

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Курганский государственный университет»
Кафедра «Технология и автоматизация сварочного производства»

ПРОЕКТИРОВАНИЕ СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Методические указания
для проведения практических занятий
для студентов специальности 150202.65 и
направления 15.03.01.62
(профиль «Оборудование и технология сварочного производства»)

Курган 2015

Кафедра: «Технология и автоматизация сварочного производства»

Дисциплина: «Проектирование сварных конструкций»

(направление 15.03.01.62).

Составил: канд. техн. наук, доцент С.И. Казаков.

Утверждены на заседании кафедры «26» марта 2015 г.

Рекомендованы методическим советом университета «19» декабря 2014 г.

ВВЕДЕНИЕ

Настоящие указания составлены применительно к курсу «Проектирование сварных конструкций» для студентов специальности 150202.65, которые должны получить практические навыки в расчетах сварных соединений и элементов на прочность.

Решение задач, представленных в указаниях, предполагает владение материалом не только названного курса, но и таких дисциплин, как «Теоретическая механика» и «Сопротивление материалов», а также умение работать с необходимой справочной литературой.

В указаниях приведен необходимый аппарат, применяемый в настоящее время в практике проектирования сварных металлических конструкций в машиностроении и строительстве, а также необходимые справочные и нормативные материалы.

Расчет должен обеспечить необходимую прочность и жесткость сварных металлических конструкций, а также их элементов и соединений при минимальном расходе материалов и затрат труда. Прочность конструкции, в целом определяется прочностью элементов и соединений. Условие прочности элементов и соединений может быть записано в общем виде

$$\Phi_{\min} \geq N,$$

где Φ – несущая способность соединения, являющаяся функцией механических свойств материала, геометрических характеристик соединения и условий его работы;

N – внешняя нагрузка на соединение, являющаяся функцией силовых нагрузок и других воздействий на конструкцию.

В машиностроении и промышленном строительстве практическая реализация основного условия прочности различна по существу и по форме. Существенно отличаются методы оценки расчетных характеристик. Расчетные формулы, оставаясь в принципе одинаковыми, различаются по записи. Конкретно эти различия рассмотрены ниже.

Сварные соединения и элементы в машиностроении рассчитываются на прочность по методу допускаемых напряжений.

Сварные соединения и элементы строительных конструкций рассчитываются на прочность по методу предельных состояний.

Оба метода равноправны.

1 Требования к проектированию сварных соединений

1.1 Конструкция сварных соединений должна соответствовать требованиям следующих стандартов:

ГОСТ 5264-80. Швы сварных соединений. Ручная дуговая сварка. Основные типы и конструктивные элементы;

ГОСТ 8713-79. Швы сварных соединений. Автоматическая и полуавтоматическая сварка под флюсом. Основные типы и конструктивные элементы;

ГОСТ 14771-76. Дуговая сварка в защитных газах. Соединения сварные. Основные типы, конструктивные элементы и размеры;

ГОСТ 11533-75. Автоматическая и полуавтоматическая сварка под флюсом. Соединения сварные под острыми и тупыми углами. Основные типы, конструктивные элементы и размеры;

ГОСТ 11534-75. Ручная дуговая сварка. Соединения сварные под острыми и тупыми углами. Основные типы, конструктивные элементы и размеры;

ГОСТ 23518 -79. Дуговая сварка в защитных газах. Соединения сварные под острыми и тупыми углами. Основные типы, конструктивные элементы и размеры;

ГОСТ 16037-80. Соединения сварные стальных трубопроводов.

Предпочтение следует отдавать механизированным способам сварки; конструкция соединения должна обеспечивать свободный доступ к местам выполнения сварных швов с учетом выбранного способа и технологии сварки.

1.2 Сварные стыковые соединения элементов из листового проката следует, как правило, выполнять прямыми с полным проплавлением и с применением выводных планок. В монтажных условиях допускается односторонняя сварка с подваркой корня шва и сварка на остающейся подкладке.

1.3 Размеры и форму сварных угловых швов следует принимать с учетом следующих условий:

- катеты угловых швов K должны быть не более $1,2 t$, где t – наименьшая толщина соединяемых элементов;

- катеты угловых швов назначать по расчету, но не менее указанных в таблице 1 (для строительных стальных сварных конструкций);

- расчетная длина углового шва должна быть не менее $4K$ и не менее 40 мм;

- наибольшая длина фланговых швов не должна превышать $50K$ (для конструкций машиностроения) и $85\beta_f \cdot K_f$ (для строительных конструкций), где β_f – коэффициент формы угловых швов, принимаемый по таблице 2;

- размер нахлестки должен быть не менее 5 толщин более тонкого из свариваемых элементов;

- соотношение размеров катетов угловых швов следует, как правило, принимать в соотношении 1:1; при сварке элементов разной толщины соотношение катетов может быть принято равным до 1:1,2;

- в конструкциях, работающих при повторно-переменной (усталостной) нагрузке, а также возводимых в климатических районах I_1 ; I_2 ; II_2 и II_3 (СНиП II-23-81), угловые швы следует выполнять с плавным переходом к основному металлу (сварка в «лодочку»);

- для присоединения ребер жесткости, диафрагм и поясов сварных двутавровых балок и иных профилей допускается применять односторонние угловые швы, катеты которых принимать не менее указанных в таблице 1; применение односторонних швов не допускается для конструкций группы I [2], эксплуатируемых в агрессивных средах, возводимых в климатических районах I_1 ; I_2 ; II_2 и II_3 .

1.4 Применение комбинированных соединений, в которых часть усилий воспринимается сварными швами, а часть болтами, не допускается.

1.5 Применение прерывистых швов, а также электрозаклепок, выполняемых ручной дуговой сваркой с предварительным сверлением отверстий, допускается только для конструкций группы 4 [2].

Таблица 1 – Минимальные катеты швов k_f при толщине более толстого из свариваемых элементов t , мм

Вид соединения	Вид сварки	Предел текучести стали, МПа (кгс/см ²)	Минимальные катеты швов k_f мм, при толщине более толстого из соединяемых элементов t , мм						
			4-5	6-10	11-16	17-22	23-32	33-40	41-80
Тавровое с двусторонними угловыми швами; нахлесточное и угловое	Ручная	До 430 (4400)	4	5	6	7	8	9	10
		Св.430 до 530 (5400)	5	6	7	8	9	10	12
	Автоматическая и полуавтоматическая	До 430	3	4	5	6	7	8	9
		Св.430 (4400) до 530 (5400)	4	5	6	7	8	9	10
Тавровое с односторонними угловыми швами	Ручная	До 380 (3900)	5	6	7	8	9	10	12
	Автоматическая и полуавтоматическая	До 380 (3900)	4	5	6	7	8	9	10

Примечание. В конструкциях из стали с пределом текучести свыше 530 МПа, а также из всех сталей при толщине элементов свыше 80 мм минимальные катеты угловых швов принимаются по специальным техническим условиям.

Таблица 2 – Коэффициент формы угловых швов β_f и β_z

Вид сварки при диаметре сварочной проволоки d , мм	Положение шва	Коэффициент	Значения коэффициентов β_f и β_z при катетах швов, мм			
			3-8	9-12	14-16	18 и более
Автоматическая при $d = 3 \div 5$ мм	В лодочку	β_f	1,1		0,7	
		β_z	1,15		1,0	
	Нижнее	β_f	1,1	0,9	0,7	
		β_z	1,15	1,05	1,0	
Автоматическая и полуавтоматическая при $d - 1,4 \div 2$ мм	В лодочку	β_f	0,9	0,8	0,7	
		β_z	1,05	1,0		
	,Нижнее, горизонтальное, вертикальное	β_f	0,9	0,8	0,7	
		β_z	1,05	1,0		
Ручная; полуавтоматическая проволокой при $d < 1,4$ или порошковой проволокой	В лодочку, нижнее, горизонтальное, вертикальное, потолочное	β_f	0,7			
		β_z	1,0			

Примечание. Значения коэффициентов β_f и β_z соответствуют нормальным режимам сварки. Значение β_f принимается при расчетах прочности по металлу шва, β_z - при расчетах прочности по металлу границы сплавления.

2 Метод расчета по допускаемым напряжениям

Сварные соединения рассчитывают на статическую прочность при действии наибольших по величине разовых (кратковременных) нагрузок и на усталостную прочность при действии циклических нагрузок. Условно принимают, что в расчетных сечениях действуют равномерные средние напряжения, т.е. эффект локальной концентрации напряжений во внимание непосредственно не принимается.

Условие прочности

$$\sigma \leq [\sigma], \quad (1)$$

где σ – средние напряжения в расчетных сечениях сварных соединений, определяемые методами сопротивления материалов;

$[\sigma]$ – допускаемые напряжения в металле швов сварных соединений низкоуглеродистых и низколегированных сталей, принимаемые по таблице 3.

Допускаемые напряжения при растяжении в основном металле – $[\sigma]_p$ принято считать основными. Допускаемые напряжения при других видах напряженного состояния определяются как производные от $[\sigma]_p$ по таблице 3.

Таблица 3 – Допускаемые напряжения для швов сварных соединений низкоуглеродистых и низколегированных сталей

Сварные соединения	Напряженное состояние	Допускаемое напряжение
Стыковые	Растяжение, сжатие, изгиб при автоматической и полуавтоматической дуговой сварке под флюсом, в CO ₂ и при ручной дуговой сварке электродами Э42А, Э46А, Э50А с физическим контролем качества швов	$[\sigma']_p = [\sigma]_p$ $[\sigma']_{сж} = [\sigma]_p$ $[\sigma']_{и} = [\sigma]_p$
	То же при визуальном контроле качества шва	$[\sigma']_p = 0,9 [\sigma]_p$ $[\sigma']_{сж} = [\sigma]_p$ $[\sigma']_{и} = 0,9[\sigma]_p$
	Срез	$[\tau'] = 0,6 [\sigma]_p$
С угловыми швами	Срез	$[\tau'] = 0,6 [\sigma]_p$

Обозначения: $[\sigma]_p$ – допускаемое напряжение на растяжение в основном металле сварного соединения;

$[\sigma']_p$ – допускаемое напряжение на растяжение в металле шва.

$$[\sigma]_p = [\sigma]_T / K_3, \quad (2)$$

где $[\sigma]_T$ – предел текучести материала при растяжении (по ГОСТ 1497-73);

$K_3 = 1,3 \dots 1,7$ – коэффициент запаса прочности, в среднем принимаемый равным 1,5.

