не должно быть меньше времени, необходимого для стабилизации показаний прогибомеров. Важным фактором результативности испытания следует считать контроль за постоянством усилий, прикладываемых к конструкции на каждой ступени нагружения. При использовании гидродомкратов и пневмокамер должна обеспечиваться подкачка, а при нагружении водой - отсутствие утечки.

Таблица 10.2. Ведомость испытания

Руководитель ..... ( )
Оператор ..... ( )

Дата, время	№№ этапов	Нагрузка на этапе	Отсчеты по приборам																					
			Прогибомеры, деформометры								Тензисторы													
			1 k = 0,01мм		2 k = 0,01мм		3 k = 0,01мм		4 k = 0,01мм		1.1		1.2		1.3		1.4		.....		1.11		1.12	
			n_i	n_i-n_0	n_i	n_i-n_0	n_i	n_i-n_0	n_i	n_i-n_0	n_i	n_i-n_0	n_i	n_i-n_0	n_i	n_i-n_0	n_i	n_i-n_0	n_i	n_i-n_0	n_i	n_i-n_0	n_i	n_i-n_0
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25

После окончания испытания конструкция сохраняется до завершения обработки результатов измерений и подлежит демонтажу, если не возникает необходимости повторения испытания.

Значительное расширение возможностей анализа результатов испытания конструкций обеспечивается при использовании фото- и видеосъемки для документальной фиксации размещения нагрузочных систем силовозбуждения, показаний регистрирующей аппаратуры, геометрического положения и деформаций конструкций в предельном состоянии (прогибы, характер разрушения, трещины в швах, разрушенные болты, элементы, потерявшие устойчивость и др.).

Видеосъемка весьма содержательна, когда проводятся испытания с доведением испытываемой конструкции до разрушения (при потере устойчивости или хрупком разрушении, при динамических испытаниях, при нагружении ударной или импульсной нагрузкой) и особенно, если в кадр попадают шкалы регистрирующих приборов. Испытания считаются оконченными, когда выполнена задача, сформулированная программой испытания, или когда получены данные, свидетельствующие о том, что задача испытаний при оговоренных программой условиях не может быть решена, и программу необходимо корректировать.

10.3.3. Обработка результатов. При обработке результатов испытаний первым этапом можно считать вычисление первых разностей. Из отсчета по прибору на очередной ступени нагружения вычитается отсчет по нему при нулевой нагрузке (нулевой отсчет). Значение нулевого отсчета корректируется по показаниям контрольных приборов, показывающих «дрейф нуля»

$$\Delta n = n_i - n_0 , \tag{10.5}$$

где n_i – отсчет по прибору при i-том нагружении; n_0 – нулевой отсчет, скорректированный с учетом «дрейфа нуля».

Первые разности умножаются на цену деления прибора и, таким образом, получают значения измеряемых параметров. При обработке показаний тензисторов напряжения вычисляют по формуле (10.6)

$$\sigma = E\varepsilon , \tag{10.6}$$

где ε – относительная деформация в ЕОД = $1 \cdot 10^{-5}$; E – модуль упругости стали, который при напряжениях, меньших предела пропорциональности стали, равен $2{,}1 \cdot 10^6$ кг/см^2; при больших напряжениях его величина подлежит уточнению по реальной диаграмме $\sigma - E$ работы стали (ЕОД – единица относительной деформации $\Delta l / l = 1 \cdot 10^{-5}$).

Наиболее наглядная интерпретация результатов испытаний – графическая, представляемая в виде эпюр прогибов, перемещений, углов наклона и поворота сечений, эпюр деформаций, нагрузок и напряжений в характерных точках конструкции, а также графиков нагрузка–прогиб, нагрузка–перемещение, нагрузка–усилие или нагрузка–изгибающий момент. На рис.10.34, 10.35 и 10.36 приведены примеры эпюр прогибов, эпюр напряжений в поперечном сечении балки и график нагрузка–прогиб в середине пролета изгибаемой балки. Вычислив истинные величины напряжений в поперечном сечении балки, можно определить среднее значение напряжений в полках и величину изгибающего момента в сечении

$$M = \sigma_{cp} \cdot W , \tag{10.7}$$

где $\sigma_{cp} = \dfrac{\sum |\sigma_i|}{n}$; σ_i – напряжение в точке измерения на полке; n – количество точек измерения на полках; W – момент сопротивления сечения балки, определенный по результатам натурных обмеров.

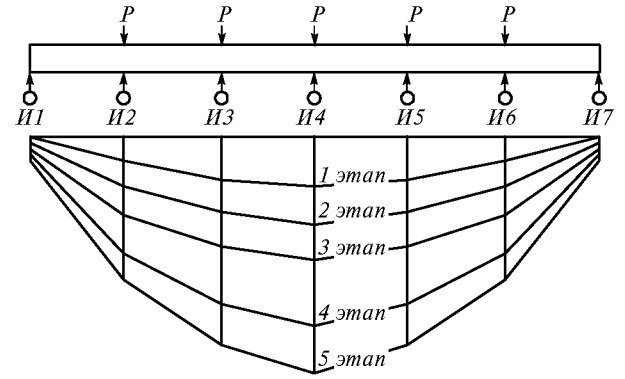


Рис.10.34. Построение эпюр прогибов балки при испытании

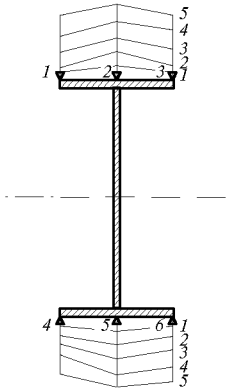


Рис.10.35. Построение эпюр напряжений в поперечном сечении балки

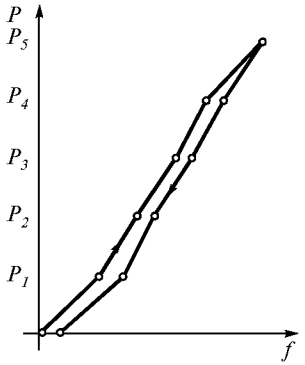


Рис.10.36. Построение графика нагрузка–прогиб балки

Главные деформации и напряжения вычисляют по результатам измерений так называемыми «розетками» тензисторов по схеме на рис.10.37.

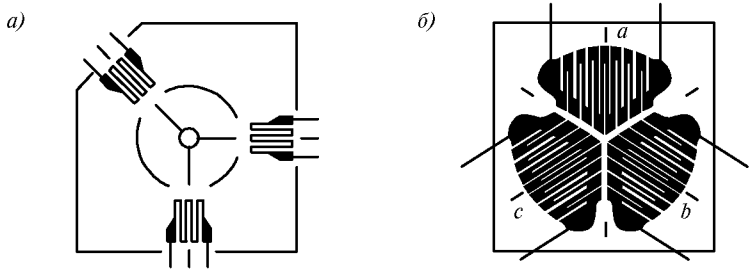


Рис.10.37. Тензометрические розетки
а – прямоугольная; *б* – «дельта»-розетка

Главные деформации в соответствии с показаниями тензисторов вычисляются по формулам:

а) для прямоугольной розетки

$$\varepsilon_{\substack{\max\\ \min}} = \frac{n_1 + n_3}{2} \pm \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(n_1 - n_2)^2 + (n_2 - n_3)^2} \,. \qquad (10.8)$$

Угол между направлением максимальной главной деформации и осью тензометра № 1 находят по формуле

$$\varphi = 0{,}5\operatorname{arctg}\left[\frac{2n_2 - (n_0 + n_3)}{n_1 - n_3}\right]; \qquad (10.9)$$

б) для «дельта»-розетки

$$\varepsilon_{\substack{\max \\ \min}} = \frac{n_0 + n_2 + n_3}{3} \pm \frac{\sqrt{2}}{3}\sqrt{(n_1 - n_2)^2 + (n_2 - n_3)^2 + (n_3 - n_1)^2}\,, \qquad (10.10)$$

$$\varphi = 0{,}5\operatorname{arctg}\left[\frac{\sqrt{3}(n_3 - n_2)}{2n_1 - n_2 - n_3}\right]. \qquad (10.11)$$

Главные напряжения вычисляют по формулам

$$\sigma_1 = \frac{E}{1 - \mu^2}\left(\varepsilon_1 + \mu\varepsilon_2\right), \qquad (10.12)$$

где $\varepsilon_1 = \varepsilon_{max}$; $\varepsilon_2 = \varepsilon_{min}$

$$\sigma_2 = \frac{E}{1 - \mu^2}\left(\varepsilon_2 + \mu\varepsilon_1\right), \qquad (10.13)$$

μ – коэффициент Пуассона, равный для стали 0,3.

На основе анализа эпюр прогибов можно вычислить изгибающие моменты и поперечные силы в характерных сечениях конструкции. Подобрав на основе, например, метода наименьших квадратов подходящую аппроксимирующую функцию, описывающую эпюру перемещений, можно последовательным дифференцированием этой функции вычислить:

$y = F(x)$	—	уравнение эпюры прогибов;	(10.14)
$y' = \frac{dF(x)}{dx} = tg\varphi_i$	—	уравнение эпюры углов наклона оси сечения элемента (применяется при оценке показаний клинометров);	(10.15)
$y'' = \frac{\partial^2 F(x)}{\partial x^2} = M(x)$	—	уравнение эпюры моментов (применяется при оценке величин σ в изгибаемых сечениях); $M/W = \sigma$; $\sigma/E = \varepsilon$;	(10.16)
$y''' = \frac{\partial^3 F(x)}{\partial x^3} = Q(x)$	—	уравнение эпюры поперечных сил (применяется крайне редко);	(10.17)
$y^{IV} = \frac{\partial^4 F(x)}{\partial x^4} = q(x)$	—	уравнение эпюры нагрузки (применяется в случае действия неопределенной нагрузки, например, давление сыпучих тел).	(10.18)

Приведенные формулы предназначены лишь для качественной оценки величин M, Q и q. Однако могут быть весьма полезными при экспресс-обработке результатов испытаний.

10.3.4. Состав технического отчета по результатам испытаний. Технический отчет обязательно должен содержать:

- программу испытания с обоснованием его необходимости, принятой методикой и перечнем ожидаемых результатов;
- предварительный расчет испытываемой конструкции (с фактическими размерами и сечениями элементов) на испытательные нагрузки, с определением ожидаемых величин усилий, моментов, напряжений, прогибов и перемещений в заданных программой точках и сечениях, где должны производиться измерения;

- схему испытательного стенда с размещением всех его элементов, испытываемой конструкции, измерительных, регистрирующих и контролирующих приборов и аппаратуры;
- описание хода испытаний с разбивкой по времени всех этапов и регистрацией всех особенностей и деталей, установленных в ходе испытания, в том числе и не нашедших логического объяснения;
- результаты испытаний в виде таблиц, графиков, эпюр, стерео- и фотограмметрических снимков и других документальных свидетельств, полученных в результате испытания;
- сопоставление теоретических и экспериментальных данных;
- анализ и объяснение причин отличия результатов испытания от теоретических расчетов, перечисление реализованных и неудавшихся технических аспектов испытания;
- выводы по проведенному испытанию и предложения по желательным направлениям дальнейших исследований;
- приложения, которые обычно включают ведомости испытаний, подписанные руководителем испытаний и оператором, обмерочные чертежи испытанной конструкции, сертификаты (или акты испытаний) на сталь, сварочные материалы, болты, заклепки и т.д.

10.4. Особенности динамических испытаний

10.4.1. Задачи динамических испытаний. При испытании конструкций, предназначенных для восприятия динамических нагрузок и воздействий, приходится решать ряд специфических, отличных от статических испытаний, задач, а именно:
- определение динамических характеристик здания, сооружения или их элементов: амплитуд, частот и форм собственных колебаний, динамической жесткости, декремента затухания колебаний;
- выявление влияния динамических нагрузок на прочность, выносливость и деформативность элементов, конструкций и сооружения в целом;
- проверку соответствия параметров колебаний здания или сооружения физиологическим и технологическим требованиям;
- исследование и уточнение истинного характера физико-механических процессов в сооружении и его элементах при совокупном действии эксплуатационных статических и динамических нагрузок в целях уточнения методики расчета и получения объективной оценки соответствия объекта испытания требованиям надежности и долговечности в эксплуатационных условиях.

10.4.2. Программа испытаний. Программа испытания должна содержать кроме сведений, содержащихся в п.10.3.1:
- формулирование цели испытания;
- предварительный динамический расчет сооружения с оценкой частоты и формы собственных колебаний;
- координаты точек, в которых должны измеряться параметры колебаний, типы и количество виброизмерительной аппаратуры и приборов;
- методы и средства возбуждения колебаний в исследуемой конструкции.

10.4.3. Способы возбуждения колебаний. При динамических испытаниях конструкций измеряют колебания, вызываемые естественными причинами (работой технологического оборудования, подъемно-транспортных средств, воздействием ветра, морских волн) или же специально создаваемыми воздействиями.

Испытания конструкций эксплуатационной нагрузкой обеспечивают получение представления об истинном отклике сооружения или конструкции на реальные

воздействия, поскольку характер и место приложения нагрузки точно соответствуют условиям эксплуатации. Однако, в большинстве случаев динамических испытаний приходится прибегать к искусственным приемам возбуждения колебательных воздействий.

При испытаниях вертикально или горизонтально протяженных конструкций (мачт, башен, опор ЛЭП, пролетных строений мостов) для имитации ветровой нагрузки, обрыва оттяжки и других воздействий используют тросовые тяги. Тяги закрепляют в расчетных точках сооружения и натягивают лебедками, закрепленными в грунте (рис.10.38).

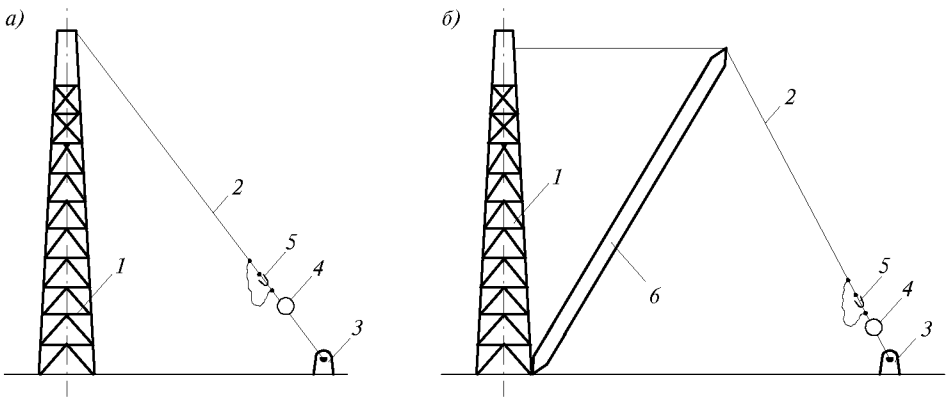


Рис.10.38. Схема создания наклонного (*а*) и горизонтального (*б*) импульсов силы на испытуемую конструкцию

1 – конструкция; *2* – трос; *3* – лебедка; *4* – динамометр; *5* – тарированная разрывная вставка; *6* – наклонная стойка

Контроль за величиной усилия натяжения осуществляют динамометром, встроенным в тросовую тягу вблизи анкера. При разрыве калиброванного на определенное усилие образца, встроенного в тягу, имитируется горизонтальная импульсная сила.

При необходимости создания строго горизонтальной нагрузки могут быть использованы наклонные мачты (рис.10.38 *б*), а также подъемные краны с длинной стрелой.

При необходимости испытания конструкций на воздействие вибрационных нагрузок применяются вибромашины. Наиболее распространены вибромашины электромеханические эксцентрикового типа. Машина имеет два синхронно вращающихся во встречных направлениях эксцентрика, приводимых в действие электромотором, у которого имеется возможность изменять скорость вращения (рис.10.39). Машина закрепляется на конструкцию и, за счет варьирования скорости вращения мотора, подбирают требуемую частоту колебаний. При помощи такого рода машин возможно воспроизведение только колебаний с частотой 10 герц и более.

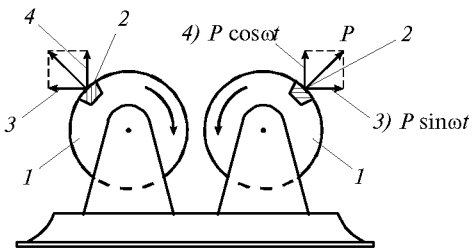


Рис.10.39. Схема работы вибромашины с эксцентриками

1 – роторы; *2* – эксцентрики; *3* – уравновешенные составляющие центробежных сил; *4* – неуравновешенные составляющие центробежных сил

Ударные нагрузки на испытуемые конструкции возбуждаются методом падающего груза (варьируется вес и высота падения груза), а также взрывом.

В первом случае в целях обеспечения необходимой точности приложения на-

грузки и соблюдения требований техники безопасности используется специальный копер, в котором падающий груз движется по направляющим (рис.10.40).

При необходимости создания горизонтальной нагрузки используют маятниковый копер (рис.10.41).

Во втором случае удар наносится бойком взрывной камеры, в которой происходит взрыв газовоздушной смеси либо мгновенный пуск сжатого газа (рис.10.42).

Устройство позволяет наносить удар, произвольно ориентированный в пространстве.

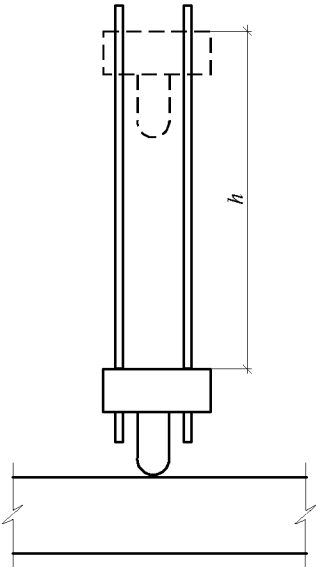


Рис.10.40. Ударный копер (схема)
h – высота подъема

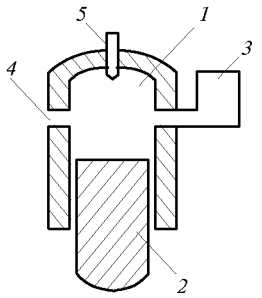


Рис.10.42. Взрывная камера

1 – взрывная камера; *2* – боек; *3* – питатель газовоздушной смесью; *4* – окно продувки; *5* – электрический запал (свеча)

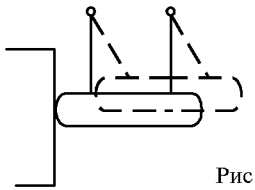


Рис.10.41. Схема работы тарана

Для возбуждения импульсных нагрузок обычно применяются гидравлические пульсаторы, а для имитации однократной вертикально ориентированной нагрузки применяется метод срыва груза. Гидравлический пульсатор представляет собой достаточно сложный агрегат, который генерирует в гидросистеме импульсы давления по заданному закону. Гидропульсатор может быть присоединен либо к испытательной машине, либо к гидравлическому домкрату или к системе домкратов. При помощи гидропульсаторов проводят ресурсные испытания конструкций и устройств, работающих в особо тяжелых условиях (элементы строительных машин, опоры радиолокаторов и т.п.), а также элементы, узлы, соединения и образцы при испытании их на усталость. Способ срыва груза применяется в основном при натурных испытаниях, связанных с определением частоты собственных колебаний конструкций, например, пролетных строений мостов, мостовых и козловых кранов, эстакад и др. Груз подвешивается к конструкции при помощи легко раскрывающегося замка, поднимается на небольшую высоту, измеряемую десятками сантиметров, и затем освобождается путем быстрого раскрытия замка.

Для возбуждения динамических как гармонических, так и апериодических колебаний используют также электродинамические машины, работающие по принципу звукового динамика в акустической аппаратуре, и пневматические, работающие по схеме пневматического молотка. Эти типы машин применяют в основном при испытаниях в оборонной и аэрокосмической промышленности.

Для возбуждения колебаний вертикально-протяженных малобазных сооружений с низкой частотой собственных колебаний от 0,2 до 2 герц применяют также простейший метод, при котором один или несколько человек, разместившись на вершине сооружения, начинают синхронно раскачивать его. Подобным образом можно возбудить собственные колебания сооружения высотой от 20 до 100 м с амплитудой от 0,5 до 5 м. После достижения требуемых параметров люди закрепляются на конструкции неподвижно до полного затухания колебательного процесса. Места размещения возбудителя колебаний зависят от заданной формы колебаний. Например, для конструкции типа балки на двух опорах для возбуждения 1-ой гармоники возбудитель размещают в середине пролета, 2-ой гармоники – в четверти пролета и т.п.

10.4.4. Измерение амплитуды и частоты колебаний. Для измерения весьма низких частот (0,1÷2 Гц) и значительных амплитуд (0,5÷5 м) колебаний успешно применяются геодезические приборы (нивелиры и теодолиты) и секундомер.

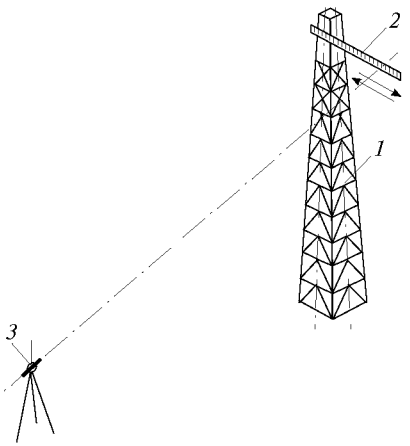


Рис.10.43. Схема измерения размаха низкочастотных колебаний башни
1 – башня; *2* – геодезическая рейка; *3* – теодолит

Схема действий в подобных случаях представлена на рис.10.43. На вершине испытываемой башни в плоскости колебаний укрепляется в горизонтальном положении геодезическая рейка. На некотором удалении от башни, на линии, перпендикулярной рейке, устанавливают теодолит. В испытании принимают участие руководитель, наблюдатель-геодезист и рабочие – возбудители колебаний. При достижении нужного размаха, контролируемого геодезистом через теодолит, включают кнопку секундомера и ведут отсчет количества и величины амплитуд колебаний по рейке с периодической записью этого процесса вплоть до его полного затухания.

Частота колебаний вычисляется по формуле

$$\omega = \frac{n}{T}, \qquad (10.19)$$

где n – количество полных колебаний за время между отсчетами; T – время между отсчетами.

Логарифмический декремент затухания определяется по формуле

$$\delta = \frac{1}{n} \ln \frac{A_1}{A_n}, \qquad (10.20)$$

где A_1 – размах первого колебания; A_n – размах колебаний через время T; n – количество полных циклов колебаний за время T.

Точность измерения этим методом составляет около 1%, что, как правило, достаточно для практических отсчетов.

Для измерения низкочастотных колебаний применяется также система, состоящая из лазерного визира, фотомишени и электронного регистратора. Точность его несколько выше (0,2 – 0,5%), однако он сложен в эксплуатации.

Для измерения параметров колебаний в диапазоне частот 10÷100 Гц и более применяются специальные приборы и в их числе:

- приборы для измерения амплитуд колебаний конструкций относительно внешней неподвижной точки;
- приборы для измерения амплитуд колебаний относительно встроенной инертной массы;

- приборы для измерения ускорений колеблющийся конструкции (акселерометры);
- приборы для измерения напряжений и деформаций в элементах колеблющейся конструкции.

Приборы для измерения амплитуд относительно внешней неподвижной точки представляют из себя механические, механо-электрические или электрические индикаторы, которые размещаются на неподвижной опоре и соединяются с колеблющейся конструкцией гибкой или жесткой связью. Обладая высокой чувствительностью и большим диапазоном по амплитуде, эти приборы ограничены верхним уровнем частотного диапазона, так как способ связи накладывает определенные ограничения на передачу высокочастотных перемещений. К подобным приборам относятся ручной вибратор ВР-1 и виброграф Гейгера.

В упомянутых приборах измерения регистрируются на движущейся ленте в виде виброграмм.

Приборы для измерения амплитуды колебаний относительно встроенной в прибор инертной массы крепятся непосредственно на конструкцию. В качестве неподвижной точки, относительно которой производятся измерения перемещений, используется массивный груз, подвешенный на эластичной пружине. Обеспечение достаточной точности измерения достигается при соблюдении условия:

$$\frac{\omega_{изм}}{\omega_{соб}} \geq 8 \div 10\,, \qquad (10.21)$$

где $\omega_{изм}$ – измеряемая частота колебаний; $\omega_{соб}$ – собственная частота колебаний системы инертная масса–подвеска.

Наиболее известным прибором подобного типа является уже упомянутый виброграф Гейгера. К электрическим датчикам такого же типа относятся разнообразные вибродатчики, у которых чувствительным элементом может быть тензистор, наклеенный на упругий элемент.

Кроме названных, существуют датчики, у которых чувствительный элемент реагирует на скорость взаимного перемещения корпуса прибора и инертной массы – магнитоэлектрические и другие.

Наиболее распространенными вибродатчиками являются акселерометры, т.е. приборы, измеряющие ускорение конструкции в процессе колебаний. Они могут быть как магнитоэлектрическими, так и пьезоэлектрическими. Последние характерны очень малыми габаритами и высокой чувствительностью, однако имеют значительные погрешности при измерении колебаний с малыми частотами $\omega \leq 10$ Гц.

Показания электрических вибродатчиков усиливают при помощи специальных усилителей, отличающихся низким уровнем помех и линейностью характеристики во всем диапазоне измерений. Усиленный сигнал поступает на вход регистрирующего прибора – осциллографа или магнитографа. Последние могут быть выполнены одно- и многоканальными. Осциллограф регистрирует измеряемую величину на светочувствительной ленте в виде осциллограммы. Схема измерения при помощи вибродатчика приведена на рис.10.44. Магнитограф регистрирует сигнал на магнитной ленте, с которой он для обработки вводится в компьютер и обрабатывается по специальной программе.

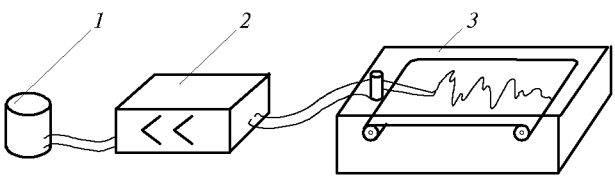


Рис.10.44. Схема измерительного тракта при замерах колебаний при помощи вибродатчика

1 – вибродатчик; *2* – усилитель; *3* – осциллограф

10.4.5. Обработка результатов испытаний

10.4.5.1. *Предварительная обработка виброграмм и осциллограмм.* Обработка результатов динамических испытаний сводится, как правило, к анализу виброграмм и осциллограмм – процесс обработки может быть сведен к трем основным операциям:

- предварительному общему анализу полученных записей;
- установлению численных значений параметров колебаний;
- гармоническому и статистическому анализу.

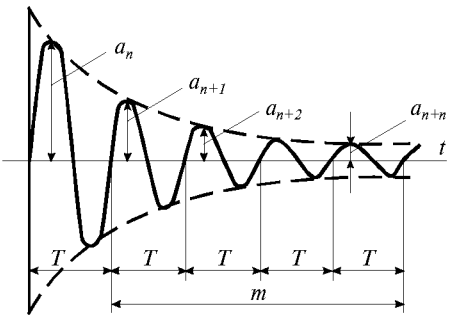


Рис.10.45. Осциллограмма затухающих колебаний

Первый этап обработки начинается с определения масштабов записей: горизонтального (масштаба времени) и вертикального (масштаба амплитуд). Временной масштаб устанавливается по меткам времени, наносимым при записи на ленту. Вертикальный масштаб записи вычисляют, умножая измеренную на осциллографе величину амплитуды на сквозной коэффициент усиления тракта: вибродатчик-усилитель-осциллограф (рис.10.45)

$$A = \frac{k 2A_{зап}}{V_{(f)}}, \qquad (10.22)$$

где A – амплитуда колебания конструкции; $2A_{зап}$ – размах колебания на осциллограмме; $V_{(f)}$ – сквозной коэффициент усиления вибродатчика и усилителя; k – коэффициент ослабления канала записи осциллографа. Для повышения точности определения частоты рекомендуется принимать для обработки участок записи, включающий несколько периодов колебаний T.

10.4.5.2. *Обработка записи двух и более гармоник.* На практике нередко встречаются случаи, когда измеряемый колебательный процесс является суммой двух и более гармонических колебаний, например, если колебания возбуждаются двумя механизмами, имеющими разные периоды колебаний. Если частоты отличаются значительно, то ручная обработка может быть произведена «методом огибающей», который приведен на рис.10.46.

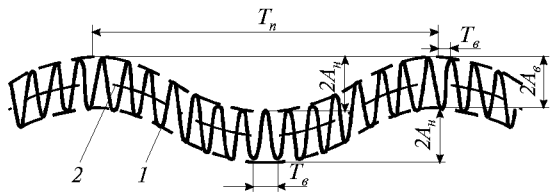


Рис.10.46. Осциллограмма колебаний конструкции на двух частотах

В случае, если частоты колебаний различаются незначительно, для разложения записанной сложной кривой колебательного процесса на отдельные гармонические составляющие и определения их амплитуд, периодов и фазовых углов применяется гармонический анализ, задачей которого является получение коэффициентов Фурье для графически заданной непрерывной функции $f_{(t)}$ с периодом T

$$a_n = \frac{2}{T}\int_0^T f(t)\cos\frac{2\pi t}{T}\,dt, \qquad (10.23)$$

$$b_n = \frac{2}{T}\int_0^T f(t)\sin\frac{2\pi t}{T}\,dt, \qquad (10.24)$$

где $n = 0, 1, 2, 3 \ldots$

После вычисления a_n и b_n процесс может быть приближенно представлен в виде суммы гармонических составляющих

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum\left(a_n \cos\frac{2\pi nt}{T}\right) + \left(b_n \sin\frac{2\pi nt}{T}\right), \qquad (10.25)$$

где $n = 0, 1, 2, 3 \ldots$

Для определения коэффициентов Фурье можно использовать различные методы (ручной, численный при помощи компьютерной программы). В некоторых задачах при анализе полигармонических колебаний можно ограничиться получением амплитудного спектра - зависимости распределения по частоте амплитуд гармонических составляющих.

Запись затухающих колебаний получают при испытании конструкций с ударной нагрузкой, срывом груза и т.п. Для получения достоверной информации (истиной величины амплитуды и времени полного отклонения от положения равновесия) необходимо учитывать амплитудные и фазовые искажения, вносимые аппаратурой.

При наличии развернутого во времени графика затухающих колебаний находят логарифмический декремент δ, связанный с ψ (коэффициентом поглощения) зависимостью:

$$\psi = 2\delta .$$

Логарифмический декремент подсчитывается по формуле:

$$\delta = \ln\frac{a_n}{a_{n+1}}, \qquad (10.26)$$

где a_n и a_{n+1} - измеренные на графике амплитуды n и $n+1$ циклов колебаний. При этом измерение амплитуд можно заменить измерением соответствующих размахов колебаний, что может быть выполнено без предварительного проведения нулевой линии на графике.

10.4.5.3. *Спектральный анализ колебаний типа стационарного случайного процесса*. Воздействие окружающей среды на сооружение имеет, как правило, случайный характер. Если случайная нагрузка является динамической, то есть изменяется во времени, она порождает случайные колебания сооружения, на которое воздействует. Эти колебания зависят от свойств сооружения, параметров нагрузки (интенсивность, направление и т.д.) и случайных факторов. Исследование колебаний позволяет получать значительный объем полезной информации о конструкции: собственные динамические характеристики, коэффициент динамичности, уровень вибронапряжений и т.д.

Спектральный анализ является наиболее эффективным методом исследования колебаний. Для механических систем он представляет собой разложение функции перемещения конструкции во времени $x(t)$ (или функций dx/dt, d^2x/dt^2) в ряд Фурье. Спектральный анализ колебаний позволяет решать следующие задачи:

- сложные, полигармонические колебания конструкции представлять в виде суммы синусоидальных колебаний, характеризующихся своими амплитудой, частотой и фазой;
- определять энергию колебаний конструкции на каждой из частот разложения;
- выделять резонансные частоты, характерные для конструкции;
- строить собственные формы колебаний конструкции;
- в отдельных случаях вычислять параметры, характеризующие внутреннее демпфирование колебательной системы.

Ниже приведены основные положения данного метода. Пусть колебания конструкции представляют собой функцию произвольного вида $x(t)$, которая в общем

случае может являться непериодической. Тогда, полагая, что период этой функции $T \to \infty$, можно записать в комплексной форме интеграл Фурье:

$$x(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-j2\pi ft} dt, \qquad -\infty < f < \infty , \tag{10.27}$$

где f - частота; j - мнимая единица; $x(f)$ имеет смысл, аналогичный коэффициентам ряда Фурье для разложения периодических функций.

Поскольку в действительности колебательный процесс $x(t)$ всегда наблюдается в течение ограниченного промежутка времени ($0 \le t \le T$), функция $x(f)$ обычно оценивается путем конечного преобразования Фурье, имеющего вид:

$$x(f) = x(f,T) = \int_{0}^{T} x(t) e^{-j2\pi ft} dt . \tag{10.28}$$

В практических приложениях рассматриваемого метода функцию $x(f)$ вычисляют на дискретных частотах $f_k = k/T$, где $k = \pm 1, +2, +3, ...$

По существу эта процедура сводится к определению коэффициентов ряда Фурье для функции, имеющей период T. Соответствующие вычислительные процедуры описаны в литературе.

Функция $x(f)$ является комплексной. Обычно для нее порознь определяют мнимую $x_{jM}(f)$ и действительную $x_{RE}(f)$ составляющие, после чего вычисляют и анализируют ее модуль и фазовую характеристику:

$$\left|x(f)\right| = \sqrt{(x_{RE}(f))^2 + (x_{JM}(f))^2} \tag{10.29}$$

$$\varphi(f) = \operatorname{arctg}\left(\frac{x_{JM}(f)}{x_{RE}(f)}\right). \tag{10.30}$$

Если реализация колебательного процесса представлена в виде последовательности N дискретных отсчетов с интервалом Δt, то продолжительность реализации составляет $T = N\Delta t$. При этом непрерывное преобразование Фурье $x(f)$ заменяется дискретной последовательностью $\{X_R\} = \{X(R/T)\}$. Разрешающая способность метода по частоте равна $\Delta f = 1/T$. Часто вместо функции $x(f)$ рассматривается связанная с ней функция спектральной плотности (или автостпектр):

$$G_{xx}(f) = \frac{2}{T}\left|X(f)\right|^2 . \tag{10.31}$$

Для определения значений функций $X(f)$ и $G_{xx}(f)$ на дискретных частотах применяется эффективный алгоритм быстрого преобразования Фурье. Его реализация предусматривает необходимость выполнения требования к размеру последовательности отсчетов:

$N = 2^p$, где $p = 1,2,3,...$, однако обеспечивает значительное ускорение вычислительного процесса.

При необходимости совместного анализа двух колебательных процессов $x(t)$ и $y(t)$ продолжительностью T каждый, сначала вычисляются их преобразования Фурье $X(f)$ и $Y(f)$, а затем определяется функция взаимной спектральной плотности:

$$G_{xy}(f) = \frac{2}{T} X^*(f) Y(f) , \tag{10.32}$$

где $X^*(f)$ - функция, комплексно сопряженная $X(f)$. Для построения форм колебаний важное значение имеет фазовая характеристика этой функции: $\varphi_{xy}(f) = \operatorname{arctg} * (G_{xy}^{JM}(f) / G_{xy}^{RE}(f))$.

Она позволяет определять взаимный сдвиг фазы колебаний между отдельными точками конструкции.

Для анализа колебательных систем часто используется комплексная функция $H(f)$ называемая частотной характеристикой. Она имеет следующую интерпретацию. Если на вход линейной колебательной системы с постоянными параметрами поступает гармонический сигнал $x(t) = X\sin 2\pi ft$, то выходной сигнал будет иметь вид: $y(t) = Y\sin(2\pi ft - \theta)$, причем модуль $|H(f)|$ (называемый амплитудной характеристикой) определяет соотношение амплитуд сигналов Y/X, а аргумент $\varphi_H(f)$ (называемый фазовой характеристикой) определяет сдвиг фазы θ между входом и выходом. Частотная характеристика вычисляется по формуле:

$$H(f) = G_{xy}(f)/G_{xx}(f). \tag{10.33}$$

Для линейных колебательных систем с постоянными параметрами (к которым можно отнести большинство конструкций) функция $H(f)$ не зависит от вида входного сигнала $x(t)$ и позволяет выявлять динамические характеристики самих систем (для конструкций - собственные частоты и формы). Максимум функции $|H(f)|$ проявляется только на собственных частотах конструкции.

Обнаружение и анализ нелинейных эффектов, а также случайных и систематических ошибок, возникающих при спектральном анализе колебаний, может осуществляться с помощью функции когерентности $\gamma^2_{xy}(f)$. Она определяется следующим образом:

$$\gamma^2_{xy}(f) = \frac{|G_{xy}(f)|^2}{G_{xx}(f)G_{yy}(f)}; \qquad 0 \le \gamma^2_{xy}(f) \le 1, \tag{10.34}$$

где $G_{yy}(f)$ – автоспектр выходного процесса.

Уменьшение величины $\gamma^2_{xy}(f)$ свидетельствует об увеличении нелинейности системы на частоте $f = f_0$.

С целью повышения статистической достоверности результатов спектрального анализа целесообразно разбиение динамического процесса на отдельные реализации (так называемый ансамбль реализаций) и осреднение результатов их обработки. Такой подход используется применительно к стационарным случайным процессам. При этом вычисление автоспектров, взаимных спектров, частотной характеристики и функции когерентности осуществляется по формулам:

$$\hat{G}_{xx} = \frac{2}{dT}\sum_{k=1}^{d}|X_k(f)|^2; \tag{10.35}$$

$$\hat{G}_{xy} = \frac{2}{dT}\sum_{k=1}^{d}G^{(k)}_{xy}(f); \quad \hat{H}(f) = \frac{\hat{G}_{xy}}{\hat{G}_{xx}}; \tag{10.36}$$

$$\gamma^2_{xy}(f) = \frac{|\hat{G}_{xy}(f)|^2}{\hat{G}_{xx}(f)\hat{G}_{yy}(f)}, \tag{10.37}$$

где d - параметр осреднения (количество реализаций в ансамбле).

Для получения достоверных результатов спектрального анализа необходимо стремиться к максимальному увеличению d. При этом все реализации динамического процесса должны быть представительными - позволяющими анализировать как высокочастотные, так и низкочастотные составляющие.

Продолжительность реализации **T** и количество отсчетов N выбираются таким образом, чтобы выполнялись ограничения:

$$T/\tau_1 \geq k_1; \quad (N\tau_2)/T \geq k_2; \quad \tau_1 > \tau_2, \tag{10.38}$$

где τ_1 и τ_2 – периоды гармонических составляющих с наименьшей и наибольшей частотами в рассматриваемом процессе. Величины τ_1 и τ_2 определяются визуально по осциллограмме колебаний или на основе априорных (например, расчетных) данных о свойствах процесса. Опыт обработки результатов динамических испытаний показывает, что достаточно высокое качество спектрального анализа обеспечивается при $k_1 = k_2 = 8 \div 10$.

10.5. Особенности низкотемпературных циклических испытаний металла и элементов конструкций

10.5.1. Общие положения. Строительные стальные конструкции эксплуатируются как при положительных, так и отрицательных климатических температурах при одновременном воздействии изменяющихся нагрузок.

Как свидетельствует история техники при работе сооружений в этих условиях возможны внезапные, происходящие с высокой скоростью разрушения элементов при нагрузках меньших, чем расчетные и при отсутствии заметных пластических деформаций.

Вероятность подобных разрушений сводится к минимуму за счет правильного выбора стали, а также поверочных расчетов конструкций на выносливость и элементов конструкций на прочность с учетом хрупкого разрушения согласно СНиП II-23-81*. Однако в силу несовершенства имеющихся расчетов полностью устранить опасность хрупких разрушений не удается. В связи с этим большое значение приобретает экспериментальная оценка сопротивления хрупкому и усталостному разрушению материалов и элементов конструкций.

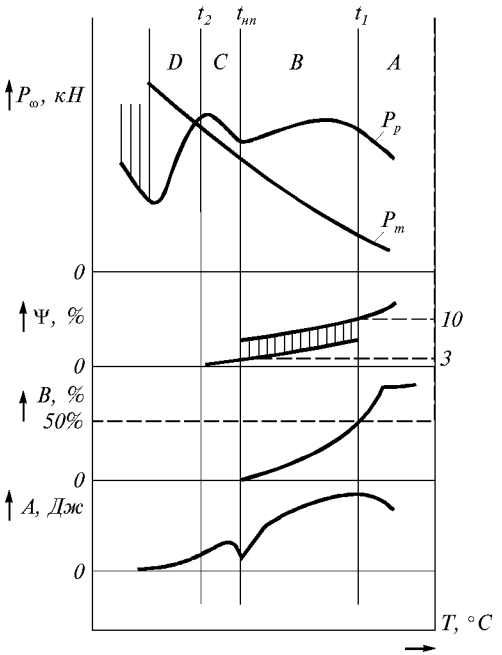


Рис.10.47. Температурная зависимость основных механических свойств стали

При этом целью низкотемпературных и усталостных испытаний является установление особенностей поведения конструкций при эксплуатации, а также выявление условий предотвращения внезапных хрупких и усталостных разрушений.

Проведение таких испытаний в ряде случаев необходимо при освидетельствовании стальных конструкций и определении их ресурса, а также на стадии проектирования и изготовления новых и реконструкции бывших в эксплуатации сооружений.

10.5.2. Зависимость прочности конструкций от температуры и условия перехода из вязкого состояния в хрупкое

10.5.2.1. *Переход из вязкого в хрупкое состояние при понижении температуры. Основные определения.* На рис.10.47 представлены основные закономерности перехода проката и элементов конструкций из вязкого состояния в хрупкое по мере сниже-

ния температуры на примере изменения величины некоторых основных характеристик: силовой (разрушающая нагрузка $P\omega$, кН), деформационной (относительное сужение в разрушенном сечении ψ, %), энергетической (работа разрушения A, Дж) и вида излома.

Обычно выделяют четыре области вязко-хрупкого перехода [38, 39]. Область А – область вязкого разрушения. Вязкость – термин, описывающий способность материала пластически деформироваться и поглощать энергию в процессе нагружения и разрушения. Площадь под кривой напряжение – деформация является мерой вязкости при данном способе нагружения.

Основные расчеты на прочность металлических конструкций по СНиП II-23-81* предполагают, что элементы металлических конструкций разрушаются вязко.

В области D разрушение классифицируют как хрупкое. Термин хрупкое разрушение конструкций в инженерной практике можно характеризовать двумя признаками. Во-первых, такое разрушение возникает при номинальных напряжениях $\sigma_н$, меньших величины предела текучести $\sigma_т$ и даже расчетного сопротивления по пределу текучести R ($\sigma_н^c < R_y$). Во-вторых, хрупкое разрушение реализуется в форме самопроизвольного развития трещины. Хрупкое разрушение не сопровождается заметной макропластической деформацией. Поверхности разрушения имеют характерное «кристаллическое» строение и состоят из блестящих фасеток.

Между областями вязкого разрушения А и хрупкого разрушения D можно выделить две области, в которых разрушение носит промежуточный характер. В области В (рис.10.47) разрушение происходит после общего течения в сечении – нетто и деформационного упрочнения ($P_C > P_T$), а также после развития заметных пластических деформаций (рис.10.48). На начальной стадии таких разрушений трещина развивается как вязкая и лишь достигнув определенной длины, начинает развиваться самопроизвольно по механизму скола. Работа, затрачиваемая на возникновение и развитие вязкого участка разрушения, фактически является энергетическим барьером, предотвращающим хрупкое разрушение конструкций в области В.

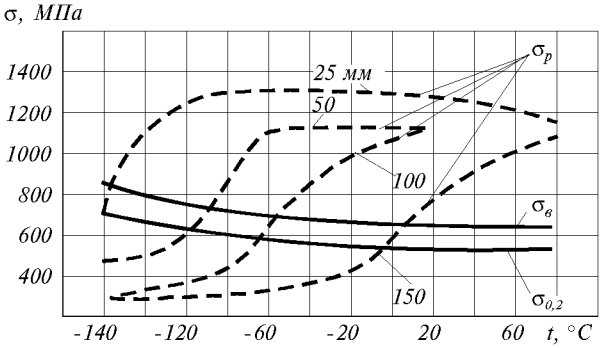


Рис.10.48. Зависимость номинального напряжения разрушения от толщины образца. (Термически улучшенная сталь 15Х2МФА). Испытывались на внецентренное растяжение компактные образцы с усталостной трещиной (тип *3* по ГОСТ 25.506–85)

В области С разрушение осуществляется сколом, (весь излом имеет кристаллическое строение, В = 0%) вследствие стеснения развития пластических деформаций. При этом $P_C \geq P_T$ ($\sigma_н \geq \sigma_т$), пластические деформации незначительны или вовсе равны нулю ($0 \leq \psi < 3\%$). Такое разрушение иногда называют квазихрупким.

Описанные выше области вязко-хрупких состояний материалов и конструкции – вязкое разрушение (область А), смешанное вязко-хрупкое разрушение (область В), квазихрупкое разрушение (область С), хрупкое разрушение (область D) – для практических целей удобно разграничивать друг от друга характерными температурами, называемыми критическими температурами вязко-хрупкого перехода или температурами условных порогов хладноломкости. За критическую принимают

минимальную температуру, при которой величина какой-либо характеристики – энергетической, силовой, деформационной, строение излома, больше или равна выбранному и физически обоснованному критериальному ее значению.

Критическую температуру, разграничивающую область А, где хрупкое разрушение исключено, от переходной области В, обозначают как t_1, [40]. Физически эти температуры характеризуют способность материала гасить быстрые трещины. Обычно t_1 определяют по виду излома по критерию В = 50%. Этот критерий надежен для наиболее часто применяемых сталей с $\sigma_т \le 375$ МПа.

При температуре t_1 прекращается экспериментально наблюдаемый в области В разброс величин пластических и энергетических (например, работа разрушения) характеристик. Поэтому обоснованным и удобным при экспертных оценках разрушений элементов конструкций представляется определение t_1 по величине относительного сужения $\psi = 10\%$. Физически эта величина лежит на нижней границе разброса значений ψ при t_1.

Граница между областями В и С при понижении температуры характеризуется исчезновением волокна в изломе и почти полным падением пластичности. Эту критическую температуру называют температурой нулевой пластичности $t_{нп}$. Экспериментально определить температуру , при которой ψ и В = 0 достаточно сложно. Обычно $t_{нп}$ определяют по допуску: иногда по $\psi = 1\%$, но наиболее часто по величине $\psi = 3\%$.

Область С от области D (хрупкое разрушение) отделяется температурой, называемой второй критической t_2. Согласно данному выше определению хрупкого разрушения эта точка при понижении температуры определяется из условия $P_C < P_T$ или $\sigma_п^c < \sigma_т$.

Температуры $t_{нп}$ и t_2 в отличие от t_1 зависят в гораздо меньшей степени от материала, во многом они определяются конструктивно технологическим исполнением элемента сооружения.

10.5.2.2. *Факторы, способствующие переходу конструкции в хрупкое состояние.* Многочисленные факторы, способствующие хрупкому разрушению конструкций, можно свести к пяти основным: 1) низкая температура; 2) высокая скорость приложения растягивающих нагрузок; 3) наличие конструктивных и технологических концентраторов напряжений, в первую очередь трещин; 4) большие толщины (масштабный фактор), приводящие к объемно-напряженному состоянию у дна надреза; 5) неблагоприятная микроструктура проката.

Ниже приводится несколько количественных примеров действия перечисленных факторов и некоторых их комбинаций.

Таблица 10.3. Критические температуры строительных сталей при испытаниях гладких цилиндрических образцов с рабочим диаметром 6 мм

Материал	Критическая температура, °С		
	t_1	$t_{нп}$	t_2
Малоуглеродистая сталь:			
крупнозернистая Б (балл зерна 4)	–40	–120	–170
обычная (балл зерна 7)	–70	–150	–180
Низколегированная марганцовистая (балл зерна 7)	–120	–210	–230

При переходе от испытаний на статический изгиб образцов из мягкой строительной стали с острым V-образным надрезом к испытаниям на ударный изгиб скорость деформации увеличилась в 10^4 раз, при этом температура t_2 возросла в зависимости от марки стали на 100–130°С, температура t_1 изменилась мало [42].

Влияние толщины проката на температуру перехода в хрупкое состояние иллюстрируется на рис.10.48 на примере хладостойкой низколегированной стали с $\sigma_т = 400$ МПа. В целом увеличение толщины проката на каждый мм снижает хладостойкость по величине t_2 на 1÷2°С в зависимости от марки стали (например, [43]).

Склонность элементов конструкций к хрупкому разрушению усиливается при наличии конструктивных или технологических надрезов-концентраторов напряжения, локализующих разрушение.

Опасность надреза естественно повышается с усилением концентрации напряжений, характеризуемой величиной теоретического коэффициента концентрации напряжений $\alpha_\sigma = \sigma_{max}/\sigma_н$ (σ_{max} – максимальное напряжение в зоне концентрации напряжений, $\sigma_н$ – номинальное напряжение). При увеличении α_σ от 2 до 100, t_1 сдвигается в область положительных температур на 60°С (наибольшее повышение наблюдается при $\alpha_\sigma = 2...5$), t_2 – на 80°С [43]. С увеличением остроты надреза α_σ резко возрастает.