Основные формулы для расчетов по допускаемым напряжениям

2.1 Растяжение или сжатие (осевые)

Сварные стыковые соединения

$$\sigma = P/F_{ш} \leq [\sigma']_p \text{ или } [\sigma']_{сж}. \quad (3)$$

Сварные соединения с угловыми швами при растяжении

$$\tau = P/F_{ш} \leq [\tau'], \quad (4)$$

где P – осевая сила;

$F_{ш}$ – расчетное сечение сварного шва.

Таблица 4 – Допускаемые напряжения для низкоуглеродистых и низколегированных сталей при толщине от 4 до 20 мм и $K_3 = 1,5$

Марка стали	Напряженное состояние	Допускаемое напряжение, кгс/см ²
ВСтЗсп ГОСТ 380-71	Растяжение	$[\sigma]_p = 1600$
Сталь 20 ГОСТ 1050-88	Растяжение	$[\sigma]_p = 1600$
09Г2 ГОСТ 19281-89	Растяжение	$[\sigma]_p = 2100$
09Г2С ГОСТ 19281-89	Растяжение	$[\sigma]_p = 2200$
10ХСНД ГОСТ 6713-91	Растяжение	$[\sigma]_p = 2400$
15ХСНД ГОСТ 6713-91	Растяжение	$[\sigma]_p = 2200$
16Г2АФ ГОСТ 19282-73	Растяжение	$[\sigma]_p = 2700$
12Г2СМФ ТУ14-1-1308-75 ($\delta = 18 \dots 32$ мм)	Растяжение	$[\sigma]_p = 3500$

Сжатие коротких элементов $[\sigma]_{сж} = [\sigma]_p$

Сжатие длинных элементов $[\sigma]_{сж} = \varphi[\sigma]_p$

Изгиб $[\sigma]_и = [\sigma]_p$

Срез $[\tau] = 0,6[\sigma]_p$

Циклическая нагрузка $[\sigma]_r = \gamma \cdot [\sigma]_p$

Обозначения: $\varphi < 1$ – коэффициент продольного изгиба, зависящий от гибкости (λ) элемента; $\gamma \leq 1$ – коэффициент снижения допускаемых напряжений при действии циклической (усталостной) нагрузки.

2.2 Изгиб

Сварные стыковые соединени $\sigma = \frac{M}{W_{и}} \leq [\sigma']_и$, (5)

Сварные соединения с угловыми швами $\tau = \frac{M}{W_{и}} \leq [\tau']$, (6)

где M – изгибающий момент в расчетном сечении;

$W_{и}$ – момент сопротивления (осевой) в расчетном сечении сварного шва.

2.3 Продольный срез поясных (соединительных) швов сварных составных сечений

Расчет проводится на 1 см длины шва:

$$\tau = \frac{Q \cdot S}{J \cdot \delta_{и}}, \quad (7)$$

где $Q = dM/dx$ – поперечная сила в расчетном сечении; S – статический момент площади выше проверяемого сечения (стенки балки, поясных швов) относи-

тельно нейтральной оси всего сечения; J – момент инерции всей площади поперечного сечения элемента относительно нейтральной оси; $\delta_{ш}$ – расчетная толщина сварного шва.

2.4 Сложное напряженное состояние (одновременно растяжение и срез)

$$\sigma_{экр} = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} \leq [\sigma']_p \quad (8)$$

2.5 Двухосное напряженное состояние в оболочке под действием внутреннего давления

$$\sigma_{экр} = \sqrt{\sigma_1^2 - \sigma_1 \cdot \sigma_2 + \sigma_2^2 + 3 \cdot \tau_s^2} \leq [\sigma']_p, \quad (9)$$

где σ_1 и σ_2 - соответственно меридиональные и кольцевые напряжения.

2.6 Циклическая (усталостная) нагрузка

$$\sigma_{\max} \leq \gamma \cdot [\sigma']_p, \quad (10)$$

где σ_{\max} – максимальное растягивающее напряжение в цикле в расчетном сечении; $\gamma \leq 1$ – коэффициент снижения допускаемых напряжений при циклической нагрузке. В случаях, когда наибольшее по абсолютной величине напряжение (усилие) является растягивающим, γ определяется

$$\gamma = \frac{c}{a - b \cdot \rho}, \quad (11)$$

случае, когда наибольшее по абсолютной величине напряжение (усилие) является сжимающим

$$\gamma = \frac{c}{b - a \cdot \rho}, \quad (12)$$

где « a », « b » и « c » - коэффициенты, принимаемые по таблице 5 в зависимости от группы элемента или соединения сварной конструкции,

$$\rho = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}, \quad (13)$$

ρ – коэффициент асимметрии цикла, σ_{\min} и σ_{\max} – соответственно наименьшее и наибольшее по абсолютной величине напряжение в расчетном сечении элемента или соединения, вычисленные (каждые со своим знаком) от заданной циклической нагрузки. Условие выносливости при растяжении – сжатии

$$\sigma_{\max} = \frac{P_{\max}}{F_{ш}} \leq \gamma \cdot [\sigma']_p, \quad (14)$$

когда расчетное сечение по сварному шву ($F_{ш}$).

$$\sigma_{\max} = \frac{P_{\max}}{F} \leq [\sigma]_p \cdot \gamma, \quad (15)$$

когда расчетное сечение по основному металлу, где P_{max} – максимальное растягивающее усилие в цикле; F_w , F – соответственно площади поперечного расчетного сечения по шву и по основному металлу.

Таблица 5 – Коэффициенты a , b и c

Класс стали	Группа соединения	a	b	c при $N=5 \cdot 10^5$	c при $N=1 \cdot 10^6$	c при $N=2 \cdot 10^6$	c при $N=3 \cdot 10^6$	c при $N=5 \cdot 10^6$
С235	1	1,20	0,6	1,2	1,1	1,0	0,95	0,9
	2	1,30	0,7					
С235	3	1,55	0,95	1,3	1,1	1,0	0,95	0,9
	4	1,85	1,25					
	5	2,10	1,50					
С235	6	2,75	2,15	1,4	1,2	1,0	0,95	0,85
	7	3,50	2,90					
	8	4,80	4,20					
С345	1	1,25	0,65	1,2	1,1	1,0	0,95	0,9
	2	1,45	0,85					
С345	3	1,80	1,20	1,4	1,2	1,0	0,95	0,9
	4	2,40	1,80					
	5	2,75	2,15					
С345	6	3,80	3,20	1,6	1,3	1,0	0,95	0,85
	7	4,80	4,20					
	8	6,00	5,40					

Примечание: класс стали С235 или С345 – стали строительные для сварных конструкций с пределом текучести 235 МПа и 345 МПа соответственно.

3 Метод расчета сварных соединений и элементов конструкции по предельным состояниям

Предельное состояние конструкции – то состояние, при котором она перестает удовлетворять эксплуатационным требованиям или требованиям при производстве работ (ГОСТ 27751-88. Надежность строительных конструкций и оснований).

Предельные состояния первой группы связаны со следующими явлениями:

- разрушение любого характера (пластическое, хрупкое, усталостное;
- потеря устойчивости формы или положения конструкции в целом или отдельных ее элементов;

- переход конструкции в геометрически изменяемую систему;
- чрезмерное развитие пластических деформаций;

Состояния второй группы (второе предельное состояние) наступают, когда нормальная эксплуатация конструкции невозможна или затруднительна вследствие:

- появления недопустимых прогибов, поворотов, осадок;
- появления недопустимых колебаний по частоте или (и) амплитуде.

Гарантия ненаступления первого и второго предельных состояний обеспечивается расчетами на прочность и жесткость. При этом в расчетном аппарате должны быть учтены следующие факторы:

- возможные неблагоприятные отклонения механических характеристик от среднего значения и возможные минусовые допуски на размеры поперечных сечений; эти факторы учитываются с помощью коэффициентов надежности по материалу:
 - γ_m – для основного материала,
 - γ_{wm} – для материала сварных швов;
- действительные условия работы; эти факторы учитываются с помощью коэффициентов условий работы:
 - γ_c – для конструкций, элементов конструкций и сварных соединений,
 - γ_b – для болтовых соединений;
- возможная перегрузка и (или) неблагоприятное сочетание постоянной и временной нагрузок и воздействий; эти факторы учитываются соответственно с помощью коэффициента надежности по нагрузке γ_f и коэффициента сочетания ψ .

Все расчетные характеристики, используемые в расчетах на прочность и жесткость по методу предельных состояний, а также значения коэффициентов, учитывающих рассмотренные факторы, регламентированы строительными нормами и правилами и приведены в нормативных документах: СНиП II-23-81 «Стальные конструкции» и СНиП 2.01.07-85 «Нагрузки и воздействия».

3.1 Расчетные характеристики материалов и соединений

Расчетные сопротивления стального проката и труб для различных видов напряженного состояния определяют по формулам, приведенным в таблице 6.

В этой же таблице приведены значения коэффициентов надежности по материалу.

Расчетные сопротивления сварных соединений для различных видов соединений и различных напряженных состояний следует определять по формулам, приведенным в таблице 7.

Расчетные сопротивления стального проката R_s для сварных металлических конструкций (лист, профиль и трубы) приведены в таблице 8.

Таблица 6 – Расчетные сопротивления стального проката для различных видов напряженного состояния

Напряженное состояние		Условное обозначение	Расчетные сопротивления проката и труб
Растяжение, сжатие и изгиб	По пределу текучести	R_y	$R_y = R_{ym}/\gamma_m$
	По временному сопротивлению	R_u	$R_u = R_{um}/\gamma_m$
Сдвиг		R_s	$R_s = 0,58 R_{ym}/\gamma_m$
Смятие торцевой поверхности (при наличии пригонки)		R_p	$R_p = R_{um}/\gamma_m$
Смятие местное в цилиндрических шарнирах (цапфах) при плотном касании		R_{tP}	$R_{tP} = 0,5 R_{um}/\gamma_m$
Диаметральное сжатие катков (при свободном касании в конструкциях с ограниченной подвижностью)		R_{cd}	$R_{cd} = 0,025 R_{um}/\gamma_m$
Растяжение в направлении толщины проката (до 60 мм)		R_{th}	$R_{th} = 0,05 R_{um}/\gamma_m$ с п. 3.2*.

Таблица 7 – Расчетные сопротивления сварных соединений для различных видов соединений и различных напряженных состояний

Сварные соединения	Напряженное состояние		Условное обозначение	Расчетные сопротивления сварных соединений
Стыковые	Сжатие. Растяжение и изгиб при автоматической, полуавтоматической сварке или ручной сварке с физическим контролем качества швов	По пределу текучести	R_{wy}	$R_{wy} = R_y$
		По временному сопротивлению	R_{wn}	$R_{wn} = R_u$
	Растяжение и изгиб при автоматической, полуавтоматической или ручной сварке	По пределу текучести	R_{wy}	$R_{wy} = 0,85 R_y$
		Сдвиг	R_{ws}	$R_{ws} = R_s$
С угловыми швами	Срез (условный)	По металлу шва	R_{wf}	$R_{wf} = 0,55 R_{wn}/\gamma_{wm}$
		По металлу границы сплавления	R_{wz}	$R_{wz} = 0,45 R_{un}$

Примечания:

1 Для швов, выполняемых ручной сваркой, значения R_{wn} следует принимать равными значениям временного сопротивления разрыву металла шва, указанными в ГОСТ 9467-75.

2 Для швов, выполняемых автоматической или полуавтоматической сваркой, значения R_{wn} следует принимать по таблице 4 СНиП II-23-81.

3 Значения коэффициента надежности по материалу шва γ_{wm} следует принимать равными: 1,25 – при значениях R_{wun} не более 490 МПа; 1,35 – при значениях R_{wun} 590 МПа и более.

Условные обозначения в методике расчета по СНиП II-23-81 [2]:

R_{yn} – нормативное сопротивление материала по пределу текучести;

R_y – расчетное сопротивление материала по пределу текучести;

R_{un} – нормативное сопротивление материала по временному сопротивлению;

R_u – расчетное сопротивление материала по временному сопротивлению;

R_s – расчетное сопротивление материала при работе на «сдвиг».

Y_m – коэффициент надежности по материалу ($Y_m > 1$);

R_{wy} – расчетное сопротивление сварного соединения по пределу текучести;

R_{wu} – расчетное сопротивление сварного соединения по временному сопротивлению;

R_{wun} – нормативное сопротивление сварного соединения по временному сопротивлению;

R_{wf} – расчетное сопротивление сварного соединения с угловыми швами при работе соединения на «срез» по металлу шва, $R_{wf} = 0,55 R_{wun} / Y_{wm}$.

Таблица 8 – Расчетные сопротивления стального проката для сварных металлических конструкций (лист, профиль и трубы)

Марка стали	ГОСТ или ТУ	Толщина проката, мм	Расчетное сопротивление R_y , МПа (кгс/см ²)	Расчетная температура эксплуатации °С
ВСт3кп2	ГОСТ 380-71	41-100	200 (2000)	минус 30
ВСт3сп	ГОСТ 380-71	4-20	235 (2350)	минус 40
18сп	ГОСТ 23570-79	4-20	235 (2350)	минус 40
18Гсп	ГОСТ 23570-79	31-40	235 (2350)	минус 40
ВСт3сп5	ТУ14-1-3023-80	4-10	285 (2850)	минус 40
09Г2гр.2	ТУ14-1-3023-80	4-10	340 (3400)	минус 65
09Г2С	ТУ14-1-3023-80	4-10	360 (3600)	минус 65
15ХСНД	ГОСТ 19282-73	4-32	340 (3350)	минус 65
10ХСНД	ГОСТ 19282-73	4-32	360 (3600)	минус 65
16Г2АФ	ГОСТ 19282-73	4-32	410 (4100)	минус 65
12Г2СМФ	ТУ14-1-1308-75	19-32	525 (5250)	минус 65

В таблице 9 приведены значения нормативного сопротивления металла шва при сварке проволоками различного химического состава $R_{\text{шв}}$, МПа (кгс/см²)

Таблица 9 – Нормативные сопротивления металла шва при сварке проволоками различного химического состава $R_{\text{шв}}$, МПа (кгс/см²)

Марки проволоки (по ГОСТ 2246—80) для автоматической или полуавтоматической сварки		Марки порошковой проволоки (по ГОСТ 26271-84)	Значения нормативного сопротивления металла шва, $R_{\text{шв}}$, МПа (кгс/см ²)
под флюсом (ГОСТ 9087-61)	в углекислом газе или в его смеси с аргоном (ГОСТ 10157-79)		
Св-08, Св-08А	-	-	410(4200) 450(4600)
Св-08ГА	-	-	490(5000) 590(6000)
Св-10ГА	СВ-08Г2С	-	-
Св-10НМА, Св-10Г2	Св-08Г2С	ПП-АН8, ПП-АНЗ	685(7000)
Св-08ХН2ГМЮ,	Св-0ХГ2СМА,	-	-
Св-08Х1ДЮ	Св-8ХГ2СДЮ	-	-

В таблице 10 приведено соответствие строительных сталей обычным машиностроительным сталям.

Таблица 10 – Марки стали, заменяемые сталями по ГОСТ 27772—88

Стали по ГОСТ 27772—88	Заменяемая марка стали	ГОСТ или ТУ
С235	ВСтЗкп2 ВСтЗкп2-1	ГОСТ 380-71 ТУ 14-1-3023-80
С245	ВСтЗпс6 (листовой прокат толщиной до 20 мм, фасонный - до 30 мм) ВСтЗпс6-1 18пс	ГОСТ 380-71 ТУ 14-1-3023-80 ГОСТ 23570-79
С255	ВСтЗсп5, ВСтЗГпс6, ВСтЗпс6 (листовой прокат толщиной св. 20 до 40 мм, фасонный - св. 30 мм), ВСтЗсп5-1, ВСтЗГпс5-1, 18сп, 18Гпс, 18Гсп	ГОСТ 380-71 ТУ 14-1-3023-80 ГОСТ 23570-79
С275	ВСтЗпс6-2	ТУ 14-1-3023-80

C285	ВСтЗсп5-2, ВСтЗГпс5-2	ТУ 14-1-3023-80
C345, C345Т	09Г2	ГОСТ 19281-73. ГОСТ 19282-73
	09Г2С, 14Г2 (листовой, фасонный прокат толщиной до 20 мм), 15ХСНД (листовой прокат толщиной до 10 мм, фасонный - до 20 мм)	ГОСТ 19282-73
	12Г2С гр. 1	ТУ 14-1-4323-88
	09Г2гр. 1, 09Г2 гр. 2, 09Г2С гр.1, 14Г2 гр. 1 (фасонный - до 20 мм)	ТУ 14-1-3023-80
	390	ТУ 14-15-146-85
	ВСтГпс	ГОСТ 14637-79
C345К	10ХНДП	ГОСТ 19281-73 ГОСТ 19282-73 ТУ 14-1-1217-75
Стали по ГОСТ 27772-88 C375, C375Т	Заменяемая марка стали	ГОСТ или ТУ
	09Г2С гр. 2	ТУ 14-1-3023-80
	12Г2С гр. 2	ТУ 14-1-4323-88
	14Г2 гр. 1 (фасон. прокат св. 20 мм), 14Г2 гр. 2 (фасон. прокат до 20 мм)	ТУ 14-1-3023-80
	14Г2 (фасон. и лист. прокат св. 20 мм), 10Г2С1, 15ХСНД (фасонный прокат св. 20 мм, листовой - св. 10 мм), 10ХСНД (фасонный прокат без ограничения толщины)	ГОСТ 19281-73, ГОСТ 19282-73
C390, C390Т	14Г2АФ, 10Г2С1 ТО, 10ХСНД (листовой прокат св. 10 мм)	ГОСТ 19282-73
C390К	15Г2АФДпс	ГОСТ 19282-73
C440	16Г2АФ, 18Г2Афпс, 15Г2СФ тегтермоупрочненная	ГОСТ 19282-73
C590	12Г2СМФ	ТУ 14-1-1308-75
C590К	12ГН2МФАЮ	ТУ 14-1-1772-76

Примечания:

1 Стали C345 и C375 категорий 1, 2, 3, 4 по ГОСТ 27772-88 заменяют стали категорий соответственно 6, 7 и 9, 12, 13 и 15 по ГОСТ 19281-73 и ГОСТ 19282-73.

2 Стали С345К, С390, С390К, С440, С590, С590К по ГОСТ27772-88 заменяют соответствующие марки стали категорий 1-15 по ГОСТ 19281-73 и ГОСТ 19282-73, указанные в настоящей таблице.

3 Замена сталей по ГОСТ 27772-88 сталями, поставляемыми по другим государственным общесоюзным стандартам и техническим условиям, не предусмотрена.

СНиП II-23-81 рекомендует применение определенных сварочных материалов (таблица 11) при дуговой сварке соответствующих марок сталей.

При выполнении рекомендаций таблицы 11 и при условии качественного выполнения сварного шва с проверкой соединения физическими неразрушающими методами контроля, при отсутствии непроваров и других внутренних дефектов, стыковые сварные соединения можно считать равнопрочными основному металлу.

Для сварных соединений с угловыми швами, нормативные и расчетные сопротивления металла швов, выполненные сварочными материалами по рекомендациям СНиП II-23-81 будут иметь значения, приведенные в табл. 12.