На рис.10.49 представлены значения α_σ для различных видов сварных соединений из проката толщиной 20 – 40 мм, типичных для строительных конструкций, с учетом влияния конструктивных и технологических факторов [44].

На рис.10.50 показано, что работа разрушения интенсивно понижается по мере увеличения остроты надреза. Наконец, на вероятность хрупкого разрушения конструкций существенное влияние оказывает микроструктура стали [41].

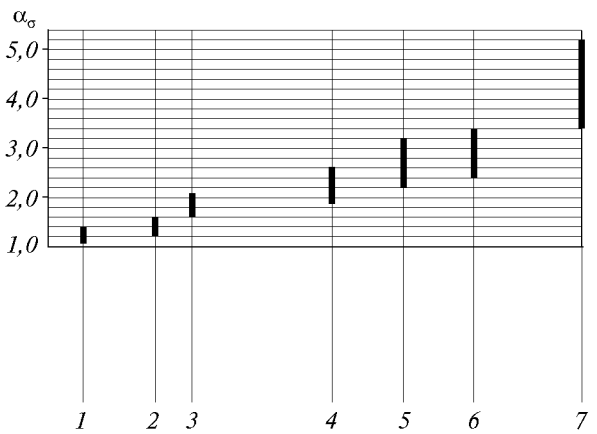


Рис.10.49. Теоретические коэффициенты концентрации напряжений для различных видов сварных соединений
1 – стыковые соединения с плавным переходом от шва к основному металлу; *2* – тавровые соединения с разделкой кромок при плавном переходе от шва к основному металлу; *3* – то же, что *1*, но с необработанным швом; *4* – приварка к несущему элементу поперечного ребра жесткости; *5* – нахлесточные соединения с лобовыми швами; *6* – нахлесточные соединения с фланговыми швами; *7* – тавровые соединения без разделки кромок

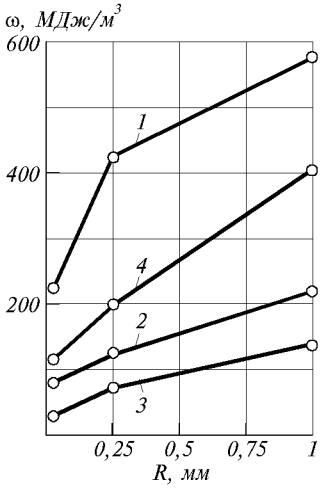


Рис.10.50. Зависимость удельной работы деформации от остроты надреза при статическом растяжении. Улучшенная сталь 10Х2ГМ
1 – толщина t=15 мм; *2* – толщина t=12 мм; *3* – толщина t=8 мм; *4* – цилиндрический образец

На рис.10.51 представлены зависимости $t_{нп}$ и t_1 от величин зерна для случая малоуглеродистых сталей типа Ст3. Из рисунка видно, что для обеспечения нор-

мальной хладостойкости проката из малоуглеродистых и низколегированных сталей с феррито-перлитной структурой, размер ферритного зерна не должен превышать 35 мкм, содержание перлита – 20%, микроструктура не должна содержать продуктов промежуточного распада.

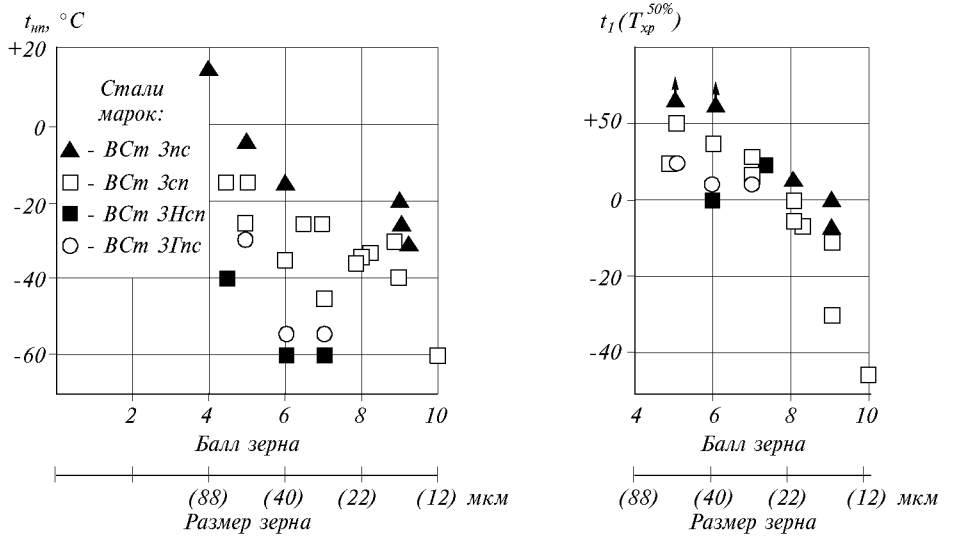


Рис.10.51. Зависимость критических температур вязкохрупкого перехода от величины зерна малоуглеродистых сталей. Испытания на ударный изгиб

Следует подчеркнуть, что ни один из перечисленных основных факторов, как правило, сам по себе не приводит к хрупкому разрушению сварной конструкции, отвечающей современным требованиям к проектированию и изготовлению. Хрупкое разрушение происходит лишь при неблагоприятном сочетании нескольких факторов. Поэтому причины хрупких разрушений часто индивидуальны, а сами эти разрушения редки.

Из публикаций известно, что частота хрупких разрушений не зависит от уровня напряжений [49], (на рис.10.52*а*,*б*,*в* показаны соответствующие статистические данные) и больше половины таких разрушений происходит при номинальных напряжениях $\sigma_н \le 0{,}5R_y$.

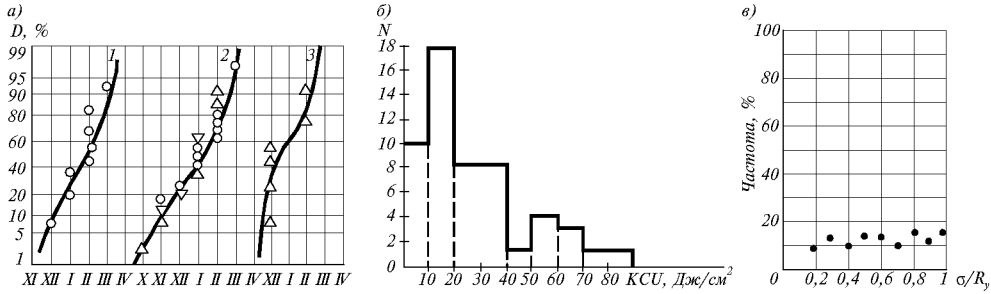


Рис.10.52. Зависимость хрупких разрушений от различных факторов

а – сезонность хрупких разрушений: *1* – резервуары; *2* – строительные конструкции; *3* – мосты; *б* – зависимость частоты хрупких разрушений от ударной вязкости проката; *в* – зависимость частоты отказа ферм от уровня номинальных напряжений

10.5.3. Выбор стали и вида испытаний в зависимости от назначения конструкции и условий эксплуатации. В существующих нормах надежность работы конструкции при отрицательных температурах обычно обеспечивается выбором материала с заданными требованиями по сопротивлению хрупким разрушениям в зависимости от температуры эксплуатации и назначения конструкций, тяжести последствий хрупкого разрушения, а также степени динамичности нагрузки, вида напряженного состояния (сжатие или растяжение, изгиб, одноосное, плоское или объемное напряженное состояние и т.п.), наличия сварных соединений, и неблагоприятных технологических воздействий, толщины проката. По степени ответственности работы материала все строительные конструкции согласно СНиП II-24-81* подразделяются на четыре группы.

Более совершенная методика назначения групп конструкций изложена в [45]. Согласно этой методике факторы опасности хрупкого разрушения оцениваются в баллах и в зависимости от количества баллов конструкцию относят к той или иной из четырех групп ответственности. Близкий принцип выбора стали по балльной системе разработан и действует в ряде стран, например Финляндии, Великобритании.

Как упоминалось ранее, важнейшей целью низкотемпературных испытаний является прогнозирование поведения конструкций в процессе эксплуатации.

Условия разрушения конструкций хорошо воспроизводятся при испытании крупных сварных образцов, выполненных из проката натурной толщины и имеющих достаточно острые концентраторы напряжений – конструктивные, технологические, либо те и другие. При испытаниях таких образцов следует применять ударное нагружение (особенно в случае конструкций первой группы) и даже нагружение с принудительным инициированием хрупкой трещины (здесь имитируется полное преодоление энергетического барьера при разрушении). Испытания ведутся в широком диапазоне температур не только климатических, но и криогенных в зависимости от конкретных целей испытаний. Недостатком данных испытаний является их высокая стоимость, необходимость наличия сложного оборудования и специализированных подразделений.

Часто для оценки хладостойкости материалов и металла сварных соединений используют испытания небольших образцов с надрезами (обычно на ударный изгиб). При таких испытаниях учитывают лишь основные факторы охрупчивания (наличие надрезов, ударные нагрузки, отрицательная температура).

Обычно именно результаты испытаний на ударный изгиб рассматривают как проверенный критерий материала, обеспечивающий надежную работу конструкций, например такой подход имеет место в СНиП II-23-81* (см.табл.10.4).

Таблица 10.4. Гарантии по ударной вязкости проката для конструкций различных групп

Климатический район строительства (расчетная температура, °С)	II_4(–30 > t ≥ –40) II_5 и др. (t ≥ –30)			I_2, II_2, II_3 (–40 > t ≥ –50)			I_1 (–50 > t ≥ –65)		
Группа конструкций	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Марка стали*)	Гарантии по ударной вязкости, °С								
С245 (ВСт3пс)	—	—	–20	—	—	—	—	—	—
С255, С285, (ВСт3сп)	–20	–20	–20	—	—	—	—	—	—
С345, С375 (09Г2С и т.д.)	–70	–40	–40	–70	–70	–40	–70+ д.с.**)	–70+ д.с.	–70
С390 (МГ2АФ)	–70	–70	–70	–70	–70	–70	–70	–70	–70
С440 (16Г2АФ)	–70	–70	–70	–70	–70	–70	–70	–70	–70
С590 (12ГН2МФАЮ)	–70	–70	–70	—	–70	–70	—	–70	–70

Знак «—» означает, что данную сталь применять не следует.

*) С245, С255, С285, С345, С375, С390, С440, С590 – стали по ГОСТ 27772-88; ВСт3пс, ВСт3сп – по ГОСТ 380-71**, 09Г2С, 14Г2АФ, 16Г2АФ – по ГОСТ 19282-73*.

**)д.с. – Ударная вязкость при комнатной температуре после деформационного старения.

Ниже описываются наиболее распространенные методы низкотемпературных испытаний.

10.5.4. Оценка сопротивления хрупкому разрушению материалов, соединений и конструкций

10.5.4.1. *Испытания на ударный изгиб.* Испытания на ударный изгиб небольших образцов размером 55×10×10 мм с надрезами в интервале климатических температур являются основным методом приемо-сдаточных испытаний строительных сталей, а также металла сварных соединений для определения их сопротивления хрупким разрушениям. Этот метод также применяется при обследовании и реконструкции сооружений, при определении остаточного ресурса, для выяснения причин аварий и т.п.

В нашей стране испытания проводят в соответствии с ГОСТ 9454-78* на специальных маятниковых копрах. Метод основан на разрушении образца с надрезом посредине одним ударом молота копра. Концы образца располагают на опорах (рис.10.53).

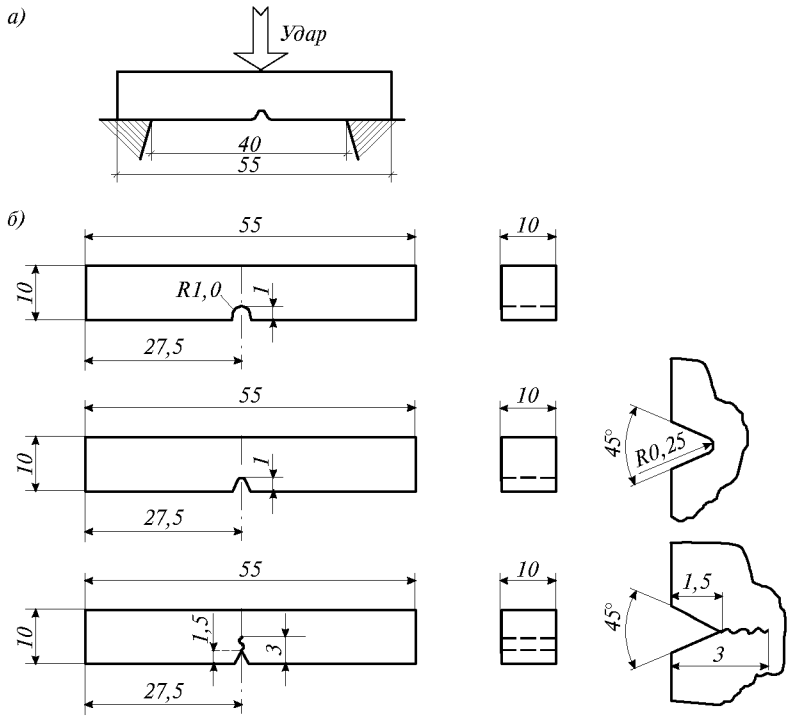


Рис.10.53. Образцы для испытаний на ударный изгиб
а – схема испытаний; *б* – основные формы образцов (надрезов)

Ударную вязкость, определяемую в указанных испытаниях, обозначают сочетанием букв и цифр. Первые две буквы KC обозначают символ ударной вязкости, третья буква – вид концентратора. Также вводится цифровой индекс, указывающий температуру испытаний. Например KCU^{-40}, KCV^{-40}, KCT^{-40} – ударная вязкость, определенная при –40°C на образцах с концентраторами U, V и T соответственно.

Типичные результаты таких испытаний показаны на рис.10.54, на котором представлены температурные зависимости ударной вязкости, содержания волокнистой составляющей в изломе B и относительного сужения ψ у корня

надреза в сечении – нетто образца. Минимальная температура испытаний, при которой измеряемая величина выше критериальной, называется критической температурой. Критические температуры и критериальные значения по величине ударной вязкости указаны в табл.10.5, критическая температура по виду излома (обычно В = 50%) фактически является t_1. В литературе часто эту температуру обозначают $T_{хр}^{50\%}$.

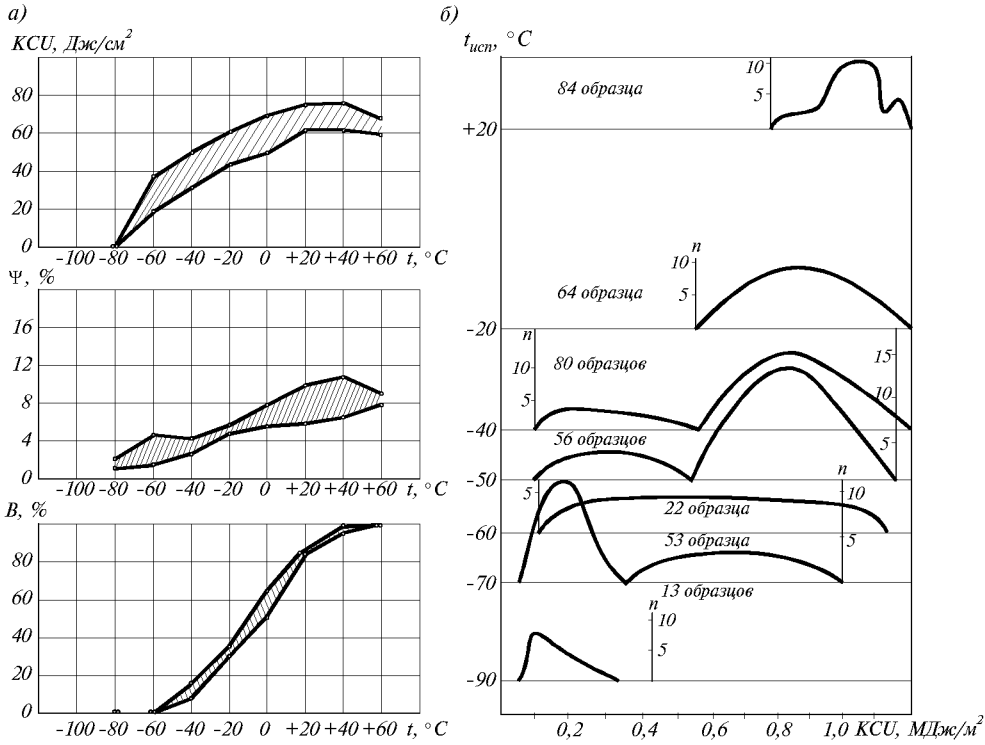


Рис.10.54. Результаты испытаний на ударный изгиб

а – температурная зависимость ударной вязкости, сужения у дна надреза и волокнистой составляющей в изломе. Горячекатаная сталь 15Г2СФ; *б* – распределение ударной вязкости при испытании на ударный изгиб образцов с U-образным надрезом из горячекатаной стали 15Г2СФ

Выбор надреза образца во многом определяется микроструктурой и следовательно маркой стали. Результаты испытаний оказываются эффективными, если радиус надреза примерно на порядок выше диаметра зерна [46].

Отбор проб для испытаний оговаривается в нормативных документах, в частности, в стандартах или ТУ на поставку стали. Из фасонного проката и универсальной полосы образцы вырезают вдоль, из листового проката – поперек направления прокатки.

Испытания на ударный изгиб наилучшим образом выявляют разброс величин энергетических и пластических характеристик в интервале температур $t_1^{Л} - t_{нп}$ (рис.10.47, рис.10.54). Распределение ударной вязкости при испытаниях на ударный изгиб в интервале температур при статистически обоснованном числе разрушенных образцов при каждой температуре представлено на рис.10.54 *б*.

Результаты испытаний на ударную вязкость хорошо коррелируют с хрупкими разрушениями при эксплуатации [47], особенно для массовых конструкций групп 2 и 3.

Таблица 10.5. Критические температуры строительных сталей

Сталь	Критические температуры		Минимальная рекомендуемая температура эксплуатации типовых сварных конструкций групп 2 и 3 по СНиП II-23-81*
	$T_{кс}$	$T_{хр}^{50\%}(t)$	
	°С		
Горячекатаные малоуглеродистые стали (С245, С255, С275, С285, по ГОСТ 27772-88 и т.п.)	–20 по критерию KCU ≥ 29 Дж/см^2	+10	–40
Горячекатаные низколегированные стали (С345, С375 по ГОСТ 27772-88 и т.п.)	–40 по критерию KCU ≥ 34 Дж/см^2	0	–50
Термически обработанные стали высокой прочности (С390, С440 по ГОСТ 27772-88 и т.п.)	–40 по критерию KCV ≥ 19 Дж/см^2	–20	–65
	–70 по критерию KCU ≥ 29 Дж/см^2		
Термически улучшенная сталь С590 по ГОСТ 27772-88 и т.п.	–40 по критерию KCV ≥ 24 Дж/см^2	–40	–65
	–70 по критерию KCU ≥ 29 Дж/см^2		

10.5.4.2. *Низкотемпературные испытания сварных соединений из проката больших толщин*. Для рассматриваемых здесь испытаний наименее трудоемкой и наиболее эффективной является так называемая проба Кинцеля (рис.10.55*а*).

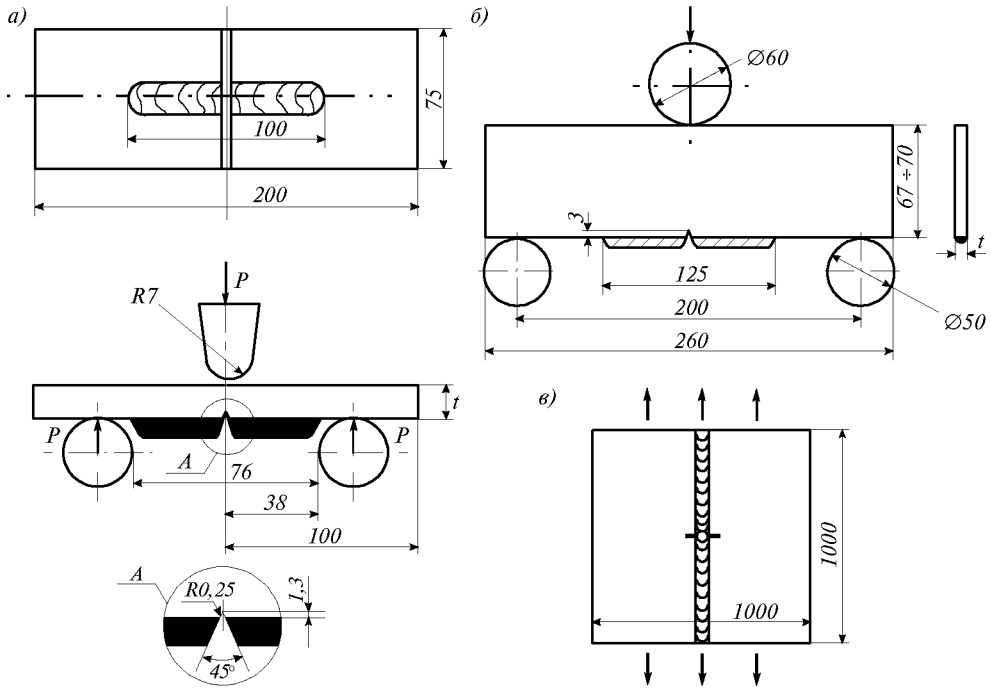


Рис.10.55.

а – геометрические размеры образца Кинцеля и схема его испытания; *б* – модернизированный образец Ван дер Вина с наплавкой и схема его испытания (*t* – толщина проката); *в* – схема испытания широкой пластины

Образец представляет собой прямоугольную пластину той же толщины, что и элемент в реальной конструкции. Образцы испытываются на статический трехточечный изгиб в интервале температур. Пробу применяют для металла толщиной не менее 20 мм. Наплавка осуществляется принятыми для сварки строительной стали электродами по соответствующим режимам.

О сопротивлении разрушению при таких испытаниях судят по величине поперечного сужения у дна надреза; критическая температура по этой характеристике принимается по критерию $\psi = 1\%$ ($T_\psi = 1\%$) и фактически является близкой к $t_{НП}$. Оценивается также количество волокна в изломе и с определением критической температуры t_1 (табл.10.6).

Эффективная область подобных испытаний – сварные конструкции группы 2 из элементов больших толщин. Представленные в таблице 10.6 результаты свидетельствуют о сильном охрупчивающем влиянии сварки, а также об объективной опасности хрупкого разрушения подобных конструкций, выполненных из сталей обычной и повышенной прочности с $\sigma_т \le 375$ МПа в случае их эксплуатации при температурах ниже минус 40°С.

Сходная методика – испытания по Ван дер Вину – применяется и при оценке хладноломкости относительно тонких сечений (рис.10.55*б*). Однако в результате этих испытаний в климатическом диапазоне температур обычно не достигаются условия хрупкого разрушения $\sigma_н < \sigma_т$, что свидетельствует о (высокой хладостойкости относительно тонких сечений.

Таблица 10.6. Сопротивление сварных соединений хрупкому разрушению по результатам испытаний образцов Кинцеля

Сталь	Состояние*) поставки	$\sigma_т$, МПа	Критические температуры, °С		
			$T_\psi = 1\%$	t_1	t_2
С255	ГК	260	-20	+20	-40
С345	ГК	356	-30	0	-60
С390Т	У	428	-40	-20	-80
С390	Н	420	-40	-20	-100
С390	У	500	-60	-40	-120
С590	У	710	-60	-50	-120

*) ГК – горячекатаный прокат, У – прокат поставлен после термической обработки типа улучшения, Н – термическая обработка типа нормализации, толщина проката 20 мм.

Существенное влияние остаточных напряжений на хрупкую прочность можно выявить при испытаниях больших образцов типа широких пластин (1000×1000 мм) (рис.10.55*в*). При температурах выше $t_{НП}$ прочность пластин независимо от наличия остаточных напряжений превышает предел текучести основного материала. При температурах ниже $t_{НП}$ прочность пластин с остаточными напряжениями может резко снизиться.

10.5.4.3. *Испытание падающим грузом.* Работоспособность материала листовых конструкций с большим запасом упругой энергии, а также подверженных ударным и переменным нагрузкам, хорошо оценивается испытаниями на трехточечный ударный изгиб больших образцов падающим грузом (рис.10.56). Толщина испытываемых образцов в данном случае соответствует толщине

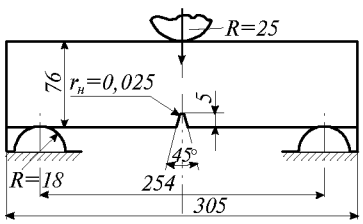


Рис.10.56. Схема нагружения и образец при испытаниях падающим грузом (ИПГ). Толщина образца равна толщине проката

листов. Надрез наносится путем вдавливания острого долота с радиусом до 0,025 мм на глубину 5 мм. Малый радиус в сочетании с наклепом дна надреза (а также с ударной нагрузкой, отрицательной температурой и большой толщиной) гарантирует снятие энергетического барьера и возникновение хрупкой трещины. По результатам испытаний оценивают долю волокнистой составляющей в изломе или, реже, работу разрушения. Такие испытания фактически оценивают критическую температуру t_1 и очень важны при оценках работоспособности магистральных газопроводов и других цилиндрических сосудов, работающих под давлением. У термически улучшенных сталей с $\sigma_т = 700$ МПа определяемая таким образом t_1 на 100°С ниже, чем у горячекатаных с $\sigma_т = 360$ МПа (минус 70 и плюс 30°С соответственно).

10.5.4.4. *Испытания на остановку трещины.* При выборе материала для ответственных конструкций необходимо иметь информацию о температуре и напряжениях, при которых материал способен остановить движущуюся хрупкую трещину.

Сущность метода заключается в следующем (рис.10.57). Крупная пластина помещается в градиентное температурное поле следующим образом: вспомогательный сварной шов охлаждается жидким азотом, а противоположный торец пластины нагревается до +40°С. Затем пластина нагружается растяжением до определенного заранее заданного уровня номинальных напряжений ($\sigma_н < \sigma_т$). Далее со стороны торца пластины, охлаждаемой азотом, инициируется хрупкая трещина. Трещина может быть инициирована статической $P_{ст}$, или ударной нагрузками (рис.10.57 *а*). Возникшая трещина останавливается при определенной температуре $t_{ост.}$, которая и является наиболее строго оцененной температурой t_1. Испытывается серия образцов при различном уровне $\sigma_н$. В результате испытаний получают зависимость температуры остановки трещины $t_{ост.}$ от величины $\sigma_н$ (рис.10.58), а также область напряжений и температур, при которых возникшая трещина не будет распространяться в прокате данной толщины (область правее и ниже полученных кривых) [48]. Результаты испытаний мало зависят от характера нагрузки, инициировавшей трещину.

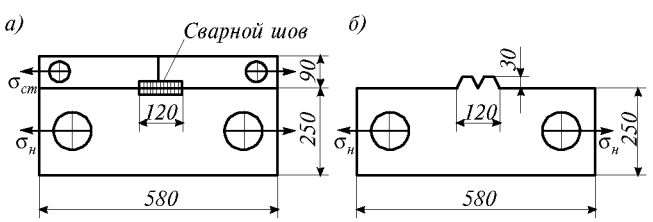


Рис.10.57. Образцы для испытаний по методу Робертсона при инициировании трещины статической (*а*) и ударной (*б*) нагрузками

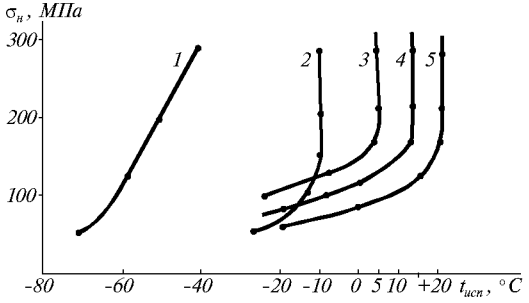


Рис.10.58. Результаты испытаний стального проката толщиной 12 мм по методу Робертсона при статическом характере разрушающей нагрузки

1 – улучшенная сталь 12ГН2МФАЮ (С 590К); *2* – улучшенная сталь 16Г2АФ (С 440); *3* – нормализованная сталь 16Г2АФ (С 440); *4* – горячекатаная сталь 12Г2С (С 345); *5* – горячекатаная сталь Вст3сп (С 255)

Способность материала к остановке трещины тем выше, чем ниже скорость движения трещины. Поэтому $t_{ост.}$ при испытаниях по Робертсону, характеризующая остановку длинной «быстрой» трещины, выше, чем t_1, определяемая при испытаниях на ударный изгиб падающим грузом (ИПГ) и характеризующая способность материала останавливать «короткие», относительно медленные трещины.

Испытания по Робертсону более представительны, поэтому они полезны и для оценки работоспособности наиболее ответственных конструкций с большим запасом упругой энергии типа магистральных трубопроводов. Испытания падающим грузом более просты, экспрессны, их применяют как приемосдаточные.

10.5.5. Оценка характеристик вязкости разрушения (трещиностойкости) при статическом и ударном нагружении

10.5.5.1. *Основы механики разрушения.* Важную информацию о работе конструкций при низких температурах дает испытание образцов с предельно острыми концентраторами напряжений – усталостными трещинами . Основой для определения характеристик трещиностойкости являются испытания образцов с надрезом и заранее наведенной усталостной трещиной (рис.10.59).

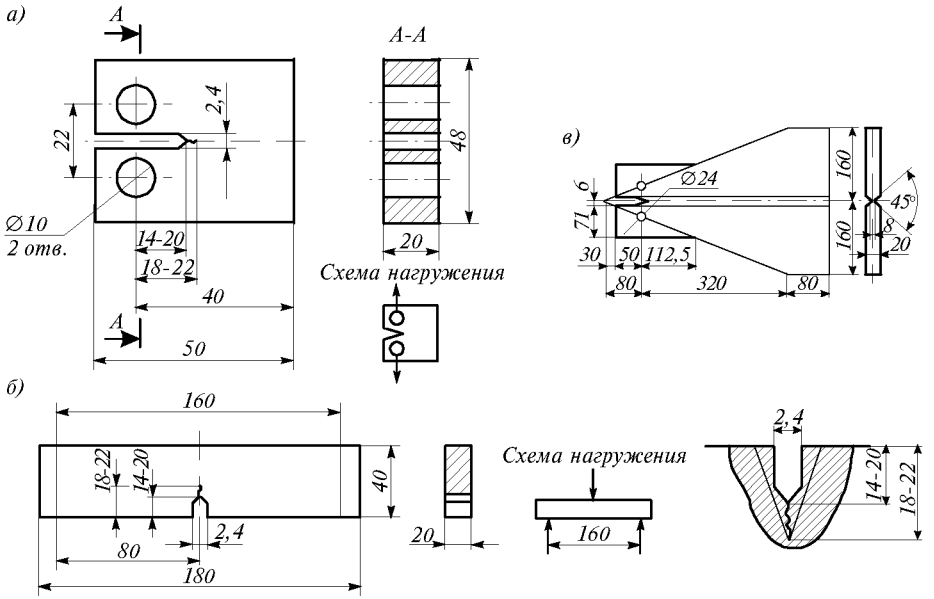


Рис.10.59. Образцы для определения характеристик трещиностойкости (из проката толщиной 20 мм)
а – при испытаниях на внецентренное растяжение; *б* – на сосредоточенный изгиб; *в* – образец в виде усеченного клина

При этом напряженное состояние в вершине трещины должно быть близким к плоской деформации. Основной силовой характеристикой трещиностойкости является вязкость разрушения или критический коэффициент интенсивности напряжений K_{IC}, реже используется энергетическая характеристика – J_c – интеграл и деформационная – раскрытие трещины δ_c.

Нестабильное развитие трещины начинается при достижении коэффициентом интенсивности напряжений K_1 определенной, критической величины K_{IC}, зависящей от геометрии образца или элемента и являющейся характеристикой материала, определяемой как

$$K_{IC} = \sigma_c \sqrt{\pi a} f \ , \qquad (10.39)$$

где σ_c – критическое напряжение разрушения; a – половина длины трещины; f – коэффициент, учитывающий форму элемента конструкции или образца, размер и конфигурацию трещины. В настоящее время оценка характеристик трещиностойкости стандартизирована (ГОСТ 25. 506-85).

10.5.5.2. *Образцы и методика испытаний.* Основой для определения характеристик трещиностойкости является разрушение растяжением или изгибом образцов с усталостными трещинами, некоторые основные формы которых представлены на рис.10.59.

Создание начальной усталостной трещины на этих образцах следует осуществлять при максимальном усилии переменного нагружения, которому соответствует $K_{f\max} \le 0{,}75\ K_{IC}$. Конечный участок длиной не менее 0,3 от всей длины усталостной трещины должен создаваться при $K_{f\max} \le 0{,}6\ K_{IC}$. Число циклов нагружения при создании усталостной трещины должно быть не менее $5 \cdot 10^4$. В процессе испытаний автоматически регистрируется диаграмма нагрузка-перемещение берегов трещины (P-v) или реже, нагрузка-прогиб (P-f) в большом масштабе (не менее 100:1). Техника записи таких диаграмм приведена в ГОСТ 25.506-85.

Характерные типы диаграмм нагрузка-перемещение и методика их обработки показаны на рис.10.60. По диаграммам «P-v» (или «P-f») определяют P_Q – расчетную нагрузку на образец и P_C – максимальную нагрузку, действующую на образец в случае диаграммы типа 1 $P_Q = P_C$.

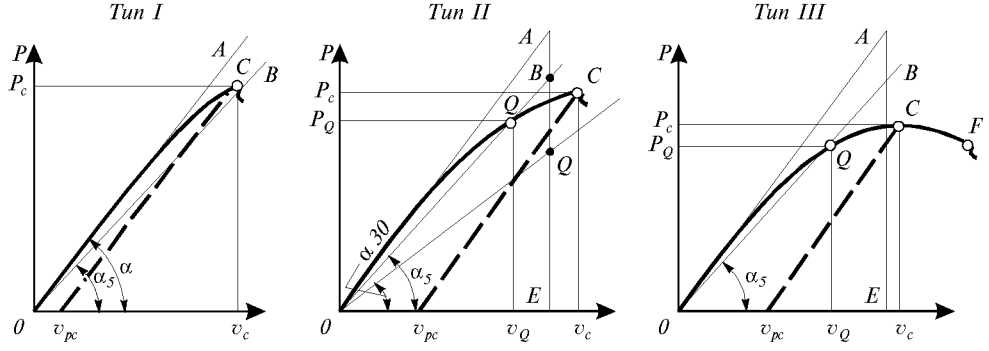


Рис.10.60. Основные типы диаграмм нагрузка–перемещение и схема их обработки. Тип I, II, III

Длину трещины l измеряют на изломе образцов. По значениям P_Q и l вычисляют величины K_Q (расчетная величина коэффициента интенсивности напряжений) по формуле

$$K_Q = \frac{P_Q}{t\sqrt{b}} \cdot Y\ , \qquad (10.40)$$

где Y – поправочная функция на форму образца и длину трещин.

Например, для образца рис.10.59 *а*.

$$Y = 13{,}74/1 - 3{,}380\left(\frac{l}{b}\right) + 5{,}572\left(\frac{l}{b}\right)^2 .$$

По величине K_Q и $\sigma_{0,2}$ (для температуры испытаний) вычисляют расчетные размеры толщины $t_{\text{рк}}$

$$t_{\text{рк}} = 2{,}5\left(\frac{K_Q}{\sigma_{0,2}}\right)^2 .$$

Величину K_Q принимают равной K_{1C}, если для диаграмы типа I (рис.10.60) и III $P_C \le 1{,}1\,P$ и если выполняется неравенство одной из двух групп:

1) $t_{\text{рк}}/t \ge 1$ и $\varphi = \dfrac{t - t_c}{t} \cdot 100\% \le 1{,}5\%$

2) $v \le 1{,}2 v_Q$ для диаграмм типа II и III.

10.5.5.3. *Оценка статической трещиностойкости*. Оценка характеристик статической трещиностойкости относительно мягких строительных сталей технически достаточно сложна. Корректно оценить K_{1C} для мягких строительных сталей толщиной 10 – 20 мм удается лишь при самых низких климатических температурах. В таблице 10.7 представлены значения K_{1C} при температуре минус 70°С для основных строительных сталей.

Из таблицы видно, что по мере повышения прочности стали и повышения дисперсности ее структуры вязкость разрушения проката растет.

Таблица 10.7. Вязкость разрушения при минус 70°С (K_{1C}^{-70}) проката толщиной 20 мм (образцы типа двухконсольной балки – ДКБ)

Сталь	Состояние поставки	$\sigma_т$, МПа	K_{1C}^{-70}, МПа $\sqrt{м}$
С255	горячая прокатка	255	44
С345	то же	355	66
С390Т	улучшение	435	100
С390	нормализация	420	88
С390*)	то же	425	100
С590К	улучшение	693	132

*) Сталь 390 повышенной чистоты.

Величину J_{1C} удобно определять при испытании двух идентичных образцов (рис.10.61 *а*) с различной длиной трещины. Испытание образцов идет с записью диаграмм «*P*–*v*», где *V* – перемещение точек приложения нагрузки. $J_к$ определяется как отношение приращения площадей под диаграммами к разнице в длинах трещин (рис.10.61*б*)

$$J_{1C} = \frac{\Delta Q}{(l_2 - l_1)\cdot t}, \quad (10.41)$$

где ΔQ – площадь диаграммы «*P*–*v*», ограниченная двумя кривыми, записанными при нагружении образцов с длиной трещин l_1 и l_2, t – толщина образца.

Испытание проведено корректно, если $v_{1C} \approx v_{2C}$.

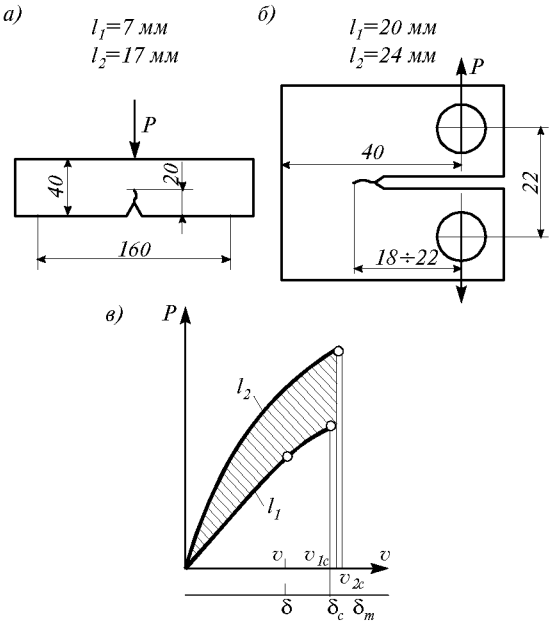


Рис.10.61. Образцы для испытаний (*а*, *б*) и схема определения *I* – интеграла (*в*). Толщина проката 20 мм

10.5.5.4. *Оценка динамической трещиностойкости*. Важные в практическом отношении результаты можно получить при оценках динамической вязкости разрушения.

Эффективность таких испытаний на примере материалов для магистральных газопроводов показана в таблице 10.8 и на рис.10.62.

В таблице 10.8 представлены значения K_{1C}, полученные при статических и динамических испытаниях ($K_{1C}^{д}$),а также испытаниях на ударную вязкость на образцах с острым V-образным надрезом.

Таблица 10.8. Вязкость разрушения низколегированных трубных сталей

Марка стали	Толщина проката, мм	$\sigma_т$, Н/мм^2	K_{1C} при -60°С, МПа$\sqrt{м}$	K_{1C}^{∂} при -60°С, МПа$\sqrt{м}$	KCV^{-60}, Дж/см^2	l_c при -60°С, мм
17Г1СУ	12	403	78	30,5	30	2,0
14Г2АФ	12	425	80	46,8	30	12,5
08Г2МБ	14	533	84	66,2	60	16,0
10Г2Ф	16	434	97	76,2	80	15,0
09Г2ФБ	14	541	106	114,8	80	32,7

Видно, что величины K_{1C}^{∂} ранжируют стали по трещиностойкости гораздо лучше, чем K_{1C} или KCV, т.е. этот метод наиболее чувствителен к изменению микроструктуры стали.

10.5.5.5. *Испытания элементов конструкции.* В последние годы широкое распространение нашли низкотемпературные испытания при статических нагрузках элементов конструкций с конструктивными формами пониженной хдадостойкости (рис.10.63) с целью выявления возможности использования таких решении при конструировании [49]. Примеры температурных зависимостей испытаний таких элементов представлены на рис.10.62. Здесь совокупность геометрических параметров конструктивного решения, технологические особенности нагружения объединяются в понятие конструктивно-технологической формы (КТФ). На практике инициирование хрупкого разрушения конструкций происходит в зонах их конструктивно-технологических несовершенств. Однако часто при проведении этих полезных, но дорогих экспериментов, факторов охрупчивания (конструктивная форма пониженной хладостойкости, штатные дефекты при стандартном изготовлении, низкая климатическая температура) оказывается недостаточно для перехода элемента конструкции в хрупкое состояние даже при наиболее низких климатических температурах (например, рис.10.64). Отсюда возможность получения излишне оптимистических представлений о хладостойкости ряда стандартных элементов.

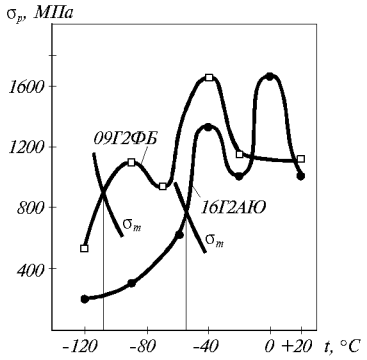


Рис.10.62. Температурная зависимость разрушающих напряжений, испытания на трехточечный ударный изгиб образцов с усталостной трещиной

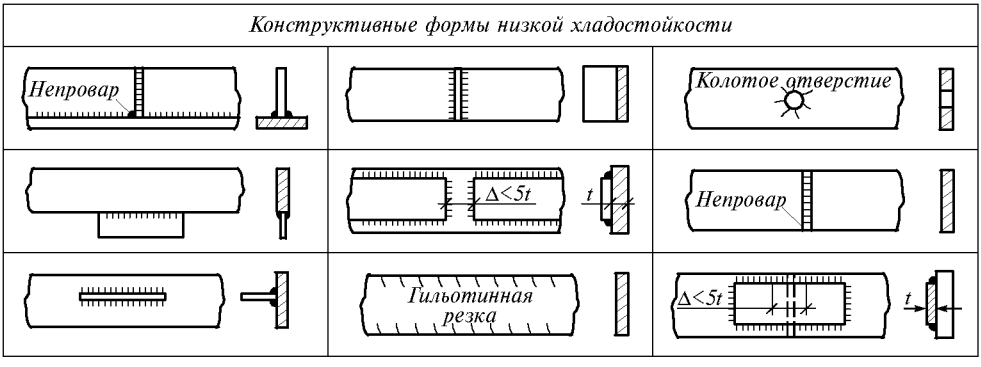


Рис.10.63. Конструктивные формы низкой хладостойкости

Низкотемпературные испытания узлов необходимо проводить при изготовлении нестандартных тяжело нагруженных конструкций, при условии изготовления образцов-элементов конструкций из того же материала, что и конструкция и по технологии, принятой для ее изготовления.

На рис.10.65 приведен пример такого испытания. Материал оказался более хладостойким, чем принято по проекту (гарантии по удару при -70°С вместо -40°С по проекту). Даже при наличии до 70% непровара конструкции не разрушались хрупко в диапазоне климатических температур. Такой результат дает полную гарантию надежной работы конструкции.

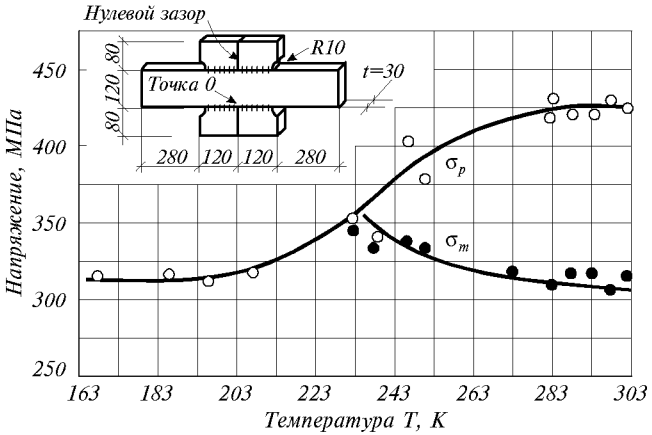


Рис.10.64. Температурная зависимость разрушающего напряжения при испытании узла с низкой хладостойкостью

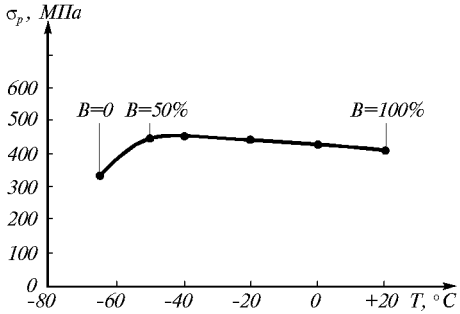


Рис.10.65. Результаты температурных испытаний конструкции из гнутосварных труб типа «Молодечно», 140×140×6 мм, $R_y = 335$ МПа

В настоящее время для охлаждения и испытания крупных образцов и узлов разработаны простые и вполне современные холодильные камеры. Здесь в качестве хладоносителя используются пары азота. Камера устанавливается на образец, закрепленный в захватах испытательной машины. Испарительные ванны расположены в верхней части камер. Измерение температуры осуществляется хромель-копелевыми термопарами, плотно прижимаемыми к поверхности образцов.

10.5.5.6. *Корреляции результатов испытаний, полученных различными методами*. Установление корреляции между характеристиками сопротивления хрупкому разрушению и обычными механическими свойствами, а также между параметрами трещиностойкости посвящено большое количество работ, выполненных у нас и за рубежом. В них пытались найти связь между критическими температурами хрупкости, критериями трещиностойкости и другими характеристиками разрушения, полученными для лабораторных и крупноразмерных образцов при статическом, ударном и циклическом нагружениях. При этом особое внимание уделялось оценке расчетных характеристик разрушения по результатам наименее трудоемких и достаточно простых испытаний. В ряде случаев поиск корреляций связан с необходимостью определения служебных свойств материалов на основе данных лабораторных исследований. Как правило, установленные корреляции относятся к определенному классу или уровню прочности и пластичности материала. Степень корреляции характеристик разрушения материала зависит от ряда факторов и может колебаться в довольно широких пределах.

Несмотря на невозможность получения общих корреляционных связей между характеристиками сопротивления хрупкому разрушению, а также между вязкостью разрушения и другими механическими свойствами, установление частных корре-

ляций имеет большое практическое значение для оценки несущей способности строительных конструкций по критериям хрупкой прочности и трещиностойкости. Многие приведенные ниже корреляционные зависимости установлены для строительных сталей средней и высокой прочности.

Достаточно тесные корреляции установлены между температурой нулевой пластичности (ТНП), используемой для построения диаграмм анализа разрушения конструкций (ДАР), и критическими температурами хрупкости, определяемыми для обычных испытаний на ударную вязкость.

$$\begin{aligned} \text{ТНП} &= 0{,}57(t^V_{K_{50}}) - 21^\circ\text{C} \\ \text{ТНП} &= 0{,}65(t^V_{K_{15}}) - 4^\circ\text{C}, \end{aligned} \tag{10.42}$$

где $t_{K_{50}}$ и $t_{K\,15}$ – критические температуры, устанавливаемые по доле вязкой составляющей в изломе (50 и 15%) образцов на ударную вязкость типа II по ГОСТ 9454-78.

Температура остановки трещины в конструкции (ТОТ) также коррелирует с $t_{K_{50}}$

$$\text{ТОТ}(^\circ\text{K}) = 0{,}864(t^V_{K_{50}}) + 25\,. \tag{10.43}$$

Кроме того

$$\text{ТОТ} \approx t_{K_{25}}\,,$$

где $t_{K_{25}}$ – критическая температура хрупкости, определяемая по 25% вязкой составляющей в изломе образцов на ударный изгиб.

Критическую температуру ТОТ можно установить и по результатам испытания образцов на ударный изгиб по методу ДWTT

$$\text{ТОТ} \approx T_{\text{к}}^{\text{дWTT}}\,,$$

где $T_{\text{к}}^{\text{дWTT}}$ – критическая температура хрупкости, соответствующая 20 - 25% вязкой составляющей в изломе образцов, испытываемых по методу ДWTT.

Смещение $T_{\text{к}}^{\text{дWTT}}$ и $t^V_{\text{к}}$ одинаково при переходе от одной стали к другой. Корреляции между этими температурами имеют вид

$$T_{\text{к}}^{\text{дWTT}} = t_{\text{к}}(^\circ\text{K}) + 17 \tag{10.44}$$

или

$$T_{\text{к}}^{\text{дWTT}} = t_{\text{к}_{95\text{-}100}}\,.$$

Для низколегированных сталей существует довольно устойчивая связь между ТНП и ТОТ ТОТ = ТНП + 33.

Характеристики трещиностойкости (K_c, K_{1c}, K_{1d}, δ_c) коррелируют с такими механическими свойствами сталей как $S_{\text{к}}$, $\sigma_{0,2}$, KCV, A, a_p и др., где A - работа разрушения образцов типа Шарпи (тип II по ГОСТ 9454-78); a_p - ударная работа распространения трещины, определяемая при испытании на ударную вязкость.