Таблица 11 – Материалы для сварки, соответствующие стали

Группы конструкций в климатических районах	Стали	Материалы для сварки		
		под флюсом	в CO ₂ (ГОСТ 8050-85) и его смеси с аргоном (ГОСТ 10157-79)	покрытыми электродами типов по ГОСТ 9467-75
		Марки		
флюс по ГОСТ 9087-81)	сварочной проволоки по ГОСТ 2246-70)			

Продолжение таблицы 11

2, 3 и 4 - во всех районах, кроме I ₁ , I ₂ , II ₂ и II ₃ .	C235, C245, C255, C275, C285, 20, ВСтЗкп, ВСтЗпс, ВСтЗсп	АН-348А, АН-60	СВ-08А СВ-08ГА	СВ-08Г2С	Э42, Э46
	C345, C345Т, C375, C375Т, C390, C390Т, C390К, C440, 16Г2АФ, 09Г2С	АН-47, АН-43, АН-17-М, АН-348-А ¹	СВ-10НМА, СВ-10Г2 ² , СВ-08-ГА ² , СВ-10ГА ²		Э50
	C345К	АН-348А	СВ-08Х1ДЮ	СВ-08ХГ2СДЮ	Э50А ³
1 - во всех районах; 2, 3 и 4 - в районах I ₁ , I ₂ , II ₂ и II ₃	C235, C245, C255, C275, C285, 20, ВСтЗкп, ВСтЗпс, ВСтЗсп	АН-348А	СВ-08А, СВ-08ГА	СВ-08Г2С	Э42А, Э46А
	C345, C345Т, C375, C375Т, 09Г2С	АН-47, АН-43, АН-348А	СВ-10НМА, СВ-10Г2 ² , СВ-08ГА ² , СВ-10ГА ²		Э50А
	C390, C390Т, C390К, C440, 16Г2АФ	АН-47, АН-17М АН-348А ¹	СВ-10НМА СВ-10Г2 ² , СВ-08ГА ² , СВ-10ГА ²		Э50А
	C345К	АН-348А	СВ-08Х1ДЮ	СВ-08ХГ2СДЮ	Э50А ³
	C590, C590К, C590КШ	АН-17М	СВ-08ХН2ГМЮ СВ-10НМА	СВ-10ХГ2СМА СВ-08ХГСМА, СВ-08Г2С	Э60, Э70
<p>¹ Применение флюса АН-348А требует проведения дополнительного контроля механических свойств металла шва при сварке соединимей элементов всех толщин для конструкций в климатических районах I₁, I₂, II₂ и II₃ и толщин свыше 32 мм - в остальных климатических районах.</p> <p>² Не применять в сочетании с флюсом АН-4.</p> <p>³ Применить только электроды марок ОЗС-18 и КД-11.</p>					

При расчете сварных соединений с угловыми швами их расчетные сопротивления металла швов R_{wf} рекомендуется принимать по таблице 12.

Таблица 12 – Нормативные и расчетные сопротивления металла швов стальных сварных соединений с угловыми швами

Сварочные материалы		R_{wint}	R_{wf}
тип электрода по ГОСТ 9467-75	марка проволоки	МПа (кгс/см ²)	МПа (кгс/см ²)
Э42, Э42А	Св-08, Св-08А	410(4200)	180(1850)
Э46, Э46А	Св-08ГА	450(4600)	200(2050)
Э50, Э50А	Св-10ГА, Св-08Г2С, Св-08Г2СЦ, ПП-АН8, ПП-АН3	490(5000)	215(2200)
Э60	Св-08Г2С*, Св-08Г2СЦ*, Св-10НМА, Св-10Г2	590(6000)	240(2450)
Э70	Св-10ХГ2СМА, Св-08ХН2ГМЮ	685(7000)	0280(2850)
Э85	-	835(8500)	340(3450)
*Только для швов с катетом $k_f \leq 8$ мм в конструкциях из стали с пределом текучести 440 МПа (4500 кгс/см ²) и более			

3.2 Расчет элементов стальных конструкций на выносливость (СНиП II-23-81)

Стальные конструкции и их элементы (подкрановые балки, балки рабочих площадок, элементы конструкций бункерных и разгрузочных эстакад, конструкции под двигатели и др.), непосредственно воспринимающие многократно действующие подвижные, вибрационные или другого вида нагрузки с количеством циклов нагружений 10^5 и более, которые могут привести к явлению усталости, следует проектировать с применением таких конструктивных решений, которые не вызывают значительной концентрации напряжений, и проверять расчетом на выносливость.

Количество циклов нагружения следует принимать по технологическим требованиям эксплуатации.

Конструкции высотных сооружений типа антенн, дымовых труб, мачт, башен и подъемно-транспортных сооружений, проверяемые на резонанс от действия ветра, следует проверять расчетом на выносливость.

Расчет конструкций на выносливость следует производить на действие нагрузок, устанавливаемых согласно требованиям СНиП по нагрузкам и воздействиям.

Расчет на выносливость следует производить по формуле

$$\sigma_{\max} \leq \alpha R_v \gamma_v, \quad (16)$$

где R_v - расчетное сопротивление усталости, принимаемое по таблице 13 в зависимости от временного сопротивления стали и групп элементов конструкций, приведенных в таблице 14;

α – коэффициент, учитывающий количество циклов нагружений n и вычисляемый:

при $n < 3,9 \cdot 10^6$ по формулам:

для групп элементов 1 и 2

$$\alpha = 0,064 \left(\frac{n}{10^6} \right)^2 - 0,5 \left(\frac{n}{10^6} \right) + 1,75; \quad (17)$$

для групп элементов 3 – 8

$$\alpha = 0,07 \left(\frac{n}{10^6} \right)^2 - 0,64 \left(\frac{n}{10^6} \right) + 2,2; \quad (18)$$

при $n \geq 3,9 \cdot 10^6$ $\alpha = 0,77$;

γ_v – коэффициент, определяемый по таблице 14 в зависимости от вида напряженного состояния коэффициента асимметрии напряжений $\rho = \sigma_{\min} / \sigma_{\max}$; здесь σ_{\max} и σ_{\min} – соответственно наибольшее и наименьшее по абсолютному значению напряжения в рассчитываемом элементе, вычисленные по сечению нетто без учета коэффициента динамичности и коэффициентов φ , φ_e , φ_b . При разнозначных напряжениях коэффициент асимметрии напряжений следует принимать со знаком «минус». При расчетах на выносливость по формуле (16) произведение $\alpha R_v \gamma_v$ не должно превышать R_u / γ_u .

Таблица 13 – R_v - расчетное сопротивление усталости

Группы элементов	Значения R_v при временном сопротивлении стали разрыву R_{un} , МПа (кгс/см ²)				
	до 420 (4300)	св. 420 (4300) до 440 (4500)	св. 440 (4500) до 520 (5300)	св. 520 (5300)	св. 580 (5900)
122	120(1220) 100(1020)	128 (1300) 106 (1080)	132(1350) 108(1100)	136 (1390) 110 (1120)	145(1480) 116(1180)
345678	Для всех марок стали 90(920) Тоже				75(765)
	»	60(610)			
	»	45(460)			
	»	36(370)			
	»	27(275)			

ТАБЛИЦЫ ДЛЯ РАСЧЕТА НА ВЫНОСЛИВОСТЬ И С УЧЕТОМ ХРУПКОГО РАЗРУШЕНИЯ

Таблица 14 – Группы элементов и соединений при расчете на выносливость

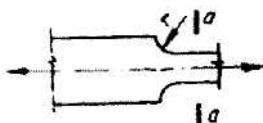
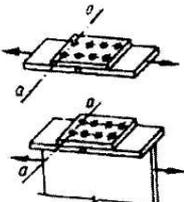
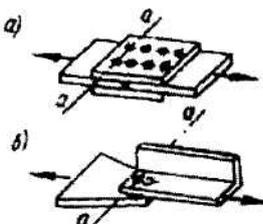
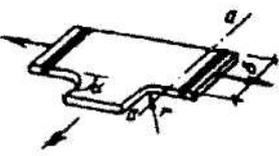
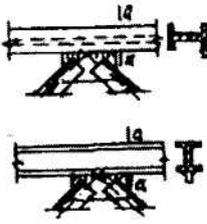
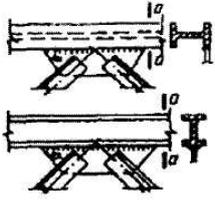
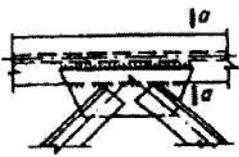
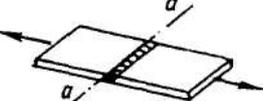
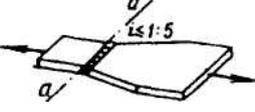
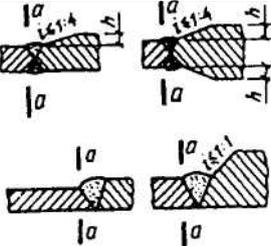
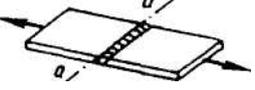
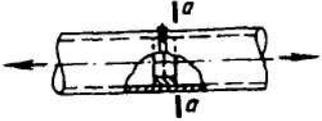
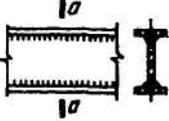
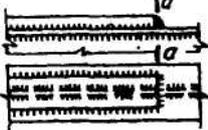
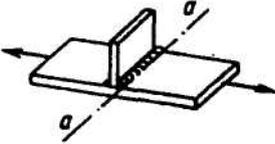
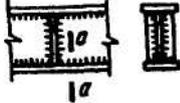
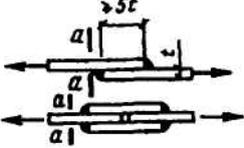
Схема элемента и расположение расчетного сечения	Характеристика элемента	Группа элемента
	<p>Основной металл с прокатными или обработанными механическим путем кромками. То же, с кромками, обрезанными машинной газовой резкой</p>	<p>1 2</p>
	<p>Основной металл с обработанными механическим путем кромками, при разной ширине и радиусе перехода r, мм: 200 10</p>	<p>1 2</p>
	<p>Основной металл в соединениях на высокопрочных болтах</p>	<p>1</p>
	<p>Основной металл в болтовом (болты класса точности А) соединении в сечениях по отверстию: а) при парных накладках; б) при односторонних накладках</p>	<p>4 5</p>
	<p>Переход и закругление (класс чистоты газовой резки 1 или фрезеровка) при $a \geq 72^\circ$, $z \geq 0,5 b$</p>	<p>2</p>
	<p>Фасонки прямоугольной формы, приваренные встык или в тавр к элементам конструкций без механической обработки перехода от фасонки к элементу</p>	<p>7</p>

Схема элемента и расположение расчетного сечения	Характеристика элемента	Группа элемента
	<p>Фасонки, приваренные встык или в тавр к стенкам и поясам балок, а также к элементам ферм при $a \leq 45^\circ$</p>	4
	<p>Фасонки прямоугольной или трапециевидной формы, приваренные к поясам балок внахлестку с обваркой по контуру нахлестки без механической обработки швов</p>	7
	<p>Стыковой необработанный шов; нагрузка перпендикулярна сварному шву; стыкуемые элементы одинаковой ширины и толщины</p>	2
	<p>Стыковой необработанный шов; стыкуемые элементы разной ширины или разной толщины</p>	5
	<p>Основной металл в месте перехода к стыковому шву со снятым механическим способом усилием шва: при стыковании элементов одинаковой толщины и ширины то же, разной толщины и ширины</p>	2 3
	<p>Стыковой шов, выполненный на подкладном листе; нагрузка перпендикулярна сварному шву</p>	4

	<p>Стыковой шов труб, выполненный на подкладном кольце</p>	<p>4</p>
<p>Схема элемента и расположение расчетного сечения</p>	<p>Характеристика элемента</p>	<p>Группа элемента</p>
	<p>Соединение встык прокатных профилей</p>	<p>4</p>
	<p>Сварные сечения двутаврового, таврового и других типов, сваренные непрерывными продольными швами при действии усилия вдоль оси шва</p>	<p>2</p>
	<p>Элемент со вспомогательным элементом, прикрепленным продольными швами, при α: до 45° 90°</p>	<p>4 7</p>
	<p>Обрыв поясного листа без механической обработки поперечного(лобового) шва</p>	<p>7</p>
	<p>Основной металл с поперечным швом; сварной шов двусторонний с плавным переходом к основному металлу</p>	<p>4</p>
	<p>Основной металл растянутых поясов балок и элементов ферм вблизи диафрагм и ребер, приваренных угловыми швами</p>	<p>5</p>
	<p>Основной металл в месте перехода к поперечному (лобовому) угловому шву</p>	<p>6</p>

	<p>Основной металл в соединениях с фланговыми швами (в местах перехода от элемента к концам фланговых швов):</p> <p>а) с двойными фланговыми швами б) с фланговыми и лобовыми швами в) при передаче усилия через основной металл г) щеки анкеров для крепления стальных канатов</p>	<p>8 7 7 8</p>
<p>Схема элемента и расположение расчетного сечения</p>	<p>Характеристика элемента</p>	<p>Группа элемента</p>
	<p>Основной металл трубы растянутого раскоса при отношении толщины к наружному диаметру трубы пояса:</p> <p>$t_m/d_m \geq 1/14$ $1/20 \leq t_m/d_m < 1/14$</p>	<p>7 8</p>
<p>$\alpha = 45-60^\circ$</p>	<p>Основной металл трубы растянутого раскоса при отношении диаметров раскоса и пояса $d_d/d_m = 0,4-0,7$ и отношении толщины к наружному диаметру трубы пояса:</p> <p>$t_m/d_m \geq 1/14$ $1/20 \leq t_m/d_m < 1/14$ $1/35 \leq t_m/d_m < 1/20$</p>	<p>6 7 8</p>

Таблица 15 – Формулы для вычисления коэффициента γ_v

σ_{\max}	Коэффициент асимметрии напряжений ρ	Формулы для вычисления кокоэффициента γ_v
Растяжение	$-1 \leq \rho \leq 0$ $0 < \rho \leq 0,8$ $0,8 < \rho < 1$	$\gamma_v = 2,5/(1,5 - \rho)$ $\gamma_v = 2,0/(1,2 - \rho)$ $\gamma_v = 1,0/(1 - \rho)$
Сжатие	$-1 \leq \rho < 1$	$\gamma_v = 2,0/(1 - \rho)$

Стальные конструкции и их элементы, непосредственно воспринимающие нагрузки с количеством циклов нагружений менее 10^5 , следует проектировать с применением таких конструктивных решений, которые не вызывают значительной концентрации напряжений, и в необходимых случаях проверять расчетом на малоцикловую прочность.

3.3 Расчет соединений стальных конструкций по СНиП II-23-81

Сварные соединения

Расчет сварных стыковых соединений на центральное растяжение или сжатие следует производить по формуле:

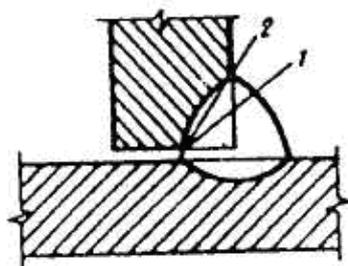
$$\frac{N}{t \cdot l_w} \leq R_{wy} \cdot \gamma_c \quad (19)$$

где t – наименьшая толщина соединяемых элементов;

l_w – расчетная длина шва, равная полной его длине, уменьшенной на $2t$, или полной его длине в случае вывода концов шва за пределы стыка. При расчете сварных стыковых соединений элементов конструкций в формуле (19) вместо R_{wy} следует принимать R_{wu/γ_u} .

Расчет сварных стыковых соединений выполнять не требуется при применении сварочных материалов согласно таблице 11 и при условии полного провара соединяемых элементов и физическом контроле качества растянутых швов.

Сварные соединения с угловыми швами при действии продольной и поперечной сил следует рассчитывать на срез (условный) по двум сечениям (рисунок 1).



1 – сечение по металлу шва; 2 – сечение по металлу границы сплавления

Рисунок 1 – Схема расчетных сечений сварного соединения с угловым швом

Условие прочности по металлу шва (сечение 1)

$$N/(\beta_f k_f l_w) \leq R_{wf} \gamma_{wf} \gamma_c ; \quad (20)$$

по металлу границы сплавления (сечение 2)

$$N/(\beta_z k_f l_w) \leq R_{wz} \gamma_{wz} \gamma_c, \quad (21)$$

где l_w – расчетная длина шва, принимаемая меньше его полной длины на 10 мм; β_f и β_z – коэффициенты, принимаемые при сварке элементов из стали: с пределом текучести до 530 МПа (5400 кгс/см²) – по таблице 2; с пределом текучести свыше 530 МПа (5400 кгс/см²) независимо от вида сварки, положения шва и диаметра сварочной проволоки $\beta_f=0,7$ и $\beta_z=1$;

γ_{wf} и γ_{wz} – коэффициенты условий работы шва, равные 1 во всех случаях, кроме конструкций, возводимых в климатических районах I₁, I₂, II₂ и II₃, для которых $\gamma_{wf} = 0,85$ для металла шва с нормативным сопротивлением $R_{wun} = 410$ МПа (4200 кгс/см²) и $\gamma_{wz} = 0,85$ – для всех сталей.

Расчетные сопротивления сварных соединений для различных видов соединений и напряженных состояний следует определять по формулам, приведенным в таблице 6.

Расчетные сопротивления стыковых соединений элементов из сталей с разными нормативными сопротивлениями следует принимать как для стыковых соединений из стали с меньшим значением нормативного сопротивления.

Расчетные сопротивления металла швов сварных соединений с угловыми швами R_{wf} приведены в таблице 12.

При выборе электродов или сварочной проволоки следует учитывать группы конструкций и климатические районы, указанные в таблице 11.

Расчет сварных соединений с угловыми швами на действие момента в плоскости, перпендикулярной плоскости расположения швов, следует производить по двум сечениям по формулам:

- по металлу шва

$$\frac{M}{W_f} \leq R_{wf} \gamma_{wf} \gamma_c, \quad (22)$$

- по металлу границы сплавления

$$\frac{M}{W_z} \leq R_{wz} \gamma_{wz} \gamma_c; \quad (23)$$

где W_f – момент сопротивления расчетного сечения по металлу шва;

W_z – то же, по металлу границы сплавления.

При расчете сварных соединений с угловыми швами на одновременное действие продольной и поперечной сил и момента должны быть выполнены условия

$$\tau_f \leq R_{wf} \gamma_{wf} \gamma_c \text{ и } \tau_z \leq R_{wz} \gamma_{wz} \gamma_c, \quad (24)$$

где τ_f и τ_z – напряжения в расчетном сечении соответственно по металлу шва и по металлу границы сплавления, равные геометрическим суммам напряжений, вызываемых продольной и поперечной силами и моментом.

3.4 ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ ПО ПРОЕКТИРОВАНИЮ СТАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Основные положения

При проектировании стальных конструкций необходимо:

- предусматривать связи, обеспечивающие в процессе монтажа и эксплуатации устойчивость и пространственную неизменяемость сооружения в целом и его элементов, назначения их в зависимости от основных параметров сооружения и режима его эксплуатации (конструктивной схемы, пролетов, типов кранов и режимов их работы, температурных воздействий и т.п.);

- учитывать производственные возможности и мощность технологического и кранового оборудования предприятий изготовителей стальных конструкций, а также подъемно-транспортное и другое оборудование монтажных организаций;

- производить разбивку конструкций на отправочные элементы с учетом вида транспорта и габаритов транспортных средств, рационального и экономичного транспортирования конструкций на строительство и выполнения максимального объема работ на предприятии-изготовителе;

- использовать возможность фрезерования торцов для мощных сжатых и внецентренно-сжатых элементов (при отсутствии значительных краевых растягивающих напряжений) при наличии соответствующего оборудования на предприятии-изготовителе;

- предусматривать монтажные крепления элементов (устройство монтажных столиков и т.п.);

- в болтовых монтажных соединениях применять болты класса точности В и С, а также высокопрочные, при этом в соединениях, воспринимающих значительные вертикальные усилия (крепления ферм, ригелей и т.п.), следует предусматривать столики; при наличии в соединениях изгибающих моментов следует применять болты класса точности В и С, работающие на растяжение.

При конструировании стальных сварных конструкций следует исключать возможность вредного влияния остаточных деформаций и напряжений, в том числе сварочных, а также концентрации напряжений, предусматривая соответствующие конструктивные решения (с наиболее равномерным распределением напряжений в элементах и деталях, без входящих углов, резких перепадов сечения и других концентраторов напряжений) и технологические мероприятия (порядок сборки и сварки, предварительный выгиб, механическую обработку соответствующих зон путем строгания, фрезерования, зачистки абразивным кругом и др.).

В сварных соединениях стальных конструкций следует исключать возможность хрупкого разрушения конструкций в процессе их монтажа и эксплуатации в результате неблагоприятного сочетания следующих факторов:

- высоких местных напряжений, вызванных воздействием сосредоточенных нагрузок или деформаций деталей соединений, а также остаточных напряжений;

- резких концентраторов напряжений на участках с высокими местными напряжениями и ориентированных поперек направления действующих растягивающих напряжений;

- пониженной температуры, при которой данная марка стали в зависимости от ее химического состава, структуры и толщины проката переходит в хрупкое состояние.

При конструировании сварных конструкций следует учитывать, что конструкции со сплошной стенкой имеют меньше концентраторов напряжений и менее чувствительны к эксцентриситетам по сравнению с решетчатыми конструкциями.

Стальные конструкции следует защищать от коррозии в соответствии со СНиП по защите строительных конструкций от коррозии.

Защита конструкций, предназначенных для эксплуатации в условиях тропического климата, должна выполняться по ГОСТ 15150-69.