Некоторые из корреляционных зависимостей между указанными характеристиками имеют вид:

$K_{1c} = 0{,}39(S_{\text{к}} - \sigma_{0,2})$; где $S_{\text{к}}$ – сопротивление отрыву $S_{\text{к}} = f(d)$

$S_{\text{к}} = \sigma_b(1 + 1{,}4\psi_{\text{к}})$

$K_{1c}/E = 2(A)^{3/2}$

для области вязко-хрупкого перехода

$$\left(\frac{K_{1c}}{\sigma_{0,2}}\right)^2 = \frac{5}{\sigma_{0,2}}\left(A - \frac{\sigma_{0,2}}{20}\right) \tag{10.45}$$

для области верхних значений A на кривой $A = f(t)$

$$K_{1c} = \sqrt{2/3\, E\sigma_{0,2} n^2 \varepsilon'}\,, \tag{10.46}$$

где n – коэффициент деформационного упрочнения; ε' – истинная деформация до разрушения гладкого образца $\left(\varepsilon' = \ln\dfrac{1}{1-\psi_к}\right)$

$$\delta_{1c}^{z} = \frac{\pi}{40}\cdot\frac{\mathrm{KCV}_z^{\max}}{\sigma_т^z}\,, \tag{10.47}$$

где δ_{1c}^{z}, $\mathrm{KCV}_z^{\max}$ и $\sigma_т^z$ – характеристики разрушения в Z направлении (по толщине). Установлено, что для строительных сталей марок СтЗ, 09Г2С и 14Г2АФ отношение $\delta_c/\delta_c^z = 2...7$. Имеющиеся в литературе данные свидетельствуют о том, что

$$\delta_c = f(KCV);\quad K_c = f\left(\frac{\sigma_т}{\sigma_b}\right);\quad K_{1c} = f\left(\frac{\sigma_{-1}}{\sigma_{0,2}}\right).$$

Для строительных сталей получена зависимость

$$K_{1d} \approx 37{,}5\sqrt{a_p}\,. \tag{10.48}$$

Наличие корреляции между характеристиками трещиностойкости $K_c = f(K_{1c})$; $K_{1d} = f(K_{1c})$; $K_{th} = f(K_{1c})$ и др. позволяет при поверочных расчетах учитывать особенности работы материала в конструкции. При этом можно воспользоваться следующими зависимостями:

$$\frac{K_{1d}}{K_{1c}} = 1{,}27.....1{,}60\ ;\quad K_{th} \approx 0{,}1K_{1c}\ ;$$
$$K_c = K_{1c}^2(1 + 1{,}4\beta_{1c})\,, \tag{10.49}$$

где $\beta_{1c} = \dfrac{1}{t}(K_{1c}/\sigma_т)^2$, t – толщина.

Экспериментальными исследованиями, выполненными за рубежом, показано, что скорость роста усталостной трещины увеличивается с уменьшением K_{1c}. Линейная корреляция между константами c и n в степенном уравнении Пэриса $dl/dN = c(\Delta K)^n$ также зависит от K_{1c} и $\sigma_{0,2}$ материала.

10.5.5.7. *Испытательная техника*. Для испытания металлов на статическое растяжение, сжатие и изгиб применяются машины с механическим или гидравлическим приводом. Обычно машины с максимальной нагрузкой 10^5Н имеют механический привод, а с максимальной нагрузкой > 10^5Н – гидравлический.

Для испытаний со статическим нагружением применяются отечественные испытательные машины Армавирского завода испытательных машин (ЗИМ) типа Р5, УМЭ-10ТМ, УМЭ-100, УРС-50/50 и другие, а также зарубежных фирм, в том числе производства завода испытательных машин в г. Лейпциге (ЦДМ-30, ЦДМ-100, EUS-100 и др.), английской фирмы «Инстрон», немецкой фирмы «Шенк» и другие.

Для проведения испытаний на усталость находят применение различные виды испытательных машин, отличающихся способом получения циклических нагрузок. Наибольшее распространение получили испытательные машины с электромеханическим и гидравлическим приводом, снабженные пульсатором. Высокочастотные пульсаторы с электромагнитным приводом позволяют достичь частоты нагружения до 300 Гц. Высокие частоты нагружения получают также на резонансных испытательных машинах.

В связи с наличием большого числа факторов, определяющих способность сопротивления материалов деформированию и разрушению разработаны и используются машины, отличающиеся автоматизацией процесса циклического нагружения, записи зависимости $\varepsilon - \sigma$, а также обеспечивающие возможность получения требуемой частоты и формы цикла нагружения (мягкое, жесткое, асимметрия).

Выбор испытательной машины производится, исходя из способа нагружения, нагрева и охлаждения в процессе испытания; принципов измерения и регистрации основных параметров нагружения; системы регулирования нагрузок, деформаций и температур.

Упруго-пластические деформации образца при малоцикловых испытаниях замеряются с помощью деформометров, представляющих собой датчик перемещений. Для измерения усилий в испытательной машине используется динамометр. Температура измеряется термопарами. Диаграммы деформирования могут записываться двухкоординатными приборами типа ПДС-021, ПДП и др.

В последние годы получают распространение программные испытательные установки, снабженные следящими системами нагружения с обратной связью. Они имеют существенные преимущества перед машинами позиционного регулирования. Программные испытательные установки сервогидравлического и электрогидравлического типа представляют собой универсальные испытательные машины, позволяющие вести статическое, повторностатическое и усталостное нагружение образцов.

10.5.6. Сопротивление усталости сварных соединений. Большинство сварных металлоконструкций (подкрановые балки, балки рабочих площадок, элементы конструкций бункерных и разгрузочных эстакад, газгольдеры, резервуары, воздухонагреватели доменных печей и др.) в процессе эксплуатации испытывают действие переменных во времени напряжений. В результате действия таких напряжении в элементах конструкции могут происходить необратимые изменения, приводящие к образованию трещин. Постепенно развиваясь, трещина в конце концов приводит к разрушению конструкции или отдельного ее элемента. Это явление называется усталостью металла. Исследования усталостных повреждений позволили выявить две значительно отличающиеся друг от друга области циклического нагружения и деформирования.

Первая область - циклическое нагружение, при котором деформации во время каждого цикла почти полностью упруги. Для этой области характерны относительно малые нагрузки и большие долговечности (более 10^4-10^5 циклов). Эта область называется многоцикловой усталостью. Другая область - циклическое нагружение, при котором во время каждого цикла возникают значительные пластические деформации. Эта область характеризуется большими по величине нагрузками и малыми долговечностями (не более 10^4-10^5 циклов), ее называют малоцикловой усталостью. Даже в тех случаях, когда действующие на конструкцию нагрузки, номинально малы, материал в зонах конструктивной концентрации напряжений будет локально пластически деформироваться, т.е. будет работать в режиме малоцикловой усталости.

При обследовании во многих сварных конструкциях обнаруживаются усталостные трещины. Нередко они являлись причиной разрушения. При низких температурах усталостные трещины могут служить очагом хрупкого разрушения, что подтверждается анализом разрушенных элементов сварных конструкций.

Выносливость сварных металлоконструкций зависит от ряда факторов. Основными из них являются: величина максимального напряжения в рассчитываемом элементе σ_{max} (или амплитуда напряжений); концентрация напряжений; характер циклической нагрузки (стационарная, нестационарная); число циклов нагружений за период эксплуатации; температура эксплуатации конструкции и др.

Известно, что сварка создает механическую неоднородность в соединении и остаточные напряжения. В свою очередь влияние остаточных напряжений зависит от сочетания таких факторов, как концентрация напряжений, асимметрия цикла $R_к$, размер элемента и состояние его поверхности. Влияние механической неоднородности зависит от соотношения характеристик прочности и пластичности основного металла, металла сварного шва и зоны термического влияния.

10.5.6.1. *Возникновение и распространение усталостных трещин.* Усталостное разрушение сварных соединений и металла вообще рассматривается как процесс постепенного разрушения, состоящий из зарождения и распространения или роста трещины до размера, при котором наступает ее нестабильное развитие. С физической точки зрения трудно разделить эти две стадии. Однако такое разделение процесса усталостного разрушения существенно облегчает изучение и прогнозирование усталостной прочности и долговечности сталей и их соединений.

Считается установленным, что, начиная с первого цикла нагружения, во всем объеме или в отдельных областях соединения происходят структурно-механические изменения, которые приводят к изменению его механических свойств.

Обычно за начало стадии распространения трещины принимают, появление видимой макротрещины длиной 1 - 2 мм. Хотя, строго говоря, процесс распространения трещины идет с начала появления в металле микротрещины, охватывающей одно или два зерна. По экспериментальным данным долговечность элемента конструкции с трещиной может составлять от 10 до 80% общей долговечности.

На стадии возникновения усталостной трещины долговечность при многоцикловой усталости определяется по кривой усталости (кривой Велера), построенной по результатам испытания стандартных образцов (круглого или прямоугольного сечения) по ГОСТ 25.502-79, а также других типов образцов натурной толщины, в том числе сварных, и натурных элементов конструкций. Кривая Велера показывает число циклов N, которое при данном напряжении образец выдержал до разрушения (появления трещины), а также изменение N при снижении амплитуды напряжений $\sigma_a = \sigma_{max} - \sigma_{min}$. В двойных логарифмических координатах кривая усталости принимает вид прямой (рис.10.66). По данным большого количества испытаний, координаты точки перелома зависимости $\lg\sigma_a - \lg N$ соответствуют пределу выносливости, при котором N примерно равно $2 \cdot 10^6$ циклов. По отечественным данным перелом кривой лежит в области 1,5÷4 млн.циклов. Предел выносливости изменяется в зависимости от материала и типа образца, вида и характера цикла нагружения, концентрации напряжений. Для аналитического описания кривой Велера выведены различные формулы. Линейная зависимость описывается формулой

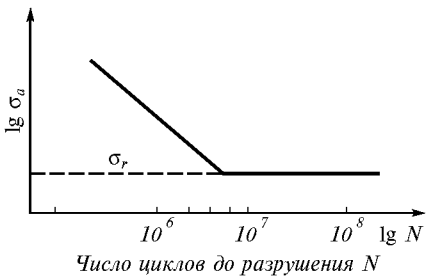


Рис.10.66. Зависимость амплитуды напряжений σ_a и числа циклов до разрушения N (кривая Велера) в двойных логарифмических координатах

$$\sigma_r^{огр} = \sigma_N \left(\frac{N}{n}\right)^k, \qquad (10.50)$$

где $\sigma_r^{огр}$ - предел ограниченной выносливости при числе циклов n; σ_N - напряжения, вызывающее разрушение после N циклов; k – угловой коэффициент прямой.

Во многих случаях для описания кривой усталости используется экспоненциальное уравнение с N в показателе экспоненты

$$\sigma = \sigma_r^{\frac{m}{N+B}} \quad \text{или} \quad \ln\sigma - \ln\sigma_r = \frac{m}{N+B}, \tag{10.51}$$

где σ_r – предел выносливости при заданном коэффициенте асимметрии цикла $r \approx \sigma_{min}/\sigma_{max}$; σ – действующее напряжение; m, B – параметры кривой усталости.

Эти соотношения позволяют вычислить предел ограниченной выносливости при любом числе циклов нагружения в пределах прямолинейного участка кривой усталости по известному наклону кривой и разрушающему напряжению в одной точке, соответствующей тому же типу нагружения. Одна кривая усталости характеризует поведение образца при одном каком-либо типе нагружения. Для представления общей картины поведения соединения или элемента конструкции необходима серия кривых усталости для различных типов нагружения.

Обычно пределы выносливости натурных элементов сварных металлоконструкций σ_r значительно ниже пределов выносливости стандартных лабораторных и даже крупноразмерных образцов. Это снижение обуславливается суммарным влиянием различных конструкционных, технологических и эксплуатационных факторов. Существенное влияние на усталостную прочность сварных соединений оказывают следующие факторы: абсолютные размеры поперечного сечения; концентрация напряжений; остаточные напряжения, в том числе сварочные; дефекты сварки; температура эксплуатации; частота нагружения; коррозия и др.

Долговечность на стадии возникновения усталостной трещины при малоцикловой усталости в соответствии с деформационным критерием разрушения определяется из соотношения между числом циклов до появления трещины N_t и амплитудой циклической пластической деформации

$$l_a N^{m_e} = c_\psi, \tag{10.52}$$

где l_a – амплитуда пластической деформации; c_ψ – параметр пластичности материала; m_e – постоянная, характеризующая угол наклона кривой малоцикловой прочности.

Для многих конструкционных сталей m_e в первом приближении равна ~ 0,5–0,6.

Скорость роста трещин при обычной усталости описывается математически с помощью коэффициента интенсивности напряжений (КИН)

$$dl/dN = c(\Delta K)^n, \tag{10.53}$$

где c и n – постоянные для данного материала, зависящие от частоты нагружения, асимметрии и формы цикла, окружающей среды; ΔK – размах КИН ($\Delta K = K_{max} - K_{min}$). Скорость трещины при малоцикловой усталости в значительной степени определяется характеристиками прочности и пластичности стали (σ_b^t, $\sigma_{0,2}^t$, $\psi_к^t$), конструктивными формами и условиями эксплуатации:

$$dl/dN = f\left[\sigma_{0,2}^t; \sigma_b^t; \psi_к^t; \alpha_\sigma; \sigma_n; t^э; L^э; N^э; \sigma_{1;2;3}; l_0\right], \tag{10.54}$$

где α_σ – коэффициент концентрации упругих напряжений; σ_n – номинальное напряжение; t – температура; L – время выдержки в каждом цикле; N – число циклов нагружения; l_0 – начальный (исходный) размер трещины; индекс «Э» указывает на то, что характеристика принята с учетом режимов эксплуатации.

В простейшей форме уравнение (10.54) принимает вид:

$$\frac{dl}{dN} = \frac{c(\Delta K)^n}{(1-R)K_{cf} - \Delta K}, \tag{10.55}$$

где R – коэффициент асимметрии цикла; K_{cf} – критическое значение КИН при циклическом нагружении; c и n – константы циклической трещиностойкости материала.

10.5.6.2. *Оценка скорости распространения усталостных трещин.* Усталостная трещина, возникающая при циклическом нагружении, или другой трещиноподобный дефект конструкции, будут расти при дальнейшем циклическом нагружении до тех пор, пока не достигнут критического размера, после чего наступает разрушение.

Для оценки скорости роста усталостной трещины (СРУТ) и увеличения размера начального дефекта до критического предложено много различных моделей. Все они сводятся к выражению вида

$$dl/dN = f(\Delta\sigma; l; c), \qquad (10.56)$$

где $\Delta\sigma$ – размах номинальных напряжений; l – длина трещины; c – параметр, зависящий от среднего значения нагрузки, свойств материала и некоторых других переменных.

Из уравнения (10.56) видно, что рост усталостной трещины (РУТ) зависит от размаха циклического напряжения и длины трещины. Учитывая, что коэффициент интенсивности напряжения (КИН) зависит от величины действующего напряжения и размера трещины, величина dl/dN связана с размахом КИН ($\Delta K = K_{\max} - K_{\min} = \Delta\sigma\sqrt{\pi l}$). Таким образом, КИН является ключевым параметром, контролирующим распространение трещины.

Скорость роста трещины dl/dN, характеризуемая наклоном кривых зависимостей l от N, возрастает как с увеличением нагрузки, так и длины трещины. Для получения зависимости между dl/dN и ΔK СРУТ определяется по наклону кривых зависимости l от N между двумя соседними точками или путем дифференцирования кривой $l - N$ по точкам.

Значения ΔK вычисляются по размаху действующей нагрузки и среднему значению длины трещины в каждом интервале с помощью формулы для КИН, соответствующей заданной геометрии испытываемого образца с трещиной. Для определения СРУТ обычно используют плоские образцы натурной толщины на внецентренное растяжение или трехточечный изгиб. Длина трещины измеряется в процессе испытания визуальными методами, киносъемкой, методом разности потенциалов, методами, основанными на изменении податливости, и другими.

Зависимость dl/dN от ΔK в логарифмических координатах в большинстве случаев получается в виде S-образной кривой (рис.10.67), которая асимптотически приближается к обоим граничным условиям распространения трещины - ΔK_{th} и ΔK_c, где ΔK_{th} - пороговое значение размаха КИН, ниже которого усталостная трещина не способна к росту; ΔK_c - размах КИН, при котором происходит разрушение, то есть когда $K_{\max} = K_c$.

На кинетической диаграмме (рис.10.67) наблюдается 3 области. В области II (так называемый пэрисовский участок зависимости $\lg dl/dN - \lg \Delta K$) зависимость между dl/dN и ΔK с достаточной точностью описывается степенным уравнением

$$dl/dN = c(\Delta K)^n = c(\Delta\sigma\sqrt{\pi l}Y)^n, \qquad (10.57)$$

где c и n - постоянные, зависящие от материала и условий нагружения (n характеризует наклон кривой, c - значение dl/dN при $\Delta K = 1$ кг·мм$^{-3/2}$).

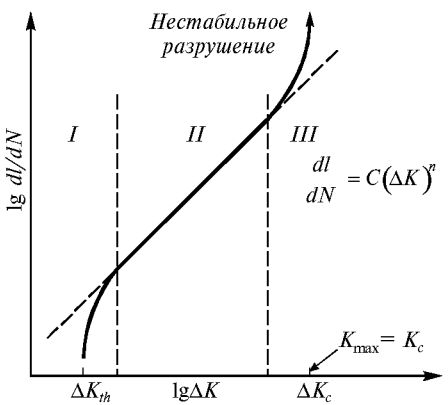


Рис.10.67. Зависимость $\lg dl/dt$ от $\lg \Delta K$
I - область зарождения трещины; II - область стабильного роста; III - область ускоренного развития трещины

Для металлов n изменяется в пределах 2,5 - 9, увеличиваясь с повышением $\sigma_{ном}$ цикла и понижением сопротивления материала упруго-пластическим деформациям. Для строительных сталей n изменяется от 2,5 до 4, а c является функцией n, $c = f(n)$

$$c = 7{,}94 \cdot 10^{-8} / 24{,}5^{n} .$$

СРУТ зависит от коэффициента асимметрии цикла номинальных напряжений R_σ. При заданном размахе КИН СРТ возрастает с увеличением R_σ и приближением КИН к критическому. В средней линейной части кинетической диаграммы РУТ влияние R_σ в зависимости от материала может быть мало.

Для описания кинетической зависимости РУТ предложено более 50-ти уравнений, учитывающих асимметрию цикла и распространяющихся на все 3 области диаграммы. Например, уравнение Эрдогана

$$\frac{dl}{dN} = \frac{c(\Delta K^{n} - \Delta K_{th}^{n})}{(1-R)K_{c} - \Delta K}, \qquad (10.58)$$

где $R = \dfrac{K_{\min}}{K_{\max}}$.

На скорость роста трещины помимо R оказывают влияние также температура, частота нагружения, коррозия и другие факторы.

10.5.7. Схема расчета элементов конструкции на сопротивление хрупкому и усталому разрушению. Оценка надежности в отношении усталостного и хрупкого разрушения, а также установление ресурса безопасной эксплуатации металлоконструкций производится на основе силовых (σ, K_c) энергетических (J_c, G_c) и деформационных (δ_c, ψ) критериев разрушения. Исходными параметрами для расчета сопротивления конструкций хрупкому и усталостному разрушению служат данные технического освидетельствования, при котором устанавливаются фактические механические свойства материала конструкции, уровень дефектности и эксплуатационные параметры. *В* рамках расчета на хрупкую прочность определяются минимальная температура безопасной эксплуатации, допускаемые или предельные нагрузки и максимальный допустимый размер дефекта. По результатам расчета даются рекомендации по снижению уровня нагруженности, устранению дефектов, а также назначению минимальной температуры дальнейшей эксплуатации.

Расчет на обычную и малоцикловую усталость производится с целью установления остаточного ресурса по стадии зарождения трещины. В случае если ресурс конструкции на этой стадии исчерпан и в конструкции обнаружены развивающиеся усталостные трещины небольшой длины - существенно меньше критических, определяемых расчетом на статическую трещиностойкость, производится оценка скорости роста усталостных трещин. Затем определяется ресурс конструкции с учетом докритического роста трещин.

Расчетная оценка сопротивления строительных металлоконструкций хрупкому разрушению производится в основном для конструкций, не содержащих трещиноподобных дефектов. В этом случае характеристиками материалов, используемыми в расчете, являются предел текучести R_{yn}, временное сопротивление R_{un} и критические температуры хрупкости элементов конструкций ($T_{к_1}^{к}$ и $T_{к_2}^{к}$). Для центрально и внецентренно растянутых элементов, а также зоны растяжения изгибаемых элементов конструкций, возводимых в климатических районах I_1, I_2, II_2, II_3, II_4 и II_5, проверка на прочность с учетом сопротивления хрупкому разрушению проводится по формуле

$$\sigma_{max} \le \beta \sigma_к / \gamma_u , \qquad (10.59)$$

где σ_{max} – наибольшее растягивающее напряжение в расчетном сечении элемента, вычисленное по сечению «нетто» без учета коэффициента динамичности и φ_b ; β – коэффициент, учитывающий влияние температуры на сопротивление разрушению элемента конструкции; $\sigma_к$ – расчетное критическое напряжение; γ_u – коэффициент неоднородности по материалу, для основного металла принимается 1,3.

Максимальные напряжения, определенные поверочным расчетом по формуле (10.59), должны быть не выше расчетных напряжений, вычисленных по разделу 5 СНиП II-23-81*.

Расчетные критические напряжения при температурах эксплуатации $T_2 \le T_{min} < T_1$, определяются по формуле

$$\sigma_к = (R_{un} - R_{yn}) \frac{T^э_{min} - T_2}{T_1 - T_2} + R_{yn} , \qquad (10.60)$$

где $T^э_{min}$ – минимальная расчетная температура эксплуатации; T_1 и T_2 – первая и вторая расчетные температуры хрупкости элементов конструкций, определяемые по первым и вторым критическим температурам хрупкости стали ($T_{к1}$ и $T_{к2}$) с учетом смещения их под действием конструктивных и технологических факторов и соответствующих температурных запасов вязкости ΔT_1 и ΔT_2 .

Коэффициент β, учитывающий изменение способности стали к макроскопической деформации при понижении температуры от T_1 до T_2 следует определять по формуле

$$\beta = 0{,}35 \frac{T^э_{min} - T_2}{T_1 - T_2} + 0{,}65 . \qquad (10.61)$$

При температурах эксплуатации $T^э_{min} < T_2$ следует изменить конструктивное решение или применить более хладостойкую сталь. Для удобства расчета элементов стальных конструкций на прочность с учетом хрупкого разрушения в СНиП II-23-81* формула (10.59) записана в виде

$$\sigma_{max} \le \beta R_u / \gamma_u , \qquad (10.62)$$

где β - коэффициент, принимаемый по СНиП II-23-81*.

Расчетная оценка сопротивления хрупкому разрушению элементов стальных конструкций, находящихся в хрупком и квазихрупком состояниях ($T^э_{min} - T_1$) и имеющих небольшие трещиноподобные дефекты ($l < 50$ мм) производится по критериям механики разрушения (K_c и δ_c). При этом сопротивление хрупкому разрушению считается обеспеченным, если для рассматриваемого дефекта выполняется условие:

$$K_1 \le K_c / n_к$$

$$\delta_1 \le \delta_c / n_\delta ,$$

где K_c – предельное значение коэффициента интенсивности напряжений (КИН) при температуре $T = T^э_{min} - \Delta T$; δ_c – предельное значение раскрытия трещины (РК) при температуре $T = T^э_{min} - \Delta T$; $n_к$ и n_δ – коэффициенты надежности по трещиностойкости материала (принимаются от 1,5 до 2 в зависимости от степени ответственности конструкции); ΔT – температурный запас вязкости материала, принимаемый равным 20°С; K_1 и δ_1 – КИН и РК в расчетном сечении.

Предельные значения КИН и РК (K_c и δ_c), являющиеся наряду с R_{yn} и R_{un} характеристиками материала, определяются либо экспериментально, либо принимаются по соответствующим таблицам в справочной литературе. Предельные значения КИН для строительных сталей Ст3сп, 09Г2С,10ХСНД и 16Г2АФ в толщинах от 10 до 30 мм можно найти в Рекомендациях по учету влияния дефектов [50].

Формулы для вычисления КИН и РК в расчетных сечениях варьируются в зависимости от вида трещины (сквозной или поверхностной), ее относительных размеров, геометрии рассчитываемого элемента и схемы его нагружения.

Выражение для КИН в расчетном сечении имеет вид

$$K = \sigma_{\max}\sqrt{\pi l_{эф}}\, f(\Delta K), \tag{10.63}$$

где $l_{эф} = l_0 \cdot \varphi_т$ – эффективный размер трещиноподобного дефекта с учетом поправки на пластичность; $f(\Delta K)$ – поправочная функция, учитывающая конструктивную форму, вид и относительные размеры дефектов; $l_0 = 1{,}1$ – расчетный размер дефекта (l_0 – выявленный при обследовании дефекта).

Выражения для поправочной функции и поправки на пластичность можно найти в соответствующей справочной литературе [40, 47].

При грубой оценке опасности того или иного дефекта в случае отсутствия данных о предельной трещиностойкости материала значения K_c и δ_c можно определить по имеющимся в литературе и приведенным выше корреляционным зависимостям.

При вязком состоянии материала конструкции ($T^{э}_{\min} > T_1$) проверка на трещиностойкость проводится с использованием расчетного сопротивления разрушению стали при наличии трещины – $R_c \approx 0{,}75\ R_u$.

В этом случае несущая способность проверяется по $\sigma_1 \le R_c/n_\delta$, где $n_\delta = 1{,}5$ – коэффициент безопасности по разрушению.

Расчет на усталость на стадии зарождения трещины производится в соответствии со СНиП II-23-81* по формуле

$$\sigma_{\max} \le \alpha\, R_v/\gamma_v\ , \tag{10.64}$$

где R_v – расчетное сопротивление усталости, принимаемое по табл.32 СНиП II-23-81* в зависимости от R_{un} и групп элементов конструкций, приведенных в табл.83* СНиП; α – коэффициент, учитывающий количество циклов нагружений и вычисляемый по соответствующим формулам, приведенным в § 9.2* СНиП; γ_v – коэффициент, определяемый по табл.33 СНиП в зависимости от вида нагружения и коэффициента асимметрии напряжений $r = \sigma_{\min}/\sigma_{\max}$.

Расчет на малоцикловую усталость на стадии зарождения трещины выполняется на основании деформационного критерия местной прочности

$$N = \frac{1}{n_N}\left[\frac{c_\psi}{\sigma_a - \dfrac{\sigma^{*}_{-1}}{1+\dfrac{1+r}{1-r}}}\right], \tag{10.65}$$

где $c_\psi = \dfrac{E}{4}\ln\dfrac{1}{1-\psi}$ – параметр пластичности стали; σ_a – амплитуда условных упругих местных напряжений; σ^{*}_{-1} – предел усталости с учетом остаточных сварочных напряжений; r – коэффициент асимметрии цикла нагружения; $n_N = 10$ – коэффициент запаса по числу циклов; $n_e = 1/m_e$ – показатель степени, характеризующий наклон кривой малоцикловой усталости.

Расчетная оценка продолжительности распространения усталостной трещины выполняется путем интегрирования уравнения Пэриса

$$dl/dN = c(\Delta K)^n,$$

где dl/dN – скорость роста усталостной трещины; ΔK – размах КИН $(\Delta\sigma\sqrt{\pi l})$; c и n – переменные, характеризующие природу материала, окружающую среду, частоту нагружения, температуру нагружения.

Могут использоваться и другие зависимости $dl/dN - \Delta K$. Интегрирование уравнения скорости роста усталостной трещины ведется в пределах от начального до конечного размеров дефекта

$$N = \int_{l_0}^{l_к} \frac{dl}{c\Delta K^n} = \frac{1}{(2-n)\cdot c(\Delta\sigma\sqrt{\pi})^n}\left[l_к^{(2-n)/2} - l_0^{(2-n)/2}\right]. \qquad (10.66)$$

10.5.8. Методы предотвращения хрупких и усталостных разрушений. Повышение сопротивления сварных конструкций усталостному и хрупкому разрушению достигается проведением целого комплекса мероприятий, осуществляемых на стадиях проектирования, изготовления и эксплуатации конструкций. При этом, как правило, мероприятия, повышающие усталостную прочность, благоприятно сказываются и на поведение элементов конструкций при эксплуатации в условиях пониженных климатических температур. Наиболее эффективными способами повышения усталостной и хрупкой прочности являются: применение сталей и сварочных материалов с высоким сопротивлением усталостному и хрупкому разрушению, снижение конструктивной и технологической концентрации напряжений, снятие растягивающих остаточных напряжений и создание сжимающих остаточных напряжений. Исходя из этого, на стадии проектирования следует добиваться максимального снижения уровня концентрации напряжений. Для этого необходимо:

- обеспечить плавное изменение сечения элементов и избегать входящих углов и подрезов;
- избегать резкого изменения поперечного сечения или жесткости элементов конструкций;
- требовать шлифования стыковых сварных швов с целью удаления усиления (шлифовки с ориентировкой следов обработки по направлению действующих напряжений);
- применять стыковые соединения вместо соединений внахлестку с угловыми швами;
- избегать крепления каких-либо деталей к элементам конструкции, работающим при высоких переменных напряжениях;
- применять непрерывные швы вместо прерывистых;
- избегать деталей конструкции, вызывающих местное стеснение деформаций;
- не допускать крепления вспомогательных деталей в зонах действия высоких переменных напряжений и не делать в них отверстий и др.

На стадии изготовления конструкций следует:

- обеспечить правильную подготовку кромок материала перед сваркой;
- правильную установку свариваемых деталей, исключающих депланацию и увод кромок;
- использовать технологию сварки, исключающую появление пористости и шлаковых включений, непроваров, трещин, а также чрезмерно большую неровность поверхности сварного шва;
- обеспечить выполнение сварки, исключающее чрезмерно большие подрезы и наплывы у сварного шва. Не оставлять незаваренными кратер или иные дефекты

у концов сварных швов или в местах перерыва в сварке;
- избегать отклонения от заданных размеров сварных швов;
- обеспечить снятие остаточных сварочных напряжений путем термообработки (высокого отпуска) или перегрузки;
- навести в сварном соединении остаточные напряжения сжатия путем упрочняющего наклепа, местного нагрева, точечного и линейного обжатия.

При эксплуатации сварных металлоконструкций в случае обнаружения усталостной или другой какой-либо трещины следует:
- немедленно принять меры к приостановке ее распространения, например, путем сверления отверстий на небольшом расстоянии от конца трещины или выборки материала в окрестности трещины;
- выявить причину начала усталостного или хрупкого разрушения и принять соответствующие меры по усилению конструкции или изменению режима ее эксплуатации с проведением поверочного расчета на статическую и циклическую трещиностойкость.

Кроме того, учитывая влияние окружающей среды на сопротивление стали усталости, на сварные конструкции и соединения следует наносить покрытия, изолирующие их от действия среды. Покрытия могут быть лакокрасочными, полимерными или металлическими. При этом повышение усталостной прочности достигается как за счет герметизации соединения, так и за счет упрочнения под действием старения или подкалки и остаточных напряжений сжатия, например, при горячем цинковании.

10.6. Натурные испытания

10.6.1. Особенности натурных испытаний. Натурные испытания зданий, сооружений, их фрагментов и элементов, прослуживших значительный срок, является, как уже отмечено ранее, крайне громоздкой, длительной и дорогостоящей процедурой и поэтому предпринимаются в исключительных случаях. Здесь не рассматриваются особенности испытаний новых, завершенных строительством зданий и сооружений перед сдачей их в эксплуатацию, для которых СНиП-ами предусмотрена обязательность проведения таких испытаний, а детальная их регламентация осуществляется совокупностью действующих государственных, отраслевых и ведомственных стандартов, норм, инструкций и указаний.

Непосредственной причиной проведения натурных испытаний может явиться одна или несколько из нижеследующих:
- большая продолжительность эксплуатации;
- значительное количество обнаруженных при выборочном обследовании дефектов, повреждений и отступлений от проекта;
- технологические затруднения эксплуатации вследствие вибраций, прогибов, неравномерных осадок, износа;
- достижение критического уровня уменьшения несущей способности элементов за счет коррозии, изменения механических свойств металла, угрозы коррозионного охрупчивания, усталости, насыщения водородом и др.;
- необходимость проведения модернизации, реконструкции, ремонта и усиления объекта по технологическим причинам, вследствие планируемого увеличения нагрузок или ужесточения условий эксплуатации и т.п. В отличие от ранее рассмотренных стендовых испытаний на статические и динамические нагрузки, формулирование цели и задач натурного испытания и строгое обоснование целесообразности и необходимости его проведения возможно лишь после весьма трудоемкого исследования, включающего в первую очередь:

– сравнение выполненных по результатам выборочного обследования расчетов здания (или сооружения) и его элементов с расчетами, осуществленными на стадии проектирования объекта испытания, а также сопоставление соответствующих нормативных баз (требования к стали, методика расчета, величины и сочетания нагрузок и т.д.) с установлением наиболее важных расхождений и их предполагаемого влияния на надежность испытываемой конструкции;

– анализ полноты и качества проектной документации (чертежи КМ, КМД, АР), представленной при приемке объекта в эксплуатацию, документации, выполненной в последующие годы при ремонтах, заменах и усилении конструкций, а также вызванных изменениями технологического процесса, оборудования и соответствующих им воздействий и нагрузок, с указанием основных отличий от реального состояния, зафиксированного по результатам обследования, и влияния этих отличий на работу элементов и сооружения в целом;

– изучение документально подтвержденных изменений условий функционирования метеорологического и сейсмологического характера, степени агрессивности среды, относительной влажности, уровня грунтовых вод и т.п. фактов технологического характера, а также оценка этих изменений применительно к особенностям конструкций, подлежащих натурному испытанию.

В заключение этого исследования должен быть сделан вывод о достаточной представительности результатов выборочного инструментального обследования и выполненного на его основе расчета для оценки общего состояния объекта испытания, В противном случае испытаниям должно предшествовать сплошное освидетельствование всех конструкций, элементов и узлов, а не только случайно выбранных по законам статистической представительности, как это в большинстве случаев делается.

Заключение должно также содержать перечень вопросов, которые не нашли решения при выполнении данного анализа, но могут быть решены при проведении натурного испытания.

10.6.2. Программа натурных испытаний. Программа натурного испытания должна включать в себя все перечисленные выше документально оформленные аналитические действия, чертежи, акты, протоколы и другие материалы, характеризующие историю возникновения самой причины натурного испытания.

Основной целью проведения натурных испытаний является оценка и прогнозирование надежности и долговечности зданий и сооружений. При этом для конкретного объекта должны быть четко сформулированы задачи, которые должны решаться в процессе испытания. Например, определение прогибов стропильной фермы при воздействии нормативной нагрузки или оценка степени защемления колонн в фундаментах и т.п. Лишь в подобной постановке полученные экспериментальные данные после закладки в алгоритм расчета могут дать возможность прогнозировать поведение конструкции при расчетной или даже предельной нагрузке. Это обстоятельство существенно, имея в виду одну из особенностей натурных испытаний - невозможность доведения объекта до разрушения.

10.6.3. Выбор объекта испытания. При выборе фрагментов сооружения или его элементов для проведения натурных испытаний принимается во внимание: место, занимаемое конструкцией в обеспечении безопасного функционирования сооружения в целом; уровень его загружения эксплуатационными или имитирующими их воздействиями; наличие в конструкции наибольшего количества дефектов, повреждений и иных отступлений от проекта.

Учитывают также возможности свободного доступа к зонам размещения измерительной аппаратуры и силовозбуждающих агрегатов, обеспеченность подстраховочными устройствами, удобство проведения визуальных и оптических наблюдений, наибольшую безопасность для персонала предприятия и участников испытаний и т.п.

Выбор измеряемых параметров и средств их измерения обычно близок к используемым при стендовых статических и динамических испытаниях. Тем не менее необходимо иметь в виду, что условия работы приборов при проведении натурных испытаний несравнимо сложнее, чем в лабораторных: выше уровень помех, большая вероятность повреждений приборов, более трудоемки процессы установки приборного оснащения и снятия отсчетов по ним. По этой причине следует особое внимание уделить обеспечению стабильности и помехозащищенности показаний приборов, предохраняя их от климатических и технологических перепадов температур, агрессивных воздействий, повышенной влажности, грозовых разрядов и т.д.

10.6.4. Способы силовозбуждения. Натурные испытания могут осуществляться без приложения дополнительных воздействий с использованием лишь имеющихся в здании или сооружении эксплуатационных нагрузок. Таким примером могут служить испытание подкрановых балок и тормозных конструкций в зданиях, оснащенных кранами, или резервуарных конструкций, заполняемых продуктом, для хранения которых они и предназначены.

Более распространенным методом натурных испытаний являются испытания, при которых, кроме эксплуатационных используются дополнительные, искусственно создаваемые нагрузки путем загружения различными грузами, натяжения тяговыми устройствами к смежным конструкциям, якорям, фундаментам, использования специальных вибровозбудителей. Так, например, подвеска тарированной нагрузки к фермам покрытия позволяет имитировать снеговую нагрузку; за счет натяжения тяговых систем воспроизводят подобие воздействия ветровых, сейсмических и ударных нагрузок на сооружение. В любой из этих разновидностей воздействий должен быть обеспечен строгий постоянный контроль величины испытательной нагрузки и их совокупности.

Для этой цели периодически контролируют неизменность веса испытательных грузов, при помощи встроенных динамометров и калиброванных вставок обеспечивают заданное значение натяжения тросов, при использовании мостовых кранов в буксы колес встраиваются специальные контрольные динамометры. При создании дополнительных нагрузок во время проведения натурных испытаний непременным условием является непревышение суммарным уровнем нагружения нормативных или эквивалентных им значений, определенных по нормам или по фактическим механическим свойствам металла.

Таким образом, природа натурных испытаний исключает возможность прямого изучения области упругопластического и тем более пластического деформирования, крайне важных для корректной оценки имеющихся и предполагаемых резервов несущей способности и характерных параметров предельного состояния, диктуя поиск других искусственных путей, некоторые из которых рассматриваются ниже.

10.6.5. Техника безопасности при натурных испытаниях. Специальным разделом программы испытаний должны быть предусмотрены меры безопасности, включающие:

- инструкцию по проведению испытаний с четким разделением обязанностей и ответственности между членами коллектива испытателей;
- схему испытательного участка с размещением всех измерительных, регистрирующих и силовозбуждающих систем, опасных зон и т.п.;
- страхующие устройства (временные опоры, стойки, ограничители перемещений, оттяжки и др.), исключающие возможность обрушения конструкций, падение грузов, превышение установленных значений суммарных нагрузок;
- устройства мгновенного аварийного сброса нагрузки;
- ограждение участка под испытываемой конструкцией, исключающее допуск людей в эту зону на все время испытаний.

Целям предупреждения опасного развития событий служит обязательная экспресс-обработка и контроль безопасных значений измеряемых величин и характерных параметров реакции испытываемой конструкции и оперативное сопоставление данных измерения с теоретическими их значениями на каждом этапе испытаний.

Установка на конструкцию элементов силовозбуждения и измерительных приборов должна осуществляться с подмостей, лесов, стремянок и лестниц, на конструкцию также навешивают страховочные тросы и веревки.

Перед началом работ на высоте каждый участник должен пройти инструктаж с соответствующим занесением в журнал по технике безопасности, получить каску, монтажный пояс, переговорное устройство и другое необходимое оснащение.

Размещение персонала, регистрирующей и обрабатывающей аппаратуры должно обеспечиваться вне зоны возможного обрушения конструкции.

В случае проведения испытаний на действующем объекте без остановки технологического процесса, для исключения взаимных помех график испытаний должен быть согласован со службой эксплуатации предприятия.

10.6.6. Проведение натурных испытаний. После установки, сборки и подключения к источникам питания измерительных приборов и установок силовозбуждения осуществляется проверка работоспособности испытательной системы небольшим ее нагружением. Это позволяет выявить влияние колебаний суточной температуры и других конструктивных и технологических факторов на дрейф нулевого отсчета, выявить и ликвидировать неисправности, установить параметры значений, принимаемые впредь за начало отсчета. Особенностью натурных испытаний является, как правило, большая длительность каждого из этапов нагружения и разгрузки, что иногда требует круглосуточного режима наблюдений с соответствующим формированием бригад испытателей.

При первом нагружении, предусмотренном программой натурных испытаний и осуществляемом в 3–5 последовательных этапов, предусматривают достижение нагрузки, эквивалентной нормативной нагрузке. При необходимости продолжения загрузки решение о возможности доведения нагрузки до соответствующей расчетной или даже ее превышения может быть принято только после обработки и анализа результатов отсчетов по приборам на предыдущих этапах. Экспресс-обработка с вычислением «первых разностей», построением эпюр прогибов, графиков нагрузка–прогиб и др. данных должна осуществляться после каждого этапа, а результаты сопоставляться с данными теоретического расчета.

Наиболее эффективно экспресс-анализ реализуется с использованием ПК со специальной программой обработки.

Разгрузка объекта испытания ведется этапами также с поэтапной обработкой и анализом результатов измерений.

Наиболее ответственный момент испытания – подведение его итогов. Руководитель испытания принимает решение после изучения всей совокупности показаний регистрирующей и обрабатывающей аппаратуры, графической их интерпретации и сопоставления этих документов с данными теоретических расчетов. Реально возможны следующие варианты вывода:

1. Поставленные программой задачи выполнены полностью, полученные результаты согласуются с теоретической моделью.

2. Поставленную программой задачу, как показали результаты натурного испытания, в данных условиях выполнить невозможно и испытания необходимо прекратить.

3. Предусмотренная программой задача может быть успешно решена при условии повышения точности измерений или изменения расположения точек замера и размещения систем силовозбуждения.

В последнем случае измерительные и силовозбуждающие системы не демонтируются до принятия окончательного решения заказчиком.

В особых случаях отдельные элементы измерительной системы могут быть сохранены на конструкции для проведения длительных наблюдений. Это могут быть стационарные столики для установки нивелиров и теодолитов или стереофотокамер, измерительные рейки, марки, контрольно-сигнальное устройство и др. Целесообразность длительных наблюдений определяется службой эксплуатации заказчика.

10.7. Основные понятия о модельных испытаниях

10.7.1. Общие положения. Модельные испытания позволяют при сравнительно небольших затратах получить представление о работе конструкции, о рациональности принятой конструктивной формы, о путях выбора адекватной расчетной схемы. Особенно эффективно применение модельных экспериментов на начальных этапах разработки новой конструкции. По этой причине они широко распространены в авиакосмической технике, судостроении, автомобилестроении и др. отраслях. В строительстве моделирование применяется, как правило, при разработке и проектировании уникальных зданий и сооружений: гидротехнических объектов, высотных башен и зданий, подземных сооружений и т.д.

10.7.2. Виды моделей. *Модели физические.* Это, как правило, модели, выполненные в определенном уменьшенном масштабе из того же материала, что и натурное здание или сооружение. Модели основательно насыщают высокоточной измерительной аппаратурой и испытывают в специально оборудованных лабораторных помещениях при минимальном влиянии случайных помех. Часто физические модели изготавливают из материала более деформативного, чем имитируемый оригинал. Это объясняется стремлением за счет повышения деформативности модели и улучшения изотропии материала повысить точность измерения. Однако, может оказаться, что эта идея не столь уж безупречна, поскольку придется считаться со значительной нелинейностью работы, например, пластмасс и ее особой чувствительностью к температурным изменениям.

К физическим можно отнести также модели поляризационно-оптические, изготовленные из оптически активных материалов – полиэфирных, полиакриловых и др., – в которых напряженное состояние материала вызывает поворот плоскости поляризации проходящего сквозь них поляризованного света.

Модели аналоговые. Испытания на аналоговых моделях основаны на идентичности математических уравнений, описывающих напряженно-деформированное состояние конструкций под действием нагрузки и уравнений, описывающих распределение электрических токов в некоторой электрической сети под действием электрических потенциалов, приложенных к определенным узлам этой сети, либо уравнений, отражающих движение жидкости в системе трубопроводов под действием гидравлического напора.

Подобные гидравлические и электрические модели, называемые еще «интеграторами», имели широкое распространение в технике в 30 – 60^{e} годы, но с развитием компьютерной техники были вытеснены цифровыми моделями.

Цифровое моделирование заключается в том, что при помощи компьютера рассчитывается напряженно-деформированное состояние конструкции под действием определенной нагрузки. При этом в зависимости от поставленной задачи могут варьироваться геометрия конструкции, сечения и жесткостные характеристики элементов и узлов, виды нагрузок и воздействий и т.д. Большое быстродействие ПК, огромный объем памяти, наличие программ визуализации результатов расчета, возможность работы в диалоговом режиме – все это позволяет решать большой спектр задач, в особенности при разработке и оптимизации новых конструктивных форм.

10.8. Длительные натурные наблюдения

10.8.1. Общие положения. Периодическое наблюдение за состоянием технологического процесса и строительных конструкций является традиционным для массовых зданий и сооружений различного назначения. Конкретизация предмета наблюдения, периодичности контрольных процедур, их оснащения, документального оформления результатов регламентируются соответствующими отраслевыми и ведомственными инструкциями и стандартами предприятия. Некоторые особенности проведения таких работ при технической эксплуатации приведены в гл.9 настоящего справочника. Их общей целью является поддержание конструкций в работоспособном состоянии на весь срок службы объекта. Непосредственное исполнение наблюдений возлагается на специальные подразделения службы эксплуатации предприятия.

Здесь же рассматриваются уникальные объекты строительства, отличающиеся необычностью конструктивной формы, размерами, массой и другими особенностями, для которых роль длительного инструментального наблюдения существенно повышается и оно может стать единственно возможным средством объективной оценки степени соответствия сооружения своему эксплуатационному назначению, справедливости расчетных предпосылок, конструктивной их реализации, а также прогнозирования надежности на будущее, В наибольшей мере это актуально для особо ответственных объектов с ограниченным ресурсом усталостной прочности или объектов, аварийное разрушение которых чревато особо тяжелыми последствиями. Во всех подобных случаях планирование, обоснование и проведение длительных натурных наблюдений должно выполняться привлеченными специализированными организациями, имеющими соответствующие лицензии, при обязательном участии разработчиков проекта сооружения, специалистов по обследованию и работников служб эксплуатации.

10.8.2. Примеры осуществления натурных наблюдений. Опыт многолетних инструментальных наблюдений за поведением висячих трубопроводных переходов с уникальными по величине пролетами как, например, для газопровода у г. Келиф через р. Амударью (пролет 660 м) и аммиакопровода Тольятти - Одесса через р. Днепр (пролет 720 м) подтвердил особую эффективность инструментального наблюдения и анализа работы крупногабаритных сооружений. При этом проводились измерения:

- фактических перемещений несущих элементов конструкций в вертикальной и горизонтальной плоскости под действием натурных нагрузок, что позволило контролировать истинную жесткость и деформативность элементов и сооружения в целом;
- усилий и напряжений в наиболее ответственных узлах и элементах;
- параметров динамических воздействий и оценка поведения сооружения с точки зрения прочности, а также физиологического и психологического влияния на эксплуатационный персонал, обслуживающий переходы.

Для наблюдения за функционированием крупнопролетных переходов использовались как традиционные геодезические средства, так и специально разработанный институтом «Днепрпроектстальконструкция» комплекс приборного оснащения. В составе комплекса были задействованы индуктивные прогибомеры, чувствительным элементом которых являлся индуктивный преобразователь соленоидного типа. Принцип его действия основан на изменении индуктивного сопротивления обмоток при перемещении внутри катушки сердечника из ферромагнитного материала. Связь между объектом и сердечником осуществляется с помощью стальной нити, натягиваемой грузом или пружиной. С помощью отводных роликов измеря-

ются горизонтальные перемещения. Пределы измерений прибора составляют 0,5÷500 мм по амплитуде и 0÷5 Гц по частоте. Разработан был также реохордный датчик больших перемещений, который обеспечивает измерение квазистатических перемещений и параметров колебаний амплитудой до 1000 мм. Датчик состоит из реохордного резисторного преобразователя угловых перемещений и набора шкивов. Выходным сигналом датчика является напряжение постоянного тока, пропорциональное углу поворота шкива, соединенного с осью преобразователя. Система питания преобразователя от источника тока позволила устанавливать датчик на значительном (до 1000 м) расстоянии от регистрирующей аппаратуры.