Конструкции, которые могут подвергаться воздействию расплавленного металла (в виде брызг при разливке металла, при прорыве металла из печей или ковшей), следует защищать облицовкой или ограждающими стенками из огнеупорного кирпича или жароупорного бетона, защищенными от механических повреждений.

Конструкции, подвергающиеся длительному воздействию лучистой или конвекционной теплоты или кратковременному воздействию огня во время аварий тепловых агрегатов, следует защищать подвесными металлическими экранами или футеровкой из кирпича или жароупорного бетона.

Для расчетных и конструктивных угловых швов в проекте должны быть указаны вид сварки, электроды или сварочная проволока, положение шва при сварке.

Примеры расчета сварных соединений

Пример 1. Проверить прочность стыкового соединения. Полоса растянута силой N . Физические методы контроля качества сварного соединения отсутствуют. Ось шва наклонена к оси полосы x (см. рисунок 2) под углом 60° . Материал полосы – сталь С345. Сварка полуавтоматическая, выполняется в среде углекислого газа проволокой Св-08Г2С с применением технологических планок. Нормативное сопротивление металла шва $R_{wun} = 490 \text{ Н/мм}^2 = 49 \text{ кН/см}^2$. Расчетное сопротивление стыковых сварных соединений на растяжение по пределу текучести $R_{wy} = 0,85 R_y$. Для толщины полосы $t = 10 \text{ мм}$ $R_y = 33,5 \text{ кН/см}^2$. Предельное значение усилия, которое может выдержать полоса в сечении по основному металлу, равно $N = R_y b t \gamma_c$. Коэффициент условия работы $\gamma_c = 1$, ширина полосы $b = 300 \text{ мм}$, толщина полосы $t = 10 \text{ мм}$. Следовательно, $N = 33,5 \cdot 30 \cdot 1 \cdot 1 = 1005 \text{ кН}$.

Раскладываем усилие N на составляющие:

- усилие, перпендикулярное оси шва (нормальное), $N_n = N \cdot \sin \alpha = 1005 \cdot 0,866 = 870,33 \text{ кН}$;

- усилие, направленное вдоль оси шва (тангенциальное), $N_t = N \cdot \cos \alpha = 1005 \cdot 0,5 = 502,5 \text{ кН}$.

Площадь расчетного сечения шва $A_w = t b / \sin \alpha = 1 \cdot 30 / 0,866 = 34,64 \text{ см}^2$.

Расчетное сопротивление металла стыкового шва растяжению для стали С345 (без физического контроля качества)

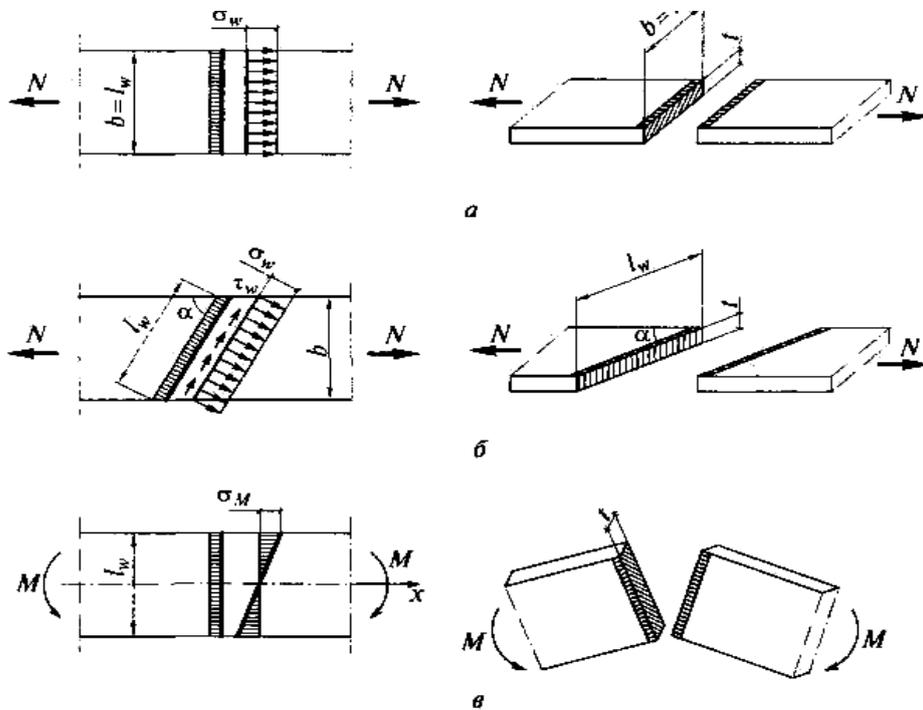
$R_{wy} = 0,85 R_y = 0,85 \cdot 33,5 = 28,48 \text{ кН/см}^2$.

Напряжения $\sigma = N_\sigma / A_w = 870,33 / 34,64 = 25,12 < R_{wy} = 28,48 \text{ кН/см}^2$.

Напряжения от сдвигающего усилия $\tau = N_{\tau} / A_w = 502,5 / 34,64 = 14,51 \text{ кН/см}^2$
 $\tau = 14,51 \text{ кН/см}^2 < R_{ws} = 19,52 \text{ кН/см}^2$.

Расчетное сопротивление металла стыкового шва сдвигу
 $R_{ws} = R_S = 0,58 R_{un} / \gamma_m = (0,58 \cdot 34,5 / 1,025) = 19,52 \text{ кН/см}^2$.

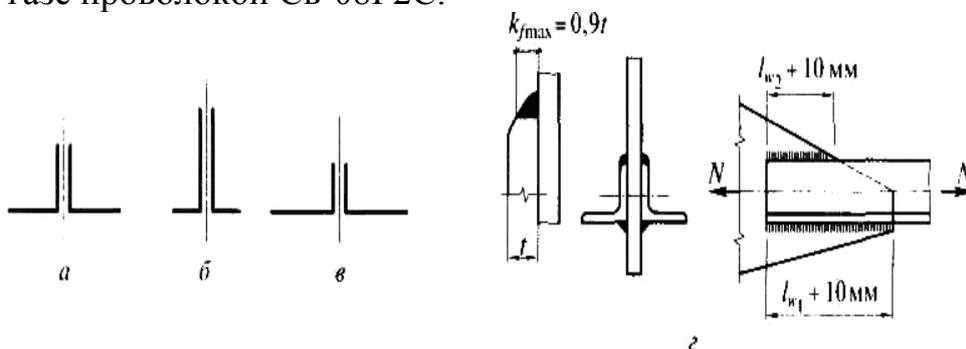
Стыковой шов, выполненный под углом 60° к оси полосы, удовлетворяет условиям прочности без физического контроля качества.



*а – на продольную силу; б – на продольную силу стыка с косым швом;
 в – на изгиб*

Рисунок 2 – Расчетные схемы стыковых швов

Пример 2. Рассчитать прикрепление растянутого стержня из стали С345, состоящего из двух равнополочных уголков $\angle 80 \times 7 \text{ мм}$, к фанонке из такой же стали толщиной $t = 12 \text{ мм}$ (рисунок 3). Сварка полуавтоматическая в углекислом газе проволокой Св-08Г2С.



*а – равнополочных (равнобоких); б – неравнобоких, соединенных большими полками вместе; в – неравнобоких, соединенных малыми полками вместе;
 г – соединение уголков с фанонками*

Рисунок 3 – Прикрепление уголков к фанонке

Усилие N , проходящее через центр тяжести сечения стержня, по условию задачи равно 700 кН. На один уголок действует $N_l = 0,5 N = 350$ кН. Распределяем усилие, приходящееся на один уголок между швами на обушке уголка и на пере.

При равнополочных уголках на сварной шов со стороны обушка действует усилие $0,7 \cdot N_l = 0,7 \cdot 350 = 245$ кН (усилия распределяются в соотношении, обратно пропорциональном расстояниям от центра тяжести сечения стержня до швов). Усилие передаваемое на сварной шов у пера $0,3 \cdot N_l = 105$ кН. Определяем расчетное сечение соединения.

По границе сплавления $R_{wz} \beta_Z = 0,45 R_{un} \beta_Z = 1,05 \cdot 0,45 \cdot 47 = 22,21$ кН/см²; для фасонки толщиной 12 мм $R_{un} = 47$ кН/см². По металлу шва $\beta_f R_{wf} = 0,9 \cdot 22 = 19,8$ кН/см².

Коэффициенты β_f и β_Z определяем по таблице 2 ($\beta_f = \beta_Z = 0,9$). Расчетное сопротивление R_{wf} металла углового шва выполненного проволокой Св-08Г2С по таблице 11 $R_{wf} = 22$ кН/см²; $\beta_Z \cdot R_{wz} = 22,21 > \beta_f R_{wf} = 19,8$. Расчетным сечением является сечение по металлу шва, согласно таблице 38 СНиП II-23-81, при толщине фасонки $t = 12$ мм минимальный катет шва $k_{fmin} = 6$ мм. При толщине полки уголка 7 мм максимальное значение катета шва $k_{fmax} = 0,9t = 0,9 \cdot 7 = 6,3$ мм. Принимаем катеты швов на обушке и пере одинаковыми: $k_f = 6$ мм. Требуемая длина шва на обушке уголка $l_{w1} = 0,7 N_l / \beta_f k_f R_{wf} = 245 / 0,9 \cdot 0,6 \cdot 22 = 20,7$ см.

Требуемая длина шва на пере уголка

$$l_{w2} = 0,3 N_l / \beta_f k_f R_{wf} = 105 / 0,9 \cdot 0,6 \cdot 22 = 8,9 \text{ см.}$$

Предельная расчетная длина должна быть не более

$$85 \beta_f k_f = 85 \cdot 0,9 \cdot 0,6 = 45,9 \text{ см} = 459 \text{ мм} > 207 \text{ мм.}$$

Можно считать, что шов работает равномерно на всей длине.

Учитывая непровар и кратер в концевых участках шва, имеем: на обушке $l_{w1} + 1 = 22$ см; на пере $l_{w2} + 1 = 10$ см (см. рисунок 3, з).

Как правило, катеты швов на обушке и пере уголков принимаются одинаковыми. Разная величина катетов усложняет изготовление конструкций, так как при этом необходимо менять режим сварки.

Пример 3. Требуется подобрать поперечное сечение стойки; ее длина $L = 8$ м, продольная сжимающая сила $P = -940$ кН; концы стойки закреплены шарнирно; материал - сталь класса С345 ($[\sigma]_p = 240$ МПа). Задаемся в первом приближении коэффициентом $\varphi_l = 0,6$. Требуемая площадь поперечного сечения стойки по формуле (8.11) [6] $F_{mp} = 0,940 / (240 \cdot 0,6) = 0,00652 \text{ м}^2 = 65,2 \text{ см}^2$.

Принимаем, что сечение сконструировано в форме сварного двутавра из двух листов 280x10 мм и одного 200x8 мм (вариант 1): $F = 72 \text{ см}^2$. Моменты инерции относительно осей X и Y :

$$I_x = 2(1^3 \cdot 28/12 + 28 \cdot 10,5^2) + 20^3 \cdot 0,8/12 = 6711 \text{ см}^4;$$

$I_y = 2 \cdot 28^3 \cdot 1/12 + 0,8^3 \cdot 20/12 = 3659 \text{ см}^4$. Наименьший радиус инерции находим по формуле:

$$r_y = \sqrt{3659/72} = 7,13 \text{ см;}$$

$$\text{гибкость по формуле (9.6): } \lambda_y = 800/7,13 = 112.$$

По таблице 8.2 [6] определяем, что при $\lambda_y = 112$ для стали класса С345,

$\varphi=0,46$ и подставляем в формулу (8.10):

$$\sigma = -0,94/(0,46 \cdot 72 \cdot 10^{-4}) = -284 \text{ МПа.}$$

Напряжение больше допустимого $[\sigma]_p = 240 \text{ МПа}$. Увеличиваем размеры элементов стойки, чтобы возросла не только площадь, но и радиус инерции r_y . Для этого принимаем размеры листов полок $320 \times 10 \text{ мм}$ и стенки $250 \times 8 \text{ мм}$ (вариант 2). Тогда $F=84 \text{ см}^2$.

Определяем момент инерции относительно оси Y:

$$I_y = 2 \cdot 32^3 \cdot 1/12 + 25 \cdot 0,8^3/12 = 5462 \text{ см}^4.$$

Радиус инерции равен

$$r_y = \sqrt{5462/82} = 8,1 \text{ см.}$$

Гибкость $\lambda = 800/8,1 = 100$; $\varphi = 0,482$. Затем находим напряжение сжатия:

$$\sigma = -0,940/(0,482 \cdot 84 \cdot 10^{-4}) = -232 \text{ МПа.}$$

Стойка недогружена на $\Delta = \frac{240 - 232}{240} \cdot 100 = 3,3\%$. Сечение подобрано хорошо.

Пример 4. Определить несущую способность листа из стали 15ХСНД толщиной 12 мм шириной 200 мм с поперечным ребром, приваренным двусторонним швом с плавным переходом к основному металлу (рисунок 4).

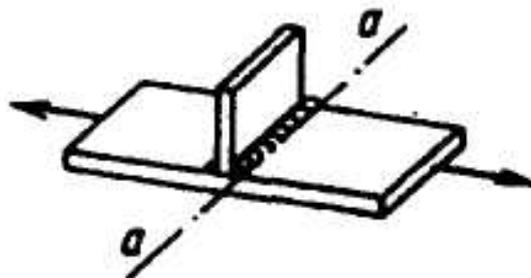


Рисунок 4 – Стальная пластина с поперечным ребром

Нагрузка на пластину растягивающая циклическая с коэффициентом асимметрии цикла $\rho = -1$. Количество циклов нагружения $n = 2 \cdot 10^6$.

Расчет на выносливость следует производить по формуле

$$\sigma_{\max} \leq \alpha R_v \gamma_v,$$

В рассматриваемом примере $\rho = -1$. Группа элемента конструкции – 4 (таблица 14, № п/п – 18). По таблице 13 $R_v = 75 \text{ МПа}$ (765 кгс/см^2).

Для элементов 4 группы

$$\alpha = 0,07 \left(\frac{n}{10^6} \right)^2 - 0,64 \left(\frac{n}{10^6} \right) + 2,2;$$

$$\alpha = 0,07(2 \cdot 10^6/10^6) - 0,64(2 \cdot 10^6/10^6) + 2,2 = 0,14 - 1,28 + 2,2 = 1,06$$

Коэффициент γ_v при растяжении и $\rho = -1$ определяется из таблицы 15 по формуле

$$\gamma_v = 2,5/(1,5 - \rho) = 2,5/(1,5 - (-1)) = 1$$

Максимальные напряжения в цикле определяются $\sigma_{\max} \leq \alpha R_v \gamma_v,$

$$\sigma_{\max} = 1,06 \cdot 75 \cdot 1 = 79,5 \text{ МПа.}$$

Максимальное растягивающее усилие, действующее на пластину не должно превышать

$$P_{\max} \leq \sigma_{\max} \cdot F_{\Pi} = 79,5 \cdot 12 \cdot 200 \cdot 10^{-6} = 0,1908 \text{ МН} = 190,8 \text{ КН} = 19080 \text{ кгс.}$$

Пример 5. Расчет и конструирование балки [6, п. 9.7].

Требуется разработать конструкцию сварной балки пролетом $l=16$ м со свободно опертыми концами. Допускаемое напряжение в подкрановых балках устанавливается с учетом коэффициентов условий работы $m=0,9$ и перегрузки $n=1,2$:

$$[\sigma]_p = R_p m/n.$$

Для стали Ст3 при $R_p=210$ МПа $[\sigma]_p = 157,5$ МПа ≈ 160 МПа.

Балка нагружена равномерной нагрузкой от собственного веса $q=2,5$ кН/м и двумя сосредоточенными грузами $P=50$ кН (от веса тележки с грузом), которые могут перемещаться по балке. Расстояние между осями тележки $d=2$ м; наибольший прогиб балки f от сосредоточенных грузов не должен превышать $1/500$ ее пролета l (рисунок 5 а).

Конструирование балки следует начать с определения расчетных усилий M и Q . Сначала необходимо построить линии влияния изгибающих моментов, чтобы знать их максимально возможные значения в разных сечениях балки (рисунок 5 б). Метод линий влияния рассмотрен в главе 3 [6]. Максимальные ординаты y_{\max} линий влияния для различных сечений x при наиболее опасном положении грузовой тележки составят:

$$x \dots 0,1l \quad 0,2l \quad 0,3l \quad 0,4l \quad 0,5l$$

$$y_{\max} \dots 0,09l \quad 0,16l \quad 0,21l \quad 0,24l \quad 0,25l$$

Определим моменты от веса тележки в каждом из сечений с учетом того, что один из сосредоточенных грузов располагается над вершиной линии влияния, а второй занимает положение, показанное на рисунке 5 б. Момент от сосредоточенных сил вычисляется по формуле

$$M_p = \Sigma P \cdot y_i, \quad (25)$$

где y_i – ордината линии влияния, т.е.

$$M_p = y_{\max} [1 + (l - x - d)/(l - x)] P. \quad (26)$$

Момент в сечении x от распределенной нагрузки q (рисунок 5 а)

$$M_q = \frac{qlx}{2} - \frac{qx^2}{2}. \quad (27)$$

Суммарные моменты в сечениях от сосредоточенных сил и равномерной нагрузки

$$M_{\Sigma} = M_p + M_q \quad (28)$$

Результаты подсчетов по формулам (26), (27) и (28) представлены на рисунке 5 в, г, д. Таким образом, расчетное значение момента для балки составляет $M_{\Sigma} = 430$ кН·м = 0,43 МН·м. Требуемый момент сопротивления балки для этого изгибающего момента равен $W_{Tp} = M_{\Sigma} / [\sigma]_p = 0,43 : 160 = 0,002688$ м³ = 2688 см³.

Производим построение линии влияния поперечной силы (рисунок 5 е).

Ординаты Q для различных сечений x составят:

x	0	0,1l	0,2l	0,3l	0,4l	0,5l
Q	1	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5

Определим расчетные усилия от сосредоточенных сил в каждом из указанных сечений с учетом того, что одна из сил располагается над вершиной линии влияния:

$$Q_p = \sum P_{yi}, \text{ т. е.}$$

$$Q_p = [1 + (l - x - d)/(l - x)]P. \quad (29)$$

Поперечные силы Q_q от собственного веса q равны

$$Q_q = ql/2 - qx. \quad (30)$$

Суммарные значения поперечных сил от сосредоточенных и равномерно распределенных нагрузок