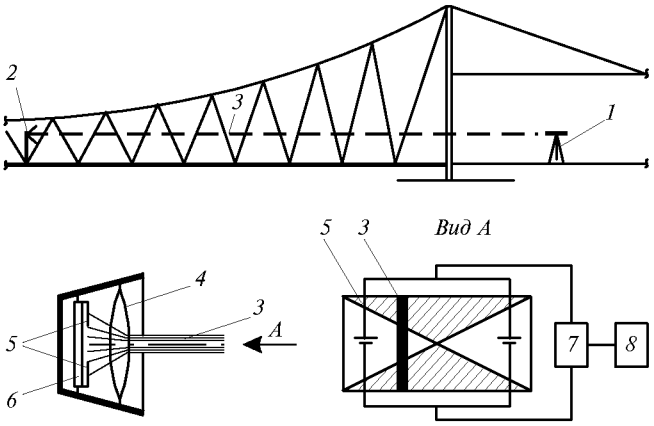


Рис.10.68. Лазерный измеритель перемещений

1 – лазерный визир; *2* – фотоприемное устройство; *3* – оптическая ось (лазерный луч); *4* – линза; *5* – маска; *6* – чувствительный элемент; *7* – измерительно-калибровочный блок; *8* – регистрирующее устройство

Для изучения поведения сооружения в естественном ветровом потоке использовался лазерный измеритель перемещений. С его помощью в течение длительного времени регистрировались величины квазистатических перемещений и амплитуды колебаний пролетного строения. Основными элементами прибора являются лазерный визир с мощностью квантового генератора не менее 5 мВт и фотоприемное устройство (рис.10.68). Визир позволяет создавать лазерный луч мощностью, достаточной для засвечивания чувствительного слоя фотоприемного устройства при расстоянии между ними до 1000 м и при средней интенсивности дневного света.

Была задействована также специально созданная трособлочная и реперная система с измерительными преобразователями, состоящая из жесткой рамы с пружинами и преобразователями в виде датчиков угловых перемещений, расположенными на осях блоков (рис.10.69), установленных на раме. При движении сооружения в горизонтальной плоскости происходят одинаковые по величине и направлению повороты блоков. При движении объекта наблюдения в вертикальной плоскости блоки вращаются в разных направлениях с одинаковыми углами поворота. Датчики, укрепленные на осях блоков, измеряют их углы поворота. Специальная схема включения преобразователей датчиков обеспечивает автоматическую раздельную регистрацию горизонтальных, вертикальных и крутильных колебаний. В качестве регистрирующего прибора использовался магнито-электрический осциллограф, снабженный блоком балансировки и калибровки входных сигналов.

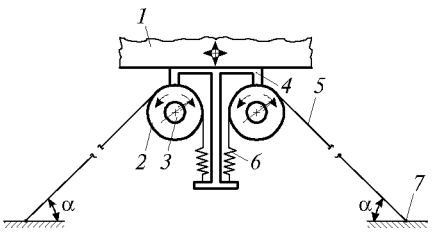


Рис.10.69. Устройство для одновременной записи перемещений в двух плоскостях

1 – объект измерения; *2* – блок; *3* – измерительный преобразователь; *4* – рама; *5* – трос; *6* – пружина; *7* – неподвижная точка

Подобно упомянутым горизонтально протяженным сооружениям немало сложных проблем возникает при расчете, приемке в эксплуатацию и при проведении натурных наблюдений за развитыми по вертикали объектами (радиотелескопы, антенны, мачты, башни, опоры ЛЭП, высокие монументальные сооружения). Особые затруднения появляются, когда имеет место сочетание таких параметров как большая высота при малой опорной базе, сложная конфигурация, значительные размеры выступающих деталей и т.п. Эти особенности, трудно учитываемые теоретическим расчетом, могут явиться причиной аэродинамической неустойчивости и опасного развития пульсационных и вихревых воздействий. Из практики строительства известно, что подобные явления могут происходить даже при небольших скоростях ветра (10 – 15 м/сек) за счет возбуждения резонансных колебаний и привести к усталостным повреждениям и даже к разрушению сооружения или его фрагментов.

Заслуживающим внимания примером организации и проведения натурных наблюдений за состоянием высотного сооружения может считаться главный монумент памятника Победы на Поклонной горе в Москве, принятый в эксплуатацию 9 мая 1995 г. Главный монумент представляет собой трехгранный штык высотой 141,8 м, увенчанный фигурой богини победы Ники с амурами массой 15 т, расположенной на отм. 110,5÷123 м. Каркас монумента вместе со скульптурой, фахверком и панелями облицовки из нержавеющей стали, бронзы и медных листов имеет общую массу, превышающую 1000 т (рис.10.70).

Стилобатная часть состоит из технических и вспомогательных помещений; в подземном коллекторе размещены инженерные коммуникации, обеспечивающие жизнедеятельность монумента. Как установлено расчетом и подтверждено продувкой макета и фрагментов монумента в аэродинамической трубе, мемориальное сооружение весьма чувствительно к пульсационному воздействию ветра из-за больших периодов собственных колебаний с амплитудой, достигающей 2 м.

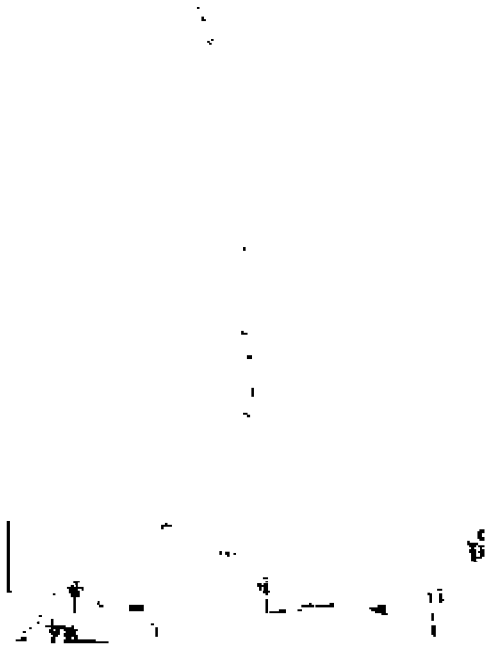


Рис.10.70. Главный монумент памятника Победы на Поклонной горе в Москве

Исключительная историческая значимость монумента, особенности его архитектурной формы и специфика взаимодействия с ветровым потоком обусловили поиск новых нетрадиционных решений несущего каркаса, облицовки, фундаментов, выбор материала и методов соединений, достаточность и обоснованность которых может быть выявлена лишь в процессе функционирования сооружения. Комплексом длительных натурных наблюдений, разработанным для этой цели, предусматривается периодическое освидетельствование состояния сооружения, его элементов и узлов, уточнение метеорологических воздействий с учетом рельефа местности и формы сооружения, измерение напряженно-деформированного состояния наиболее нагруженных элементов, фрагментов и узлов, контроль за эффектив-

ностью работы гасителей колебаний и др. Так, в действующей на конец 1998 г. системе оперативного контроля за состоянием монумента осуществляется:

- контроль скорости и направления ветра с использованием индикаторов скорости, расположенных по трем граням штыка на отм. 124 м с выводом данных на компьютер «Ветер»;
- контроль температуры и влажности воздуха при помощи датчиков, установленных на отм. 111 м в зоне гасителя колебаний ДГК-10; данные поступают на цифровой измеритель-индикатор температуры и влажности, располагающийся в аппаратной;
- контроль за отклонениями сооружения от вертикали и его колебаниями осуществляется при помощи датчиков вертикали, формирующих полный телевизионный сигнал; одновременно осуществляется и контроль осадок основания при помощи гидронивелиров. Информация о статических и динамических отклонениях от вертикали накапливается в архиве компьютера «Вертикаль» (на отметке 140 м размещены точечные источники света – инфракрасные прожекторы на специальной штанге);
- контроль за работой динамических гасителей колебаний:
  - на отм. 117 м (Ника) датчиками перемещений гасителя ДГК-3 с потенциометром и кулисным приводом;
  - на отм. 111 м датчиками перемещений штоков гасителя ДГК-10 с потенциометрами и кулисными приводами; предусмотрена возможность одновременного контроля трех датчиков без выхода на компьютер;
- контроль акустической эмиссии. Датчики АЭ с предусилителями установлены в 3-х точках по углам сечения несущего каркаса на десяти ярусах между отметками 16÷135 м с передачей сигналов в аппаратную на комплект аппаратуры «Локан» с возможностью хранения, последующей обработки и анализа полученных данных.

Помимо изложенного выше инструментального инспектирования, осуществляется также профилактическое освидетельствование состояния силового каркаса, фахверка, панелей и плит облицовки. В соответствии с установленным регламентом визуальному осмотру подвергаются болтовые и сварные соединения, проверяется количество болтов, гаек, плотность их затяжки, состояние прокладок, опорных столиков, целостность стрингеров и шпангоутов панелей, контролируется состояние бронзовых облицовочных панелей для выявления возможного возникновения трещин в теле панелей и по контуру отверстий и т.д. Успешное функционирование этого уникального сооружения и системы натурного наблюдения за его состоянием дает основание судить о достаточной надежности работы монумента на заданный срок жизни.

10.8.3. Цели длительных наблюдений. Длительные наблюдения по своей природе оправданы при изучении развития медленных процессов, существенно влияющих на напряженно-деформированное состояние конструкции и ее живучесть. Под этим обычно понимают рост осадок и боковых перемещений фундаментов, развитие коррозионных повреждений, явлений усталости, ползучести, охрупчивания, нарастание разрушений соединительных элементов (заклепок, болтов), износ рельсовых путей и т.п.

При длительных натурных наблюдениях периодически выполняют ряд контрольных процедур, в составе которых:

- геодезическая или фотограмметрическая съемка конструкции с целью отслеживания процессов ее перемещений и деформаций;
- установление динамики развития трещин в основном металле и сварных швах элементов конструкции;
- периодические ревизии болтовых и заклепочных соединений с простукиванием головок заклепок и контролем усилия натяжения высокопрочных болтов.

В общем случае конечной целью проведения натурных инструментальных наблюдений является оценка состояния, прогнозирование надежности контролируемого объекта и, в случае необходимости, формулирование предложений по корректировке расчетных схем и конструктивных деталей или изменению режима работы. Разнообразие назначения, условий эксплуатации, конструктивных решений, методик расчета, особенностей нагружения и т.п., свойственных каждому из сооружений, для которых необходимо проведение наблюдений, объясняет и пестроту в наборе подлежащих контролю параметров, периодичности измерений, способах регистрации, анализа и представления результатов. И тем не менее, имеется и нечто общее для всех без исключения объектов наблюдения.

Совокупность данных инструментальных наблюдений включает, как правило, информацию о фактических природных воздействиях и технологических нагрузках, действительном напряженно-деформированном состоянии металлоконструкций, абсолютных и взаимных перемещениях в элементах и узлах, уточненные фактические параметры колебаний конструкции при динамических, вибрационных и ударных воздействиях. Состав и объем наблюдений должны гарантировать достаточную, статистически обоснованную информацию об особенностях функционирования объекта наблюдения и, в первую очередь, тех его параметров, которые интегрально характеризуют эксплуатационную надежность сооружения и позволяют достоверно прогнозировать ресурс безаварийной работы.

Первичным критерием для оценки параметров функционирования объекта наблюдения обычно является сопоставление результатов наблюдения с расчетно-теоретическими предпосылками. При прямом пути контроль параметров осуществляется непосредственно по показаниям приборов. Например, по величине напряжений, замеренных в характерных наиболее нагруженных элементах. При косвенном пути о контролируемом параметре судят по регистрируемым показаниям лишь функционально связанными с контролируемым. Как, например, при оценке жесткости конструкции по частоте ее собственных колебаний. В преобладающем большинстве случаев оба приема используют совместно. Отработанный практикой механизм оценки параметров действительной работы наблюдаемой конструкции строится на предположении, что система нагрузка–реакция данной конструкции линейна или известен закон этой зависимости.

Тогда, используя принцип суперпозиции, можно зафиксировать в каждый отрезок времени условия, в которых находится сооружение, отразив всю совокупность внешних нагрузок и воздействий, а также суммарную реакцию на них сооружения. Если результаты расчета по принятой при проектировании расчетной схеме совпадают с показаниями, характеризующими совокупную реакцию объекта наблюдения, имеются основания для вывода о соответствии действительной работы сооружения теоретической модели и в общем случае оценить эксплуатационную работоспособность.

Достоверность полученной информации определяется объемом статистически обоснованных данных при различных сочетаниях и величинах входных параметров.

Приборное и инструментальное оснащение при выполнении длительных натурных наблюдений определяется программой, содержащей перечень элементов, узлов и конкретных параметров, подлежащих длительному контролю, необходимых и достаточных для суждения о техническом состоянии объекта наблюдения.

В зависимости от особенностей объекта и поставленных задач для долговременных наблюдений могут использоваться как простейшие регистрационные устройства, так и современные измерительно-информационные комплексы, обеспечивающие полную автоматизацию всего процесса инструментальных наблюдений: сбор, регистрацию, обработку и хранение информации. Эти комплексы должны

строиться на базе серийно выпускаемой промышленностью аппаратуры. При необходимости разработки специальных методов и средств измерений они должны быть метрологически обеспечены, отвечать требованиям надежности и долговечности, иметь дистанционное управление, отличаться ремонтоспособностью, простотой установки и обслуживания.

Упомянутые системы и приборы для регистрации, обработки и анализа результатов длительных наблюдений аналогичны используемым при статических, динамических и натурных испытаниях конструкций и здесь не рассматриваются.

Результаты длительных натурных наблюдений заносятся в специальный журнал, который должен храниться в службе эксплуатации объекта. Записи сопровождаются необходимыми чертежами, эскизами, схемами и другими документальными свидетельствами. Каждая запись должна содержать дату наблюдения, его сущность, ведомость и графики измеряемых параметров, условия наблюдения (температура, погодные условия, техногенные воздействия, включающие вибрацию, агрессивные факторы, влажность и т.п.). Завершают запись фамилией и должностью исполнителя и его личной подписью.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Александров А.Я., Ахметзянов М.Х.** Поляризационно-оптические методы механики деформированного тела. М., 1973.
2. **Аронов Р.И.** Испытание сооружений. М., Высшая школа, 1974.
3. **Бруевич П.Н.** Фотограмметрия. М., Недра, 1990.
4. **Веников В.А.** Теория подобия и моделирования. М., 1976.
5. **Вуллерт Р.** Области применения ударных испытаний с осциллографированием. Ударные испытания металлов. М., Мир, 1973.
6. **Горев В.В.** Математическое моделирование в системах автоматизированного проектирования объектов строительства. Учебн.пособие. Воронеж, ВПИ, 1989.
7. **Грешников В.А., Дробот Ю.Б.** Акустическая эмиссия. М., Издательство стандартов, 1976.
8. **Долидзе Д.Е.** Испытание конструкций и сооружений. М., Высшая школа, 1975.
9. **Злочевский А.Б.** Экспериментальные методы в строительной механике. М., Стройиздат, 1983.
10. **Злочевский А.Б.** Методика измерения электротензометрическим способом упругопластической деформации в зоне с высоким градиентом напряжений. Заводская лаборатория, 1968, №5.
11. **Злочевский А.Б.** Применение специальных фольговых тензисторов для оценки прочности и надежности конструкций. ГОСНИТИ, 1971, № 1/4-74.
12. **Казакевич М.И., Шульман З.А.** и др. Инструментальные наблюдения за работой вантовых трубопроводных мостов больших пролетов. М., Сборник трудов ЦНИИПСК, 1986.
13. **Керонян К.К.** Электрическое моделирование в строительной механике. М., Стройиздат, 1963.
14. **Крылов И.А., Глуховский К.А.** Испытание конструкций сооружений. Л., Изд.литературы по строительству, 1970.
15. **Лебедев А.Н.** Моделирование в научно-технических исследованиях. М., Радио и связь, 1989.
16. **Лужин О.В.** и др. Обследование и испытание сооружений. **М.,** Стройиздат, 1987.
17. **Мартин Ф.** Моделирование на вычислительных машинах. М., Советское радио, 1972.
18. **Мастаченко В.Н.** Испытание строительных конструкций на моделях. Методические разработки, М., 1972.
19. **Метелкин А.И.** Фотограмметрия в строительстве и архитектуре. М., Стройиздат, 1981.
20. **Новак С.М., Логвинец А.С.** Защита от вибрации и шума в строительстве. Справочник. Киев, Будивельник, 1990.
21. **Почтовик Г.Я., Злочевский А.Б., Яковлев А.И.** Методы и средства испытаний строительных конструкций. М., 1973.
22. **Ренский А.Б., Баранов Д.С., Макаров Р.А.** Тензометрирование строительных конструкций и материалов. М., 1974.

23. **Сердюков В.М.** Фотограмметрия в промышленном и гражданском строительстве. М., Недра, 1977.
24. **Сердюков В.М., Григоренко А.Т., Кривелев Л.И.** Испытание сооружений. Киев, Будивельник, 1976.
25. **Советов Б.Я., Яковлев С.А.** Моделирование систем. **М.,** Высшая школа, 1985.
26. СНиП 3.01.03-84. Геодезические работы в строительстве. М., Стройиздат, 1985.
27. **Тетиор А.Н., Померанец В.Н.** Обследование и испытание сооружений. Киев, Высшая школа, 1988.
28. **Финк К., Рорбах Х.** Измерение напряжений и деформаций. Под ред. Григоровского Н.И. М., 1961.
29. Измерение вибраций сооружений. Справочное пособие. Под ред. Шейнина. Л., Стройиздат, 1974.
30. **Шульман З.А.** Методы и средства оценки состояния инженерных сооружений. Сб.трудов ЦНИИПСК, 1984.
31. **Шеннон Р.** Имитационное моделирование систем. Искусство и наука (пер. с англ.). М., Мир, 1978.
32. **Казакевич М.И.** и др. Методика натурных испытаний и длительных наблюдений висячих мостов и переходов. В сб. «Вопросы динамики мостов и теории колебаний». Днепропетровск, ДИИТ, 1980, вып.207/24.
33. **Горицкий В.М., Шнейдеров Г.Р.** Метод восстановительной термообработки футерованных конструкций и сосудов давления с повышенной температурой эксплуатации. Промышленное и гражданское строительство, 1997, № 6.
34. **Горицкий В.М., Шнейдеров Г.Р.** Особенности диагностирования технического состояния кожухов доменных печей и воздухонагревателей. Промышл. и гражд. строительство, 1998, №5.
35. **Кулахметьев Р.Р.** Оценка временной работоспособности резервуара с трещиной. Промышл. и гражд. строительство, 1998, № 5,
36. Системы автоматизированного проектирования. Учебное пособие для вузов, кн.4. **Трудоношин В.А., Пивоваров Н.В.** Математические модели технических объектов. М., Высшая школа, 1986.
37. **Ханухов Х.М., Воронецкий А.Е., Горицкий В.М.** Влияние эксплуатационных и технологических факторов на техническое состояние и остаточный ресурс шаровых резервуаров и газгольдеров объемом 600 и 2000 **м^3.** Промышл. и гражд. строительство, 1997, № 6.
38. **Екобори Т.** Научные основы прочности и разрушения металлов. Киев, Наукова думка, 1978.
39. **Вуллерт Р.** Области применения ударных испытаний с осциллографированием. Ударные испытания металлов. М., Мир, 1973.
40. **Махутов Н.А.** Деформационные критерии разрушения и расчет элементов конструкций на прочность. М., Машиностроение, 1981.
41. **Тылкин М.А., Большаков В.Н., Одесский П.Д.** Структура и свойства строительных сталей. **М.,** Металлургия, 1983.
42. **Эйбер Р., Даффи А., Мак-Клер Дж.** Прикладное значение испытаний падающим грузом и ударных испытаний образцов Шарпи с V-образным надрезом. Ударные испытания металлов. М., Мир, 1973.
43. **Мельников Н.П., Баско Е.М., Беляев Б.Ф.** Инженерный метод расчета строительных металлических конструкций на хрупкую прочность. Труды ин-та ЦНИИПСК, 1982.
44. **Евдокимов В.В.** Уровень концентрации напряжений в характерных видах сварных соединений элементов строительных металлоконструкций. Труды ин-та ЦНИИПСК, 1989.
45. **Перельмутер А.В., Гильденгорн Л.А.** О классификации стальных конструкций. Строительная механика и расчет сооружений. 1990, **№ 3.**
46. **Фридман Я.Б.** Механические свойства металлов. Т.2. Механические испытания. Конструкционная прочность. М., Машиностроение, 1974.
47. **Боулгер Ф.Х.** Оценка вязкости разрушения стали. Разрушение. Т.6. Разрушение металлов. М., Металлургия, 1976.
48. **Демыгин Н.Е.** Методика определения сопротивляемости стали распространению хрупкого разрушения в условиях двухосного растяжения. Заводская лаборатория, 1973, № 5.
49. **Сильвестров А.В., Шайрай С.Д., Чибряков Г.Г.** Расчетная оценка прочности элементов стальных конструкций в температурном интервале квазихрупкого их разрушения в условиях плоской деформации. Изв.ВУЗ-ов. Строительство и архитектура, 1983, № 6.
50. Рекомендации по учету влияния дефектов и повреждений на эксплуатационную пригодность стальных конструкций производственных зданий. ЦНИИПСК, М., 1987.

ГЛАВА 11

НОРМАТИВНОЕ И ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ РАБОТ ПО ОБСЛЕДОВАНИЮ, УСИЛЕНИЮ И ИСПЫТАНИЮ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

11.1. Термины и определения, используемые при обследовании, усилении и испытании реконструируемых зданий и сооружений

1. Авария – полное или частичное обрушение (разрушение) здания, сооружения, его части или отдельных конструктивных элементов, либо такая их деформация, которая вызывает либо полную остановку производственного процесса, либо создает непосредственную угрозу безопасности людей.
2. Вмятина – выпучивание, имеющее локальный характер.
3. Воздействие – влияние несилового характера окружающей среды на конструкцию, способное вызвать изменения ее технического состояния (температура, агрессивные факторы и т.д.)
4. Выборка – группа конструктивных элементов, выбранная определенным образом из общего числа однотипных, для определения какого-либо параметра технического состояния конструкции на основе результатов ее освидетельствования.
5. Выпучивание – искривление плоских частей конструкции, имеющее пространственный характер.
6. Выборочный контроль – специальный вид контроля, при котором оценка параметров технического состояния производится на основе освидетельствования ограниченной группы элементов (конструкций) из общего числа однотипных.
7. Выборочное обследование – обследование отдельных, наиболее ответственных элементов конструкции, находящихся в самых неблагоприятных условиях и определяющих в основном техническое состояние конструкции (здания, сооружения).
8. Грибовидность – искажение формы поперечного сечения двутавра или тавра, выражающееся в искривлении полки выпуклостью наружу.
9. Дефект – отклонение качества, формы и фактических размеров элементов, конструкций и узлов соединений от требований нормативных документов или проекта, возникающие на стадии изготовления, транспортировки и монтажа.
10. Деформация здания (сооружения) – изменение формы и размеров, а также положения в пространстве (осадка, сдвиг, крен и т.д.) здания или сооружения под влиянием различных нагрузок или воздействий.
11. Деформация конструкции – изменение формы и (или) размеров конструкции или ее части под действием нагрузок или воздействий.
12. Деформация остаточная – часть деформации, не исчезающая после устранения нагрузок или воздействия, вызвавших ее.
13. Деформация пластическая – остаточная деформация, происходящая без нарушения сплошности материала.
14. Деформация упругая – деформация, полностью исчезающая после устранения вызвавшей ее причины.
15. Долговечность (здания, сооружения) – способность здания или сооружения, их отдельных частей и конструктивных элементов сохранять во времени требуемые эксплуатационные качества при установленном режиме эксплуатации.
16. Допустимое отклонение (дефект, повреждение) – отклонение, при наличии которого конструкция сохраняет работоспособность.

17. Ендова (разжелобок) – пространство между двумя скатами крыши, образующими входящий угол.
18. Здание (производственное) – строительная система, состоящая из несущих и ограждающих конструкций (или совмещающих несущие и ограждающие функции), образующих замкнутый объем, предназначенный для производственной деятельности людей и эксплуатации технологического оборудования.
19. Зона (производственного здания, сооружения) – ограниченная в пространстве территория, часть производственного здания или сооружения, характеризующаяся определенными едиными признаками (комбинацией нагрузок и воздействий, условий внешней среды и т.д.)
20. Зонирование – комплекс работ по разделению производственного здания (сооружения) на зоны в зависимости от условий работы строительных конструкций.
21. Исправное состояние конструкции – техническое состояние конструкции, при котором все ее нормируемые свойства и параметры удовлетворяют требованиям действующих нормативных документов и проектной документации.
22. Испытание конструкции – экспериментальное определение изменения характеристик конструкции под действием специально создаваемых (опытных) нагрузок или воздействий.
23. Истирание – ослабление поперечного сечения элемента, вызванное трением другого элемента или сыпучего материала.
24. Каркас здания (сооружения) – стержневая система, воспринимающая усилия от нагрузок и воздействий и обеспечивающая прочность и устойчивость зданий (сооружения) во время эксплуатации.
25. Капитальный ремонт – комплекс мероприятий и работ, выполняемый с целью восстановления исправного или работоспособного состояния конструкций, включая их усиление или замену.
26. Конструкция плоскостная – конструкция, способная воспринимать нагрузку, действующую только в одной определенной плоскости.
27. Конструкция пространственная – конструкция, способная воспринимать систему сил, не лежащих в одной плоскости.
28. Контроль технического состояния – система надзора за техническим состоянием конструкций в период их эксплуатации, имеющая целью поддержание их в работоспособном состоянии и являющаяся составной частью технической эксплуатации конструкций.
29. Коробление – чередующиеся разнонаправленные выпучивания плоских частей конструкции.
30. Надежность конструкции – свойство (способность) здания или сооружения, а также их несущих и ограждающих конструкций выполнять заданные функции в течение нормативного срока эксплуатации с заданной степенью вероятности.
31. Напряжение механическое – мера внутренних сил отнесенных к площади поперечного сечения элемента, возникающих в элементах конструкций под влиянием нагрузок и воздействий.
32. Натурное освидетельствование конструкций – осмотр и обмер конструкций в натурных условиях с применением в необходимых случаях специальных приборных методов с целью выявления отклонений, дефектов и повреждений.
33. Неработоспособное (аварийное) состояние конструкции – техническое состояние конструкции, имеющей недопустимые дефекты и повреждения, свидетельствующие о возможной потере несущей способности и не перешедшей в предельное состояние потому, что еще не реализовалось расчетное сочетание нагрузок.

34. Неремонтопригодное состояние конструкции – такое неработоспособное техническое состояние конструкции, при котором восстановление ее эксплуатационных характеристик либо технически невозможно, либо экономически нецелесообразно.
35. Нормативный срок эксплуатации – устанавливаемый нормативными документами срок, в течение которого конструкция должна сохранять работоспособность.
36. Нормальная эксплуатация здания (сооружения) – эксплуатация здания (сооружения) с проведением мероприятий по поддержанию конструкций в работоспособном состоянии.
37. Образец (материал) – изделие, вид, размеры и форма которого соответствуют стандарту и предназначенное для проведения испытаний и анализа с целью определения служебных характеристик материала.
38. Обследование конструкций – комплекс работ по сбору, обработке и систематизации данных о техническом состоянии конструкций с целью их анализа и оценки.
39. Ограниченно работоспособное состояние конструкции – техническое состояние конструкции, имеющей дефекты и повреждения и сохраняющее работоспособность по отношению лишь к части заданных функций, либо при ограничении на нагрузки и режимы эксплуатации.
40. Ослабление – отклонение в форме и размерах поперечного сечения, связанное с уменьшением его площади.
41. Отказ – событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния элемента, узла, а также конструкции, здания или сооружения в целом.
42. Отклонение – несоответствие фактического значения любого из параметров технического состояния конструкции требованиям норм, проектной документации и требованиям обеспечения технологического процесса.
43. Оценка технического состояния конструкции (техническое диагностирование) – процесс количественного определения технических параметров конструкции с выявлением мест, вида, количественной оценки величины и причин появления отклонений, дефектов и повреждений и их влияния на работоспособность конструкции.
44. Повреждение – отклонение качества, формы и фактических размеров элементов и конструкции от требований нормативных документов или проекта, возникшее в процессе монтажа, погрузо-разгрузочных работ и эксплуатации конструкции.
45. Предельное отклонение – наибольшее отклонение параметра технического состояния конструкции, наличие которого приводит конструкцию в неработоспособное состояние.
46. Предельное состояние конструкции – техническое состояние конструкции при ее переходе из работоспособного в неработоспособное состояние.
47. Проба – фрагмент конструкции, отобранный из ее характерного участка, предназначенный для изготовления из него стандартных образцов с целью определения служебных свойств материала.
48. Пространственная работа конструкции – свойство конструкции, состоящее в том, что при действии на нее системы сил, лежащих в одной плоскости, в работу вовлекаются элементы конструкции, не находящиеся в этой плоскости.
49. Работоспособное состояние конструкции – техническое состояние конструкции, при котором она удовлетворяет требованиям обеспечения производственного процесса и правилам техники безопасности, хотя может не соответствовать некоторым требования действующих норм или проектной документации.

50. Разгрузка конструкции – изменение условий эксплуатации, вида и величины нагрузки, условий взаимодействия с другими конструкциями или с внешней средой, приводящее к снижению напряжений конструкции.
51. Режим эксплуатации конструкций – характеристика условий функционирования конструкции, отражающая величину, скорость изменения и периодичность нагрузок и воздействий, определяющих техническое состояние конструкций.
52. Резервы несущей способности конструкции – не учтенные при проектировании факторы, способствующие повышению ее несущей способности.
53. Реконструкция (завода, предприятия) – переустройство существующих объектов (как правило без расширения), имеющихся зданий и сооружений основного назначения, в том числе – и строительство новых зданий и сооружений на территории предприятия, взамен ликвидируемых в связи с технической или экономической нецелесообразностью их дальнейшей эксплуатации.
54. Ремонт – работа, проводимая с целью восстановления и поддержания работоспособного состояния здания, сооружения, их отдельных частей и конструкций.
55. Служба технической эксплуатации – специальное подразделение предприятия, в функции которого входит технический надзор, содержание, планирование и проведение всех видов ремонтов строительных конструкций зданий и сооружений предприятия.
56. Содержание строительных конструкций – комплекс мероприятий, обеспечивающих поддержание в исправном или работоспособном состоянии строительных конструкций зданий и сооружений.
57. Сохраняемая конструкция – существующая конструкция, сохраняемая (с усилением или без него) в составе конструкций зданий или сооружения после реконструкции.
58. Текущий ремонт – комплекс технических мероприятий и работ, выполненных с целью своевременного предохранения конструктивных элементов зданий и сооружений от преждевременного износа и поддержания их в работоспособном состоянии.
59. Технический надзор – комплекс технических мероприятий, включающий систематические осмотры и обследования строительных конструкций, проверку условий их функционирования с целью своевременного выявления дефектов и повреждений, оценки степени их износа, определения объемов и видов ремонтных работ.
60. Технический ресурс конструкции – продолжительность работы конструкции от начала ее эксплуатации или от возобновления ее в результате ремонта до перехода в предельное состояние.
61. Техническое перевооружение (завода, предприятия) – массовая замена технологического оборудования с целью резкого увеличения или изменения характера выпускаемой продукции, в том числе с частичной реконструкцией существующих зданий и сооружений, обусловленная габаритами или условиями работы вновь устанавливаемого оборудования.
62. Техническое состояние конструкции – совокупность свойств, характеризующих соответствие конструкции требованиям норм и условиям обеспечения технологического процесса.
63. Узел (конструкции, каркаса) – соединение разнородных элементов конструкции (каркаса), обладающее заданной прочностью и жесткостью.
64. Усилия внутренние – силы, возникающие в поперечных сечениях элементов конструкции от внешних нагрузок и воздействий (моменты, нормальные и поперечные силы и т.д.)

65. Усиление конструкции – увеличение несущей способности или жесткости конструкции путем изменения сечения или схемы ее работы.
66. Усиление прямое – усиление конструкции путем присоединения к усиливаемому элементу дополнительного усиливающего элемента.
67. Усиление косвенное – усиление конструкции путем введения дополнительных конструкций, не образующих с сохраняемой конструкцией единого несущего элемента, но разгружающих ее или иным образом улучшающих условия ее работы.
68. Условия эксплуатации конструкции – совокупность факторов, влияющих на техническое состояние конструкции в процессе ее эксплуатации.
69. Эксплуатация здания (сооружения) – использование здания (сооружения, конструкции) по его функциональному назначению.

11.2. Перечень норм, технических условий и стандартов, регламентирующих проектирование металлических конструкций прежних лет

Таблица 11.1. Нормативные документы на проектирование

Годы проектирования	Наименование нормативных документов	Соответствующие ГОСТ (НиТУ) на конструкционные стали
1	2	3
1843–1923	Урочное положение	
1925	Технические условия проектирования	№ 302 ТУ 24 НКПС № 321 ТУ 24 НКПС № 368 ТУ 24 НКПС
1928	Технические условия и нормы проектирования и возведения металлических конструкций. Комиссия по строительству СТО	
1931–1934	Технические условия и нормы проектирования и возведения металлических конструкций и сооружений. ВСНХ СССР от 21.08.1931 (ТУиН 1931 г.)	То же
1934–1942	Технические условия и нормы на проектирование промышленных зданий. Металлические конструкции и сооружения Главстройпром НКТП СССР (ТУиН 1934 г.)	ОСТ 4125 ОСТ 4120
1942–1946	Указания по проектированию и применению стальных конструкций в условиях военного времени от 16.06.42 г. Наркомстрой СССР (V-28-42)	ГОСТ 380-41 И-63-42 Наркомстроя
1946–1955	Нормы и технические условия проектирования стальных конструкций Минтяжстрой СССР от 23.07.46 г. (ТУиН I-46) Указания по проектированию стальных клепаных конструкций из низколегированных сталей повышенной прочности марки СХЛ-2. Минтяжстрой СССР от 08.08.46 г. (У-70-46)	ГОСТ 380-41 ГОСТ 380-50 ТУ-303 (НКЧМ)
1955–1962	Нормы и технические условия проектирования стальных конструкций Госстроя СССР от 31.01.55 г. (НиТУ 121-55)	ГОСТ 380-50, ГОСТ 380-57, ГОСТ 6713-53, ГОСТ 5058-49, ГОСТ 499-41

Продолжение табл.11.1

1	2	3
1962–1972	Стальные конструкции. Нормы проектирования. Госстрой СССР от 27.08.62 г. СНиП II-В.3-62 СНиП II-В.3-62 (1968 г) Изменения СНиП II-В.3-62 от 23.07.71 г. Временные указания по проектированию стальных конструкций из сталей высокой прочности. Госстрой СССР. СН 347-66. Указания по проектированию, изготовлению и монтажу стальных конструкций, предназначенных для эксплуатации в условиях низких температур. Госстрой СССР. СН 363-66.	ГОСТ 380-60, ГОСТ 380-60 с изменениями №1 с 1.01.66 г. ГОСТ 5058-57, ГОСТ 5058-65
1972–1981	Стальные конструкции. Нормы проектирования. Госстрой СССР от 29.12.72. СНиП II-В.3-72 (срок введения с 1.07.73) Изменения и дополнения к СНиП II-В.3-72: № 150 от 12.09.75 г. № 94 от 24.06.76 г. № 211 от 31.10.78 г. № 250 от 27.12.78 г. № 2 от 25.01.80 г. № 104 от 14.07.80 г. № 130 от 31.07.81 г.	ГОСТ 380-71 ГОСТ 380-71 ГОСТ 5058-65 ГОСТ 19281-73 с 1.01.75 г. ГОСТ 19282-73 с 1.01.75 г. ГОСТ 23570-79
1982–1998	Стальные конструкции. Нормы проектирования. Госстрой СССР. СНиП II-23-81*, часть II, гл.23 (срок введения с 1.01.82 г.) Изменения и дополнения: № 120 от 25.07.84 г.; № 218 от 11.12.85 г.; № 69 от 29.12.86 г.; № 132 от 8.07.88 г.; № 121 от 12.07.89 г.; от 1.07.90 г.	ГОСТ 380-71**, ГОСТ 10705-80, ГОСТ 10706-76*, ГОСТ 14637-79, ГОСТ 19281-73*, ГОСТ 19282-73, ГОСТ 23570-79, ТУ 14-1-1217-75, ТУ 14-1-1308-75, ТУ 14-1-1722-76, ТУ 14-1-3023-80, ТУ 14-3-389-72, ТУ 14-3-500-76, ТУ 14-3-567-76, ТУ 14-3-829-79

Таблица 11.2. Стандарты на определение служебных свойств сталей

№ ГОСТ	Наименование
1	2
7564-73*	Сталь. Общие правила отбора проб, заготовок образцов для механических и технологических испытаний
7565-81	Чугун, сталь и сплавы. Метод отбора проб для определения химического состава
22536.0-77	Сталь углеродистая и чугун нелегированный. Общие требования к методам анализа
22536.1-77 по 25536.12-77	Сталь углеродистая и чугун нелегированный. Методы определения содержания: углерода, графита, серы, фосфора, кремния, марганца, мышьяка, хрома, меди, никеля, алюминия, титана, ванадия
22536.13-77	Стали углеродистые и чугун нелегированный. Методы спектрального анализа
1497-84*	Металлы. Методы испытания на растяжение

1	2
9454-78*	Металлы. Методы испытания на изгиб при пониженной, комнатной и повышенной температуре
2860-65	Методы испытания на усталость
7268-82	Сталь. Метод определения склонности к механическому старению по испытанию на ударный изгиб
22761-77	Металлы и сплавы. Метод определения твердости по Бринеллю
9013-59	То же по Роквеллу
9013-59	То же по Виккерсу
23273-78	То же по Шору
10243-75*	Сталь. Методы испытаний и оценки макроструктуры
12344-78	Стали легированные и высоколегированные. Методы определения углерода
12346-78	То же, кремния
12348-78	– ″– марганца
12350-78	– ″– хрома
12353-78	– ″– кобальта
12355-78	– ″– меди
12352-81	– ″– никеля
12361-82	– ″– ниобия
12359-81	Стали углеродистые, легированные и высоколегированные. Методы определения азота

Таблица 11.3. Перечень ГОСТов по определению свариваемости и свойств сварных соединений

№ ГОСТ	Наименование
2601-74	Сварка металлов. Основные понятия
19521-74	Сварка металлов. Классификация
11969-79	Сварка плавлением. Основные положения и обозначения
23870-79	Свариваемость сталей. Метод оценки влияния сварки плавлением на основной металл
13585-68	Сталь. Метод валиковой пробы для определения допускаемых режимов дуговой сварки и наплавки
23240-78	Конструкции сварные. Метод оценки хладостойкости по реакции на ожог сварной дугой
6996-66	Сварные соединения. Методы определения механических свойств
7122-81	Швы сварные и металл наплавленный. Методы отбора проб для определения химического состава
3242-79	Сварные соединения. Методы контроля качества

11.3. Рекомендации по документальному оформлению результатов освидетельствования состояния конструкций

Основные требования к заданию на выполнение работ по обследованию и оценке технического состояния стальных конструкций зданий и сооружений

1. Задание включает пояснительную записку и чертежи.
2. Содержание пояснительной записки:

2.1. Наименование работ:

– провести обследование … (далее приводится наименование конструкций или частей стального каркаса с указанием пролетов, осей, отметок и других данных,

характеризующих объем работы; приводится название объекта, предприятия, местонахождение и т.д.)

2.2. Сведения о нарушениях или затруднениях технологического процесса, создаваемых состоянием несущих металлоконструкций. Сведения об общем состоянии конструкций, их моральном и физическом износе и времени нахождения в эксплуатации с результатами наблюдения за конструкциями, в том числе результатами периодических геодезических съемок и т.д. Сведения о характере предстоящего технического перевооружения предприятия, в том числе об изменении нагрузок и воздействий на конструкции.

2.3. Технико-экономическое обоснование необходимости проведения обследования и оценки технического состояния стальных конструкций.

2.4. Сведения о замене конструкций в процессе эксплуатации, их ремонте или усилении с указанием чертежей, по которым выполнены эти работы и с указанием времени выполнения работ (сведения приводятся как для обследуемых конструкций, так и для конструкций, передающих нагрузку на обследуемые конструкции).

2.5. Технологические нагрузки на обследуемые конструкции.

2.6. Сведения о предполагаемых изменениях технологических нагрузок или эксплуатационного режима здания (сооружения).

2.7. Сведения о наличии подъемно-транспортного оборудования, передающего подвижные нагрузки на обследуемые конструкции.

2.8. Сведения о предполагаемых изменениях характеристик или расположения подъемно-транспортного оборудования.

2.9. Район ветровой и снеговой нагрузок, расчетная зимняя температура, степень сейсмичности района и другие внешние факторы с указанием максимальных значений температуры, категории пожарной опасности и взрывоопасности.

2.10. Характеристики металла, использованного при изготовлении обследуемых конструкций (приводятся на основании сертификатов завода-изготовителя).

2.11. Общая площадь, строительный объем, балансовая стоимость здания, затраты на капитальный ремонт и реконструкцию здания за время его эксплуатации (по карточке учета основных средств формы ОС).

3. Чертежи, прилагаемые к заданию:

3.1. Архитектурно-строительные чертежи марок АР и КМ, включая заглавные листы с перечнем чертежей проекта и основными данными по проекту: планы, разрезы, чертежи всех конструктивных элементов, нагрузка от которых передается на обследуемые конструкции.

3.2. Чертежи металлоконструкций марки КМД – полный комплект.

3.3. Чертежи металлоконструкций марки КМ – полный комплект.

3.4. Чертежи на замены металлоконструкций в процессе эксплуатации, их ремонт и усиление.

3.5. Чертежи со схемами существующих и прогнозируемых технологических нагрузок.

3.6. Схемы размещения существующего и прогнозируемого подъемно-транспортного оборудования с его габаритами, точками опирания на конструкции и весовыми характеристиками.

Задание подписывается руководителем соответствующей службы предприятия-заказчика, в ведении которой находится выполнение заказываемых работ.

Задание направляется в адрес организации-исполнителя с сопроводительными письмами, подписанными руководителем предприятия-заказчика.

Таблица 11.4. Ведомость сечений элементов (конструкции)

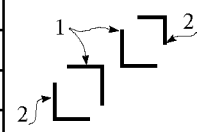
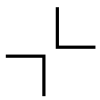
Код конструкции и элемента			Фактическое сечение			Проектное сечение		
Наименование конструкции	Место расположения конструкции	Место расположения элемента	Эскиз	Позиция	Состав	Эскиз	Позиция	Состав
ФС	1А–Б	3–4		1	2L75×75×8			2L80×80×8
		3–6		2	2L75×75×6			
		3–6		1	2L80×80×6			
		7–8		2	2L75×75×6			
	3А–Б	1–3			13БТ1			2L180×100×10
		3–5			13БТ2			2L160×100×12
		5–7			13БТ3			2L160×100×10
		7–9			15БТ2			2L180×100×10
		9–11						
		11–13						

Таблица 11.5. Ведомость сечений и длин сварных швов (конструкция)

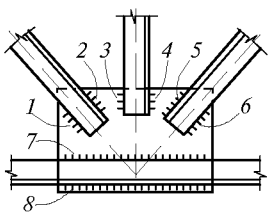
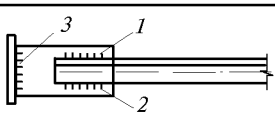
Код конструкции	Код узла	Эскиз	Позиция	Фактическое сечение, мм				Проектное сечение, мм		
				сварные швы				сварные швы		
				по направлению взгляда	с обратной стороны	δ фасонки	*a*, мм, расстояние между примыкающими элементами	по направлению взгляда	с обратной стороны	δ фасонки
ФС: 1А–Б	7		1	6–180	6–185	16	40	6–180	6–180	16
			2	6–180	6–185			6–180	6–180	
			3	4–154	4–156			6–160	6–160	
			4	4–156	4–154			6–160	6–160	
			5	6–192	6–192			6–180	6–180	
			6	6–192	6–194			6–180	6–180	
			7	8–408	8–411			8–400	8–400	
			8	8–412	8–410			8–400	8–400	
	2		1	4–192	4–192	12	60	6–190	6–190	16
			2	4–184	4–185			6–180	6–180	
			3	8–310	8–310			8–310	8–310	

Таблица 11.6. Ведомость дефектов и повреждений (конструкция)

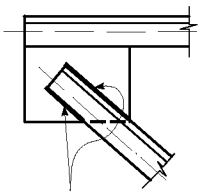
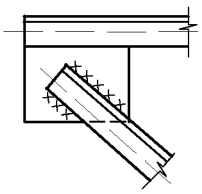
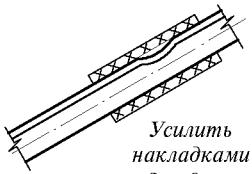
Код конструкции	Код элемента или узла	Группа дефекта (повреждения) по классификации	Эскиз и описание дефекта (повреждения)	Заключение (рекомендуемый способ устранения)
ФС : 6А–Б	2^{x} –3	4.20	 *разрушены сварные швы*	 *восстановить сварные швы с K_f = 6 мм*
ФС : 7А–Б	9–12	6.2	 *Полки раскоса погнуты l_f = 150 мм*	 *Усилить накладками δ = 8 мм*

Таблица 11.7. Ведомость измерений параметров воздушной среды и исследования свойств пыли

Дата замера	Наружный воздух			Внутренняя воздушная среда помещений								
	время замера	температура в °С	относительная влажность в %	время замера	цех	отделение	№ сечения и пункт замера	температура в °С	относительная влажность в %	агрессивные компоненты	концентрация в мг/м^3	состояние вентиляции (аэрации)

Таблица 11.8. Результаты исследования проб пыли с поверхности металлических конструкций

Дата отбора проб	№№ проб п/п	Цех	Отделение, конструкции, с которых отобрана проба	Толщина пылеотложений в мм	Химический состав пыли	Растворимость в г/л	Степень гигроскопичности	Примечание

Таблица 11.9. Ведомость нагрузок

Наименование конструкции (части здания, элемента)	Пролет	Классификация нагрузки	Наименование нагрузки	Единица измерения	Фактическая (или нормативная)	Коэффициент надежности по нагрузке	Расчетная фактическая	Примечание
Покрытие	*А–Б* 1–38	Постоянная	Гидроизоляционный ковер (3 слоя рубероида на битумной мастике)	кН/м^2	0,10	1,3	0,13	
			Утеплитель (пенопласт ФРП-1: $\gamma = 0{,}5$ кН/м^3, $h = 100$ мм		0,05	1,2	0,06	Указать источник информации (СНиП, испытания и др.)
			Стальной профилированный настил	–	0,15	1,05	0,1575	
			Прогоны	–	0,15	1,05	0,1575	
			Стропильные фермы	–	0,26	1,05	0,2730	
			Связи по фермам	–	0,05	1,05	0,0325	
			Итого:		0,76		0,8305	
		Временная	Снеговая	кН/м^2	1,0	1,4	1,4	
Подкрановые балки	*А–Б*	Временная	Крановая	кН/м^2	–	–	–	

Таблица 11.10. Ведомость результатов механических испытаний образцов стали

Код конструкции	Код элемента (узла)	Толщина проката (сечение)	№ проб	Характеристики механических испытаний						Предполагаемая марка стали	Примечание
				Временное сопротивление (МПа)	Предел текучести (МПа)	Относительное удлинение (%)	Ударная вязкость KCU, кДж/см^2				
							°C		после мех. старения		
							+20	–20			
ФС:3*А–Б*	1–4	7	1	500	350	21	0,4	0,35	0,3	10Г2С1	
	3–5	8	2	500	350		0,4	0,35	0,3	10Г2С1	
	3–4	7	3	500	350		0,4	0,35	0,3	10Г2С1	
	2–4	8	4	300	350	21	0,4	0,35	0,3	10Г2С1	
ПП:*А*1–2	2–4	10	5	480	330	21	0,35	0,3	0,3	09Г2С	
121	1–3	10	6	480	330	21	0,35	0,3	0,3	09Г2С	

Примечание: при необходимости проводится испытание на ударную вязкость при $t = -40°C$ и $t = -70°C$.

Таблица 11.11. Ведомость результатов химического анализа стали

Код конструкции	Код элемента (узла)	№ пробы	Массовая доля элементов, %								Примечание
			C	Мп	Si	S	P	Ni	Cr	Cu	
ФС:2А–Б	1–4	1	0,10	1,43	0,8	–	–	0,28	0,25	0,17	
	9–10	2	0,10	1,43	0,8	–	–	0,28	0,25	0,17	
	6–8	3	0,10	1,43	0,8	–	–	0,28	0,25	0,17	
КН:АН–12	1–3	4	0,11	1,42	0,8	–	–	0,25	0,25	0,19	
	6–8	5	0,11	1,42	0,8	–	–	0,25	0,25	0,15	
	3–6	6	0,11	1,42	0,8	–	–	0,25	0,25	0,19	
	1–3	7	0,12	1,43	0,9	–	–	0,28	0,22	0,21	

11.4. Измерительные инструменты и приборы, применяемые при освидетельствовании состояния конструкций

Таблица 11.12. Инструменты для замера линейных размеров и выполнения геодезических работ

№ пп	Наименование. Тип, (завод-изготовитель)	Цена деления, мм	Диапазон измерений (мм)	Область применения
1.	Линейки измерительные металлические с двумя шкалами ГОСТ 427-75	1,0	0–150 0–300	Размеры до 300 мм
2.	Линейки измерительные металлические с одной шкалой ГОСТ 427–75	1,0	0–500 0–1000	Размеры до 1000 мм
3.	Рулетки РЛ ГОСТ 7502-80	1,0	0–2000	Размеры свыше 1000 мм
4.	Штангенциркули ГОСТ 166-80: – с линейкой для измерения глубины ШЦ-1; – с губками из твердосплавных материалов ШЦТ-1; – с односторонним расположением губок ШЦ-111		0–125 0–125 0–250 250–630 320–1000 500–1500 800–2000	Предназначены для наружных и внутренних измерений длин, для измерения глубин и разметки
	Штангенциркуль-угломер для разметки углов, модель код ОКП 00202 (Ставропольский инструментальный завод)		0–160 0°–90°	
5.	Штангенциркуль со стрелочным отсчетом, модель 124, код ОКП 3933113101, ТУ 2-034-9-85 (з-д «Калибр» г.Москва)	10 0,1	0–150	Предназначен для измерения наружных и внутренних размеров, высоты уступов, глубины глухих отверстий и пазов
6.	Струна капроновая (леска капроновая, ОСТ 6-06-387-84) Струна металлическая (проволока стальная, ГОСТ 9389-75, кл.1)			Применяется для задания линии отсчета при определении отклонений от прямолинейности и плоскости
7.	Рулетка с динамометром (Судостроительный завод, г.Санкт-Петербург)	1,0	0–50 м	Предназначена для измерения наружных и открытых внутренних размеров, размеров по вертикали, межцентровых расстояний, расстояний между закладными, разметки, имеет встроенный в рукоятку динамометр и ролики, фиксирующие длину полотна рулетки

Таблица 11.13. Оптические средства измерения линейных размеров

№ пп	Наименование. Тип, (завод-изготовитель)	Цена деления, мм	Диапазон измерений (мм)	Область применения
1.	Микроскоп МПБ-2 ТУЗ-3.824-78	0,05		Используется для измерения трещин, раковин и других размеров на плоскости изделий
2.	Линейки оптические ГОСТ 24703-81	0,001	200–4000	Предназначены для определения отклонений от прямолинейности и плоскостности поверочных линеек
3.	Труба визирная ППС-11 ТУЗ-31045-75	0,01	0,5–30 м	Предназначена для измерения отклонений от прямолинейности, перпендикулярности, соосности и горизонтальности
4.	Струна оптическая ОС-3М ТУ АЛ-2766, 053ТУ (Новосибирский приборостроительный завод им. Ленина)	0,001 0,01	0,2–30 м	Предназначена для измерения отклонений от прямолинейности поверхности с III по X степени точности в цеховых условиях
5.	Прибор ИШБ-6 (ЛИСИ г.С.-Петербург)		0,05–10 мм	Предназначен для измерения шероховатости независимо от состояния поверхности (твердого, легкодеформируемого) и может быть использован для контроля качества поверхности изделий в процессе их заглаживания и при приемке готовой продукции
6.	Уровень брусковый (завод «Калибр» г.Москва) ГОСТ 9392-75 Модель 117	0,02		Уровень предназначен для установки в горизонтальное и вертикальное положение поверхностей и определения отклонений от этих положений.

Геодезические приборы, применяемые при обследовании и испытании металлоконструкций

Теодолитом называют геодезический прибор для измерения на местности горизонтальных и вертикальных углов, применяемый при топографической съемке, геодезических, астрономических и инженерных работах.

Таблица 11.14. Технические характеристики теодолитов

Технические параметры	Марка прибора					
	Т1	2Т2	2Т5	Theo 010B	Theo 015B	Theo 020B
1. Средняя квадратическая погрешность измерения угла, (сек)						
горизонтальный	±1–1,3	±2	±5	±1,0	±2,5	±3,0
вертикальный	1,5–2,0	2–3	7–8			
2. Увеличение зрительной трубы	30; 40	27,5	27,5	30	30	30
3. Наименьшее расстояние визирования (м)	5	2	2	1,5	1,5	1,5
4. Цена деления лимба (мин)						
горизонтальный	10	20	60	20	60	60
вертикальный	10	20	60	20	60	60
5. Цена деления шкалы						
оптического микрометра (сек)	1	1	–	1	6	–
отсчетного микроскопа (мин)	–	–	1	–	–	–
6. Масса, (кг)	9	4,8	4,2	4,8	4,8	4,5
7. Температурный диапазон работы (°С)	–50 +50	–50 +50	–50 +50	240 +45	–40 +45	–40 +45

В строительстве используются для разного рода планировочных и высотных выверок и контроля монтажа металлоконструкций, установки элементов конструкции в проектное положение, а также для определения и исследования деформаций и осадок сооружений. Для обеспечения высокого качества работ целесообразно использовать высокоточные и точные оптические теодолиты.

Нивелир – это оптико-механический инструмент, снабженный зрительной трубой, вращающейся в горизонтальной плоскости, и чувствительным уровнем.

Нивелиры используются для определения вертикальных перемещений при наблюдениях за деформациями и осадками конструкций, оценки отклонений от плоскости и формы заданного профиля, передачи отметок на монтажные горизонты и при контроле монтажа металлоконструкций. Применяются высокоточные (H-05, H-05K, Ni-002) и точные нивелиры (H-3, H-3K, Ni-007). Значительно сокращает сроки работ и облегчает их проведение использование нивелиров с самоустанавливающейся осью визирования (нивелиры с компенсатором).

Таблица 11.15. Технические характеристики нивелиров

Технические параметры	Высокоточные нивелиры			Точные нивелиры		
	H-05	H-05K	Ni-002	H-3	H-3K	Ni-007
1. Средняя квадратическая погрешность определения превышения на 1 км двойного нивелирного хода (мм)	0,5	0,5	0,2	3	3	2
2. Увеличение зрительной трубы (*)	42	42	40	30	30	31,5
3. Наименьшее расстояние визирования (м)	2	2	1,5	2	2	2,2
4. Цена деления цилиндрического уровня при трубе (с)	10			15		
5. Цена деления шкалы оптического микрометра (мм)	0,05	0,05	0,05	–	–	0,05
6. Погрешность самоустановки линии визирования, (с)	–	0,2	0,005	–	0,1	0,15
7. Температурный диапазон работы, (°С)	–30 +50	–30 +50	–30 +50	–40 +50	–40 +50	–40 +50
8. Масса, (кг)	6	6	6,5	2,0	2,5	3

Таблица 11.16. Высотомеры гидростатические (гидронивелиры)

Технические параметры	Модель 115	Мейссера (Германия)	НШТ-1
Длина шкалы измерений (мм)	25	100	200
Цена делений (наименьшая) (мм)	1	1	1
Тип отсчетного устройства	Микрометренный индекс-винт		
Цена деления микрометренного винта	0,01	0,01	–
Длина шланга (м)	10	30	10
Средняя квадратическая погрешность одного измерения (мм)	0,01	0,02	0,5
Масса прибора (кг)	12	12	3,5

Электрооптический дальномер (светодальномер) – прибор, используемый для измерения с помощью модулированного по интенсивности светового луча по временным или фазовым соотношениям посылаемого и принятого (отраженного) от объекта сигнала.

Светодальномеры предназначены для измерения длин линий при контрольно-исполнительных съемках смонтированных металлоконструкций, для определения и исследования деформаций и при других работах. Характеристики некоторых отечественных светодальномеров приведены в талб.11.17.

Таблица 11.17. Технические характеристики светодальномеров

Технические параметры	Марка прибора			
	МСД1М	ДК 001	СТ-5 «Блеск»	СМ-3 «Топаз»
1. Дальность действия (км)	0,5	0,5	5	3
2. Точность (мм)	2 мм+5 мм/км	0,8 мм+1,5 мм/км	10 мм+5 мм/км	2 мм+2 мм/км
3. Диапазон углов наклона, (град)	–40 +90	–40 +90	–20 +20	–20 +20
4. Потребляемая мощность (Вт)	2,5	35	5	5
5. Температурный диапазон (°С)	–10 +40	–15 +20	–30 +40	–30 +40
6. Цифровая индикация измеренного расстояния	нет	нет	есть	есть
7. Масса приемопередатчика (кг)	9	7,5	4,5	4,5

Фотограмметрические приборы

Фотограмметрией называют способ определения формы, размеров и положения объекта в пространстве по фотографическим изображениям. Стереофотограмметрия изучает методы измерения объемных форм (например рельефа местности) по стереопаре фотоснимков, основанные на использовании стереоскопического эффекта и измерения объемной модели стереометрическими приборами.

Таблица 11.18. Основные технические характеристики универсальных фотограмметрических камер UMK 1318

Наименование параметра	Тип фотограмметрической камеры UMK				
	6,5/1318	10/1318F	10/1318N	20/1318	30/1318
1	2	3	4	5	6
Фокусное расстояние, мм	64	99		200	300
Дисторсия объектива, мкм	±5	±1		±4	±2
Выдержка экспозиции	T; B; 1, 1/2, 1/4, 1/8, 1/15, 1/30, 1/60, 1/125, 1/250, 1/400				
Полезный формат	120 мм ×166 мм				
Съемочные расстояния, м	2 … ∞	1 … ∞		4 … ∞	25 … ∞
Полезный угол изображения	104° 86°	79° (длинная сторона кадра) 61°(короткая сторона кадра)		45° 33°	31° 22°
Пределы угла наклона камеры	+90°; +75°; +60°; +30°; +15°; 0; –15°; –30°				
Индикация режима съемки	A; AL; AR; B; BL; BR				
Индикация номера снимка	от 1 до 72				
Точность установки по уровням	30″				
Используемый фотоматериал	Стеклянные фотопластинки: 13×18 см толщина 1,5–6 мм, длина 9 м. Рулонная фотопленка: ширина 190 мм				
Количество кадров	около 60				
Последовательность цикла съемки	3, 4, 5, 6, 8, 10, 15, 20, 25, 30 С				
Источник питания	12 В (6 А·г)				
Номер для заказа на фирме «Karl Zeiss»	140212: 016.20	140212: 045.20	140212: 061.20	140212: 121.20	140212: 131.20

Таблица 11.19. Основные технические характеристики стереофотограмметрических камер JMK 1318 и SMK 5,5/0808

Наименование параметра	Тип стереофотограмметрической камеры		
	SMK 5,5/0808/40	SMK 5,5/0808/120	JMK 10/1318
Фокусное расстояние объективов	101 мм	56 мм	56 мм
Максимальная дисторсия объективов	±5÷12 мкм	±5 мкм	±5 мкм
Выдержка экспозиции	T; B; 1...1/400C	B; 1...1/500	
Полезный формат снимка	120 мм × 160 мм	80 мм × 80 мм	
Съемочное расстояние, м	1...5	1,5...10	5...30
Полезный угол изображения	76° 70°	71°(длинная сторона кадра) 71°(короткая сторона кадра)	
Пределы углов наклона стереокамеры	от 0 до –45°	от 0 до 360° через 15°	
Значения базисов стереосъемки	350 мм...1600 мм	400 мм	1200 мм
Перемещение на штативе	0,6÷2,1 м	1,3÷2,5 м	
Индикация режима съемки	A; AR; B; BR	A; B	
Точность установки по уровням	15″	27,5″	
Используемый фотоматериал	Пластинки 13×18 см толщиной до 3,5 мм	Пластинки 9×12 см, толщиной 1,2 мм–2,2 мм	
Источник питания	12 В	12В (6 А·г)	
Номера для заказа на фирме «Karl Zeiss»	Каталог № 14-323a-8	141502: 002.20	141503: 002.20

Компараторами называют измерительные приборы для сравнения измеряемой величины с эталоном. Различают компараторы оптические, электрические, пневматические. При обследовательских работах используют весьма точные моно- и стереокомпараторы для обработки фотоснимков.

Таблица 11.20. Основные технические характеристики прецизионных моно- и стереокомпараторов для аналитической обработки снимков

Наименование параметра	Наименование прибора			
	Моно-компаратор «Askorekord»	Стерео-компаратор «Steco-1818»	Стерео-компаратор «Stecometer-C»	Стерео-компаратор «Dikometer»
Максимальный формат снимков	30 см × 30 см	18 см × 18 см	23 см × 23 см	24 см × 24 см
Увеличение оптической системы наблюдения	18^x, 29^x, 36^x, 45^x, 58^x, 90^x	8^x	$6^x(9^x)$, 12^x, 18^x	8^x, 17^x, 24^x
Диапазоны измерений				
Координаты X′	до 295 мм	до 235 мм	±140 мм	±120 мм
Y′	270–295	до 180 мм	±140 мм	±120 мм
Параллаксы X″	–	до 75 мм	от -10 до 130 мм	±120 мм
Y″	–	от -10 до +10 мм	±40 мм	±120 мм
Средняя квадратическая ошибка измерения координат и параллаксов	±0,0004 мм	+0,01 мм ±0,001 мм	±0,002 мм	±0,002 мм
Дополнительные приборы	–	–	Электронный регистрирующий прибор «Coordimeter-G» и ЭВМ	Счетчик-интерфейс ZJF-2 и ЭВМ
Номер для заказа на фирме «Karl Zeiss»	163613: 023.20	145201: 002.20	145205: 011.20	Каталог №14-K358a-0

Таблица 11.21. Основные технические характеристики универсальных приборов для обработки фотоснимков

Наименование параметра	Наименование прибора		
	Стереокартирующий прибор «TOPOCART-C»	Стереокартирующий прибор «TECHNOKART»	Автоматическая система обработки «ТОРОМАТ»
1	2	3	4
Максимальный формат снимка	60 см × 90 см	23 см × 23 см	60 см × 90 см
Диапазон фокусных расстояний стереокамер	от 50 мм до 215 мм	от 50 мм до 215 мм	от 50 мм до 215 мм
Установка базисных составляющих:			
b_x	от 0 до 240 мм	от 0 до 240 мм	от 0 до 240 мм
b_z	от –20 мм до +20 мм	от –20 мм до +20 мм	от –20 мм до +20 мм
b_y	от –20 мм до +20 мм	от –15 мм до +15 мм	от –20 мм до +20 мм
Установка пространственных координат:			
X	480 мм	±240 мм	±240 мм
Y	480 мм	±240 мм	±240 мм
Z	70 мм–320 мм	35 мм–350 мм	70 мм–320 мм
Средняя квадратическая ошибка измерения параллаксов	0,003 мм	0,004 мм	0,003 мм
Средняя квадратическая ошибка определения координат	±0,03 мм	±0,03 мм	±0,03 мм
Номер для заказа на фирме «Karl Zeiss»	144121:001.22	145610:000.20	145510:001.22

11.5. Инструменты, приборы и аппаратура для измерения напряженно-деформированного состояния конструкций

Таблица 11.22. Силоизмерительная аппаратура

№ пп.	Наименование	Завод-изготовитель
1.	Динамометры тензометрические ДСТБ-010 на усилия 10, 12, 16, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 80, 100, 120, 160, 200, 250, 320 кН	Украина, Киев. Опытный завод института автоматики. Завод порционных автоматов
2.	Динамометры тензометрические типа СВК с кольцевым чувствительным элементом на усилия 120, 250, 500, 1000 кН	Россия. Завод Тензоприбор, (г.Краснодар)
3.	Динамометры тензометрические на растяжение типа ДПУ на предельное усилие 20, 50, 100, 200, 500 кН	
4.	Динамометры механические на растяжение ДОРМ-3 на предельное усилие 100, 200, 1000, 2000 кН	
5.	Динамометры механические на сжатие типа ДОСМ-3 на предельные усилия 200, 500, 1000, 2000 кН	
6.	Динамометры механические универсальные типа ДОУМ-3 на предельные усилия 3000 и 50 кН	

Таблица 11.23. Тензометрическая аппаратура

№	Наименование	Изготовитель
1.	Тензометры механические рычажные ТР-1, ТР-2	Россия. ЗОКИО ЦНИИПСК
2.	Компараторы переносные механические с базой 200÷1000 мм с индикатором часового типа с ценой деления 0,01 мм	Украина, Днепропетровск, мастерские Днепрпроект-стальконструкции
3.	Тензорезисторы проволочные петлевые на бумажной основе с базой 5, 10, 20, 50 мм и сопротивлением 30÷200 ом	Россия. ЗОКИО ЦНИИПСК
4.	Тензорезисторы фольговые термокомпенсированные на пленочной основе с базой 3, 5, 10, 20 мм	
5.	Тензорезисторы для высокотемпературных измерений с базой 10, 20 мм	
6.	Тензорезисторы малобазные фольговые на пленочной основе с базой 1, 1,5, 3 мм с сопротивлением 20÷50 ом	Россия. МИСИ
7.	Измеритель тензометрический с коммутаторами ключевого типа АИ-1	Россия. ЗОКИО ЦНИИПСК
8.	Измеритель тензометрический с увеличенным диапазоном измерений АИ-2 с коммутаторами ключевого типа	– ″–
9.	Тензометрический электронный измерительный комплекс ТК-2	– ″–
10.	Система информационно-измерительная тензометрическая СИИТ-2	Россия. Краснодарский завод «Тензоприбор»
11.	Система информационно-измерительная тензометрическая СИИТ-3	– ″–
12.	Измеритель деформаций цифровой ИДЦ-1	– ″–
13.	Осциллографы шлейфные типа Н044.1; Н044.2	Молдова. Кишиневский завод «Виброприбор»
14.	Самописцы Н-3031-4; Н-3031-6; Н-3031-8	Россия. Краснодарский завод измерительных приборов
15.	Виброизмерительный комплект ВИ6-ТН	Эстония, г.Тарту, п/я А-1603

Таблица 11.24. Деформометры

№	Наименование	Изготовитель
1.	Прогибомеры Аистова 6ПАО	С.-Петербург. Инструментальный завод
2.	Прогибомеры Максимова ПМ-3	Мастерские Московского горного института
3.	Прогибомеры Мокина	ЗОКИО ЦНИИПСК
4.	Прогибомеры электронные	– ″–
5.	Индикаторы часового типа 07-052 И410М, 07-058 И425, 07-59 И450 0,001, 0,002	
6.	Уровень микрометрический тип 107, 109	
7.	Уровень электронный М 1-28	
8.	Квадрант оптический К010; К060	Завод «Калибр, г.Москва
9.	Виброграф ручной ВР-1	Таганрогский завод «Виброприбор»

Таблица 11.25. Дефектоскопы

№ пп.	Наименование
1.	Дефектоскоп ультразвуковой переносной ДУК-66ПМ
2.	Измеритель глубины трещин ИГТ-10НК
3.	Дефектоскоп ультразвуковой УД2-12
4.	Ультразвуковой толщиномер
5.	Техноэндоскоп волоконнооптический РВП-496; АР-16/5 ЭО
6.	Дефектоскоп коленчатый перископический ПДК-60

Таблица 11.26. Первичные преобразователи (датчики). Сейсмоприемники

Тип, марка	Диапазон измерений		Чувствительность, МВ/см/с	Габариты, мм	Масса, кг
	частота, Гц	амплитуда, мм			
С-5С	0,2–100	$15 \cdot 10^{-5}$–15	130	355×147×188	11
ОСП-2М	0,55–55	0,01–1200	90	155×116×115	6,5
ВВП-Ш	1–100	1–100	1,1	150×230×230	9,6
ВЭГИК	1–100	0,005–2	110	300×120×150	9,5
К001	2–200	0,002–1	15	130×70×70	0,6

Таблица 11.27. Первичные преобразователи. Акселерометры

Тип, марка	Коэффициент преобразования по напряжению в мВ.сек^2/м	Частота собственных колебаний датчика в кГц	Частотный диапазон в Гц	Наибольшее ускорение в м/сек^2	Размеры в мм	Масса в г	Тип измерительного прибора
АПТ-1 Трехкомпонентный	20–30	1,5±15%	0,15÷500	100	0,154×130	4600	светолучевой осциллограф
ДН-3	на частоте 63 Гц–10		0÷4000		27×31×24	0,06	Виброметр типа ВМ-1
ДН-4	на частоте 1000 Гц–1	–	0÷12500	до 10000	18,8×7×14	0,013	
	на частоте 63–31,5		0÷500	– ″–	0,22×28	0,04	

Таблица 11.28. Измерительные и регистрирующие приборы

Тип, марка	Число каналов	Верхний предел регистрируемых частот, Гц	Ширина ленты, размер экрана, мм	Масса, кг
Осциллограф электронно-лучевой С2-69	2	$2 \cdot 10^6$	80×100	17
– ″– С1-33	5	$5 \cdot 10^6$	100×100	62
Светолучевой осциллограф Н044.2	24	6000	120	21
Магнитограф Н066	14	20000	25,4	60
Кассетный накопитель на магнитной ленте Н083	14	20000	25,4	42
Прибор быстродействующий самопишущий Н3031	8	125	320	35

Таблица 11.29. Аппаратура для обработки и анализа результатов измерений

Наименование	Тип, марка	Диапазон частот	Регистрирующее устройство
Преобразователь графиков для оцифровки 12 одновременных процессов	Ф018		Перфоратор ПА-150 непосредственный ввод в ЭВМ
Комплекс измерительно-вычислительный для автоматизированного сбора и анализа результатов измерений	О38	$0,1–10^6$	АЦП, перфоратор, магнитограф, графопостроитель ввод в ЭВМ
Измерительно-вычислительный комплекс	К754	10000	Графический индикатор С1-83, графопостроитель Н307

Таблица 11.30. Краткие технические характеристики приборов для измерения твердости металла

Обозначение прибора	Наименование прибора и его назначение	Диапазон измерения твердости	Испытательная нагрузка, Н(кгс)	Форма испытательного наконечника	Тип отсчетного устройства	Тип привода. Процесс измерения	Рабочее пространство (высота × глубину) мм	Габаритные размеры, мм (масса, кг). Особенность конструкции, наличие специальных приспособлений
ТШ-2М	Прибор для измерения твердости металлов по методу Бринелля	8...450HV	29430 (3000); 9800 (1000); 7355 (750); 2450 (250)	Шарики ∅2,5; 5,0; 10,0 мм	Микроскоп 24^{x}МПБ-2	Электро-механический	250×130	730×225×880(180)
ТШП-4	Прибор переносный для измерения твердости металлов по методу Бринелля	30...450HV	29430 (3000); 9800 (1000); 7355 (750); 2450 (250)	Шарики ∅5,0; 10,0 мм	Микроскоп 24^{x}МПБ-2	Ручной	–	340×290×150(10) Цепной захват
ТП-7Р-1	Прибор для измерения твердости металлов по методу Виккерса	8...2000HV	49 (5); 98,1 (10); 294 (30); 490 (50); 981 (100)	Алмазная пирамида	Проекционная система 120^{x}	Ручной	210×180	720×370×1150(195)
ТПП-2	Прибор переносный для измерения твердости металлов по методу Виккерса	1500HV	49 (5); 98,1 (10)	Алмазная пирамида	Микроскоп 125^{x}	–	С магнитным захватом, струбцина 160×80	220×125×240(5,4) 210×145×620(5,6)
ТК-14-250	Прибор для измерения твердости металлов по методу Роквелла	20...67HRC 70...85HRA 25...100HRB	1470 (150); 981 (100); 588 (60)	Алмазный конус < 120°, шарик ∅1,588 мм	Индикатор 0,001 мм	Ручной	250×170	580×330×830(130) Смена нагрузок механическая поворотом рукоятки
ТКП-1	Прибор для измерения твердости металлов по методу Роквелла	20...67HRC 70...85HRA 25...100HRB	98 (10); 1470 (150); 980 (100); 588 (60)	Алмазный конус < 120°, шарик ∅1,588 мм	Индикатор 0,002 мм	Ручной	150×80	225×130×680(15) Магнитный захват, цепной захват

Примечание. Изготовитель приборов ПО «Точприбор» (г.Иваново).

Таблица 11.31. Технические характеристики маятниковых копров

Марка копра	Вид испытания	Наибольший запас энергии, Дж	Число сменных маятников	Запас энергии сменных маятников, Дж	Скорость движения маятника, м/с	Допускаемые потери энергии, % не более	Угол подъема маятника до центра удара, мм	Расстояние между опорами, мм	Габаритные размеры, мм	Масса, кг
КМ-0,5	Двухопорный изгиб (ДИ)	5	2	5; 2,5	3, 4	2	94, 160	40–100	790×300×900	120
БКМ-5		50	6	50, 25, 10, 5	3,8; 2,9	0,5; 1,0; 2,0	160, 97	40–70	665×350×1100	220
КМ-15		150	1	150, 100, 75	40; 3,5; 3,0	2	92, 78, 66	30–120	2100×700×1400	650
КМ-30		300	2	300, 150	5,5	0,5	156	40–120	2100×910×2115	880

Примечание. Изготовитель ПО «Точприбор» (г.Иваново).

11.6. Испытательные машины, стенды и другое оборудование для испытания конструкций

Таблица 11.32. Технические характеристики машин для испытания на растяжение

Индекс (тип) машины	Наибольшая нагрузка, кН	Тип привода	Рабочий ход активного захвата, мм	Максимальное расстояние, мм		Масштаб записи деформации	Скорость перемещения активного захвата, мм/мин	Габаритные размеры, мм	Масса, кг	Вид (тип) силоизмерителя	Изготовитель
				между захватами	между опорами						
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Р-05	2	Механический	700	500	150	10:1; 50:1 100:1	0,5–100	460×1260×1900	570	Рычажно-маятниковый	«Точприбор» (г.Иваново)
Р-5	50	—//—	700	600	200	10:1; 50:1 100:1	1–100	1350×700×2100	750	—//—	
УММ-5	50	—//—	800	600	600	1:1; 5:1	2–100	1230×680×2160	640	—//—	
2055 Р-05	5	—//—	900	700	180	10:1; 50:1 100:1	2–500	490×1220×2160	560	Электронный	
УМЭ-10ТМ	100	—//—	900	900	600	200:1; 500:1 1000:1	0,05–500	1165×2880×2265	2250	—//—	

Продолжение табл. 11.32

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
ГМС-50	500	Гидравлический	265	1000	1000	4:1; 1:1	0–100	2750×1300×4300	4200	Рычажно-маятниковый	«Точмаш-прибор»
ГМС-100	1000	—//—	300	1500	1500	1:1; 4:1	0–60	3100×1600×4900	7600	—//—	(г.Армавир)
УММ-10	100	—//—	250	400	300	1:1; 5:1	0–200	860×700×2400	1600	Маятниковый	
УММ-20	200	—//—	250	500	200	1:1; 5:1	0–160	965×800×3100	1900	—//—	
УММ-50	500	—//—	300	600	400	1:1; 5:1	0–100	1000×865×3640	2400	—//—	
УММ-100	1000	—//—	300	800	400	1:1; 5:1	0–70	1660×920×4240	5300	—//—	
УММ-200	2000	—//—	300	1550	700	1:1; 5:1	0–50	2880×1110×5980	11800	—//—	
Р-10	100	—//—	280	800	210	5:1; 50:1	0–300	1420×940×2480	1260	Торсионный	
Р-20	200	—//—	300	900	210	5:1; 50:1	0–200	1550×970×2900	1820	—//—	
Р-50	500	—//—	320	1000	200	5:1; 50:1	0–100	1755×960×3520	2900	—//—	
Р-100	1000	—//—	340	1100	170	5:1; 50:1	0–100	2980×1930×4230	7190	—//—	«Точмаш-прибор»
МР-100	100	—//—	410	400	–	10:1; 50:1	3–360	1500×800×2100	980	—//—	(г.Армавир)
МР-200	200	—//—	420	420	–	10:1; 50:1	3–210	1650×800×2350	1400	—//—	
МР-500	500	—//—	420	400	–	10:1; 50:1	3–120	1900×900×2600	1900	—//—	
ИР-6001-1	100	—//—	400	700	–	1:1–1000:1	3–600	1440×703×2009	980	Электронный	
ИР-6002-1	200	—//—	400	700	–	1:1–1000:1	3–300	1590×703×2190	1400	—//—	
ИР-6003-1	500	—//—	400	650	–	1:1–1000:1	3–200	1805×705×2530	1900	—//—	

Таблица 11.33. Основные технические характеристики гидравлических машин на сжатие (прессов) для испытания строительных материалов

Индекс	Максимальное усилие при сжатии, кН	Ход плунжера, мм	Максимальная скорость плунжера, мм/мин	Размер рабочего контура, мм		Рабочее давление, МПа	Мощность привода, квт	Масса, т	Тип силоизмерителя
				Максимальное расстояние между плитами (высота)	Опорные плиты				
2ПГ-10	100	60	30	350	210×210	15	1,2	0,3	Торсионный-1
2ПГ-50	500	50	20	600	320×320	25	1,3	0,55	—//—
2ПГ-125	1250	70	30	700	375×375	20	2,2	1,8	—//—
2ПГ-250	2500	70	35	800	440×440	25	2,8	2,8	—//—
2ПГ-500	5000	100	20	1200	550×550	25	4,2	6,0	—//—
ПСУ-10	100	75	30	350	210×210	16	1,0	0,32	Торсионный-2
ПСУ-50	500	70	30	600	325×325	20	1,2	0,76	—//—
ПСУ-125	1250	100	35	700	360×360	25	–	1,8	—//—
ПСУ-250	2500	100	30	800	440×440	20	1,8	3,0	—//—
ПСУ-500	5000	100	20	1200	550×550	20	–	6,2	—//—
П-10	100	50	40	400	210×210	15	1,1	0,48	Торсионный-3
П-50	500	50	20	630	320×320	15	1,4	0,92	—//—
П-125	1250	100	30	800	420×420	20	1,7	2,2	—//—
П-250	2500	100	20	1000	500×500	25	3,6	3,65	—//—
П-500	5000	100	20	1250	550×550	20	5,6	7,2	—//—
ИП-6012	1000	100	120	500	320×320	20	2,3	1,6	Электронный
ИП-6013	2000	100	60	600	320×320	20	–	3,26	—//—
ИП-1000-2	1000	100	100	120	320×320	25	2,5	1,6	Электронный с электрогидравлическим управлением
ИП-2000-2	1000	100	80	600	410×410	25	3,2	3,1	—//—

Примечание. Изготовитель ПО «Точмашприбор» (г.Армавир).

Таблица 11.34. Основные технические характеристики прессов отечественного производства для испытания конструкций

Индекс	Наибольшая нагрузка, МН	Ход плунжера, мм	Скорость плунжера, мм/мин	Габаритные размеры рабочего пространства (высота × ширина), мм	Пролет изгиба, мм	Мощность электродвигателей, квт	Масса, т	Число колонн
ПММ-125	1,25	200	50	1100×540	600	2,4	3,0	2
ПММ-250	2,5	250	50	2500×800	1500	4,6	8,5	2
ПММ-500	5	250	50	3500×800	2000	11,6	20,6	4
ПММ-1000	10	300	60	6000×1000	4500	17,7	53	4
ИПС-500	5	250	50	2500×800	1500	4,5	7	2
ИПС-1000	10	300	80	6000×1000	4500	18,5	43	4
ПР-125	1,25	200	50	1250×500	1200	3,2	3,1	2
ПР-250	2,5	250	50	2500×600	1500	4,8	8,3	2
ПР-500	5	250	50	3500×750	2500	10,7	16,7	2
ПР-1000	10	300	80	6000×1000	4500	18,5	43	4

Примечание. Изготовитель ПО «Точмашприбор» (г.Армавир).

Таблица 11.35. Основные технические параметры гидропульсационных установок одностороннего действия отечественного производства

Индекс машины	Наибольшая нагрузка, кН		Ход активного захвата, мм		Расстояние между колоннами в свету, мм	Максимальное расстояние, мм		Пролет изгиба, мм	Диапазон частот, ГЦ	Масса, т	Мощность, квт	Высота машины, мм
	стати-ческая	цикли-ческая	стати-ческий	цикли-ческий		между опорами	между захватами					
ГРМ-1	500	250	275	6,5	395	1000	1200	1200	3,2–10	5,8	8,1	3750
ГРМ-2	1000	500	300	7,5	800	1500	1500	1500	3–10	12	13,5	4670
МУП-20	200	100	250	9	365	200	500	800	5–12	2,7	4,6	2950
МУП-50	500	250	300	6,5	640	400	600	1000	5–12	4,5	8,1	3640
МУП-100	1000	500	300	7,5	900	600	800	1200	5–10	7,8	13,4	4510
ЦР-20	200	100	300	9	500	210	900	–	5–20	3,2	4,2	2900
ЦР-50	500	250	320	6,5	600	200	1000	–	5–18	4,8	7,5	3520
ЦР-100	1000	500	340	7,5	800	170	1100	–	5–16	5,5	12,8	4230
УРС-20/6000	±200	±200	100	0,2–50	500	600	900	500	$4 \cdot 10^{-5}$–100	5,6	85,0	3020
УРС-50/50	±500	±500	100	0,2–50	600	800	1000	600	$4 \cdot 10^{-5}$–50	9,1	85,0	3340

Примечание. Изготовитель ПО «Точмашприбор» (г.Армавир).

Таблица 11.36. Основные технические данные гидродомкратов для стендового оборудования

Фирма, завод-изготовитель	Индекс домкрата	Максимальное усилие, кН		Статический ход поршня, мм	Ход винтового штока, мм	Площадь поршня, $см^2$	Максимальное динамическое давление, МПа	Наименьшая высота, мм	Наружный диаметр цилиндра, мм	Масса, кг
		Статический режим	Динамический (циклический) режим							
Лозенгаузен (Германия)	EPZ-4	40	20	250	180	12,5	16	1030	165	–
	EPZ-10	100	50	250	180	31,2	16	1040	220	–
	EPZ-20	200	100	250	180	62,5	16	1045	275	190
	EPZ-40	400	200	250	350	125,0	16	980	380	225
	EPZ-60	600	300	250	350	187,5	16	1020	440	275
	EPZ-100	1000	500	250	350	312	16	1140	475	480
ВПМ-Германия	PZ-10	100	60	150	150	50	10	600	240	70
	PZ-20	200	100	150	150	100	10	600	270	85
	PZ-40	400	200	150	150	200	10	700	320	130
	PZ-60	600	300	300	300	300	10	950	400	200
	PZ-100	1000	500	300	300	500	10	1200	480	380
ЦНИИСК (Москва)	ДГ-5	50	–	75	–	12,6	40	190	90	7,8
	ДГ-10	100	–	75	–	28,0	40	220	110	14,6
	ДГ-25	250	–	150	–	64,0	40	260	140	30,5
	ДГ-50	500	–	150	–	125	40	315	170	53
	ДГМ-100	1000	–	155	–	255	40	340	240	62
	ДГМ-200	2000	–	155	–	510	40	360	280	112
	ДГУ-25	250	–	200	–	65	40	320	180	54
	ДГУ-50	500	–	250	–	132	40	380	220	82
	ДГУ-100	1000	–	250	–	256	40	440	310	158

Примечание. Максимальное давление домкратов ЦНИИСК указано для статического режима.

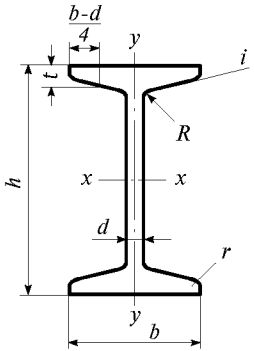


Таблица 11.37. Двутавры по ОСТ 16 редакция 1926 г.
(отменены с октября 1934 г.)
Уклон внутренних граней полок 1:6

№ профиля	Вес погонного метра, кг	Размеры в мм						Площадь сечения F, см^2	Ось x–x			Ось y–y		
		h	b	d	t	R	r		J_x, см^4	W_x, см^3	i_x, см	J_y, см^4	W_y, см^3	i_y, см
10	8,66	100	57	4,5	6,3	4,5	2,7	11,03	180	36,1	4,05	16,1	5,65	1,21
12	11,26	120	63,4	5,1	7,1	5,1	3,1	14,31	334	55,7	4,83	25,2	7,95	1,33
14	14,19	140	69,8	5,7	7,9	5,7	3,4	18,08	569	81,3	5,61	37,7	10,8	1,44
16	17,47	160	76,2	6,3	8,8	6,3	3,8	22,26	909	114	6,39	54,3	14,3	1,56
18	21,09	180	82,6	6,9	9,6	6,9	4,1	26,87	1381	153	7,17	75,9	18,4	1,68
20	25,05	200	89,0	7,5	10,4	7,5	4,5	31,91	2014	201	7,94	103,4	23,2	1,80
22	29,24	220	95,4	8,1	11,3	8,1	4,9	37,38	2843	258	8,72	137	28,8	1,92
24	33,98	240	101,8	8,7	12,1	8,7	5,2	43,29	3903	325	9,49	180	35,4	2,04
26	38,96	260	108,2	9,3	13,0	9,3	5,6	49,63	5254	403	10,25	231	42,7	2,16
28	44,27	280	114,6	9,9	13,9	9,9	5,9	56,40	6878	491	11,05	293	51,1	2,27
30	49,93	300	121,0	10,5	14,7	10,5	6,3	63,61	8881	592	11,80	366	60,5	2,40
32	55,93	320	127,4	11,1	15,5	11,1	6,7	71,25	11292	706	12,58	452	70,9	2,52
36	68,94	360	140,2	12,3	17,2	12,3	7,4	87,82	17544	975	14,14	668	95,3	2,76
40	83,31	400	153,0	13,5	18,9	13,5	8,1	106,13	26087	1304	15,68	954	125	3,00
45	115,00	450	170,0	16,2	24,3	16,2	9,7	147,00	45888	2040	17,66	1722	203	3,42

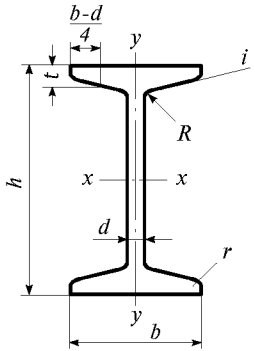


Таблица 11.38. Двутавры
по ОСТ 16 редакция 1932 г. (с октября 1934 г. по январь 1940 г.)
и по ОСТ 10016-39 (с января 1940 г. по июль 1958 г.)
Уклон внутренних граней полок 1:6

№ профиля	Вес погонного метра, кг	Размеры в мм						Площадь сечения F, см^2	Ось x–x			Ось y–y		
		h	b	d	t	R	r		J_x, см^4	W_x, см^3	i_x, см	J_y, см^4	W_y, см^3	i_y, см
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
10	11,2	100	68	4,5	7,6	6,5	3,3	14,3	245	49	4,14	33,0	9,72	1,52
12	14,0	120	74	5,0	8,4	7,0	3,5	17,8	436	72,7	4,95	46,9	12,7	1,62
14	16,9	140	80	5,5	9,1	7,5	3,8	21,5	712	102	5,76	64,4	16,1	1,73
16	20,5	160	88	6,0	9,9	8,0	4,0	26,1	1130	141	6,58	93,1	21,2	1,89
18	24,1	180	94	6,5	10,7	8,5	4,3	30,6	1660	185	7,36	122	26,0	2,00
20 а	27,9	200	100	7,0	11,4	9,0	4,5	35,5	2370	237	8,15	158	31,5	2,12
в	31,1	200	102	9,0	11,4	9,0	4,5	39,5	2500	250	7,96	169	33,1	2,06
22 а	33,0	220	110	7,5	12,3	9,5	4,8	42,0	3400	309	8,99	225	40,9	2,31
в	36,4	220	112	9,5	12,3	9,5	4,8	46,4	3570	325	8,78	239	42,7	2,27
24 а	37,4	240	116	8,0	13,0	10,0	5,0	47,7	4570	381	9,77	280	48,4	2,42
в	41,2	240	118	10,0	13,0	10,0	5,0	52,5	4800	400	9,57	297	50,4	2,38
27 а	42,8	270	122	8,5	13,7	10,5	5,3	54,6	6550	485	10,9	345	56,6	2,51
в	47,1	270	124	10,5	13,7	10,5	5,3	60,0	6870	509	10,7	366	58,9	2,47
30 а	48,0	300	126	9,0	14,4	11,0	5,5	61,2	8950	597	12,1	400	63,5	2,55
в	52,7	300	128	11,0	14,4	11,0	5,5	67,2	9400	627	11,8	422	65,9	2,50
с	57,4	300	130	13,0	14,4	11,0	5,5	73,2	9850	657	11,6	445	68,5	2,46

Продолжение табл. 11.38

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
33 а	53,4	330	130	9,5	15,0	11,5	5,8	68,1	11900	721	13,2	460	70,7	2,60
в	58,6	330	132	11,5	15,0	11,5	5,8	74,7	12500	757	12,9	484	73,4	2,55
с	63,8	330	134	13,5	15,0	11,5	5,8	81,3	13100	794	12,7	510	76,1	2,51
36 а	59,9	360	136	10	15,8	12,0	6,0	76,3	15760	875	14,4	552	81,2	2,69
в	65,6	360	138	12	15,8	12,0	6,0	83,5	16530	919	14,1	582	84,3	2,64
с	71,2	360	140	14	15,8	12,0	6,0	90,7	17310	962	13,8	612	87,4	2,60
40 а	67,6	400	142	10,5	16,5	12,5	6,3	86,1	21720	1090	15,9	660	93,2	2,77
в	73,8	400	144	12,5	16,5	12,5	6,3	94,1	22780	1140	15,6	692	96,2	2,71
с	80,1	400	146	14,5	16,5	12,5	6,3	102	23850	1190	15,2	727	99,6	2,65
45 а	80,4	450	150	11,5	18,0	13,5	6,8	102	32240	1430	17,7	855	114	2,89
в	87,4	450	152	13,5	18,0	13,5	6,8	111	33700	1500	17,4	894	118	2,84
с	94,5	450	154	15,5	18,0	13,5	6,8	120	35280	1570	17,1	938	122	2,79
50 а	93,6	500	158	12,0	20,0	14,0	7,0	119	46470	1860	19,7	1120	142	3,07
в	101	500	160	14,0	20,0	14,0	7,0	129	48560	1940	19,4	1170	146	3,01
с	109	500	162	16,0	20,0	14,0	7,0	139	50640	2030	19,0	1220	151	2,96
55 а	105	550	166	12,5	21,0	14,5	7,3	134	62870	2290	21,6	1370	164	3,19
в	114	550	168	14,5	21,0	14,5	7,3	145	65640	2390	21,2	1420	170	3,14
с	123	550	170	16,5	21,0	14,5	7,3	156	68410	2490	20,9	1480	175	3,08
60 а	118	600	176	13,0	22,0	15,0	7,5	151	83860	2800	23,5	1700	193	3,36
в	128	600	178	15,0	22,0	15,0	7,5	163	87460	2920	23,2	1770	199	3,30
с	137	600	180	17,0	22,0	15,0	7,5	175	91060	3040	22,8	1840	205	3,24

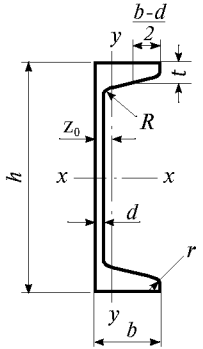


Таблица 11.39. Швеллеры по ОСТ 17 редакция 1926 г.
(отменены с января 1936 г.)
Уклон внутренних граней полок 14%

№ профиля	Вес погонного метра, кг	Размеры в мм						z_0, см	Площадь сечения F, см^2	Ось x–x			Ось y–y			Ось y_1–y_1
		h	b	d	t	R	r			J_x, см^4	W_x, см^3	i_x, см	J_y, см^4	W_y, см^3	i_y, см	J_{y_1}, см^4
5	5,86	50	38	5,0	7,5	7,5	3,75	1,41	7,47	27,57	11,03	1,92	9,44	3,94	1,12	24,2
6,5	7,55	65	42	5,5	8,0	8,0	4,0	1,43	9,62	59,9	18,43	2,50	14,98	5,42	1,25	34,8
8	9,30	80	45	6,0	9,0	9,0	4,5	1,53	11,85	113,9	28,5	3,10	20,9	7,02	1,33	48,4
10	10,93	100	50	6,0	9,0	9,0	4,5	1,60	13,92	213,2	42,65	3,91	30,16	8,85	1,47	65,6
12	13,55	120	55	6,5	9,5	9,5	4,75	1,65	17,26	371,6	61,9	4,65	44,9	11,67	1,61	92,0
14	16,42	140	60	7,0	10,5	10,5	5,25	1,80	20,92	624	89,2	5,46	64,5	15,35	1,76	132,2
16	19,56	160	65	7,5	11,0	11,0	5,5	1,86	24,92	954	119,2	6,19	89,0	19,2	1,89	176
18	22,97	180	70	8,0	12,0	12,0	6,0	2,01	29,26	1433	159,2	7,00	121,0	24,26	2,03	239,6
20	26,64	200	75	8,5	12,5	12,5	6,25	2,08	33,93	2018	202,0	7,71	159,2	29,4	2,17	306
22	30,57	220	80	9,0	13,5	13,5	6,75	2,23	38,94	2831	257,3	8,53	207,8	36,0	2,31	402
24	34,76	240	85	9,5	14,0	14,0	7,0	2,30	44,28	3773	314,4	9,23	264,0	42,6	2,44	499
26	39,21	260	90	10,0	15,0	15,0	7,5	2,45	49,95	5045	388,0	10,05	334,0	51,0	2,59	635
30	48,91	300	100	11,0	16,5	16,5	8,25	2,68	62,30	8361	557,0	11,58	510,0	69,7	2,86	957

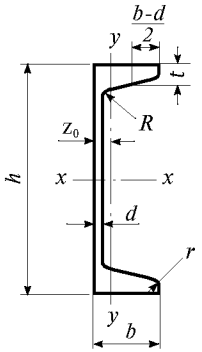


Таблица 11.40. Швеллеры
по ОСТ 17 редакция 1933 г. (с октября 1936 г. по январь 1940 г.)
и по ОСТ 10017-39 (с января 1940 г. по апрель 1959 г.)
Уклон внутренних граней полок 10%

№ профиля	Вес погонного метра, кг	Размеры в мм						z_0, см	Площадь сечения F, см^2	Ось x–x			Ось y–y			Ось y_1–y_1
		h	b	d	t	R	r			J_x, см^4	W_x, см^3	i_x, см	J_y, см^4	W_y, см^3	i_y, см	J_{y_1}, см^4
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
5	5,44	50	37	4,5	7,0	7,0	3,5	1,35	6,93	26,0	10,4	1,94	8,3	3,55	1,10	20,9
6,5	6,70	65	40	4,8	7,5	7,5	3,75	1,38	8,54	55,2	17,0	2,54	12,0	4,59	1,19	28,3
8	8,04	80	43	5,0	8,0	8,0	4,0	1,43	10,24	101,3	25,3	3,15	16,6	5,79	1,27	37,4
10	10,00	100	48	5,3	8,5	8,5	4,25	1,52	12,74	198,3	39,7	3,95	25,6	7,80	1,41	54,9
12	12,06	120	53	5,5	9,0	9,0	4,50	1,62	15,36	346,3	57,7	4,75	37,4	10,17	1,56	77,7
14 а	14,53	140	58	6,0	9,5	9,5	4,75	1,71	18,51	563,7	80,5	5,52	53,2	13,01	1,70	107,1
в	16,73	140	60	8,0	9,5	9,5	4,75	1,67	21,31	609,4	87,1	5,35	61,1	14,12	1,69	120,6
16 а	17,23	160	63	6,5	10,0	10,0	5,0	1,80	21,95	866,2	108,3	6,28	73,3	16,3	1,83	144,1
в	19,74	160	64	8,5	10,0	10,0	5,0	1,75	25,15	934,5	116,8	6,10	83,4	17,55	1,82	160,8
18 а	20,17	180	68	7,0	10,5	10,5	5,25	1,88	25,69	1272,7	141,4	7,04	98,6	20,03	1,96	189,7
в	22,99	180	70	9,0	10,5	10,5	5,25	1,84	29,29	1369,9	152,2	6,84	111,0	21,52	1,95	210,1
20 а	22,63	200	73	7	11,0	11,0	5,5	2,01	28,83	1780,4	178,0	7,86	128,0	24,20	2,11	244,0
в	25,77	200	75	9	11,0	11,0	5,5	1,95	32,83	1913,7	191,4	7,64	143,6	25,88	2,09	268,4
22 а	24,99	220	77	7	11,5	11,5	5,75	2,10	31,84	2393,9	217,6	8,67	157,8	28,17	2,23	298,2
в	28,45	220	79	9	11,5	11,5	5,75	2,03	36,24	2571,4	233,8	8,42	176,4	30,05	2,21	326,3

Продолжение табл. 11.40

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
24 а	26,55	240	78	7	12	12	6	2,10	34,21	3052,2	254,3	9,45	173,8	30,47	2,25	324,6
в	30,62	240	80	9	12	12	6	2,03	39,00	3282,6	273,5	9,17	194,1	32,51	2,23	354,8
с	34,89	240	82	11	12	12	6	2,00	43,81	3513,0	292,7	8,96	213,4	34,42	2,21	388,1
27 а	30,83	270	82	7,5	12,5	12,5	6,25	2,13	39,27	4362,0	323,1	10,54	215,6	35,32	2,34	393,1
в	35,07	270	84	9,5	12,5	12,5	6,25	2,06	44,67	4690,1	347,4	10,27	239,2	37,72	2,31	428,2
с	39,30	270	86	11,5	12,5	12,5	6,25	2,03	50,07	5018,1	371,7	10,10	261,4	39,79	2,26	466,8
30 а	34,45	300	85	7,5	13,5	13,5	6,75	2,17	43,89	6047,9	403,2	11,72	259,5	41,10	2,43	466,5
в	39,16	300	87	9,5	13,5	13,5	6,75	2,13	49,59	6497,9	433,2	11,41	289,2	44,03	2,41	515,2
с	43,81	300	89	11,5	13,5	13,5	6,75	2,09	55,89	6947,9	463,2	11,15	315,8	46,38	2,38	559,7
33 а	38,70	330	88	8,0	14,0	14,0	7,0	2,21	49,50	8076,8	489,5	12,80	307,5	46,65	2,50	547,6
в	43,88	330	90	10,0	14,0	14,0	7,0	2,14	55,90	8675,7	525,8	12,46	338,4	49,32	2,46	593,2
с	49,06	330	92	12,0	14,0	14,0	7,0	2,10	62,50	9274,7	562,1	12,18	367,9	51,81	2,43	643,2
36 а	47,80	360	96	9,0	16,0	16,0	8,0	2,44	60,89	11874,2	659,7	13,97	455,0	63,54	2,73	818,4
в	53,45	360	98	11,0	16,0	16,0	8,0	2,37	68,09	12651,8	702,9	13,63	496,7	66,85	2,70	880,4
с	59,10	360	100	13,0	16,0	16,0	8,0	2,34	75,29	13429,4	746,1	13,36	536,4	70,02	2,67	947,9
40 а	58,91	400	100	10,5	18,0	18,0	9,0	2,49	75,05	17577,9	878,9	15,30	592,0	78,83	2,81	1067,7
в	65,19	400	102	12,5	18,0	18,0	9,0	2,44	83,05	18644,5	932,2	14,98	640,0	82,52	2,78	1135,6
с	71,47	400	104	14,5	18,0	18,0	9,0	2,42	91,50	19711,2	985,6	14,71	687,8	86,19	2,75	1220,7

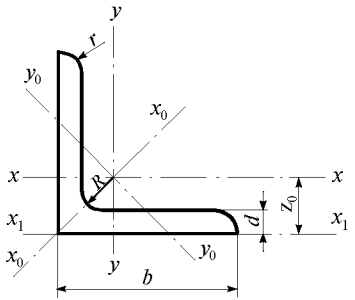


Таблица 11.41. Уголки равнобокие
по ОСТ 14 редакция 1926 г. (отменены с января 1934 г.)

Размеры, мм		R, мм	r, мм	Площадь сечения F, см^2	Вес погонного метра, кг	Ось x–x		Ось x_0–x_0		Ось y_0–y_0		Ось x_1–x_1	Расстояние центра тяжести z_0,см
b	d					J_x, см^4	i_x, см	J_{x_0}, см^4	i_{x_0}, см	J_{y_0}, см^4	i_{y_0}, см	J_{x_1}, см^4	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
20	3	3,5	1,7	1,12	0,88	0,392	0,60	0,62	0,74	0,165	0,38	0,793	0,60
	4			1,45	1,14	0,492	0,58	0,77	0,73	0,212	0,38	1,080	0,64
25	3	4	2,0	1,43	1,12	0,798	0,75	1,26	0,94	0,333	0,49	1,535	0,72
	4			1,86	1,46	1,012	0,74	1,60	0,92	0,427	0,48	2,08	0,76
30	4	4	2,0	2,26	1,77	1,824	0,90	2,88	1,13	0,76	0,58	3,59	0,88
	5			2,77	2,17	2,18	0,89	3,44	1,13	0,93	0,58	4,54	0,92
35	4	5	2,5	2,67	2,10	2,95	1,05	4,68	1,32	1,23	0,68	5,64	1,00
	5			3,28	2,57	3,56	1,04	5,64	1,31	1,49	0,67	7,13	1,04
40	4	6	3,0	3,08	2,42	4,47	1,20	7,09	1,52	1,86	0,78	8,33	1,12
	5			3,79	2,97	5,43	1,20	8,59	1,51	2,26	0,77	10,54	1,16
	6			4,48	3,52	6,31	1,19	9,98	1,49	2,65	0,77	12,78	1,20
45	5	6,5	3,25	4,30	3,37	7,87	1,35	12,48	1,70	3,27	0,87	14,95	1,28
	6			5,09	4,00	9,19	1,34	14,55	1,69	3,84	0,87	18,11	1,32
	7			5,86	4,60	10,4	1,33	16,47	1,68	4,39	0,86	21,31	1,36
50	5	7	3,5	4,80	3,77	10,96	1,51	17,38	1,90	4,55	0,97	20,43	1,40
	6			5,69	4,47	12,85	1,50	20,34	1,89	5,35	0,97	24,74	1,44
	7			6,56	5,15	14,62	1,49	23,10	1,88	6,13	0,97	29,10	1,48

Продолжение табл. 11.41

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
60	6	8	4,0	6,91	5,42	22,84	1,82	36,1	2,28	9,53	1,17	42,5	1,69
	7			7,98	6,26	26,05	1,81	41,3	2,27	10,82	1,17	49,9	1,73
	8			9,03	7,09	29,16	1,80	46,1	2,26	12,16	1,16	57,4	1,77
65	6	8	4,0	7,51	5,89	29,36	1,97	46,6	2,49	12,14	1,27	54,0	1,81
	8			9,83	7,72	37,66	1,96	59,7	2,46	15,63	1,26	72,9	1,89
	10			12,07	9,47	45,20	1,95	71,5	2,44	19,03	1,25	92,1	1,97
75	8	10	5	11,47	9,00	58,9	2,27	93,3	2,85	24,4	1,46	111	2,13
	10			14,11	11,08	71,9	2,26	113	2,83	29,7	1,45	140	2,21
	12			16,67	13,09	82,6	2,23	130	2,80	34,9	1,44	170	2,29
80	8	10	5	12,27	9,63	72,5	2,43	115	3,06	30,4	1,57	135	2,25
	10			15,11	11,86	87,2	2,40	139	3,02	35,8	1,56	170	2,34
	12			17,87	14,03	102,0	2,39	161	3,00	43,3	1,55	206	2,41
90	10	11	5,5	17,13	13,45	127	2,72	201	3,42	52,5	1,75	241	2,58
	12			20,29	15,93	148	2,70	234	3,40	61,4	1,74	291	2,66
	14			23,37	18,35	168	2,69	265	3,37	70,3	1,73	343	2,74
100	10	12,5	6,25	19,17	15,05	176	3,03	280	3,82	72,7	1,95	329	2,82
	12			22,73	17,84	206	3,01	327	3,78	85,7	1,94	398	2,90
	14			26,21	20,57	234	2,99	371	3,76	97,6	1,93	467	2,98
	16			29,61	23,24	262	2,97	412	3,73	112	1,93	538	3,05
120	10	13	6,5	23,18	18,20	313	3,68	497	4,64	130	2,36	567	3,31
	12			27,54	21,62	367	3,65	584	4,60	150	2,34	685	3,40
	14			31,82	24,98	419	3,63	666	4,57	172	2,33	804	3,48
	16			36,02	28,28	470	3,61	743	4,54	197	2,33	924	3,55
130	10	13,5	6,75	25,20	19,78	402	4,00	640	5,04	163,5	2,55	721	3,56
	12			29,96	23,52	473	3,97	751	5,03	195,7	2,55	870	3,64
	14			34,64	27,19	541	3,95	858	4,97	224,6	2,54	1021	3,72
	16			39,24	30,80	606	3,93	960	4,95	251	2,53	1172	3,80
140	12	14	7	32,37	26,41	596	4,29	977	5,47	245	2,75	1086	3,89
	14			37,45	29,40	683	4,27	1084	5,39	281	2,74	1273	3,93
	16			42,46	33,32	765	4,24	1215	5,35	316	2,73	1462	4,00
150	12	14	7	34,77	27,29	740	4,61	1177	5,82	303	2,95	1336	4,14
	14			40,25	31,60	849	4,59	1349	5,78	349	2,94	1565	4,22
	16			45,65	35,84	952	4,57	1513	5,76	392	2,93	1796	4,35
	18			50,97	40,01	1054	4,56	1674	5,74	434	2,92	2029	4,38

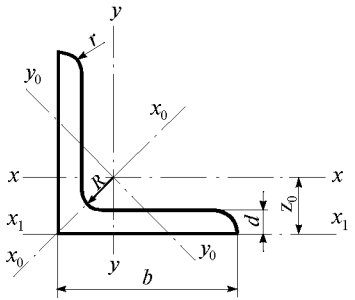


Таблица 11.42. Уголки равнобокие

по ОСТ 14 редакция 1932 г. (с января 1934 г. по январь 1940 г.)
и по ОСТ 10014-39 (с января 1940 г. по июль 1958 г.)

Размеры, мм		R,	r,	Площадь сечения F, см^2	Вес пог. м, кг	Расстояние центра тяжести z_0,см	Ось x–x		Ось x_1–x_1	Ось x_0–x_0		Ось y_0–y_0		Сечение из двух уголков ⅂⌈ δ_ϕ = 10 мм	
b	d	мм	мм				J_x, см^4	i_x, см	J_{x_1}, см^4	J_{x_0}, см^4	i_{x_0}, см	J_{y_0}, см^4	i_{y_0}, см	$J_{y'}$, см^4	$i_{y'}$, см
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
20	3	3,5	1,2	1,13	0,89	0,60	0,40	0,60	0,81	0,63	0,75	0,17	0,39	3,53	1,25
	4			1,46	1,15	0,64	0,49	0,58	1,09	0,78	0,73	0,21	0,38	4,77	1,28
25	3	3,5	1,2	1,43	1,12	0,73	0,80	0,75	1,56	1,28	0,95	0,32	0,47	5,92	1,44
	4			1,86	1,46	0,77	1,02	0,74	2,12	1,63	0,94	0,41	0,47	6,04	1,47
30	4	4,5	1,5	2,25	1,78	0,89	1,82	0,90	3,62	2,90	1,13	0,75	0,58	12,4	1,65
	5			2,78	2,18	0,93	2,20	0,89	4,58	3,47	1,12	0,93	0,58	15,7	1,68
35	4	4,5	1,5	2,67	2,10	1,01	3,02	1,06	5,74	4,77	1,34	1,27	0,69	18,2	1,85
	5			3,28	2,57	1,05	3,61	1,05	7,23	5,71	1,32	1,51	0,68	23,0	1,87
	4			3,08	2,42	1,13	4,60	1,22	8,53	7,26	1,53	1,93	0,79	25,6	2,04
40	5	5,0	1,7	3,79	2,97	1,17	5,54	1,21	10,7	8,75	1,52	2,34	0,78	32,2	2,06
	6			4,48	3,52	1,21	6,41	1,20	13,0	10,10	1,50	2,70	0,78	39,1	2,09
	4			3,48	2,73	1,26	6,60	1,38	12,1	10,5	1,74	2,68	0,88	34,8	2,24
45	5	5,0	1,7	4,20	3,37	1,30	8,00	1,37	15,3	12,7	1,72	3,26	0,87	43,8	2,25
	6			5,08	3,99	1,34	9,29	1,35	18,4	14,8	1,71	3,78	0,86	52,0	2,28

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
50	5	5,5	1,7	4,80	3,77	1,42	11,2	1,53	20,9	17,8	1,92	4,61	0,98	57,7	2,45
	6			5,69	4,47	1,46	13,1	1,52	25,2	20,7	1,91	5,39	0,97	69,9	2,48
	5			5,82	4,57	1,66	19,9	1,85	35,9	31,4	2,32	8,29	1,19	94,2	2,85
60	6	6,5	2,2	6,91	5,42	1,70	23,3	1,84	43,3	36,8	2,31	9,76	1,19	114,0	2,87
	8			9,03	7,09	1,78	29,6	1,81	58,2	46,8	2,28	12,40	1,17	153,0	2,91
	6			7,55	5,93	1,82	29,8	1,98	54,8	47,1	2,50	12,3	1,28	141	3,06
65	8	8,0	2,7	9,87	7,75	1,90	38,1	1,96	73,7	60,3	2,48	15,8	1,27	190	3,10
	10			12,10	9,57	1,98	45,4	1,94	92,9	72,0	2,44	18,8	1,25	240	3,15
	6			8,78	6,89	2,06	46,7	2,31	83,9	73,3	2,89	20,1	1,51	208	3,44
75	8	9,0	3,0	11,5	9,03	2,14	60,1	2,28	113,0	94,9	2,87	25,3	1,48	280	3,49
	10			14,1	11,10	2,22	72,2	2,26	142,0	114,0	2,84	30,3	1,47	353	3,54
	12			16,7	13,1	2,34	83,3	2,24	172,0	132,0	2,81	34,9	1,45	436	3,61
	6[x]			9,58	7,36	2,19	57,0	2,47	102	90	3,11	23,5	1,58	250	3,61
80	8	9,0	3,0	12,3	9,66	2,27	73,3	2,44	137	116	3,07	30,3	1,57	335	3,69
	10			15,1	11,9	2,35	88,4	2,42	172	140	3,05	36,5	1,56	422	3,73
	8			14,0	11	2,51	106	2,76	194	168	3,46	43,6	1,77	466	4,08
90	10	11	3,7	17,2	13,5	2,59	128	2,74	244	204	3,44	53,1	1,76	584	4,11
	12			20,4	16,0	2,67	149	2,71	294	237	3,41	61,7	1,75	708	4,16
	14			23,4	18,4	2,74	169	2,69	345	267	3,38	77,9	1,75	830	4,21
	8			15,6	12,3	2,75	147	3,07	265	233	3,87	61,0	1,98	624	4,47
	10			19,2	15,1	2,83	179	3,05	333	284	3,85	74,9	1,97	784	4,51
100	12	12	4,0	22,8	17,9	2,91	209	3,03	402	331	3,81	87,6	1,96	948	4,56
	14			26,3	20,6	2,99	237	3,01	472	375	3,78	99,1	1,95	1115	4,60
	16			29,7	23,3	3,06	265	2,99	572	416	3,75	113	1,95	1282	4,65
	10			23,3	18,3	3,33	316	3,68	575	503	4,64	130	2,36	1316	5,31
	12			27,6	21,7	3,41	371	3,66	693	590	4,62	153	2,35	1588	5,36
120	14	13	4,3	31,9	25,1	3,49	423	3,64	811	671	4,59	174	2,34	1864	5,41
	16			36,1	28,4	3,56	474	3,62	931	749	4,56	199	2,34	2138	5,45
	18[x]			40,3	31,6	3,64	520	3,60	1052	822	4,54	219	2,33	2422	5,49

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
	10			25,3	19,8	3,58	406	4,01	730	646	5,05	166	2,56	1656	5,70
130	12	13	4,3	30,0	23,6	3,66	477	3,99	880	759	5,03	196	2,55	1992	5,76
	14			34,7	27,3	3,74	545	3,96	1030	866	5,00	223	2,54	2338	5,81
	16			39,3	30,9	3,82	608	3,93	1182	967	4,96	249	2,52	2682	5,84
	12			34,9	27,4	4,15	745	4,62	1347	1186	5,83	305	2,98	2998	6,55
	14			40,4	31,7	4,22	857	4,60	1577	1358	5,80	356	2,97	3520	6,60
150	16	15	5,0	45,8	36,0	4,30	961	4,58	1808	1522	5,77	399	2,95	4030	6,64
	18			51,1	40,1	4,38	1060	4,56	2041	1679	5,73	440	2,94	4550	6,67
	20			56,4	44,3	4,45	1154	4,52	2275	1830	5,70	478	2,91	5068	6,70
	14			48,8	38,3	4,97	1515	5,57	2725	2405	7,03	625	3,58	5950	7,80
180	16	15	5,0	55,4	43,5	5,05	1704	5,55	3117	2705	7,00	703	3,56	6824	7,85
	18[x]			61,9	48,6	5,13	1885	5,52	3515	2994	6,94	775	3,54	7690	7,90
	16			62,0	48,7	4,15	2355	6,17	4264	3755	7,79	954	3,93	9250	8,64
	18			69,3	54,4	4,22	2619	6,15	4808	4165	7,77	1074	3,93	10418	8,68
200	20	18	6,0	76,5	60,1	4,30	2868	6,13	5355	4560	7,74	1175	3,92	11616	8,72
	24			90,8	71,3	4,38	3349	6,07	6456	5313	7,66	1384	3,90	14018	8,79
	30[x]			115,9	91,0	4,45	3999	5,96	8093	6373	7,49	1685	3,87	17538	8,86
	16[x]			68,4	53,7	6,04	3168	6,80	5661	5046	8,59	1307	4,37	12176	9,44
220	20[x]	21	7,0	84,5	66,4	6,20	3359	6,75	7003	6120	8,51	1592	4,34	15298	9,51
	24[x]			100,4	78,8	6,35	4514	6,71	8560	7148	8,44	1870	4,32	18428	9,59
	28[x]			115,9	91,0	6,50	5135	6,66	10029	8130	8,37	2141	4,30	21600	9,66
230	24[x]	20	7,0	105,3	82,5	6,59	5207	7,03	9780	8266	8,86	2144	4,51	20994	9,98

[x] Отмечены профили, дополненные по ОСТ 10014-39 к ранее действующему сортаменту по ОСТ 14.

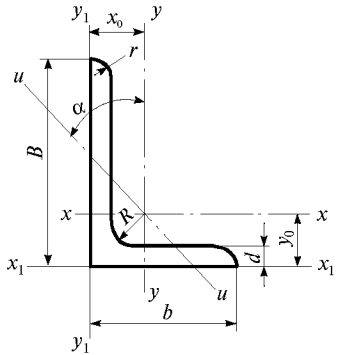


Таблица 11.43. Уголки неравнобокие
по ОСТ 15 редакция 1926 г. (отменены в январе 1934 г.)

Размеры, мм			R,	r,	Площадь сечения F,	Вес пог.м,	Ось x–x		Ось y–y		Ось x_1–x_1		Ось y_1–y_1		Ось u–u	
B	b	d	мм	мм	см^2	кг	J_x, см^4	i_x, см	J_y, см^4	i_y, см	J_{x_1}, см^4	расстояние центра тяжести y_0, см	J_{y_1}, см^4	расстояние центра тяжести x_0, см	J_u, см^4	i_u, см
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
30	20	3	3,5	1,75	1,42	1,11	1,267	0,945	0,447	0,561	2,66	0,99	0,802	0,50	0,26	0,424
		4			1,85	1,45	1,597	0,93	0,561	0,550	3,58	1,03	1,101	0,54	0,33	0,422
45	30	4	5	2,5	2,87	2,25	5,74	1,41	2,03	0,840	11,95	1,47	3,58	0,74	1,14	0,629
		6			4,17	3,27	8,08	1,39	2,83	0,825	18,16	1,55	5,59	0,81	1,66	0,630
60	40	6	7	3,5	5,69	4,47	20,1	1,88	7,07	1,244	42,6	1,99	12,8	1,01	4,00	0,839
		8			7,41	5,82	25,5	1,85	9,91	1,20	57,3	2,07	17,6	1,08	5,20	0,838
		6			7,21	5,66	42,2	2,42	14,33	1,41	84,6	2,43	24,7	1,20	8,27	1,07
75	50	8	8	4	9,43	7,40	51,9	2,35	18,27	1,39	111,4	2,51	33,8	1,28	10,43	1,06
		10			11,57	9,08	62,5	2,32	21,84	1,37	140,2	2,59	43,2	1,36	12,80	1,05
		6			6,91	5,42	44,8	2,54	7,52	1,05	100,6	2,84	12,9	0,88	4,72	0,827
80	40	8	8	4	9,03	7,09	57,5	2,52	9,55	1,03	135,0	2,93	17,9	0,96	6,18	0,828
		10			11,57	8,69	69,1	2,50	11,4	1,01	169,7	3,01	23,3	1,04	7,57	0,827

Продолжение табл. 11.43

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
90	60	8	9	4,5	11,45	8,99	92,1	2,84	32,6	1,69	193	2,95	57,6	1,48	18,51	1,270
		10			14,09	11,06	111,4	2,81	39,3	1,67	241	3,04	73,4	1,56	22,6	1,256
		8			12,65	9,93	127,1	3,17	42,5	1,83	263	3,28	73,2	1,56	24,2	1,382
100	65	10	9	4,5	15,59	12,24	154,3	3,15	51,2	1,81	331	3,37	93,0	1,64	29,6	1,380
		12			18,45	14,48	180	3,12	59,1	1,79	399	3,45	113	1,72	37,8	1,430
		10			19,13	15,02	276	3,80	98,2	2,24	570	3,92	171	1,95	55,3	1,70
120	80	12	11	5,5	22,69	17,81	323	3,77	114	2,22	686	4,00	207	2,03	65,2	1,694
		14			26,17	20,54	368	3,75	130	2,22	804	4,08	245	2,10	75,3	1,697
		10			21,15	16,60	358	4,12	141	2,58	728	4,15	241	2,18	77,3	1,910
130	90	12	12	6	25,11	19,71	420	4,09	165	2,56	871	4,24	293	2,26	91,3	1,908
		14			28,99	22,76	479	4,07	187	2,54	1020	4,32	345	2,34	104,8	1,902
		12			28,74	22,56	649	4,76	232	2,84	1336	4,89	400	2,42	130,0	2,13
150	100	14	13	6,5	33,22	26,08	743	4,73	264	2,82	1564	4,97	471	2,50	149,6	2,12
		16			37,62	29,53	833	4,70	295	2,80	1793	5,05	544	2,57	169,5	2,12
160	80	12	13	6,5	27,54	21,62	719	5,11	122	2,10	1620	5,72	208	1,77	77,3	1,675
		14			31,82	24,98	823	5,09	139	2,09	1896	5,80	248	1,85	86,9	1,670

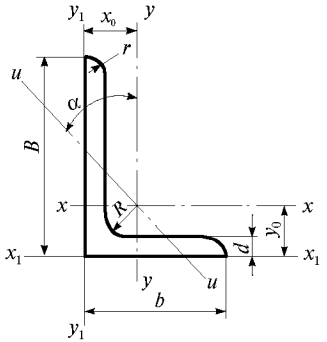


Таблица 11.44. Уголки неравнобокие
по ОСТ 15, редакция 1932 г. (с января 1934 г. по январь 1940 г.)
и по ОСТ 10015-39 (с января 1940 г. по июль 1958 г.)

Размеры, мм			R,	r,	Площадь сечения F, см^2	Вес пог.м, кг	Расстояние центра тяжести		Ось x–x		Ось y–y		Ось x_1–x_1	Ось y_1–y_1	Ось u–u		Сечение из двух уголков ⌐⌐ $\delta_ф$ = 10 мм		Сечение из двух уголков ⌐⌐ $\delta_ф$ = 10 мм	
B	b	d	мм	мм			x_0, см	y_0, см	J_x, см^4	i_x, см	J_y, см^4	i_y, см	J_{x_1}, см^4	J_{y_1}, см^4	J_u, см^4	i_u, см	J_{x_2}, см^4	i_{x_2}, см	J_{y_2}, см^4	i_{y_2}, см
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
30	20	3	3,5	1,2	1,43	1,12	0,51	1,00	1,27	0,94	0,45	0,56	2,69	0,82	0,26	0,43	8,98	1,773	3,82	1,153
		4			1,86	1,46	0,55	1,04	1,61	0,93	0,56	0,55	3,61	1,12	0,34	0,43	12,0	1,801	5,21	1,183
35	20	4[x]	3,5	1,2	2,06	1,62	0,51	1,25	2,48	1,10	0,53	0,53	5,62	1,11	0,37	0,42	17,6	2,06	5,40	1,142
		5[x]			2,52	1,98	0,55	1,29	2,95	1,09	0,70	0,53	7,15	1,45	0,45	0,42	22,1	2,09	8,95	1,173
45	30	4	5,0	1,7	2,88	2,26	0,74	1,48	5,81	1,42	2,06	0,84	12,1	3,65	1,21	0,65	34,2	2,44	13,0	1,500
		6			4,18	3,28	0,82	1,56	8,15	1,40	2,85	0,83	18,3	5,66	1,69	0,64	51,8	2,49	20,3	1,556
		5			4,83	3,79	0,97	1,95	17,4	1,90	6,19	1,13	35,8	10,8	3,62	0,87	92,8	3,10	33,3	1,855
60	40	6	7,0	2,3	5,72	4,49	1,01	2,00	20,3	1,88	7,20	1,12	43,1	13,1	4,20	0,86	112	3,13	40,5	1,883
		8			7,44	5,84	1,09	2,08	25,8	1,86	9,04	1,10	57,9	17,9	5,39	0,85	151	3,18	55,7	1,935
		5			6,11	4,80	1,17	2,39	34,9	2,39	12,5	1,43	69,9	20,9	7,24	1,09	172	3,74	59,0	2,19
75	50	6	8,0	2,7	7,25	5,69	1,21	2,44	41,0	2,37	14,6	1,42	84,0	25,3	8,48	1,08	207	3,78	71,6	2,22
		8			9,47	7,43	1,29	2,52	52,4	2,35	18,6	1,40	113	34,3	10,9	1,07	277	3,83	97,8	2,27
		10			11,60	9,11	1,36	2,60	63,0	2,33	22,1	1,38	141	43,7	13,2	1,07	349	3,88	125,0	2,32

Продолжение табл. 11.44

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
		6			7,85	6,16	1,33	2,56	50,6	2,53	19,6	1,58	102	33,4	11,1	1,19	248	3,98	91,8	2,42
80	55	8	8,0	2,7	10,3	8,06	1,41	2,64	64,9	2,51	24,9	1,56	136	45,3	14,3	1,19	333	4,02	125	2,46
		10			12,6	9,90	1,48	2,72	78,2	2,49	29,8	1,54	171	57,5	17,4	1,18	417	4,07	158	2,50
		6			8,78	6,90	1,41	2,88	72,4	2,87	26,0	1,72	145	43,4	14,7	1,30	345	4,43	116	2,58
90	60	8	9,0	3,0	11,50	9,03	1,49	2,96	93,2	2,85	33,2	1,70	194	58,6	19,3	1,29	461	4,48	157	2,62
		10			14,1	11,1	1,56	3,05	113,0	2,82	39,8	1,68	214	74,4	23,5	1,29	581	4,53	199	2,66
		8			13,5	10,6	1,88	3,11	135	3,16	65,0	2,19	266	113	35,4	1,62	622	4,80	283	3,24
100	75	10	10	3,5	16,7	13,1	1,96	3,20	163	3,13	78,5	2,17	333	143	42,6	1,60	783	4,84	359	3,28
		12			19,7	15,5	2,04	3,27	190	3,11	91,1	2,15	402	173	49,8	1,59	940	4,88	437	3,33
		8			15,6	12,2	1,88	3,85	229	3,83	82,3	2,30	459	137	47,6	1,75	1048	5,79	341	3,30
120	80	10	11	3,7	19,2	15,1	1,96	3,93	279	3,81	99,6	2,27	575	173	57,7	1,73	1312	5,85	432	3,35
		12			22,8	17,9	2,04	3,01	326	3,79	116,0	2,25	692	210	66,6	1,71	1578	5,87	526	3,40
		8			17,2	13,5	2,11	4,08	297	4,15	118	2,62	583	195	66,5	1,97	1316	6,20	470	3,70
130	90	10	12	4,0	21,3	16,7	2,19	4,16	362	4,12	143	2,59	731	245	81,4	1,95	1648	6,22	595	3,74
		12			25,2	19,8	2,27	4,25	424	4,10	167	2,57	879	297	94,8	1,94	1984	6,28	721	3,78
		14			29,1	22,8	2,35	4,33	484	4,08	189	2,55	1028	349	109,0	1,93	2326	6,33	850	3,82
		10			24,3	19,1	2,35	4,81	557	4,78	201	2,87	1120	335	115	2,18	2486	7,16	796	4,05
150	100	12	13	4,3	28,8	22,6	2,43	4,90	655	4,76	235	2,85	1347	405	137	2,18	2990	7,21	964	4,09
		14			33,3	26,2	2,51	4,98	749	4,73	267	2,83	1575	476	156	2,16	3498	7,25	1138	4,13
		16			37,7	29,6	2,58	5,06	839	4,71	297	2,81	1804	549	175	2,15	4004	7,29	1308	4,17
		12			34,9	27,4	2,82	5,79	1156	5,75	417	3,46	2325	695	240	2,62	5072	8,53	1602	4,79
180	120	14	14	4,7	40,4	31,7	2,90	5,87	1326	5,73	470	3,44	2717	816	279	2,62	5932	8,57	1888	4,84
		16			45,8	35,9	2,98	5,95	1490	5,71	532	3,41	3111	939	309	2,60	6790	8,63	2174	4,86
		12			37,3	29,2	2,68	6,64	1546	6,45	428	3,39	3188	696	259	2,64	6892	9,61	1610	4,64
200	120	14	14	4,7	43,2	33,9	2,76	6,72	1776	6,42	489	3,36	3725	818	295	2,61	8052	9,65	1894	4,68
		16			49,0	38,4	2,84	6,80	1997	6,38	547	3,34	4264	941	331	2,60	9214	9,70	2188	4,73
		12[x]			41,0	32,2	3,62	6,08	1666	6,37	810	4,44	3181	1347	456	3,25	6882	9,16	3012	6,06
200	150	16[x]	17	5,7	53,9	42,3	3,78	6,27	2155	6,32	1043	4,40	4272	1812	562	3,23	9250	9,26	4056	6,14
		18[x]			60,3	47,3	3,85	6,33	2358	6,30	1153	4,38	4809	2045	623	3,21	10395	9,29	4585	6,17
		20[x]			66,5	52,2	3,93	6,41	2614	6,27	1259	4,35	5344	2285	683	3,21	11585	9,33	5121	6,21

[x] Отмечены профили дополнительные по ОСТ 10015 к ранее действующему сортаменту по ОСТ 15.

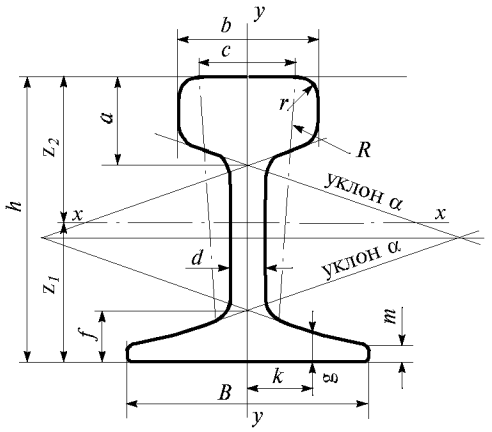


Таблица 11.45. Рельсы железнодорожные для дорог широкой колеи ОСТ 118, редакция 1927 г.

Тип рельса	Размеры в мм													
	h	B	a	b	c	d	e	f	g	k	m	r	R	α
Ia	140,0	125	44	70,0	46,0	14	60,5	25,0	13,0	36,0	10	13,0	300,0	1:3
IIa	135,0	114	40	68,0	43,9	13	59,5	24,0	10,82	39,52	9	13,00	300,0	1:3
IIIa	128,0	110	37	60,0	37,5	12	57,0	23,0	11,04	35,88	9	12,00	300,0	1:3
IVa	120,5	100	40	53,5	32,0	12	51,0	21,5	13,00	23,25	9	11,68	213,6	1:2,75

Статические величины

Тип рельса	Площадь сечения F, см^2	Расстояние центра тяжести		Момент инерции J_x, см^4	Момент сопротивления		Половина ширины подошвы $B/2$, см	Момент инерции J_y, см^4	Момент сопротивления $W_y = \frac{J_y}{B/2}$, см^3	Вес погонного метра, кг
		z_1, см	z_2, см		$W_1 = \frac{J_x}{z_1}$, см^3	$W_2 = \frac{J_x}{z_2}$, см^3				
Ia	55,640	6,963	7,037	1476,11	212,00	209,75	6,25	284,18	45,47	43,567
IIa	49,063	6,781	6,719	1222,54	180,29	181,95	5,70	209,28	36,72	38,416
IIIa	42,758	6,209	6,591	967,98	155,90	146,86	5,50	166,72	30,31	33,480
IVa	39,451	5,924	6,126	751,00	126,77	122,59	5,00	120,20	24,04	30,890

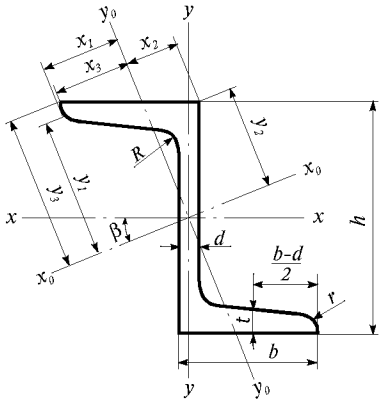


Таблица 11.46. Зетовый профиль
по ОСТ 29, редакция 1926 г.

№ профиля	Размеры, мм						Площадь профиля F, см^2	Вес пог.м, кг	Моменты инерции, см^4			
	h	b	d	t	R	r			J_x	J_y	J_{x_0}	J_{y_0}
6	60	45	5,0	7,5	7,5	3,75	9,18	7,21	51,3	37,4	80,1	8,64
8	80	50	6,0	8,5	8,5	4,25	12,51	9,82	124	57,4	164,4	16,52
10	100	55	6,5	9,5	9,5	4,75	16,01	12,57	248	85,6	306,0	27,22
14	140	65	8	11,5	11,5	5,75	24,74	19,42	738	170,0	846,6	61,44
20	200	80	10	15,0	15,0	7,50	41,72	32,75	2514	411,0	2764,5	160,34

№ профиля	Расстояние до крайних волокон, см						Моменты сопротивления, см^3					
	x_1	x_2	x_3	y_1	y_2	y_3	$W_{x_0}^A = \frac{J_{x_0}}{y_1}$	$W_{x_0}^B = \frac{J_{x_0}}{y_2}$	$W_{x_0}^C = \frac{J_{x_0}}{y_3}$	$W_{y_0}^A = \frac{J_{y_0}}{x_1}$	$W_{y_0}^B = \frac{J_{y_0}}{x_2}$	$W_{y_0}^C = \frac{J_{y_0}}{x_3}$
6	1,70	2,10	1,38	4,50	2,16	5,02	17,80	37,10	15,98	5,07	4,12	6,26
8	2,18	2,36	1,90	5,28	3,24	5,87	31,10	50,68	28,00	7,57	7,01	8,72
10	2,58	2,58	2,31	6,17	4,29	6,81	49,60	71,21	44,90	10,54	10,56	11,77
14	3,32	2,97	3,06	8,02	6,36	8,77	105,50	133,31	96,58	18,52	20,68	20,06
20	4,30	3,58	4,01	10,86	9,32	11,83	253,90	296,61	233,61	37,33	44,81	39,83

Примечания: $b = 0{,}25h + 30$ мм; $d = 0{,}035h + 3$ мм; $t = 1{,}5d$; $R = t$; $r = t/2$; β – угол наклона оси x_0–x_0 к оси x–x; № профиля равен высоте h, см.

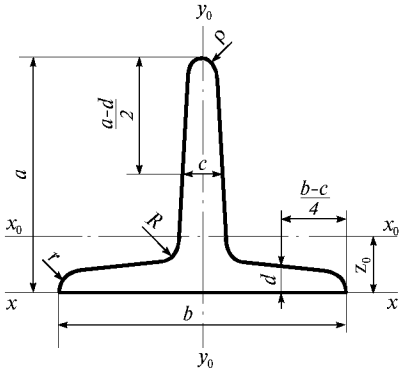


Таблица 11.47. Железо тавровое высокое по ОСТ 29, редакция 1926 г.

a, мм	*b*, мм	Вес пог.м, кг	Размеры, мм					Расстояние центра тяжести z_0, см	Площадь сечения *F*, см^2	Ось *x*–*x*	Ось x_0–x_0		Ось y_0–y_0	
			c	*d*	*R*	*r*	ρ			J_x, см^4	J_{x_0}, см^4	$W_{x_0}^{\min}$, см^3	J_{y_0}, см^4	W_{y_0}, см^3
25	25	1,16	3,0	3,25	3,0	1,75	0,87	0,72	1,48	1,60	0,834	0,468	0,431	0,345
40	40	2,94	5,0	5,0	5,0	2,5	1,25	1,18	3,74	10,20	5,10	1,81	2,80	1,40
50	50	4,44	6,0	6,0	6,0	3,0	1,5	1,38	5,66	23,06	12,20	3,36	5,99	2,40
75	75	8,99	8,0	8,0	8,0	4,0	2,0	2,12	11,45	111,0	58,80	10,9	29,0	7,74

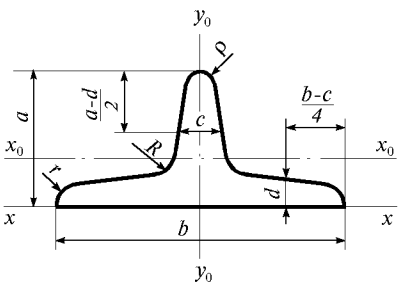


Таблица 11.48. Железо тавровое низкое по ОСТ 29, редакция 1926 г.

a, мм	*b*, мм	Вес пог.м, кг	Размеры, мм				Расстояние центра тяжести z_0, см	Площадь сечения *F*, см^2	Ось *x*–*x*	Ось x_0–x_0		Ось y_0–y_0	
			d	*R*	*r*	ρ			J_x, см^4	J_{x_0}, см^4	$W_{x_0}^{\min}$, см^3	J_{y_0}, см^4	W_{y_0}, см^3
60	30	3,97	6	6	3	1,5	0,71	5,06	5,49	2,92	1,27	9,99	3,33
80	40	6,22	7	7	3,5	1,75	0,91	7,92	14,8	8,26	2,67	27,5	6,37
100	50	9,99	9	9	4,5	2,25	1,15	12,72	37,4	20,6	5,36	69,1	13,80

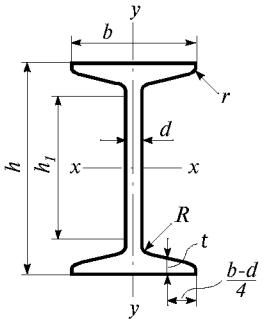


Таблица 11.49. Балки двутавровые по DIN 1025 лист 1

Обозначение профиля I	Вес п.м, кг	Размеры в мм							Площадь сечения F, см^2	Ось x–x			Ось y–y		
		h	b	d	t	R	r	h_1		I_x, см^4	W_x, см^3	i_x, см	I_y, см^4	W_y, см^3	i_y, см
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
8	5,95	80	42	3,9	5,9	3,9	2,3	59	7,58	77,8	19,5	3,20	6,29	3,00	0,91
10	8,32	100	50	4,5	6,8	4,5	2,7	75	10,6	171	34,2	4,01	12,2	4,88	1,07
12	11,2	120	58	5,1	7,7	5,1	3,1	92	14,2	328	54,7	4,81	21,5	7,41	1,23
14	14,4	140	66	5,7	8,6	5,7	3,4	109	18,3	573	81,9	5,61	35,2	10,7	1,40
16	17,9	160	74	6,3	9,5	6,3	3,8	125	22,8	935	117	6,40	54,7	14,8	1,55
18	21,9	180	82	6,9	10,4	6,9	4,1	142	27,9	1450	161	7,20	81,3	19,8	1,71
20	26,3	200	90	7,5	11,3	7,5	4,5	159	33,5	2140	214	8,00	117	26,0	1,87
22	31,1	220	98	8,1	12,2	8,1	4,9	175	39,6	3060	278	8,86	162	33,1	2,02
24	36,2	240	106	8,7	13,1	8,7	5,2	192	46,1	4250	354	9,59	221	41,7	2,20
26	41,9	260	113	9,4	14,1	9,4	5,6	208	53,4	5740	442	10,4	288	51,0	2,32
28	48,0	280	119	10,1	15,2	10,1	6,1	225	61,1	7590	542	11,1	364	61,2	2,45
30	54,2	300	125	10,8	16,2	10,8	6,5	241	69,1	9800	653	11,9	451	72,2	2,56
32	61,1	320	131	11,5	17,3	11,5	6,9	257	77,8	12510	782	12,7	555	84,7	2,67
34	68,1	340	137	12,2	18,3	12,2	7,3	274	86,8	15700	923	13,5	674	98,4	2,80
36	76,2	360	143	13,0	19,5	13,0	7,8	290	97,1	19610	1090	14,2	818	114	2,90
38	84,0	380	149	13,7	20,5	13,7	8,2	306	107	24010	1260	15,0	975	131	3,02
40	92,6	400	155	14,4	21,6	14,4	8,6	323	118	29210	1460	15,7	1160	149	3,13
42½	104	425	163	15,3	23,0	15,3	9,2	343	132	36970	1740	16,7	1440	176	3,30

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
45	115	450	170	16,2	24,3	16,2	9,7	363	147	45850	2040	17,7	1730	203	3,43
47½	128	475	178	17,1	25,6	17,1	10,3	384	163	56480	2380	18,6	2090	235	3,60
50	141	500	185	18,0	27,0	18,0	10,8	404	160	68740	2750	19,6	2480	268	3,72
55	167	550	200	19,0	30,0	19,8	11,9	444	213	99180	3610	21,6	3490	349	4,02
60	199	600	215	21,6	32,4	21,6	13	485	254	139000	4630	23,4	4670	434	4,30
*F*14[1)]	9,16	140	60	4	5,5	4	2,4	118	11,7	365	52,2	5,59	15,6	5,21	1,15

[1)] *F*14 Специальный профиль для элементов фахверка

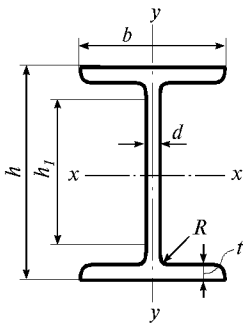


Таблица 11.50. Широкополочные двутавры по DIN 1025 лист 2

Обозначение профиля IP	Вес пог.м, кг	Размеры в мм						Площадь сечения *F*, см²	Ось *x*–*x*			Ось *y*–*y*		
		h	*b*	*d*	*t*	*R*	h_1		I_x, см⁴	W_x, см³	i_x, см	I_y, см⁴	W_y, см³	i_y, см
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
С параллельными внутренними гранями полок														
10	20,5	100	100	6,5	10	10	60	26,1	447	89,3	4,14	167	33,4	2,53
12	26,9	120	120	7	11	11	76	34,3	854	144	5,02	317	52,9	3,04
14	34,6	140	140	8	12	12	92	44,1	1520	217	5,87	550	78,6	3,53
16	45,8	160	160	9	14	14	104	58,4	2630	329	6,72	958	120	4,05
18	51,6	180	180	9	14	14	124	65,8	3830	426	7,63	1360	151	4,55

Продолжение табл. 11.50

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
20	64,9	200	200	10	16	15	138	82,7	5950	595	8,48	2140	214	5,08
22	71,5	220	220	10	16	15	158	91,1	8050	732	9,37	2840	258	5,59
24	87,4	240	240	11	18	17	170	111	11690	974	10,5	4150	346	6,11
26	94,8	260	260	11	18	17	190	121	15050	1160	11,2	5280	406	6,61
28	113	280	280	12	20	18	204	144	20720	1480	12,0	7320	523	7,14
30	121	300	300	12	20	18	224	154	25760	1720	12,9	9010	600	7,65
32	135	320	300	13	22	20	236	171	32250	2020	13,7	9910	661	7,60
34	137	340	300	13	22	20	256	174	36940	2170	14,5	9910	661	7,55
36	150	360	300	14	24	21	270	192	45128	2519	15,3	10810	721	7,51
38	153	380	300	14	24	21	290	194	50950	2680	16,2	10810	721	7,46
40	164	400	300	14	26	21	306	209	60640	3030	17,0	11710	781	7,49
42½	166	425	300	14	26	21	331	212	69480	3270	18,1	11710	781	7,43
45	182	450	300	15	28	23	348	232	84220	3740	19,0	12620	841	7,38
47½	185	475	300	15	28	23	373	235	95120	4010	20,1	12620	841	7,32
50	200	500	300	16	30	24	392	255	113200	4530	21,0	13530	902	7,28
55	207	550	300	16	30	24	442	263	140300	5100	23,1	13530	902	7,17
60	227	600	300	17	32	26	484	289	180800	6030	25,0	14440	962	7,07
65	234	650	300	17	32	26	534	297	216800	6670	27,0	14440	962	6,97
70	254	700	300	18	34	27	578	324	270300	7720	28,9	15350	1020	6,88
75	261	750	300	18	34	27	628	333	316300	8430	30,8	15350	1020	6,79
80	268	800	300	18	34	27	678	342	366400	9160	32,7	15350	1020	6,70
85	292	850	300	19	36	30	718	372	443900	10440	34,6	16270	1080	6,61
90	299	900	300	19	36	30	768	381	505000	11250	36,4	16270	1080	6,53
95	307	950	300	19	36	30	818	391	573000	12060	38,3	16270	1080	6,45
100	314	1000	300	19	36	30	868	400	644700	12900	40,1	16280	1080	6,37
С 9% уклоном внутренних граней полок														
10,10	21,0	100	100	7,5	10,25	10	55	26,8	447	89,4	4,09	151	30,1	2,37
12,12	27,2	120	120	8	11	11	70	34,6	852	142	4,96	276	46,0	2,82
14,14	34,0	140	140	8	12	12	85	43,3	1490	213	5,86	475	67,8	3,31
16,16	45,0	160	160	9	14	14	100	57,4	2580	322	6,70	831	104	3,81
18,18	50,8	180	180	9	14	14	120	64,7	3750	417	7,62	1170	130	4,25

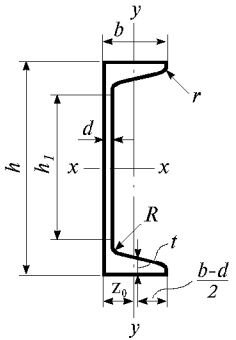


Таблица 11.51. Швеллеры по DIN 1026
Уклон внутренних граней полок 8% для NN3-30
Уклон внутренних граней полок 5% для NN32-40 кроме №38

Обозначение профиля ⊏	Вес пог.м, кг	Размеры в мм							Площадь сечения F, см^2	Ось x–x			Ось y–y			Расст. центра тяжести z_0, мм
		h	b	d	t	R	r	h_1		I_x, см^4	W_x, см^3	i_x, см	I_y, см^4	W_y, см^3	i_y, см	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
3	4,27	30	33	5	7	7	3,5	1	5,44	6,39	4,25	1,08	5,33	2,68	0,99	1,31
4	4,87	40	35	5	7	7	3,5	11	6,21	14,1	7,05	1,50	6,68	3,08	1,04	1,33
5	5,59	50	38	5	7	7	3,5	20	7,12	26,4	10,6	1,92	9,12	3,75	1,13	1,37
6½	7,09	65	42	5,5	7,5	7,5	4	33	9,03	57,5	17,7	2,52	14,1	5,07	1,25	1,42
8	8,64	80	45	6	8	8	4	46	11,0	106	26,5	3,10	19,4	6,36	1,33	1,45
10	10,6	100	50	6	8,5	8,5	4,5	64	13,5	206	41,2	3,91	29,3	8,49	1,47	1,55
12	13,4	120	55	7	9	9	4,5	82	17,0	364	60,7	4,62	43,2	11,1	1,59	1,60
14	16,0	140	60	7	10	10	5	98	20,4	605	86,4	5,45	62,7	14,8	1,75	1,75
16	18,8	160	65	7,5	10,5	10,5	5,5	115	24,0	925	116	6,21	85,3	18,3	1,89	1,84
18	22,0	180	70	8	11	11	5,5	133	28,0	1350	150	6,95	114	22,4	2,02	1,92
20	25,3	200	75	8,5	11,5	11,5	6	151	32,2	1910	191	7,70	148	27,0	2,14	2,01
22	29,4	220	80	9	12,5	12,3	6,5	167	37,4	2690	245	8,48	197	33,6	2,30	2,14
24	33,2	240	85	9,5	13	13	6,5	184	42,3	3600	300	9,22	248	39,6	2,42	2,23
26	37,9	260	90	10	14	14	7	200	48,3	4820	371	9,99	317	47,7	2,56	2,36
28	41,8	280	95	10	15	15	7,5	216	53,3	6280	448	10,90	399	57,2	2,74	2,53
30	46,2	300	100	10	16	16	8	232	58,8	8030	535	11,7	495	67,8	2,90	2,70
32	59,5	320	100	14	17,5	17,5	8,75	246	75,8	10870	679	12,1	597	80,6	2,81	2,60

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
35	60,6	350	100	14	16	16	8	282	77,3	12840	734	12,9	570	75,0	2,72	2,40
38[1)]	62,6	381	102	13,34	16	16	11,2	312	79,7	15730	826	14,1	613	78,4	2,78	2,35
40	71,8	400	110	14	18	18	9	324	91,5	20350	1020	14,9	846	102	3,04	2,65
F14[2)]	7,78	140	40	4	6	6	3	114	9,90	285	40,6	5,36	12,5	4,21	1,12	1,02

[1)] [№38 имеет уклон внутренних граней полок – 3,492%.

F14[2)] - специальный профиль для фахверка.

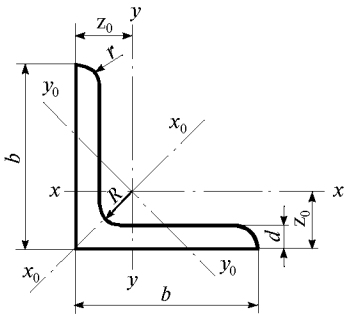


Таблица 11.52. Уголки равнобокие по DIN 1028

Размеры в мм		Вес пог.м, кг	Радиусы закр., мм		Площадь сечения F, см^2	Ось x–x			Ось x_0–x_0		Ось y_0–y_0			Расст. центра тяжести z_0, см
b	d		R	r		I_x, см^4	W_x, см^3	i_x, см	I_{x_0}, см^4	i_{x_0}, см	I_{y_0}, см^4	W_{y_0}, см^3	i_{y_0}, см	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
15	3	0,64	3,5	2	0,82	0,15	0,15	0,43	0,24	0,54	0,06	0,09	0,27	0,48
	4	0,82	3,5	2	1,05	0,19	0,19	0,42	0,29	0,53	0,08	0,11	0,28	0,51
20	3	0,88	3,5	2	1,12	0,39	0,28	0,59	0,62	0,74	0,15	1,18	0,37	0,60
	4	1,14	3,5	2	1,45	0,48	0,35	0,58	0,77	0,73	0,19	1,21	0,36	0,64
25	3	1,12	3,5	2	1,42	0,79	0,45	0,75	1,27	0,95	0,31	0,30	0,47	0,73
	4	1,45	3,5	2	1,85	1,01	0,58	0,74	1,61	0,93	0,40	0,37	0,47	0,76
	5	1,77	3,5	2	2,26	1,18	0,69	0,72	1,87	0,91	0,50	0,44	0,47	0,80

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
30	3	1,36	5	2,5	1,74	1,41	0,65	0,90	2,24	1,14	0,57	0,48	0,57	0,84
	4	1,78	5	2,5	2,27	1,81	0,86	0,89	2,85	1,12	0,76	0,61	0,58	0,89
	5	2,18	5	2,5	2,78	2,16	1,04	0,88	3,41	1,11	0,91	0,70	0,57	0,92
35	4	2,10	5	2,5	2,67	2,96	1,18	1,05	4,68	1,33	1,24	0,88	0,68	1,00
	6	3,04	5	2,5	3,87	4,14	1,71	1,04	6,50	1,30	1,77	1,16	0,68	1,08
40	4	2,42	6	3	3,08	4,48	1,56	1,21	7,09	1,52	1,86	1,18	0,78	1,12
	5	2,97	6	3	3,79	5,43	1,91	1,20	8,64	1,51	2,22	1,35	0,77	1,16
	6	3,52	6	3	4,48	6,33	2,26	1,19	9,98	1,49	2,67	1,57	0,77	1,20
45	5	3,38	7	3,5	4,30	7,83	2,43	1,35	12,4	1,70	3,25	1,80	0,87	1,28
	7	4,60	7	3,5	5,86	10,4	3,31	1,33	16,4	1,67	4,39	2,29	0,87	1,36
50	5	3,77	7	3,5	4,80	11,8	3,05	1,51	17,4	1,90	4,59	3,32	0,98	1,40
	6	4,47	7	3,5	5,69	12,8	3,61	1,50	20,4	1,89	5,24	2,57	0,96	1,45
	7	5,15	7	3,5	6,56	14,6	4,15	1,49	23,1	1,88	6,02	2,85	0,96	1,49
	9	6,47	7	3,5	8,24	17,9	5,20	1,47	28,1	1,85	7,67	3,47	0,97	1,56
55	6	4,95	8	4	6,31	17,3	4,40	1,66	27,4	2,08	7,24	3,28	1,07	1,56
	8	6,46	8	4	8,23	22,1	5,72	1,64	34,8	2,06	9,35	4,03	1,07	1,64
	10	7,90	8	4	10,1	26,3	6,97	1,62	41,4	2,02	11,3	4,65	1,06	1,72
60	6	5,42	8	4	6,91	22,8	5,29	1,82	36,1	2,29	9,43	3,95	1,17	1,69
	8	7,09	8	4	9,03	29,1	6,88	1,80	46,1	2,26	12,1	4,84	1,16	1,77
	10	8,69	8	4	11,1	34,9	8,41	1,78	55,1	2,23	14,6	5,57	1,15	1,85
65	7	6,83	9	4,5	8,70	33,4	7,18	1,96	53,0	2,47	13,8	5,27	1,26	1,85
	9	8,62	9	4,5	11,0	41,3	9,04	1,94	65,4	2,44	17,2	6,30	1,25	1,93
	11	10,3	9	4,5	13,2	48,8	10,8	1,91	76,8	2,42	20,7	7,31	1,25	2,00
70	7	7,38	9	4,5	9,40	42,4	8,43	2,12	67,1	2,67	17,6	6,31	1,37	1,97
	9	9,34	9	4,5	11,9	52,6	10,6	2,10	83,1	2,64	22,0	7,59	1,36	2,05
	11	11,2	9	4,5	14,3	61,8	12,7	2,08	97,6	2,61	26,0	8,64	1,35	2,13
75	7	7,94	10	5	10,1	52,4	9,67	2,28	83,6	2,88	21,1	7,15	1,45	2,09
	8	9,03	10	5	11,5	58,9	11,0	2,26	93,3	2,85	24,4	8,11	1,46	2,13
	10	11,1	10	5	14,1	71,4	13,5	2,25	113	2,83	29,8	9,55	1,45	2,21
	12	13,1	10	5	16,7	82,4	15,8	2,22	130	2,79	34,7	10,7	1,44	2,29
80	8	9,66	10	5	12,3	72,3	12,6	2,42	115	3,06	29,6	9,25	1,55	2,26
	10	11,9	10	5	15,1	87,5	15,5	2,41	139	3,03	35,9	10,9	1,54	2,34
	12	14,1	10	5	17,9	102	18,2	2,39	161	3,00	43,0	12,6	1,53	2,41
	14	16,1	10	5	20,6	115	20,8	2,36	181	2,96	48,6	13,9	1,54	2,48

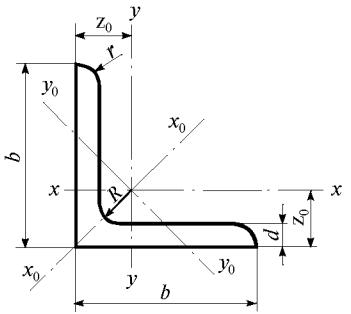


Таблица 11.53. Уголки равнобокие по DIN 1028

*)Уголки 90×90×16, 100×100×20 и 120×120×20 — специальные профили для локомотивостроения

Размеры в мм		Вес пог.м, кг	Радиусы закр., мм		Площадь сечения F, см^2	Ось x–x			Ось x_0–x_0		Ось y_0–y_0			Расст. центра тяжести z_0, см
b	d		R	r		I_x, см^4	W_x, см^3	i_x, см	I_{x_0}, см^4	i_{x_0}, см	I_{y_0}, см^4	W_{y_0}, см^3	i_{y_0}, см	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
90	9	12,2	11	5,5	15,5	116	18,0	2,74	184	3,45	47,8	13,3	1,76	2,56
	11	14,7	11	5,5	18,7	138	21,6	2,72	218	3,41	57,1	15,4	1,75	2,60
	13	17,1	11	5,5	21,8	158	25,1	2,69	250	3,39	65,9	17,3	1,74	2,70
	16*	20,7	11	5,5	26,4	186	30,1	2,66	294	3,34	79,1	19,9	1,73	2,82
100	10	15,1	12	6	19,2	177	24,7	3,04	280	3,82	73,3	18,4	1,95	2,84
	12	17,8	12	6	22,7	207	29,2	3,02	328	3,80	86,2	21,0	1,95	2,90
	14	20,6	12	6	26,2	235	33,5	3,00	372	3,77	98,3	23,4	1,94	2,98
	20*	28,4	12	6	36,2	311	45,8	2,93	488	3,67	134	29,5	1,93	3,20
110	10	16,6	12	6	21,2	239	30,1	3,36	379	4,23	98,6	22,7	2,16	3,06
	12	19,7	12	6	25,1	280	35,7	3,34	444	4,21	116	26,1	2,15	3,15
	14	22,8	12	6	29,0	319	41,0	3,32	505	4,18	133	29,3	2,14	3,21
120	11	19,9	13	6,5	25,4	341	39,5	3,66	541	4,62	140	29,5	2,35	3,37
	13	23,3	13	6,5	29,7	394	46,0	3,64	625	4,59	162	33,3	2,34	3,44
	15	26,6	13	6,5	33,9	446	52,5	3,63	705	4,56	186	37,5	2,34	3,50
	20*	34,7	13	6,5	44,2	562	67,7	3,57	887	4,48	236	45,0	2,31	3,70

Продолжение табл.11.53

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
	12	23,6	14	7	30,0	472	50,4	3,97	758	5,00	194	37,7	2,54	3,63
130	14	27,2	14	7	34,7	540	58,2	3,94	857	4,97	223	42,4	2,53	3,72
	16	30,9	14	7	39,3	605	65,8	3,92	959	4,94	251	46,7	2,52	3,80
	13	27,5	15	7,5	35,0	638	63,3	4,27	1010	5,38	262	47,3	2,74	3,90
140	15	31,4	15	7,5	40,0	723	72,3	4,25	1150	5,36	298	52,7	2,73	4,0
	17	35,3	15	7,5	45,0	805	81,2	4,23	1280	5,33	334	57,9	2,72	4,08
	14	31,6	16	8	40,3	845	78,2	4,58	1340	5,77	347	58,3	2,94	4,20
150	16	35,9	16	8	45,7	949	88,7	4,56	1510	5,74	391	64,4	2,93	4,29
	18	40,1	16	8	51,0	1050	99,3	4,54	1670	5,70	438	71,0	2,93	4,36
	15	36,2	17	8,5	46,1	1100	95,6	4,88	1750	6,15	453	71,3	3,14	4,49
160	17	40,7	17	8,5	51,8	1230	108	4,86	1950	6,13	506	78,3	3,13	4,57
	19	45,1	17	8,5	57,5	1350	118	4,84	2140	6,10	558	84,8	3,12	4,60
	16	43,5	18	9	55,4	1680	130	5,51	2690	6,96	679	95,5	3,50	5,08
180	18	48,6	18	9	61,9	1870	145	5,49	2950	6,93	757	105	3,49	5,10
	20	53,7	18	9	68,4	2040	160	5,47	3260	6,90	830	113	3,49	5,18
	16	48,5	18	9	61,8	2340	162	6,15	3740	7,78	943	121	3,91	5,58
200	18	54,3	18	9	69,1	2600	181	6,13	4150	7,75	1050	133	3,90	5,60
	20	59,9	18	9	76,4	2850	199	6,11	4540	7,72	1160	144	3,89	5,62

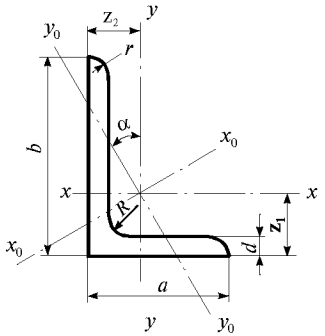


Таблица 11.54. Уголки неравнобокие по DIN 1029

Размеры в мм			Вес пог.м, кг	Радиусы закр.		Площадь сечения F, см^2	Ось x–x			Ось y–y			Ось x_0–x_0		Ось y_0–y_0			Расст. ц.т.	
a	b	d		R, мм	r, мм		I_x, см^4	W_x, см^3	i_x, см	I_y, см^4	W_y, см^3	i_y, см	I_{x_0}, см^4	i_{x_0}, см	I_{y_0}, см^4	r_{y_0}, см	tgα	z_1, см	z_2, см
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
20	30	3	1,11	3,5	2	1,42	1,25	0,62	0,94	0,44	0,29	0,56	1,43	1,00	0,25	0,42	0,431	0,99	0,50
		4	1,45	3,5	2	1,85	1,59	0,81	0,93	0,55	0,38	0,55	1,81	0,99	0,33	0,42	0,423	1,03	0,54
		5	1,77	3,5	2	2,26	1,90	0,99	0,92	0,66	0,46	0,54	2,15	0,98	0,40	0,42	0,412	1,07	0,58
20	40	3	1,35	3,5	2	1,72	2,79	1,08	1,27	0,47	0,30	0,52	2,96	1,31	0,30	0,42	0,259	1,43	0,44
		4	1,77	3,5	2	2,25	3,59	1,42	1,26	0,60	0,39	0,52	3,79	1,30	0,39	0,42	0,252	1,47	0,48
30	45	3	1,72	4,5	2	2,19	4,48	1,46	1,43	1,60	0,70	0,86	5,17	1,54	0,91	0,64	0,441	1,43	0,70
		4	2,25	4,5	2	2,87	5,78	1,91	1,42	2,05	0,91	0,85	6,65	1,52	1,18	0,64	0,436	1,48	0,74
		5	2,77	4,5	2	3,53	6,99	2,35	1,41	2,47	1,11	0,84	8,02	1,51	1,44	0,64	0,430	1,52	0,78
30	60	5	3,37	6	3	4,29	15,6	4,04	1,90	2,60	1,12	0,78	16,5	1,96	1,69	0,62	0,256	2,15	0,68
		7	4,59	6	3	5,85	20,7	5,50	1,88	3,41	1,52	0,76	21,8	1,93	2,28	0,62	0,248	2,24	0,76
40	50	3	2,06	4	2	2,63	6,58	1,87	1,58	3,76	1,25	1,20	8,46	1,79	1,89	0,85	0,632	1,48	0,99
		4	2,71	4	2	3,46	8,54	2,47	1,57	4,86	1,64	1,19	10,9	1,78	2,46	0,84	0,629	1,52	1,03
		5	3,35	4	2	4,27	10,4	3,02	1,56	5,89	2,01	1,18	13,3	1,76	3,02	0,84	0,625	1,56	1,07
40	60	5	3,76	6	3	4,79	17,2	4,25	1,89	6,11	2,02	1,13	19,8	2,03	3,50	0,86	0,437	1,96	0,97
		6	4,46	6	3	5,68	20,1	5,03	1,88	7,12	2,38	1,12	23,1	2,02	4,12	0,85	0,433	2,00	1,01
		7	5,14	6	3	6,55	23,0	5,79	1,87	8,07	2,74	1,11	26,3	2,00	4,73	0,85	0,429	2,04	1,05
40	80	4	3,68	7	3,5	4,69	31,1	5,83	2,57	5,32	1,86	1,07	33,0	2,65	3,38	0,85	0,265	2,76	0,80
		6	5,41	7	3,5	6,89	44,8	8,75	2,55	7,59	2,44	1,05	47,6	2,63	4,90	0,84	0,259	2,85	0,88
		8	7,07	7	3,5	9,01	57,6	11,4	2,53	9,68	3,18	1,04	60,9	2,60	6,41	0,84	0,253	2,94	0,95

Продолжение табл. 11.54

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
50	65	5	4,35	6,5	3,5	5,54	23,1	5,11	2,04	11,9	3,18	1,47	28,8	2,28	6,21	1,06	0,583	1,99	1,25
		7	5,97	6,5	3,5	7,60	31,0	6,99	2,02	15,8	4,31	1,44	38,4	2,25	8,37	1,05	0,574	2,07	1,33
		9	7,52	6,5	3,5	9,58	38,2	8,77	2,00	19,4	5,39	1,42	47,0	2,22	10,5	1,05	0,567	2,15	1,41
55	100	6	6,85	9	4,5	8,73	89,7	13,8	3,20	15,3	3,86	1,32	95,2	3,30	9,78	1,06	0,263	3,49	1,04
		8	8,99	9	4,5	11,5	116	18,0	3,18	19,5	5,04	1,31	123	3,28	12,6	1,05	0,258	3,59	1,13
		10	11,1	9	4,5	14,1	141	22,0	3,16	23,4	6,17	1,29	149	3,25	15,5	1,04	0,252	3,67	1,20
55	75	5	4,95	7	3,5	6,30	35,5	6,84	2,37	16,2	3,89	1,60	43,1	2,61	8,58	1,17	0,530	2,31	1,33
		7	6,80	7	3,5	8,66	47,9	9,39	2,35	21,8	5,32	1,59	57,9	2,59	11,8	1,17	0,525	2,40	1,41
		9	8,59	7	3,5	10,9	59,4	11,8	2,33	26,8	6,66	1,57	71,3	2,55	14,8	1,16	0,518	2,47	1,48
60	90	6	6,82	7	3,5	8,69	71,7	11,7	2,87	25,8	5,61	1,72	82,8	3,09	14,6	1,30	0,442	2,89	1,41
		8	8,96	7	3,5	11,4	92,5	15,4	2,85	33,0	7,31	1,70	107	3,06	19,0	1,29	0,437	2,97	1,49
		10	11,0	7	3,5	14,1	112	18,8	2,82	39,6	8,92	1,68	129	3,02	23,1	1,28	0,431	3,05	1,56
65	75	6	6,37	8	4	8,11	44,0	8,30	2,33	30,7	6,39	1,90	60,2	2,73	14,4	1,34	0,740	2,19	1,70
		8	8,34	8	4	10,6	56,7	10,9	2,31	39,4	8,34	1,92	77,3	2,70	18,8	1,33	0,736	2,28	1,78
		10	10,3	8	4	13,1	68,4	13,3	2,29	47,3	10,2	1,94	92,7	2,66	23,0	1,33	0,732	2,35	1,86
65	80	6	6,60	8	4	8,41	52,8	9,41	2,51	31,2	6,44	1,93	68,5	2,85	15,6	1,36	0,649	2,39	1,65
		8	8,66	8	4	11,0	68,1	12,3	2,49	40,1	8,41	1,91	88,0	2,82	20,3	1,36	0,645	2,47	1,73
		10	10,7	8	4	13,6	82,2	15,1	2,46	48,3	10,3	1,89	106	2,79	24,8	1,35	0,640	2,55	1,81
		12	12,6	8	4	16,0	95,4	17,8	2,44	55,8	12,1	1,87	122	2,76	29,2	1,35	0,634	2,63	1,88
65	100	7	8,77	10	5	11,2	113	16,6	3,17	37,6	7,54	1,84	128	3,39	21,6	1,39	0,419	3,23	1,51
		9	11,1	10	5	14,2	141	21,0	3,15	46,7	9,52	1,82	160	3,36	27,2	1,39	0,415	3,32	1,59
		11	13,4	10	5	17,1	167	25,3	3,13	55,1	11,4	1,80	190	3,34	32,6	1,38	0,410	3,40	1,67
65	115	6	8,25	8	4	10,5	145	18,9	3,71	34,4	6,71	1,81	158	3,88	21,1	1,42	0,327	3,85	1,38
		8	10,9	8	4	13,8	188	24,8	3,69	44,2	8,78	1,79	205	3,85	27,4	1,41	0,324	3,94	1,46
		10	13,4	8	4	17,1	229	30,6	3,66	53,3	10,8	1,77	249	3,82	33,2	1,40	0,321	4,02	1,54
65	130	8	11,9	11	5,5	15,1	263	31,1	4,17	44,8	8,72	1,72	280	4,31	28,6	1,38	0,263	4,56	1,37
		10	14,6	11	5,5	18,6	321	38,4	4,15	54,2	10,7	1,71	340	4,27	35,0	1,37	0,259	4,65	1,45
		12	17,3	11	5,5	22,1	376	45,5	4,12	63,0	12,7	1,69	397	4,24	41,2	1,37	0,255	4,74	1,53
75	90	7	8,74	8,5	4,5	11,1	88,1	13,9	2,81	55,5	9,98	2,23	117	3,24	27,1	1,56	0,683	2,67	1,93
		9	11,1	8,5	4,5	14,1	110	17,6	2,79	69,1	12,6	2,21	145	3,21	34,1	1,56	0,679	2,76	2,01
		11	13,4	8,5	4,5	17,0	130	21,1	2,77	81,7	18,5	2,19	171	3,17	40,9	1,55	0,675	2,83	2,09
75	100	7	9,32	10	5	11,9	118	17,0	3,15	56,9	10,0	2,19	145	3,49	30,1	1,59	0,553	3,06	1,83
		9	11,8	10	5	15,1	148	21,5	3,13	71,0	12,7	2,17	181	3,47	37,8	1,59	0,549	3,15	1,91
		11	14,3	10	5	18,2	176	25,9	3,11	84,1	15,3	2,15	214	3,44	45,4	1,58	0,545	3,23	1,99

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
75	130	8	12,5	10,5	5,5	15,9	276	31,9	4,17	68,3	11,7	2,08	303	4,37	41,3	1,61	0,339	4,36	1,65
		10	15,4	10,5	5,5	19,6	337	39,4	4,14	82,9	14,4	2,06	369	4,34	50,6	1,31	0,336	4,45	1,73
		12	18,3	10,5	5,5	23,3	395	46,6	4,12	96,5	17,0	2,04	432	4,31	58,6	1,60	0,332	4,53	1,81
75	150	9	15,3	10,5	5,5	19,5	455	46,8	4,83	78,3	13,2	2,00	484	4,98	50,0	1,60	0,265	5,28	1,57
		11	18,6	10,5	5,5	23,6	545	56,6	4,80	93,0	15,9	1,98	578	4,95	59,8	1,59	0,261	5,37	1,65
		13	21,7	10,5	5,5	27,7	631	66,1	4,78	107	18,5	1,96	668	4,91	69,4	1,58	0,258	5,45	1,73
75	170	10	18,6	11,5	5,5	23,7	709	65,7	5,47	88,2	14,8	1,93	739	5,59	58,5	1,57	0,214	6,21	1,52
		12	22,1	11,5	5,5	28,1	834	78,0	5,45	103	17,4	1,91	868	5,56	68,9	1,57	0,210	6,31	1,60
		14	25,5	11,5	5,5	32,5	959	90,0	5,42	117	20,0	1,89	992	5,53	79,0	1,56	0,207	6,39	1,68
		16	28,9	11,5	5,5	39,8	1070	102	5,39	130	22,6	1,88	1110	5,50	88,8	1,55	0,204	6,47	1,76
80	120	8	12,2	11	5,5	15,5	226	27,6	3,82	80,8	13,2	2,29	261	4,10	45,8	1,72	0,441	3,83	1,87
		10	15,0	11	5,5	19,1	276	34,1	3,80	98,1	16,2	2,27	318	4,07	56,1	1,71	0,438	3,92	1,95
		12	17,8	11	5,5	22,7	323	40,1	3,77	114	19,1	2,25	371	4,04	66,1	1,71	0,433	4,00	2,03
		14	20,5	11	5,5	26,2	368	46,4	3,75	130	22,0	2,23	421	4,01	75,8	1,70	0,429	4,08	2,10
90	110	9	13,6	12	6	17,3	204	26,5	3,43	122	18,3	2,66	264	3,90	62,2	1,89	0,652	3,30	2,32
		11	16,4	12	6	20,9	243	31,9	3,41	146	22,1	2,64	315	3,88	74,3	1,88	0,650	3,38	2,40
		13	19,2	12	6	24,5	281	37,2	3,39	168	25,7	2,62	362	3,85	86,0	1,88	0,648	3,46	2,48
90	130	10	16,6	12	3	21,2	358	40,5	4,11	141	20,6	2,58	420	4,46	78,5	1,93	0,472	4,15	2,18
		12	19,7	12	6	25,1	420	48,0	4,09	165	24,4	2,56	492	4,43	92,6	1,92	0,468	4,24	2,26
		14	22,8	12	6	29,0	480	55,3	4,07	187	28,1	2,54	560	4,41	106	1,91	0,465	4,32	2,34
90	150	10	18,2	12,5	6,5	23,2	532	53,1	4,79	146	21,0	2,51	591	5,05	87,3	1,94	0,363	4,99	2,03
		12	21,6	12,5	6,5	27,5	626	63,1	4,77	170	24,7	2,49	694	5,02	102	1,93	0,360	5,08	2,11
		14	25,0	12,5	6,5	31,8	716	72,8	4,75	194	28,4	2,47	792	4,99	118	1,92	0,357	5,16	2,19
90	250	10	26,0	12,5	6,5	33,2	2170	140	8,09	163	22,0	2,22	2220	8,18	113	1,84	0156	9,49	1,57
		12	31,0	12,5	6,5	39,5	2570	167	8,06	191	26,0	2,20	2630	8,15	133	1,83	0,154	9,59	1,63
		14	36,0	12,5	6,5	45,8	2960	193	8,03	218	30,0	2,18	3020	8,12	152	1,82	0,152	9,68	1,74
		16	40,8	12,5	6,5	52,0	3330	219	8,01	243	33,8	2,16	3400	8,09	172	1,82	1,150	9,77	1,82
100	150	10	19,0	13	6,5	24,2	552	54,1	4,78	198	25,8	2,86	637	5,13	112	2,15	0,442	4,80	2,34
		12	22,6	13	6,5	28,7	650	64,2	4,76	232	30,6	2,84	749	5,10	132	2,15	0,439	4,89	2,42
		14	26,1	13	6,5	33,2	744	74,1	4,73	264	35,2	2,82	856	5,07	152	2,14	0,435	4,97	2,50
100	200	10	23,0	15	7,5	29,2	1220	93,2	6,46	210	26,3	2,68	1300	6,66	133	2,14	0,266	6,93	2,01
		12	27,3	15	7,5	34,8	1440	111	6,43	247	31,3	2,67	1530	6,63	158	2,13	0,264	7,03	2,10
		14	31,6	15	7,5	40,3	1650	128	6,41	282	36,1	2,65	1760	6,60	181	2,12	0,262	7,12	2,18
		16	35,9	15	7,5	45,7	1860	145	6,38	316	40,8	2,63	1970	6,57	204	2,11	0,259	7,20	2,26
		18	40,0	15	7,5	51,0	2060	162	6,36	347	45,3	2,61	2180	6,54	227	2,11	0,256	7,29	2,34

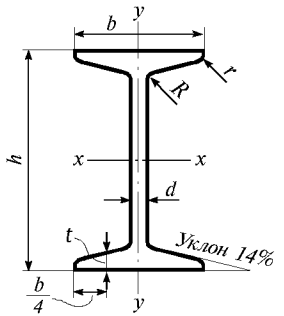


Таблица 11.55. Двутавры. 1940 г. ČSN/DIN

I	Основные размеры в мм						Площадь сечения F, см^2	Вес 1 пог.м P, кг	Моменты инерции		Радиусы инерции		Моменты сопротивления	
	h	b	d	t	R	r			J_x см^4	J_y см^4	i_x см	i_y см	W_x см^3	W_y см^3
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
8	80	42	3,9	5,9	3,9	2,3	7,58	5,95	77,8	6,29	3,20	0,91	19,5	3,00
10	100	50	4,5	6,8	4,5	2,7	10,6	8,32	171	12,2	4,01	1,07	34,2	4,88
12	120	58	5,1	7,7	5,1	3,1	14,2	11,2	328	21,5	4,81	1,23	54,7	7,41
14	140	66	5,7	8,6	5,7	3,4	18,3	14,4	573	35,2	5,61	1,40	81,9	10,7
16	160	74	6,3	9,5	6,3	3,8	22,8	17,9	935	54,7	6,40	1,55	117	14,8
18	180	82	6,9	10,4	6,9	4,1	27,9	21,9	1450	81,3	7,20	1,71	161	19,8
20	200	90	7,5	11,3	7,5	4,5	33,5	26,3	2140	117	8,00	1,87	214	26,0
22	220	98	8,1	12,2	8,1	4,9	39,6	31,1	3060	162	8,80	2,02	278	33,1
24	240	106	8,7	13,1	8,7	5,2	46,1	36,2	4250	221	9,59	2,20	354	41,7
26	260	113	9,4	14,1	9,4	5,6	53,4	41,9	5740	288	10,4	2,32	442	51,0
28	280	119	10,1	15,2	10,1	6,1	61,1	48,0	7590	364	11,1	2,45	542	61,2
30	300	125	10,8	16,2	10,8	6,5	69,1	54,2	9800	451	11,9	2,56	653	72,2
32	320	121	11,5	17,3	11,5	6,9	77,8	61,1	12510	555	12,7	2,67	782	84,7
34	340	137	12,2	18,3	12,2	7,3	86,8	68,1	15700	674	13,5	2,80	923	98,4
36	360	143	13,0	19,5	13,0	7,8	97,1	76,2	19610	818	14,2	2,90	1090	114
38	380	149	13,7	20,5	13,7	8,2	107	84,0	24010	975	15,0	3,02	1260	131

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
40	400	155	14,4	21,6	14,4	8,6	118	92,6	29210	1160	15,7	3,13	1460	149
42,5	425	163	15,3	23,0	15,3	9,2	132	104	36970	1440	16,7	3,30	1740	176
45	450	170	16,2	24,3	16,2	9,7	147	115	45850	1730	17,7	3,43	2040	203
47,5	475	178	17,1	25,6	17,1	10,3	163	128	56480	2090	18,6	3,60	2380	235
50	500	185	18,0	27,0	18,0	10,8	180	141	68740	2480	19,6	3,72	2750	268
55	550	200	19,0	30,0	19,0	11,9	213	167	99180	3490	21,6	4,02	3610	349
60	600	215	21,6	32,4	21,6	13,0	254	199	139000	4670	23,4	4,30	4630	434

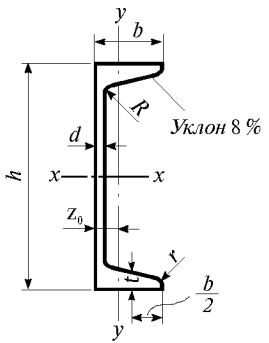


Таблица 11.56. Швеллеры. 1940 г. ČSN/DIN

h – высота швеллера
b – ширина полки
d – толщина стенки
t – ср. толщина полки
R – радиус внутреннего закругления
r – радиус закругления

[	Основные размеры в мм						Площадь сечения *F*, см^2	Вес 1 пог.м *P*, кг	z_0 см	Моменты инерции		Радиусы инерции		Моменты сопротивления	
	h	*b*	*d*	*t*	*R*	*r*				J_x см^4	J_y см^4	i_x см	i_y см	W_x см^3	W_y см^3
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
30.15	30	15	4	4,5	4,5	2	2,21	1,74	0,52	2,53	0,38	1,07	0,42	1,69	0,39
3	30	33	5	7	7	3,5	5,44	4,27	1,31	6,39	5,33	1,08	0,99	4,26	2,68
40.20	40	20	5	5	5	2,5	3,51	2,75	0,65	7,26	1,06	1,44	0,55	3,63	0,78
4	40	35	5	7	7	3,5	6,21	4,87	1,33	14,1	6,68	1,50	1,04	7,05	3,08

Продолжение табл.11.56

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
50.25	50	25	6	6,5	6,5	3	5,50	4,32	0,82	18,0	2,94	1,81	0,73	7,18	1,75
5	50	38	5	7	7	3,5	7,12	5,59	1,37	26,4	9,12	1,92	1,13	10,6	3,75
60.30	60	30	6	6	6	3	6,46	5,07	0,91	31,6	4,51	2,21	0,84	10,5	2,16
6,5	65	42	5,5	7,5	7,5	4	9,03	7,09	1,42	57,5	14,1	2,52	1,25	17,7	5,07
8	80	45	6	8	8	4	11,0	8,64	1,45	106	19,4	3,10	1,33	26,5	6,36
10	100	50	6	8,5	8,5	4,5	13,5	10,6	1,55	206	29,3	3,91	1,47	41,2	8,49
12	120	55	7	9	9	4,5	17,0	13,4	1,60	364	43,2	4,62	1,59	60,7	11,1
14	140	60	7	10	10	5	20,4	16,0	1,75	605	62,7	5,45	1,75	86,4	14,8
16	160	65	7,5	10,5	10,5	5,5	24,0	18,8	1,84	925	85,3	6,21	1,89	116	18,3
18	180	70	8	11	11	5,5	28,0	22,0	1,92	1350	114	6,95	2,02	150	22,4
20	200	75	8,5	11,5	11,5	6	32,2	25,3	2,01	1910	148	7,70	2,14	191	27,0
22	220	80	9	12,5	12,5	6,5	37,4	29,4	2,14	2690	197	8,48	2,30	245	33,6
24	240	85	9,5	13	13	6,5	42,3	33,2	2,23	3600	248	9,22	2,42	300	39,6
26	260	90	10	14	14	7	48,3	37,9	2,36	4820	317	9,99	2,56	371	47,7
28	280	95	10	15	15	7,5	53,3	41,8	2,53	6280	399	10,9	2,74	448	57,2
30	300	100	10	16	16	8	58,8	46,2	2,70	8030	495	11,7	2,90	535	67,8
32	320	100	14	17,5	17,5	8,75	75,8	59,5	2,60	10870	597	12,1	2,81	679	80,6
35	350	100	14	16	16	8	77,3	60,6	2,40	12840	570	12,9	2,72	734	75,0
38	380	102	13,34	16	16	11,2	79,7	62,6	2,35	15730	613	14,1	2,78	826	78,4
40	100	110	14	18	18	9	91,5	71,8	2,65	20350	846	14,9	3,04	1020	102
14	140	40	4	6	6	3	9,9	287	1,02	285	12,5	5,36	1,12	40,6	4,21

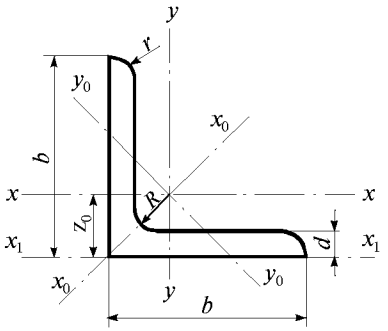


Таблица 11.57. Уголки равнобокие. 1940 г. ČSN/DIN

b – ширина полки
d – толщина полки
z – координаты центра тяжести
R – радиус внутреннего закругления
r – радиус закругления полки

Основные размеры в мм				Площадь сечения *F*, см^2	Вес 1 пог.м *P*, кг	z_0 см	Моменты инерции			Радиусы инерции			Момент сопротив.
b×*b*	*d*	*R*	*r*				J_x см^4	J_{x_0} см^4	J_{y_0} см^4	i_x см	i_{x_0} см	i_{y_0} см	W_x см^3
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
20×20	3	3,5	2	1,12	0,88	0,60	0,39	0,62	0,15	0,59	0,74	0,37	0,28
	4			1,45	1,14	0,64	0,48	0,77	0,19	0,58	0,73	0,36	0,35
	3			1,42	1,12	0,73	0,79	1,27	0,31	0,75	0,95	0,47	0,45
25×25	4	3,5	2	1,85	1,45	0,76	1,01	1,61	0,40	0,74	0,93	0,47	0,58
	5			2,26	1,77	0,80	1,18	1,87	0,50	0,72	0,91	0,47	0,69
	3			1,74	1,36	0,84	1,41	2,24	0,57	0,90	1,14	0,57	0,65
30×30	4	5	2,5	2,27	1,78	0,89	1,81	2,85	0,76	0,89	1,12	0,58	0,86
	5			2,78	2,18	0,92	2,16	3,41	0,91	0,88	1,11	0,57	1,04
	4			2,67	2,10	1,00	2,96	4,68	1,24	1,05	1,33	0,68	1,18
35×35	5	5	2,5	3,28	2,57	1,04	3,66	5,63	1,49	1,04	1,31	0,67	1,45
	6			3,87	3,04	1,08	4,14	6,50	1,77	1,04	1,30	0,68	1,71
	4			3,08	2,42	1,12	4,48	7,09	1,86	1,21	1,52	0,78	1,56
40×40	5	6	3	3,79	2,97	1,16	5,43	8,64	2,22	1,20	1,51	0,77	1,91
	6			4,48	3,52	1,20	6,33	9,98	2,67	1,19	1,49	0,77	2,26

Продолжение табл. 11.57

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
45×45	5	7	3,5	4,30	3,38	1,28	7,83	12,4	3,25	1,35	1,70	0,87	2,43
	7			5,86	4,60	1,36	10,4	16,7	4,39	1,33	1,67	0,87	3,31
	5			4,80	3,77	1,40	11,0	17,4	4,59	1,51	1,90	0,98	3,05
50×50	6	7	3,5	5,69	4,47	1,45	12,8	20,4	5,24	1,50	1,89	0,96	3,61
	7			6,56	5,15	1,49	14,6	23,1	6,02	1,49	1,88	0,96	4,15
	9			8,24	6,47	1,56	17,9	28,1	7,67	1,47	1,85	0,97	5,20
	6			6,31	4,95	1,56	17,3	27,4	7,24	1,66	2,08	1,07	4,40
55×55	8	8	4	8,23	6,46	1,64	22,1	34,8	9,35	1,64	2,06	1,07	5,72
	10			10,1	7,90	1,72	26,3	41,4	11,3	1,62	2,02	1,06	6,97
	6			6,91	5,42	1,69	22,8	36,1	9,43	1,82	2,29	1,17	5,29
60×60	8	8	4	9,03	7,09	1,77	29,1	46,1	12,1	1,80	2,26	1,16	6,88
	10			11,1	8,69	1,85	34,9	55,1	14,6	1,78	2,23	1,15	8,41
	7			8,70	6,83	1,85	33,4	53,0	13,8	1,96	2,47	1,26	7,18
65×65	9	9	4,5	11,00	8,62	1,93	41,3	65,4	17,2	1,94	2,44	1,25	9,04
	11			13,2	10,3	2,00	48,8	76,8	20,7	1,91	2,42	1,25	10,8
	7			9,40	7,38	1,97	42,4	67,1	17,6	2,12	2,67	1,31	8,43
70×70	9	9	4,5	11,9	9,34	2,05	52,6	83,1	22,0	2,10	2,64	1,36	10,6
	11			14,3	11,2	2,13	61,8	97,6	26,0	2,08	2,61	1,35	12,7
	7			10,1	7,94	2,09	52,4	83,6	21,1	2,28	2,88	1,45	9,67
75×75	8	10	5	11,5	9,03	2,13	58,9	93,3	24,4	2,26	2,85	1,46	11,0
	10			14,1	11,1	2,21	71,4	113	29,8	2,25	2,83	1,45	13,5
	12			16,7	13,1	2,29	82,4	130	34,7	2,22	2,79	1,44	15,8
	8			12,3	9,66	2,26	72,3	115	29,6	2,42	3,06	1,55	12,6
80×80	10	10	5	15,1	11,9	2,34	87,5	139	35,9	2,41	3,03	1,54	15,5
	12			17,9	14,1	2,41	102	161	43,0	2,39	3,00	1,53	18,2
	14			20,6	16,1	2,48	115	181	48,6	2,36	2,96	1,54	20,8
	9			15,5	12,2	2,54	116	184	47,8	1,74	3,45	1,76	18,0
90×90	11	11	5,5	18,7	14,7	2,62	138	218	57,1	2,72	3,41	1,75	21,6
	13			21,8	17,1	2,70	158	250	65,9	2,69	3,39	1,74	25,1
	16			26,4	20,7	2,81	186	294	79,1	2,66	3,34	1,73	30,1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
	10			19,2	15,1	2,82	177	280	73,3	3,04	3,82	1,95	24,7
100×100	12	12	6	22,7	17,8	2,90	207	328	86,2	3,02	3,80	1,95	29,2
	14			26,2	20,6	2,98	235	372	98,3	3,00	3,77	1,94	33,5
	16			29,6	23,2	3,06	262	413	111	2,97	3,74	1,93	37,6
	10			21,2	16,6	3,07	239	379	98,6	3,36	4,23	2,16	30,1
110×110	12	12	6	25,1	19,7	3,15	280	444	116	3,34	4,21	2,15	35,7
	14			29,0	22,8	3,21	319	505	133	3,32	4,18	2,14	41,0
	11			25,4	19,9	3,36	341	541	140	3,66	4,62	2,35	39,5
120×120	13	13	6,5	29,7	23,3	3,44	394	625	162	3,64	4,59	2,34	46,0
	15			33,9	26,6	3,51	446	705	186	3,63	4,56	2,34	52,5
	17			38,1	29,9	3,59	493	778	208	3,60	4,51	2,34	58,7
	12			30,0	23,6	3,64	472	750	194	3,97	5,00	2,54	50,4
130×130	14	14	7	34,7	27,2	3,72	540	857	223	3,94	4,97	2,53	58,2
	16			39,3	30,9	3,80	605	959	251	3,92	4,94	2,52	65,8
	13			35,0	27,5	3,92	638	1010	262	4,27	5,38	2,74	63,3
140×140	15	15	7,5	40,0	31,4	4,00	723	1150	298	4,25	5,36	2,73	72,3
	17			45,0	35,3	4,08	805	1280	334	4,23	5,33	2,72	81,2
	14			40,3	31,6	4,21	845	1340	347	4,58	5,77	2,94	78,2
150×150	16	16	8	45,7	35,9	4,29	949	1510	391	4,56	5,74	2,93	88,7
	18			51,0	40,1	4,36	1050	1670	438	4,54	5,70	2,93	99,3
	15			46,1	36,2	4,49	1100	1750	453	4,88	6,15	3,14	95,6
160×160	17	17	8,5	51,8	40,7	4,57	1230	1950	506	4,86	6,13	3,13	108
	19			57,5	45,1	4,65	1350	2140	558	4,84	6,10	3,12	118
	16			55,4	43,5	5,02	1680	2690	679	5,51	6,96	3,50	130
180×180	18	18	9	61,9	48,6	5,10	1870	2970	757	5,49	6,93	3,49	145
	20			68,4	53,7	5,18	2040	3260	830	5,47	6,90	3,49	160
	16			61,8	48,5	5,52	2340	3740	943	6,15	7,78	3,91	162
200×200	18	18	9	69,1	54,3	5,60	2600	4150	1050	6,13	7,75	3,90	181
	20			76,4	59,9	5,68	2850	4540	1160	6,15	7,72	3,89	199

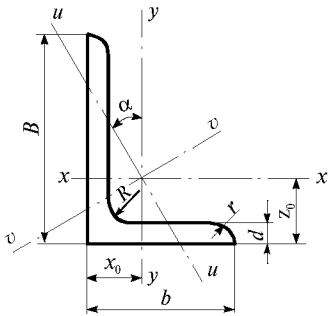


Таблица 11.58. Уголки неравнобокие. 1940 г. ČSN/DIN

B – ширина большой полки
b – ширина меньшей полки
d – толщина полки
z_0, x_0 – координаты центра тяжести
R – радиус внутреннего закругления
r – радиус закругления полок

Основные размеры в мм				Площадь сечения *F*, см^2	Вес 1 пог.м *P*, кг	tgα	Центр тяжести		Моменты инерции				Радиусы инерции				Моменты сопротивления	
b×*B*	*d*	*R*	*r*				z_0 см	x_0 см	J_x см^4	J_y см^4	J_v см^4	J_u см^4	i_x см	i_y см	i_v см	i_u см	W_x см^3	W_y см^3
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
20×30	3	3,5	2	1,42	1,11	0,431	0,99	0,50	1,25	0,44	1,43	0,25	0,94	0,56	1,00	0,42	0,62	0,29
	4			1,85	1,45	0,423	1,03	0,54	1,59	0,55	1,81	0,33	0,93	0,55	0,99	0,42	0,81	0,38
20×40	3	3,5	2	1,72	1,35	0,259	1,43	0,44	2,79	0,47	2,96	0,30	1,27	0,52	1,31	0,42	1,08	0,30
	4			2,25	1,77	0,252	1,47	0,48	3,59	0,60	3,79	0,39	1,26	0,52	1,30	0,42	1,42	0,39
30×45	4	4,5	2	2,87	2,25	0,436	1,48	0,74	5,78	2,05	6,65	1,18	1,42	0,85	1,52	0,64	1,91	0,91
	5			3,53	2,77	0,430	1,52	0,78	6,99	2,47	8,02	1,44	1,41	0,84	1,51	0,64	2,35	1,11
30×60	5	6	3	4,29	2,37	0,256	2,15	0,68	15,6	2,60	16,5	1,69	1,90	0,78	1,96	0,63	4,04	1,12
	7			5,85	4,59	0,248	2,24	0,76	20,7	3,41	21,8	2,28	1,88	0,76	1,93	0,62	5,50	1,52
	3			2,63	2,06	0,632	1,48	0,99	6,58	3,76	8,46	1,89	1,58	1,20	1,79	0,85	1,87	1,25
40×50	4	4	2	3,46	2,71	0,629	1,52	1,03	8,54	4,86	10,9	2,46	1,57	1,19	1,78	0,84	2,47	1,64
	5			4,27	3,35	0,625	1,56	1,07	10,4	5,89	13,3	3,02	1,56	1,18	1,76	0,84	3,02	2,01
	5			4,79	3,76	0,437	1,96	0,97	17,2	6,11	19,8	3,50	1,89	1,13	2,03	0,86	4,25	2,02
40×60	6	6	3	5,68	4,46	0,433	2,00	1,01	20,1	7,12	23,1	4,12	1,88	1,12	2,02	0,85	5,03	2,38
	7			6,55	5,14	0,429	2,04	1,05	23,0	8,07	26,3	4,73	1,87	1,11	2,00	0,85	5,79	2,74

Продолжение табл. 11.58

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
40×80	6	7	3,5	6,89	5,41	0,259	2,85	0,88	44,9	7,59	47,6	4,90	2,55	1,05	2,63	0,84	8,73	2,44
	7			9,09	7,07	0,253	2,94	0,95	57,6	9,68	60,9	6,41	2,53	1,04	2,60	0,84	11,4	3,18
	5			5,54	4,35	0,583	1,99	1,25	23,1	11,9	28,8	6,21	2,04	1,47	2,28	1,06	5,11	3,18
50×65	7	6,5	3,5	7,60	5,97	0,574	2,07	1,33	31,0	15,8	38,4	8,37	2,02	1,44	2,25	1,05	6,99	4,31
	9			9,58	7,52	0,567	2,15	1,41	38,2	19,4	47,0	10,5	2,00	1,42	2,22	1,05	8,77	5,39
	6			8,73	6,85	0,263	3,49	1,04	89,7	15,3	95,2	9,78	3,20	1,32	3,30	1,06	13,8	3,86
50×100	8	9	4,5	11,5	8,99	0,258	3,59	1,13	116	19,5	123	12,6	3,18	1,31	3,28	1,05	18,0	5,04
	10			14,1	11,1	0,252	3,67	1,20	141	23,4	149	15,5	3,16	1,29	3,25	1,04	22,2	6,17
	5			6,30	4,95	0,530	2,31	1,33	35,5	16,2	43,1	8,68	2,37	1,60	2,61	1,17	6,84	3,89
55×75	7	7	3,5	8,66	6,80	0,525	2,40	1,41	47,9	21,8	57,9	11,8	2,35	1,59	2,59	1,17	10,39	5,32
	9			10,9	8,59	0,518	2,47	1,48	59,4	26,8	71,3	14,8	2,33	1,57	2,55	1,16	11,8	6,66
	6			8,69	6,82	0,422	2,89	1,41	71,7	25,8	82,8	14,6	2,87	1,72	3,09	1,30	11,7	5,61
60×90	8	7	3,5	11,4	8,96	0,437	2,97	1,49	92,5	33,0	107	19,0	2,85	1,70	3,06	1,29	15,4	7,31
	10			14,1	11,0	0,431	3,05	1,56	112	39,6	129	23,1	2,82	1,68	3,02	1,28	18,8	8,92
	6			8,11	6,37	0,740	2,19	1,70	44,0	30,7	61,2	14,4	2,33	1,94	2,73	1,34	8,30	6,39
65×75	8	8	4	10,6	8,34	0,736	2,28	1,78	56,7	39,4	77,3	18,8	2,31	1,92	2,70	1,33	10,9	8,34
	10			13,1	10,3	0,732	2,35	1,86	98,4	47,3	92,7	23,0	2,29	1,90	2,66	1,33	13,3	10,2
	6			8,41	6,60	0,649	2,39	1,65	52,8	31,2	68,5	15,8	2,51	1,93	2,85	1,36	9,41	6,44
65×80	8	8	4	11,0	8,66	0,645	2,47	1,73	68,1	41,1	88,0	20,3	2,49	1,91	2,82	1,36	12,3	8,41
	10			13,6	10,7	0,640	2,55	1,81	82,2	48,3	106	24,8	2,46	1,89	2,79	1,35	15,1	10,3
	12			16,0	12,6	0,634	2,63	1,88	95,4	55,8	122	29,2	2,44	1,87	2,76	1,35	17,8	12,1
	7			11,2	8,77	0,419	3,23	1,51	113	37,6	128	21,6	3,17	1,84	3,39	1,39	16,6	7,54
65×100	9	10	5	14,2	11,1	0,415	3,32	1,59	141	46,7	160	27,2	3,15	1,82	3,36	1,39	21,0	9,52
	11			17,1	13,4	0,410	3,40	1,67	167	55,1	190	32,6	3,13	1,80	3,34	1,38	25,3	11,4
65×115	8	8	4	13,8	10,9	0,324	3,94	1,46	188	44,2	205	27,4	3,69	1,79	3,85	1,41	24,8	8,78
	10			17,1	13,4	0,321	4,02	1,54	229	53,3	249	33,2	3,66	1,77	3,82	1,40	30,6	10,8
	8			15,1	11,5	0,263	4,56	1,37	263	44,8	280	28,6	4,17	1,72	4,31	1,38	31,1	8,72
65×130	10	11	5,5	18,6	14,6	0,259	4,65	1,45	321	54,2	340	35,0	4,15	1,71	4,27	1,37	38,4	10,7
	12			22,1	17,3	0,255	4,74	1,53	376	63,0	397	41,2	4,12	1,69	4,24	1,37	45,5	12,7

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
	7			11,1	8,74	0,683	2,67	1,93	88,1	55,5	117	27,1	2,81	2,23	3,24	1,56	13,9	9,98
75×90	9	8,5	4,5	14,1	11,1	0,679	2,76	2,01	110	69,1	145	34,1	2,79	2,21	3,21	1,56	17,6	12,6
	11			17,0	13,4	0,675	2,83	2,09	130	81,7	171	40,9	2,77	2,19	3,17	1,55	21,1	18,5
	7			11,9	9,32	0,553	3,06	1,83	118	56,9	145	30,1	3,15	2,19	3,49	1,59	17,0	10,0
75×100	10	10	5	15,1	11,8	0,549	3,15	1,91	148	71,0	181	37,8	3,13	2,17	3,47	1,59	21,5	12,7
	12			18,2	14,3	0,545	3,23	1,99	176	84,0	214	45,4	3,11	2,15	3,44	1,58	25,9	15,3
	8			15,9	12,5	0,339	4,36	1,65	276	68,3	303	41,3	4,17	2,08	4,37	1,61	31,9	11,7
75×130	10	10,5	5,5	19,6	15,4	0,336	4,45	1,73	337	82,9	369	50,6	4,14	2,06	4,34	1,61	39,4	14,4
	12			23,3	18,3	0,332	4,53	1,81	395	96,5	432	59,6	4,12	2,04	4,31	1,60	46,6	17,0
	9			19,5	15,3	0,265	5,28	1,57	455	78,3	484	50,0	4,82	2,00	4,98	1,60	46,8	13,2
75×150	11	10,5	5,5	23,6	18,6	0,261	5,37	1,65	545	93,0	578	59,8	4,80	1,98	4,95	1,59	56,6	15,9
	13			27,7	21,7	0,258	5,45	1,73	631	107	668	69,4	4,78	1,96	4,91	1,58	66,1	18,5
	8			15,5	12,2	0,441	3,83	1,87	226	80,8	261	45,8	3,82	2,29	4,10	1,72	27,6	13,2
80×120	10	11	5,5	19,1	15,0	0,438	3,92	1,95	276	98,1	318	56,1	3,80	2,27	4,07	1,71	34,1	16,2
	12			22,7	17,8	0,433	4,00	2,03	323	114	371	66,1	3,77	2,25	4,04	1,71	40,4	19,1
	14			26,2	20,5	0,429	4,08	2,10	368	130	421	75,8	3,75	2,23	4,01	1,70	46,4	22,0
	10			23,2	18,2	0,263	5,63	1,69	611	104	648	67,0	5,14	2,12	5,29	1,70	58,9	16,5
80×160	12	13	6,5	27,5	21,6	0,258	5,72	1,77	720	122	763	78,9	5,11	2,10	5,26	1,60	70,0	19,6
	14			31,8	25,0	0,256	5,81	1,85	823	139	871	90,5	5,09	2,09	6,23	1,60	80,7	22,5
	10			21,2	16,6	0,472	4,15	2,18	358	141	420	78,5	4,11	2,58	4,46	1,93	40,5	20,6
90×130	12	12	6	25,1	19,7	0,468	4,24	2,26	420	165	492	92,6	4,09	2,56	4,43	1,92	48,0	24,4
	14			29,0	22,8	0,465	4,32	2,34	480	187	560	106	4,07	2,54	4,40	1,91	55,3	28,1
	10			24,2	19,0	0,442	4,80	2,34	552	198	637	112	4,78	2,86	5,13	2,15	54,1	25,8
100×150	12	13	6,5	28,7	22,6	0,430	4,89	2,42	650	232	749	132	4,76	2,84	5,10	2,15	64,2	30,6
	14			33,2	26,1	0,435	4,97	2,50	744	264	856	152	4,73	2,82	5,07	2,14	74,1	35,2
	10			29,2	23,0	0,266	6,93	2,01	1220	210	1300	133	6,46	2,68	6,66	2,14	93,2	26,3
100×200	12	15	7,5	34,8	27,3	0,264	7,03	2,10	1440	247	1530	158	6,43	2,67	6,63	2,13	111	31,3
	14			40,3	31,6	0,262	7,12	2,18	1650	282	1760	181	6,41	2,65	6,60	2,12	128	36,1
	16			45,7	35,9	0,259	7,20	2,26	1860	316	1970	204	6,38	2,63	6,57	2,11	145	40,8

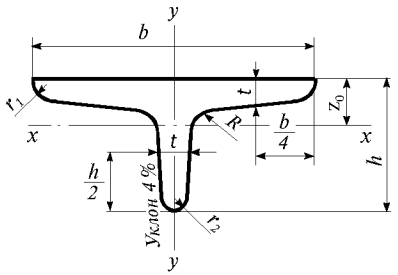


Таблица 11.59. Тавры. 1940 г. ČSN/DIN

T	Основные размеры в мм						Площадь сечения F, см^2	Вес 1 пог.м P, кг	z_0 см	Моменты инерции		Радиусы инерции		Моменты сопротивления	
	b	h	t	R	r_1	r_2				J_x см^4	J_y см^4	i_x см	i_y см	W_x см^3	W_y см^3
6×3	60	30	5,5	5,5	3	1,5	4,64	3,64	0,67	2,58	8,62	0,75	1,36	1,11	2,87
7×3,5	70	35	6	6	3	1,5	5,94	4,66	0,77	4,49	15,1	0,87	1,59	1,65	4,31
8×4	80	40	7	7	3,5	2	7,91	6,21	0,88	7,81	28,5	0,99	1,90	2,50	7,13
9×4,5	90	45	8	8	4	2	10,2	8,01	1,00	12,7	46,1	1,11	2,12	3,63	10,2
10×5	100	50	8,5	8,5	4,5	2	12,0	9,42	1,09	18,7	67,7	1,25	2,37	4,78	13,5
12×6	120	60	10	10	5	2,5	17,0	13,4	1,30	38,0	137	1,49	2,84	8,09	22,8
14×7	140	70	11,5	11,5	6	3	22,8	17,9	1,51	68,9	258	1,74	3,36	12,6	36,9
16×8	160	80	13	13	6,5	3,5	29,5	23,2	1,72	117	422	1,99	3,78	18,6	52,8
18×9	180	90	14,5	14,5	7,5	3,5	37,0	29,1	1,93	185	670	2,24	4,25	26,2	74,4
20×10	200	100	16	16	8	4	45,4	35,6	2,14	277	1000	2,47	4,69	35,2	100
TW															
$\frac{100 \times 90}{10}$	100	90	10	10	5	2,5	17,9	14,0	2,25	111	79,7	2,49	2,11	16,4	15,9
$\frac{120 \times 80}{10}$	120	80	10	10	5	2,5	18,9	14,8	1,80	84,4	138	2,11	2,70	13,6	23,0

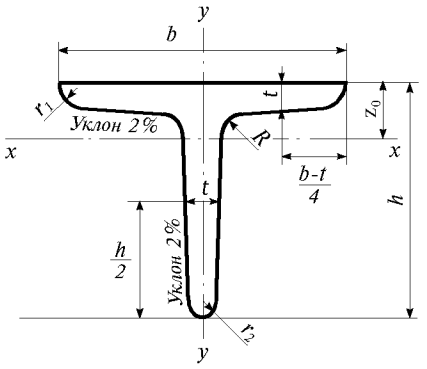


Таблица 11.60. Тавры. 1940 г. ČSN/DIN

h – высота тавра
b – ширина полки
t – ср. толщина полки
R – радиус внутреннего закругления
r_1, r_2 – радиусы закругления полок

Т	Основные размеры в мм					Площадь сечения F, см^2	Вес 1 пог.м P, кг	z_0 см	Момент инерции		Радиус инерции		Момент сопротивления	
	$h = b$	t	R	r_1	r_2				J_x см^4	J_y см^4	i_x см	i_y см	W_x см^3	W_y см^3
2	20	3	3	1,5	1	1,12	0,88	0,58	0,38	0,20	0,58	0,42	0,27	0,20
2,5	25	3,5	3,5	2	1	1,64	1,29	0,73	0,87	0,43	0,73	0,51	0,49	0,34
3	30	4	4	2	1	2,26	1,77	0,85	1,72	0,87	0,87	0,62	0,80	0,68
3,5	35	4,5	4,5	2,5	1	2,97	2,33	0,99	3,10	1,57	1,04	0,73	1,23	0,90
4	40	5	5	2,5	1	3,77	2,96	1,12	5,28	2,58	1,18	0,83	1,84	1,29
4,5	45	5,5	5,5	3	1,5	4,67	3,67	1,26	8,13	4,01	1,32	0,93	2,51	1,78
5	50	6	6	3	1,5	5,66	4,44	1,39	12,1	6,06	1,46	1,03	3,36	2,42
6	60	7	7	3,5	2	7,94	6,23	1,66	23,8	12,2	1,73	1,24	5,48	4,07
7	70	8	8	4	2	10,6	8,32	1,94	44,5	22,1	2,05	1,44	8,79	6,32
8	80	9	9	4,5	2	13,6	10,7	2,22	73,7	37,0	2,33	1,65	12,8	9,25
9	90	10	10	5	2,5	17,1	13,4	2,48	119	58,5	2,64	1,85	18,2	13,0
10	100	11	11	5,5	3	20,9	16,4	2,74	179	88,3	2,92	2,05	24,6	17,7
12	120	13	13	6,5	3	29,6	23,2	3,28	366	178	3,51	2,45	42,0	29,7
14	140	15	15	7,5	4	39,9	31,3	3,80	660	330	4,07	2,88	64,7	47,2

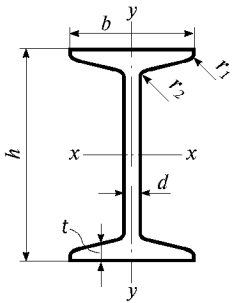


Таблица 11.61. Балки двутавровые. 1935 г. JES

Основные размеры в мм					Площадь сечения F, см^2	Вес 1 пог.м P, кг	Центр тяжести		Моменты инерции		Радиусы инерции		Моменты сопротивления	
$h\times b$	d	t	r_1	r_2			z_0 см	x_0 см	J_x см^4	J_y см^4	i_x см	i_y см	W_x см^3	W_y см^3
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
75×75	5	8	7	3,5	15,18	11,91	0	0	145,8	48,29	3,10	1,78	38,88	12,88
100×75	5	8	7	3,5	16,43	12,89	0	0	232,7	48,32	4,15	1,72	56,54	12,88
125×75	5,5	9,5	9	4,5	20,45	16,05	0	0	539,8	59,03	5,14	1,70	86,36	15,74
150×75	5,5	9,5	9	4,5	21,83	17,13	0	0	820,1	59,07	6,13	1,65	109,3	15,75
150×125	8,5	14	13	6,5	46,15	36,22	0	0	1779	394,5	6,21	2,92	237,2	63,11
180×100	6	10	10	5	30,06	23,59	0	0	1674	141,2	7,46	2,17	186,0	28,24
200×100	7	10	10	5	33,06	25,95	0	0	2175	142,0	8,11	2,07	217,5	28,40
200×150	9	16	15	7,5	64,16	50,36	0	0	4492	770,5	8,37	3,47	449,2	102,7
230×100	7,5	11,5	11	5,5	39,08	30,68	0	0	3347	167,5	9,25	2,07	291,0	33,50
250×125	7,5	12,5	12	6	48,79	38,29	0	0	5186	344,8	10,31	2,66	414,9	55,16
250×125	10	19	21	10,5	70,73	55,52	0	0	7338	560,1	10,19	2,81	587,0	89,62
300×150	8	13	12	6	61,58	48,34	0	0	9499	600,0	12,42	3,12	633,2	79,99
300×150	11,5	22	23	11,5	97,88	76,83	0	0	14719	1115	12,26	3,38	981,3	148,7
350×150	9	15	13	6,5	74,58	58,54	0	0	15236	715,2	14,29	3,10	870,6	95,36
350×150	12	24	25	12,5	111,12	87,23	0	0	22455	1230	14,22	3,33	1283	164,0
400×150	10	18	17	8,5	91,73	72,01	0	0	23974	887,0	16,17	3,11	1199	118,3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
400×150	12,5	25	27	13,5	122,11	95,85	0	0	31689	1288	16,11	3,25	1584	171,8
450×175	11	20	19	9,5	116,76	91,66	0	0	39210	1551	18,33	3,64	1743	177,2
450×175	13	26	27	13,5	146,10	114,68	0	0	48814	2096	18,28	3,79	2169	239,5
500×190	11,5	23	22	11	141,84	111,34	0	0	59568	2300	20,49	4,03	2383	242,1
500×190	15	30	32	16	184,72	145,00	0	0	75482	3120	20,21	4,11	3032	328,4
600×190	13	25	25	12,5	169,38	132,96	0	0	98172	2538	24,07	3,87	3272	267,2
600×190	16	35	38	19	224,46	176,19	0	0	129767	3701	24,04	4,06	4326	389,6

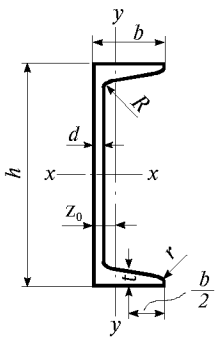


Таблица 11.62. Швеллеры. 1935 г. JES

Основные размеры в мм							Площадь сечения F, см^2	Вес 1 пог.м P, кг	Центр тяжести z_0 см	Моменты инерции		Радиусы инерции		Моменты сопротивления	
$h \times b$	h	b	d	t	R	r				J_x см^4	J_y см^4	i_x см	i_y см	W_x см^3	W_y см^3
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
75×40	75	40	5	7	8	4	8,82	6,92	1,27	75,86	12,40	2,93	1,19	20,23	4,54
100×50	100	50	5	7,5	8	4	11,92	9,35	1,55	188,9	26,87	3,98	1,50	37,79	7,82
125×65	125	65	6	8	8	4	17,11	13,42	1,94	425,2	65,45	4,99	1,96	68,04	14,36

Продолжение табл. 11.62

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
150×70	150	70	6	8,5	9	4,5	20,09	15,77	2,04	721,3	89,10	5,99	2,11	96,17	17,97
150×75	150	75	6,5	10	10	5	23,71	18,61	2,31	864,3	122,3	6,04	2,27	115,2	23,58
180×75	180	75	7	10,5	11	5,5	27,20	21,34	2,15	1383	136,5	7,13	2,24	153,7	25,53
180×90	180	90	7,5	12,5	13	6,5	34,57	27,13	2,85	1836	158,2	7,29	2,73	204,0	41,96
200×70	200	70	7	10	11	5,5	26,92	21,12	1,85	1624	112,5	7,77	2,04	162,4	21,83
200×80	200	80	7,5	11	12	6	31,33	24,59	2,24	1949	177,1	7,89	2,38	194,9	30,75
200×90	200	90	8	13,5	14	7	38,65	30,34	2,77	2493	285,6	8,03	2,72	249,3	45,85
230×80	230	80	8	12	13	6,5	36,12	28,35	2,15	2902	200,2	8,96	2,35	252,3	34,22
230×90	230	90	8,5	13,5	15	7,5	42,14	33,08	2,58	3491	303,3	9,10	2,68	303,6	47,26
250×80	250	80	8	12,5	14	7	38,51	30,23	2,11	3631	210,0	9,71	2,34	290,5	35,66
250×90	250	90	9	13	14	7	44,07	34,59	2,42	4181	306,0	9,74	2,64	334,5	46,47
250×90	250	90	11	14,5	17	8,5	51,17	40,16	2,39	4685	341,7	9,57	2,58	374,8	51,68
280×100	280	100	9	13	14	7	49,37	38,75	2,64	5928	428,2	10,96	2,95	423,4	58,19
280×100	280	100	11,5	16	18	9	61,37	48,17	2,68	7146	515,0	10,79	2,90	510,4	70,36
300×90	300	90	9	13	14	7	48,57	38,13	2,23	6435	324,7	11,51	2,59	429,0	47,95
300×90	300	90	10	15,5	19	9,5	55,75	43,76	2,33	7403	373,2	11,52	2,59	493,5	55,99
300×100	300	100	10	16	17	8,5	59,56	46,75	2,71	8167	514,2	11,71	2,94	544,5	70,56
300×100	300	100	12	18	21	10,5	68,83	54,03	2,71	9166	574,2	11,54	2,89	611,0	78,71
380×100	380	100	10,5	16	18	9	69,39	54,46	2,41	14481	556,9	14,45	2,83	762,2	73,32
380×100	380	100	13	20	24	12	85,71	67,28	2,50	17564	671,2	14,32	2,80	924,2	89,49

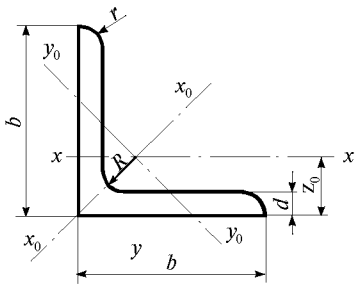


Таблица 11.63. Уголки равнобокие. 1935 г. JES

Основные размеры в мм				Площадь сечения F, см^2	Вес 1 пог.м P, кг	Центр тяжести z_0 см	Моменты инерции			Радиусы инерции			Моменты сопротивления	
b	d	R	r				J_x см^4	J_{x_0} см^4	J_{y_0} см^4	i_x см	i_{x_0} см	i_{y_0} см	W_x см^3	W_{y_0} см^3
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
20	3	4	2,8	1,11	0,87	0,58	0,36	0,62	0,10	0,57	0,75	0,29	0,25	
25	3	4	2,8	1,41	1,10	0,71	0,75	1,27	0,23	0,73	0,95	0,41	0,42	
	5	4	2,8	2,25	1,76	0,78	1,19	1,87	0,52	0,73	0,91	0,48	0,69	
30	3	4	2,8	1,71	1,34	0,84	1,36	2,26	0,45	0,89	1,15	0,52	0,63	
	5	4	2,8	2,75	2,15	0,91	2,17	3,40	0,93	0,89	1,11	0,58	1,03	
35	3	4,5	3,2	2,01	1,57	0,96	2,17	3,66	0,68	1,04	1,35	0,58	0,85	
	5	4,5	3,2	3,25	2,55	1,03	3,52	5,59	1,45	1,04	1,31	0,67	1,43	
40	3	4,5	3,2	2,31	1,81	1,08	3,33	5,56	1,10	1,20	1,55	0,69	1,14	
	5	4,5	3,2	3,75	2,94	1,16	5,41	8,58	2,24	1,20	1,51	0,77	1,90	
	4	6,5	4,5	3,44	2,70	1,23	6,97	10,33	1,61	1,32	1,73	0,69	1,83	
45	6	6,5	4,5	5,04	3,95	1,31	8,89	14,48	3,30	1,33	1,69	0,81	2,78	
	8	6,5	4,5	6,56	5,14	1,38	11,48	18,03	4,93	1,32	1,66	0,87	3,68	
	4	6,5	4,5	3,84	3,01	1,36	8,41	14,36	2,45	1,48	1,93	0,80	2,31	
50	6	6,5	4,5	5,64	4,42	1,43	12,50	20,27	4,73	1,49	1,90	0,92	3,50	
	8	6,5	4,5	7,36	5,77	1,50	16,17	25,42	6,92	1,48	1,86	0,97	4,62	

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
	5	6,5	4,5	5,75	4,51	1,65	18,83	30,86	6,80	1,81	2,32	1,09	4,32	
60	7	6,5	4,5	7,91	6,20	1,72	25,83	41,06	10,60	1,81	2,28	1,16	6,03	
	9	6,5	4,5	9,99	7,84	1,79	32,23	50,18	14,28	1,80	2,24	1,20	7,65	
	6	8,5	6	7,44	5,84	1,80	27,70	46,44	8,97	1,93	2,50	1,10	5,89	
65	8	8,5	6	9,76	7,66	1,87	36,50	59,09	13,92	1,94	2,46	1,19	7,89	
	10	8,5	6	12,00	9,42	1,94	44,61	70,47	18,76	1,93	2,42	1,25	9,78	
	6	8,5	6	8,04	6,31	1,92	35,15	58,59	11,72	2,09	2,70	1,21	6,92	
70	8	8,5	6	10,56	8,28	1,99	46,31	74,79	17,84	2,09	2,66	1,30	9,25	
	10	8,5	6	13,00	10,20	2,06	56,68	89,51	23,86	2,09	2,62	1,35	11,49	
	6	8,5	6	8,64	6,78	2,05	43,83	72,69	14,98	2,25	2,90	1,32	8,04	
75	9	8,5	6	12,69	9,96	2,15	64,40	102,6	26,20	2,25	2,84	1,44	12,05	
	12	8,5	6	16,56	12,99	2,26	82,85	128,7	36,99	2,24	2,79	1,49	15,81	
	6	8,5	6	9,24	7,25	2,17	53,83	88,88	18,77	2,41	3,10	1,43	9,23	
80	9	8,5	6	13,59	10,66	2,28	79,14	125,9	32,34	2,41	3,04	1,54	13,84	
	12	8,5	6	17,76	13,94	2,39	102,0	158,6	45,38	2,40	2,99	1,60	18,17	
	7	10	7	12,11	9,50	2,45	88,70	147,0	30,37	2,71	3,48	1,58	13,54	
90	10	10	7	17,00	13,34	2,56	124,7	199,7	49,81	2,71	3,43	1,71	19,36	
	13	10	7	21,71	17,04	2,66	157,7	246,7	68,60	2,69	3,37	1,78	24,89	
	7	10	7	13,51	10,60	2,70	124,0	204,1	41,84	3,03	3,89	1,80	16,97	
100	10	10	7	19,00	14,91	2,81	174,5	278,6	70,40	3,03	3,83	1,92	24,26	
	13	10	7	24,31	19,08	2,92	221,0	346,0	95,98	3,01	3,77	1,99	31,19	
	9	12	8,5	22,59	17,73	3,51	354,8	577,1	132,4	3,96	5,05	2,42	37,39	
130	12	12	8,5	29,76	23,36	3,62	466,3	743,0	189,5	3,96	5,00	2,52	49,71	
	15	12	8,5	36,75	28,84	3,73	571,2	896,7	245,7	3,94	4,94	2,59	61,61	
	11	14	10	31,79	24,95	4,07	663,3	1077	249,7	4,57	5,82	2,80	60,70	
150	15	14	10	42,75	33,55	4,22	889,0	1410	368,0	4,56	5,74	2,93	82,45	
	19	14	10	53,39	41,91	4,36	1098	1715	481,8	4,54	5,67	3,00	103,3	
	15	17	12	57,75	45,33	5,45	2165	3472	857,5	6,12	7,75	3,85	148,8	
200	20	17	12	76,00	59,66	5,63	2830	4457	1202	6,10	7,66	3,98	197,0	
	25	17	12	93,75	73,59	5,81	3449	5363	1536	6,07	7,56	4,05	243,2	

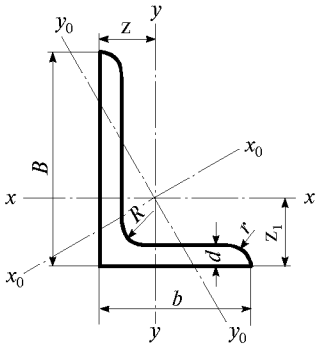


Таблица 11.64. Уголки неравнобокие. 1935 г. JES

Основные размеры в мм					Площадь сечения F, см^2	Вес 1 пог.м P, кг	Центр тяжести		Моменты инерции				Радиусы инерции				Моменты сопротивления	
B	b	d	R	r			z_1 см	z см	J_x см^4	J_y см^4	J_{x_0} см^4	J_{y_0} см^4	i_x см	i_y см	i_{x_0} см	i_{y_0} см	W_x см^3	W_y см^3
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
40	20	3	5	3,5	1,71	1,34	1,42	0,43	2,54	0,42	2,78	0,13	1,22	0,50	1,27	0,27	0,98	0,27
40	20	5	5	3,5	2,75	2,15	1,49	0,50	4,16	0,68	4,36	0,41	1,23	0,50	1,26	0,39	1,66	0,46
50	35	4	6,5	4,5	3,24	2,54	1,58	0,84	7,47	2,96	9,34	1,00	1,52	0,96	1,70	0,55	2,19	1,11
		6	6,5	4,5	4,74	3,72	1,65	0,92	11,09	4,39	13,22	2,21	1,53	0,96	1,67	0,68	3,31	1,70
60	50	5	6,5	4,5	5,25	4,12	1,78	1,30	17,83	11,20	24,21	4,80	1,84	1,46	2,15	0,96	4,23	3,02
		7	6,5	4,5	7,21	5,65	1,85	1,37	24,42	15,23	32,17	7,58	1,84	1,45	2,11	1,03	5,89	4,19
		5	6,5	4,5	5,50	4,31	1,98	1,25	22,35	11,48	28,48	5,30	2,02	1,44	2,28	0,98	4,95	3,06
65	50	7	6,5	4,5	7,56	5,93	2,06	1,32	30,64	15,61	38,02	8,29	2,01	1,44	2,24	1,05	6,90	4,24
		9	6,5	4,5	9,54	7,48	2,13	1,39	38,22	19,35	46,57	11,19	2,00	1,42	2,21	1,08	8,74	5,36
		6	8,5	6	7,44	5,84	2,06	1,57	33,66	22,66	47,52	8,69	2,13	1,75	2,53	1,08	6,81	5,12
70	60	8	8,5	6	9,76	7,66	2,13	1,64	44,28	29,66	60,60	13,45	2,13	1,74	2,49	1,17	9,09	6,81
		10	8,5	6	12,00	9,42	2,20	1,72	54,08	36,06	72,41	18,10	2,12	1,73	2,46	1,23	11,26	8,42

Продолжение табл. 11.64

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
		6	8,5	6	7,14	5,60	2,42	1,19	38,29	13,57	45,49	6,02	2,32	1,38	2,52	0,92	7,54	3,56
75	50	8	8,5	6	9,36	7,34	2,50	1,26	50,41	17,73	58,40	9,47	2,32	1,38	2,50	1,01	10,08	4,75
		10	8,5	6	11,50	9,02	2,57	1,34	61,62	21,51	70,15	12,82	2,31	1,37	2,47	1,05	12,49	5,87
		6	8,5	6	8,04	6,31	2,18	1,70	42,12	29,22	59,82	11,43	2,29	1,91	2,73	1,19	7,92	6,08
75	65	8	8,5	6	10,56	8,28	2,25	1,77	55,43	38,26	76,51	17,38	2,29	1,90	2,69	1,28	10,56	8,09
		10	8,5	6	13,00	10,20	2,32	1,84	67,78	46,60	91,70	23,17	2,28	1,89	2,66	1,34	13,09	10,00
		6	8,5	6	8,04	6,31	2,46	1,47	49,13	23,64	62,17	10,33	2,47	1,71	2,78	1,13	8,86	5,22
80	60	8	8,5	6	10,56	8,28	2,53	1,55	64,70	30,93	79,84	15,72	2,48	1,71	2,75	1,22	11,83	6,95
		10	8,5	6	13,00	10,20	2,60	1,62	79,17	37,62	96,00	20,95	2,47	1,70	2,72	1,27	14,77	8,59
		6	8,5	6	8,64	6,78	2,30	1,82	51,89	36,92	74,09	14,67	2,45	2,07	2,93	1,30	9,11	7,13
80	70	9	8,5	6	12,69	9,96	2,41	1,93	76,10	53,81	104,8	25,57	2,45	2,06	2,87	1,42	13,62	10,61
		12	8,5	6	16,56	12,99	2,52	2,04	97,89	68,86	131,7	36,04	2,43	2,04	2,82	1,48	17,86	13,88
		6	8,5	6	8,64	6,78	2,87	1,39	68,39	24,49	80,64	11,71	2,81	1,68	3,06	1,16	11,16	5,31
90	60	9	8,5	6	12,69	9,96	2,98	1,50	100,5	35,73	115,3	20,44	2,81	1,67	3,01	1,27	16,71	7,91
		12	8,5	6	16,56	12,99	3,09	1,61	129,6	45,39	146,1	28,79	2,80	1,66	2,97	1,32	21,93	10,34
		6	8,5	6	9,54	7,48	2,63	1,89	74,05	46,72	100,7	20,02	2,79	2,21	3,25	1,45	11,62	8,33
90	75	9	8,5	6	14,04	11,02	2,74	2,00	108,8	68,16	143,5	34,04	2,78	2,20	3,20	1,56	17,32	12,40
		12	8,5	6	18,36	14,41	2,84	2,11	140,4	87,43	181,4	47,57	2,77	2,18	3,14	1,61	22,80	16,22
		7	10	7	11,41	8,95	2,58	2,10	85,99	63,63	125,0	24,47	2,75	2,36	3,31	1,46	13,40	10,79
90	80	10	10	7	16,00	12,56	2,69	2,21	120,6	88,79	169,5	40,54	2,75	2,36	3,26	1,59	19,12	15,33
		13	10	7	20,41	16,02	2,80	2,32	152,2	111,5	209,1	56,10	2,73	2,34	3,20	1,66	24,54	19,63
		7	10	7	11,76	9,23	3,06	1,83	113,1	54,58	142,9	24,27	3,10	2,15	3,49	1,44	16,30	9,62
100	75	10	10	7	16,50	12,95	3,17	1,94	159,0	76,07	195,1	39,94	3,10	2,15	3,44	1,56	23,27	13,68
		13	10	7	21,06	16,53	3,28	2,05	201,0	95,47	242,0	55,04	3,09	2,13	3,39	1,62	29,88	17,50
		7	10	7	12,11	9,50	2,98	2,00	115,8	65,79	153,0	28,25	3,09	2,33	3,55	1,53	16,49	10,96
100	80	10	10	7	17,00	13,34	3,09	2,11	162,7	91,79	208,7	46,17	3,09	2,32	3,50	1,65	23,53	15,58
		13	10	7	21,71	17,04	3,19	2,21	205,7	115,3	258,7	63,45	3,08	2,31	3,45	1,71	30,22	19,94

Продолжение табл.11.64

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
		7	10	7	12,81	10,05	2,83	2,35	120,6	92,26	176,5	36,39	3,07	2,68	3,71	1,69	16,82	13,88
100	90	10	10	7	18,00	14,13	2,94	2,46	169,4	129,0	240,3	59,25	3,07	2,68	3,65	1,81	24,00	19,72
		13	10	7	23,01	18,06	3,05	2,57	214,3	162,5	298,4	80,49	3,05	2,66	3,60	1,87	30,82	25,26
		7	10	7	13,51	10,60	4,11	1,63	211,0	58,21	237,0	30,14	3,95	2,08	4,19	1,49	25,15	9,92
125	75	10	10	7	19,00	14,91	4,22	1,74	297,2	81,12	327,9	48,38	3,96	2,07	4,15	1,60	35,91	14,09
		13	10	7	24,31	19,08	4,33	1,85	377,2	101,9	411,3	65,77	3,94	2,05	4,11	1,64	46,19	18,04
		7	10	7	14,56	11,42	3,84	2,11	225,3	98,79	275,2	47,96	3,93	2,60	4,35	1,81	26,00	14,33
125	90	10	10	7	20,50	16,09	3,95	2,22	317,3	138,1	379,4	75,78	3,93	2,60	4,30	1,92	37,09	20,35
		13	10	7	26,26	20,61	4,06	2,33	402,8	173,9	475,1	102,3	3,92	2,57	4,25	1,97	47,71	26,06
		9	12	8,5	20,79	16,32	4,96	1,98	468,2	129,0	524,0	68,96	4,75	2,49	5,02	1,82	46,61	18,37
150	90	12	12	8,5	27,36	21,47	5,07	2,09	616,3	168,2	679,6	100,7	4,75	2,48	4,98	1,92	62,05	24,35
		15	12	8,5	33,75	26,49	5,18	2,20	755,4	204,4	825,1	130,5	4,73	2,46	4,94	1,97	76,91	30,06
		9	12	8,5	21,69	17,02	4,77	2,29	486,4	175,3	568,4	90,52	4,74	2,84	5,12	2,04	47,53	22,73
150	100	12	12	8,5	28,56	22,41	4,88	2,40	640,2	228,9	736,3	130,7	4,73	2,83	5,08	2,14	63,24	30,13
		15	12	8,5	35,25	27,67	4,99	2,51	784,9	278,6	892,7	169,5	4,72	2,81	5,03	2,19	78,39	37,20
		9	12	8,5	23,04	18,08	6,05	1,83	717,4	134,3	765,9	77,10	5,58	2,41	5,77	1,83	62,67	18,71
175	90	12	12	8,5	30,36	23,83	6,17	1,94	945,7	175,1	999,5	111,1	5,58	2,40	5,74	1,91	83,43	24,80
		15	12	8,5	37,50	29,43	6,28	2,05	1162	212,9	1219	143,7	5,57	2,38	5,70	1,96	103,5	30,65

ОГЛАВЛЕНИЕ

Раздел I. Сооружения

Глава 1. Антенные сооружения (доктора техн.наук *А.Г.Соколов*, *В.С.Поляк*, канд.техн.наук *Б.В.Остроумов*) ... 3
1.1. Общие сведения. Нагрузки и воздействия ... 3
1.1.1. Современные виды антенных устройств и их классификация ... 3
1.1.2. Требования, предъявляемые к металлическим конструкциям антенных устройств ... 3
1.1.3. Общие указания по нагрузкам и воздействиям ... 5
1.1.4. Масса конструкций ... 6
1.1.5. Воздействие ветра ... 9
1.1.6. Обледенение ... 17
1.1.7. Температура ... 17
1.1.8. Особые воздействия ... 18
1.2. Конструктивные решения и методы расчета башен ... 18
1.2.1. Схемы башен ... 18
1.2.2. Виды решеток и размещение диафрагм ... 18
1.2.3. Особенности расчета решетчатых башен ... 22
1.3. Конструктивные решения и методы расчета мачт ... 25
1.3.1. Общие сведения ... 25
1.3.2. Основные положения расчета нитей ... 27
1.3.3. Схемы мачт ... 30
1.3.4. Основные положения расчета ... 34
1.3.5. Расчет мачт с помощью ПЭВМ ... 41
1.3.6. Конструктивные решения мачт ... 42
1.3.7. Влияние погрешностей изготовления и монтажа ... 47
1.4. Конструктивные решения и методы расчета систем ... 50
1.4.1. Общие положения ... 50
1.4.2. Примеры конструктивных решений ... 50
1.4.3. Особенности расчета систем ... 54
1.5. Перебазируемые антенные устройства ... 54
1.6. Зеркальные антенны ... 61
1.6.1. Состав зеркальной антенны ... 61
1.6.2. Проблема прецизионности ... 62
1.6.3. Конструктивные нарушения нормальной эксплуатации зеркальных антенн и причины их вызывающие ... 63
1.6.4. Основные положения формообразования конструкций зеркальных антенн как прецизионных сооружений ... 68
1.6.5. Зеркальные системы, сохраняющие форму под нагрузкой ... 72
1.6.6. Конструкции опорно-поворотных устройств, обеспечивающие угловую стабилизацию радиолуча под нагрузкой ... 84
1.6.7. Расчет конструкций зеркальных антенн ... 91
1.7. Динамические гасители колебаний ... 107
Список литературы ... 109

Глава 2. Транспортерные галереи (кандидаты техн.наук *А.Е.Любин*, *О.Н.Суслов*) ... 110
2.1. Общие положения ... 110
2.2. Основные компоновочные схемы и типы конструктивных решений ... 111
2.3. Расчет строительных металлоконструкций галерей ... 114
2.3.1. Общие положения расчета ... 114
2.3.2. Расчет пролетных строений с несущими конструкциями из ферм ... 114

2.3.3. Расчет пролетных строений с несущими конструкциями из сварных двутавровых балок ... 115
2.3.4. Расчет пролетных строений с несущими конструкциями из ребристых оболочек прямоугольного сечения ... 118
2.3.5. Расчет пролетных строений с несущими конструкциями из круглых цилиндрических оболочек ... 123
2.4. Конструктивные решения галерей ... 125
2.4.1. Пролетные строения с несущими конструкциями из ферм ... 126
2.4.2. Пролетные строения с несущими конструкциями из сварных двутавровых балок ... 130
2.4.3. Пролетные строения с несущими конструкциями из оболочек прямоугольного сечения ... 131
2.4.4. Пролетные строения с несущими конструкциями из круглых цилиндрических оболочек ... 132
2.5. Опоры галерей ... 137
Список литературы ... 141

Глава 3. Градирни (кандидаты техн.наук *В.М.Фридкин*, *М.Б.Джуринский*, инженер *М.О.Метс*) ... 142
3.1. Общие сведения ... 142
3.2. Новые технические решения оболочек башенных градирен ... 150
3.3. Принципы проектирования и расчета оболочек башенных градирен ... 154
Список литературы ... 156

Глава 4. Открытые крановые эстакады (инженеры *М.Б.Солодарь*, *И.А.Могилевский*, канд.техн.наук *Э.С.Александровская*) ... 157
4.1. Общие сведения ... 157
4.2. Схемы эстакад ... 158
4.3. Основные конструктивные решения ... 162
4.3.1. Узлы опирания сплошностенчатых подкрановых балок на колонны обычной крановой эстакады ... 163
4.3.2. Узлы опирания сплошностенчатых подкрановых балок на колонны надводной части крановой эстакады ... 167
4.3.3. Узлы крепления подвесок и оттяжек ... 170
4.3.4. Узлы решетчатых подкрановых конструкций надводных крановых эстакад ... 175
4.4. Особенности расчета открытых крановых эстакад ... 178
Список литературы ... 180

Глава 5. Надшахтные копры (инж. *Л.Л.Лебединский*) ... 181
5.1. Общие сведения и классификация ... 181
5.2. Нагрузки и воздействия ... 184
5.3. Конструирование и расчет ... 186
5.3.1. Станковые копры ... 186
5.3.2. Башенные копры ... 189
5.3.3. Вспомогательные элементы копров ... 190
Список литературы ... 191

Раздел II. Строительные конструкции из алюминиевых сплавов

Глава 6. Области рационального применения; материалы и соединения (кандидаты техн.наук *С.С.Кармилов*, *В.Н.Спиров*) ... 192
6.1. Области рационального применения ... 192
6.2. Характеристика материалов ... 193
6.3. Виды полуфабрикатов ... 202
6.4. Соединения ... 209
Приложения:
6.1. Перечень стандартов на алюминиевые сплавы, применяемые для строительных конструкций ... 215
6.2. Перечень стандартов прессованных профилей из легких сплавов, наиболее употребляемых в строительных конструкциях ... 215

Глава 7. Расчет и проектирование конструкций из алюминиевых сплавов (кандидаты техн.наук *С.С.Кармилов, В.Н.Спиров*) ... 217
7.1. Расчетные характеристики материалов и соединений ... 217
7.2. Расчет на осевые силы и изгиб ... 223
7.2.1. Центрально-растянутые и центрально-сжатые элементы ... 223
7.2.2. Изгибаемые элементы ... 226
7.2.3. Элементы, подверженные действию осевой силы с изгибом ... 227
7.3. Расчетная длина и предельная гибкость элементов алюминиевых конструкций ... 235
7.4. Устойчивость сжатых поясов балок, свесов, полок ... 236
7.5. Расчет элементов конструкций с применением тонколистового алюминия ... 239
7.6. Расчет соединений конструкций из алюминиевых сплавов ... 243
7.6.1. Сварные соединения ... 243
7.6.2. Заклепочные и болтовые соединения ... 244
7.6.3. Монтажные соединения на высокопрочных стальных болтах ... 245
7.6.4. Соединения с фрезерованными торцами ... 246
7.6.5. Поясные соединения в составных балках ... 246
7.6.6. Анкерные болты ... 246
7.7. Проектирование алюминиевых конструкций ... 247
7.7.1. Общие рекомендации ... 247
7.7.2. Конструктивные требования к соединениям ... 249
7.7.3. Конструктивные и эксплуатационные требования к ограждающим конструкциям из алюминиевых сплавов ... 253
7.8. Примеры конструктивных решений ... 258
7.9. Оценка экономической эффективности применения алюминиевых сплавов ... 269

Глава 8. Технология изготовления полуфабрикатов и конструкций из алюминиевых сплавов (кандидаты техн.наук *С.С.Кармилов, В.Н.Спиров*) ... 270
8.1. Технология изготовления конструкций из профилей ... 271
8.2. Технология изготовления листовых конструкций ... 273
8.3. Защита алюминиевых сплавов от коррозии ... 275
8.4. Заводы строительных алюминиевых конструкций; номенклатура изделий ... 277
Список литературы ... 279

Раздел III. Техническая эксплуатация, реконструкция, обследование, усиление и испытание металлических конструкций зданий и сооружений

Глава 9. Реконструкционные работы и техническая эксплуатация (доктора техн.наук *В.В.Горев, В.В.Бирюлев, А.В.Перельмутер*; кандидаты техн.наук *В.И.Кудишин, Б.Ю.Уваров, В.И.Валь, В.А.Шевченко, А.И.Конаков, И.И.Крылов, И.В.Левитанский*) ... 280
9.1. Общие положения ... 280
9.2. Техническая эксплуатация стальных конструкций ... 282
9.2.1. Основные положения ... 282
9.2.2. Условия эксплуатации стальных конструкций ... 282
9.2.3. Надзор за состоянием конструкций ... 284
9.2.4. Дополнительные требования по содержанию конструкций ... 287
9.3. Отклонения, дефекты и повреждения элементов металлических конструкций зданий и сооружений ... 288
9.3.1. Общая характеристика ... 288
9.3.2. Дефекты и повреждения элементов строительных металлоконструкций ... 289
9.3.3. Характерные дефекты и повреждения соединений ... 298
9.3.4. Коррозионные повреждения ... 302
9.4. Подготовка и проведение обследований металлических конструкций ... 305
9.4.1. Общие положения ... 305

9.4.2. Подготовительные работы ... 306
9.4.3. Анализ технической документации ... 307
9.4.4. Состав натурного освидетельствования конструкций ... 308
9.4.5. Техника выявления отклонений, дефектов и повреждений ... 309
9.4.6. Особенности освидетельствования элементов каркаса зданий ... 312
9.4.7. Оценка качества стали ... 316
9.4.7.1. Факторы, определяющие свойства стали ... 317
9.4.7.2. Опытное определение свойств стали конструктивных элементов ... 318
9.4.7.3. Опытное определение свойств стали соединений конструкций ... 319
9.4.7.4. Оценка качества стали и установление ее расчетных характеристик ... 321
9.4.8. Определение нагрузок, воздействий и условий эксплуатации ... 322
9.5. Оценка технического состояния конструкций ... 326
9.5.1. Выбор адекватной расчетной схемы ... 326
9.5.2. Назначение расчетного сопротивления стали ... 329
9.5.3. Установление расчетных значений и сочетаний фактических и прогнозируемых нагрузок ... 330
9.5.4. Проверочный расчет конструкций ... 331
9.5.5. Результаты оценки технического состояния конструкций ... 348
9.6. Проектирование восстановления, усиления и реконструкции строительных металлоконструкций ... 349
9.6.1. Общие положения ... 349
9.6.2. Усиление конструкций путем изменения их конструктивной схемы ... 353
9.6.3. Усиление конструкций путем увеличения сечения элементов ... 359
9.6.4. Способы снижения концентрации напряжений ... 363
9.6.5. Усиление соединений ... 364
9.6.6. Реконструкция и усиление каркасов зданий и сооружений ... 365
9.6.6.1. Усиление колонн ... 367
9.6.6.2. Усиление прогонов и балок в балочных клетках ... 368
9.6.6.3. Ремонт и усиление подкрановых балок ... 369
9.6.6.4. Усиление стропильных ферм ... 370
9.6.7. Усиление транспортерных галерей ... 373
Список литературы ... 375

Глава 10. Испытания, длительные наблюдения строительных металлоконструкций (доктора техн.наук *В.В.Горев*, *В.В.Ларионов*, *П.Д.Одесский*, *Ю.Е.Тябликов*; кандидаты техн.наук *Н.Е.Демыгин*, *В.И.Кудишин*, *И.В.Левитанский*, *С.Н.Пономарева*, *З.И.Шульман*; инженеры *Д.П.Барсков*, *Ю.К.Жулев*, *Д.О.Златовратский*) ... 376
10.1. Общие положения ... 376
10.1.1. Обоснование необходимости проведения испытаний ... 376
10.1.2. Цели проведения испытаний ... 376
10.1.3. Виды испытаний по характеру воздействий ... 376
10.1.3.1. Статические испытания ... 376
10.1.3.2. Динамические испытания ... 377
10.1.4. Виды испытаний по месту их проведения ... 377
10.1.4.1. Лабораторные (стендовые) испытания ... 377
10.1.4.2. Натурные испытания ... 377
10.2. Средства проведения статических испытаний ... 378
10.2.1. Способы закрепления конструкций при испытании ... 378
10.2.1.1. Стендовое оборудование ... 378
10.2.1.2. Силовой пол ... 380
10.2.1.3. Оснастка для закрепления ... 380
10.2.1.4. Установка конструкций на стенде ... 381
10.2.2. Средства силовозбуждения ... 382
10.2.2.1. Прессы и испытательные машины ... 382
10.2.2.2. Гидравлические домкраты ... 384

10.2.2.3. Нагружение тарированными грузами, жидкостями и сыпучими материалами 384
10.2.2.4. Нагружение с использованием пневмокамер (баллонов) 384
10.2.3. Системы измерения перемещений 385
10.2.3.1. Геодезические методы 385
10.2.3.2. Методы фотограмметрии и стереофотограмметрии 386
10.2.3.3. Прогибомеры, индикаторы 387
10.2.3.4. Приборы для измерения динамических перемещений 389
10.2.4. Средства измерения усилий (динамометры) 389
10.2.5. Средства измерения деформаций (тензометры) 390
10.3. Методика проведения лабораторных (стендовых) испытаний 394
10.3.1. Программа испытаний 394
10.3.2. Проведение испытаний 396
10.3.3. Обработка результатов 398
10.3.4. Состав технического отчета по результатам испытаний 400
10.4. Особенности динамических испытаний 401
10.4.1. Задачи динамических испытаний 401
10.4.2. Программа испытаний 401
10.4.3. Способы возбуждения колебаний 401
10.4.4. Измерение амплитуды и частоты колебаний 404
10.4.5. Обработка результатов испытаний 406
10.4.5.1. Предварительная обработка виброграмм и осциллограмм 406
10.4.5.2. Обработка записи двух и более гармоник 406
10.4.5.3. Спектральный анализ колебаний типа стационарного случайного процесса 407
10.5. Особенности низкотемпературных циклических испытаний металла и элементов конструкций 410
10.5.1. Общие положения 410
10.5.2. Зависимость прочности конструкций от температуры и условия перехода из вязкого состояния в хрупкое 410
10.5.2.1. Переход из вязкого в хрупкое состояние при понижении температуры. Основные определения 410
10.5.2.2. Факторы, способствующие переходу конструкции в хрупкое состояние 412
10.5.3. Выбор стали и вида испытаний в зависимости от назначения конструкции и условий эксплуатации 415
10.5.4. Оценка сопротивления хрупкому разрушению материалов, соединений и конструкций 416
10.5.4.1. Испытания на ударный изгиб 416
10.5.4.2. Низкотемпературные испытания сварных соединений из проката больших толщин 418
10.5.4.3. Испытание падающим грузом 419
10.5.4.4. Испытания на остановку трещины 420
10.5.5. Оценка характеристик вязкости разрушения (трещиностойкости) при статическом и ударном нагружениях 421
10.5.5.1. Основы механики разрушения 421
10.5.5.2. Образцы и методика испытаний 422
10.5.5.3. Оценка статической трещиностойкости 423
10.5.5.4. Оценка динамической трещиностойкости 423
10.5.5.5. Испытания элементов конструкции 424
10.5.5.6. Корреляция результатов испытаний, полученных различными методами 425
10.5.5.7. Испытательная техника 427
10.5.6. Сопротивление усталости сварных соединений 428
10.5.6.1. Возникновение и распространение усталостных трещин 429
10.5.6.2. Оценка скорости распространения усталостных трещин 431

10.5.7. Схема расчета элементов конструкции на сопротивление хрупкому и усталостному разрушению 432
10.5.8. Методы предотвращения хрупких и усталостных разрушений 435
10.6. Натурные испытания 436
10.6.1. Особенности натурных испытаний 436
10.6.2. Программа натурных испытаний 437
10.6.3. Выбор объекта испытаний 437
10.6.4. Способы силовозбуждения 438
10.6.5. Техника безопасности при натурных испытаниях 438
10.6.6. Проведение натурных испытаний 439
10.7. Основные понятия о модельных испытаниях 440
10.7.1. Общие положения 440
10.7.2. Виды моделей 440
10.8. Длительные натурные наблюдения 441
10.8.1. Общие положения 441
10.8.2. Примеры осуществления натурных наблюдений 441
10.8.3. Цели длительных наблюдений 444
Список литературы 446

Глава 11. Нормативное и техническое обеспечение работ по реконструкции, обследованию, усилению и испытанию металлических конструкций зданий и сооружений (доктора техн.наук *А.В.Перельмутер*, *Ю.Е.Тябликов*; кандидаты техн.наук *В.И.Кудишин*, *И.В.Левитанский*, *С.Н.Пономарева*; инженеры *Д.П.Барсков*, *Ю.К.Жулев*, *Д.О.Златовратский*, *В.Б.Корсак*) 448

11.1. Термины и определения, используемые при обследовании, усилении и испытании реконструируемых зданий и сооружений 448
11.2. Перечень норм, технических условий и стандартов, регламентирующих проектирование металлических конструкций прежних лет 452
11.3. Рекомендации по документальному оформлению результатов освидетельствования состояния конструкций 454
11.4. Измерительные инструменты и приборы, применяемые при освидетельствовании состояния конструкций 460
11.5. Инструменты, приборы и аппаратура для измерения напряженно-деформированного состояния конструкций 465
11.6. Испытательные машины, стенды и другое оборудование для испытания конструкций 469
11.7. Сортаменты отечественных и некоторых зарубежных профилей проката прежних лет 474