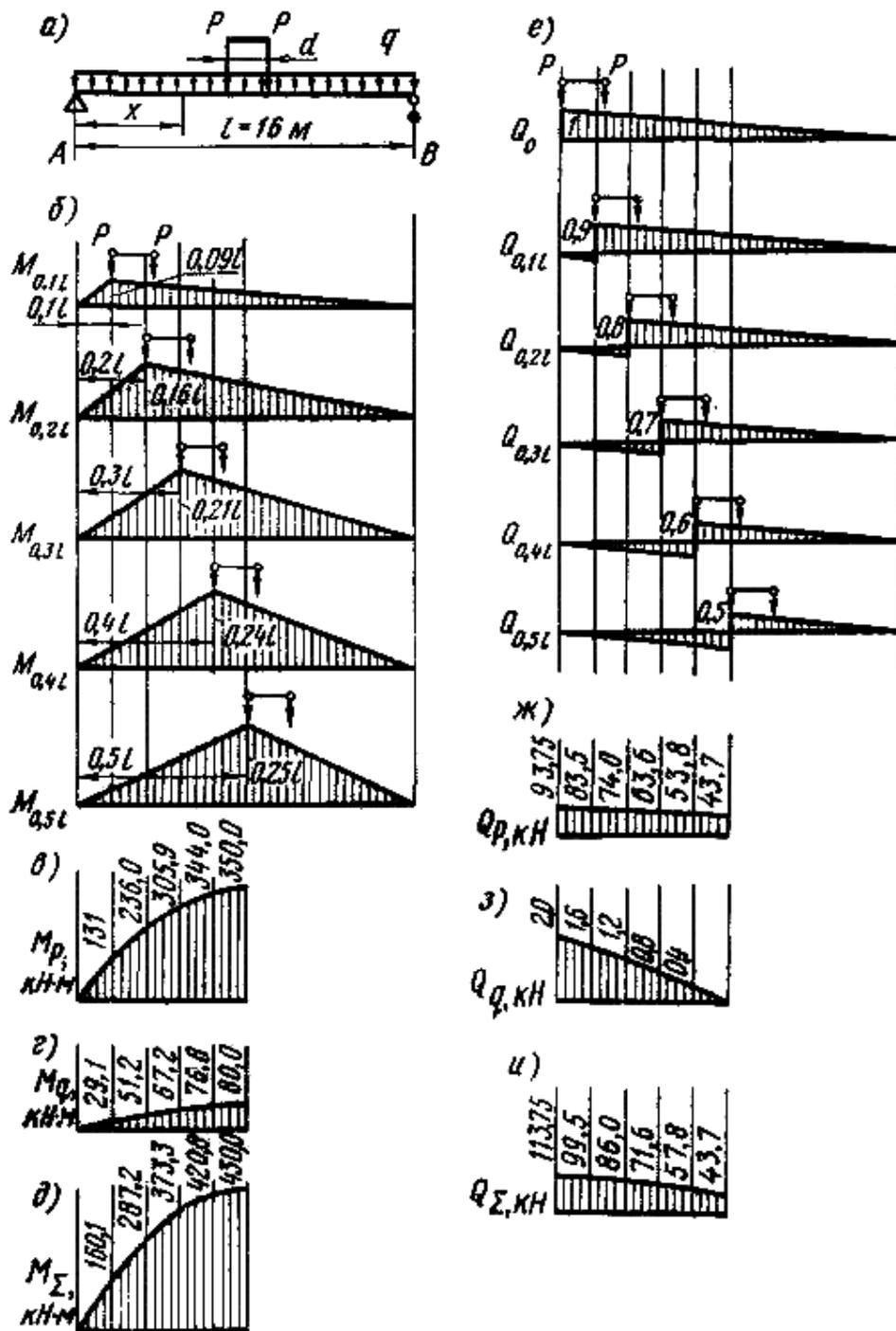
$$Q_\Sigma = Q_p + Q_q. \quad (31)$$

Результаты подсчетов представлены на рисунке 5 ж, з, и.

Определив расчетные усилия, переходим к нахождению наименьшей высоты балки из условия нормы жесткости $f_{max}/l = 1/500$ при сосредоточенных грузах P . При определении требуемой высоты следует учесть, что по условию прогиб ограничен лишь в отношении нагрузки P . Так как напряжение от суммарного момента $M_\Sigma = 430 \text{ кН}\cdot\text{м}$ достигает $[\sigma]_p$, то напряжение от момента $M = 350 \text{ кН}\cdot\text{м}$, вызванного сосредоточенными грузами, будет составлять $0,8[\sigma]_p$. Это напряжение следует брать вместо $[\sigma]_p$ при определении требуемой высоты балок h .

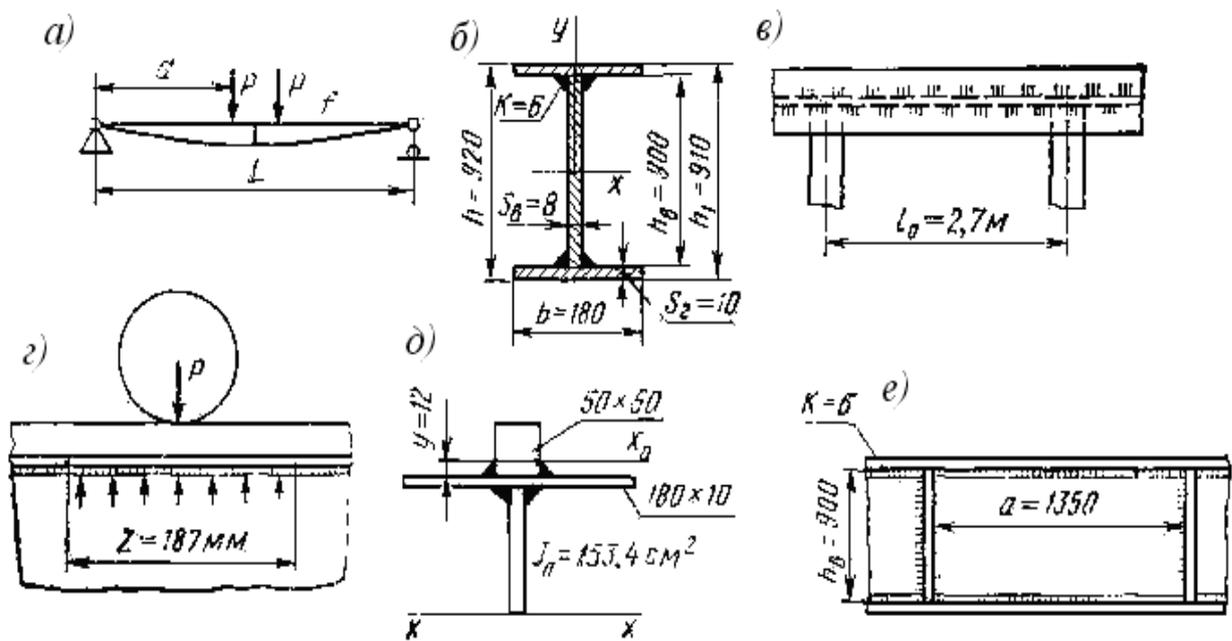
Прогиб балки от двух сосредоточенных сил P , расположенных симметрично в пролете (рисунок 6 а),

$$f = Pa^2 [l - 4/3(a/l)^2] / (8EI). \quad (32)$$



а – схема балки; б – линии влияния; в – наибольший момент M от подвижной нагрузки в разных сечениях; г – эюра M от q ; д – наибольший расчетный момент M от сил P и q в разных сечениях; е – линии влияния поперечной силы Q ; ж – наибольшие значения Q от подвижной нагрузки в разных сечениях; з – эюра Q от q ; и – наибольшие расчетные значения Q в разных сечениях

Рисунок 5 – К расчету балки пролетом 16 м



а – определение высоты балки h из условий жесткости; б – подобранный профиль балки; в – расположение горизонтальных связей; г – учет местного влияния сосредоточенной силы; д – к расчету поясных швов; е – расстановка ребер жесткости

Рисунок 6 – К примеру расчета сварной балки $l=16$ м

Подставив $P \cdot a = M$, получим

$$f = \frac{Ml^2 \left[1 - \left(\frac{4}{3} \right) \left(\frac{a}{l} \right)^2 \right]}{8EJ} \quad (33)$$

Если выразить M в формуле (33) через напряжение, $0,8[\sigma]_p$ вызванное сосредоточенными силами и умноженное на момент сопротивления $W=2J/h$, то

$$f = 1,6[\sigma]_p l^2 \left[1 - \left(\frac{4}{3} \right) \left(\frac{a}{l} \right)^2 \right] / (8Eh), \quad (34)$$

откуда требуемая высота балки из условий жесткости

$$h/l = 0,8[\sigma]_p l \left[1 - \left(\frac{4}{3} \right) \left(\frac{a}{l} \right)^2 \right] / (4Ef) = 0,8 \cdot 160 \cdot 500 \left[1 - \left(\frac{4}{3} \right) \left(\frac{7}{16} \right)^2 \right] / (4 \cdot 2,1 \cdot 10^5) = 0,0567;$$

$$\text{или } h = 0,0567 \cdot 16 \text{ м} = 0,912 \text{ м.}$$

Чтобы определить требуемую высоту балки из условия ее наименьшего сечения, нужно задаться толщиной вертикального листа. Можно воспользоваться рекомендуемым приближенным соотношением

$$s_g = \sqrt{10} h / 12,5 = 7,6 \text{ мм.}$$

Примем $s_g = 8$ мм.

Требуемая высота из условия наименьшей массы по формуле

$$h = 1,3 \sqrt{0,43 / (8 \cdot 160 \cdot 10^{-3})} = 0,75 \text{ м.}$$

Так как требуемая высота, найденная по формуле (34), больше 0,75 м, то ее и следует принять в расчет при подборе сечения. Высоту вертикального листа h_g принимаем равной 90 см, а высота балки $h=92$ см (рисунок 6 б).

Требуемый момент инерции поперечного сечения сварной балки двутаврового профиля

$$I_{\text{тр}} = W_{\text{тр}} h / 2 = 2688 \cdot 46 = 123648 \text{ см}^4$$

Момент инерции подобранного вертикального листа 900x8 мм

$J_B = 90^3 \cdot 0,8 / 12 = 48600 \text{ см}^4$. Требуемый момент инерции горизонтальных листов балки (поясов) $J_{\Gamma} = J_{\text{тр}} - J_B = 123648 - 48600 = 75048 \text{ см}^4$. Момент инерции горизонтальных листов записывается в виде

$$J_{\Gamma} = 2[I_0 + F_2 (h_1 / 2)^2].$$

Величина $I_0 = h_6 \cdot s_6^3 / 12 = 90 \cdot 0,8^3 / 12 = 3,84 \text{ см}^4 \approx 0$.

Таким образом, требуемое сечение одного пояса балки равно

$$F_2 = J_{\Gamma} / [2(h_1 / 2)^2] = 75048 / (2 \cdot 45,5^2) = 18,1 \text{ см}^2.$$

Принимаем сечение горизонтального листа 180x10 мм.

Определим уточненное значение момента инерции подобранного поперечного сечения балки:

$$J = 90^3 \cdot 0,8 / 12 + 2(1^3 \cdot 18 / 12 + 1 \cdot 18 \cdot 45,5^2) = 48600 + 74532 = 123132 \text{ см}^4.$$

Наибольшее нормальное напряжение в крайнем волокне балки

$$\sigma_{\text{max}} = M \cdot y_{\text{max}} / J = 0,43 \cdot 0,46 / 123132 \cdot 10^{-8} = 160,7 \text{ МПа}.$$

Расчетное напряжение превышает допускаемое на 0,5%, что вполне приемлемо.

Определим касательное напряжение на уровне центра тяжести балки в опорном ее сечении по формуле $\tau = QS / (J \cdot S_B)$:

$$S = 18 \cdot 45,5 + 0,8 \cdot 45^2 / 2 = 819 + 810 = 1629 \text{ см}^3;$$

$$Q = 113,75 \text{ кН};$$

$$\tau = 0,11375 \cdot 1629 \cdot 10^{-6} / (123132 \cdot 10^{-8} \cdot 0,8 \cdot 10^{-2}) = 19 \text{ МПа}.$$

Определим эквивалентные напряжения в сечении, в котором наибольший изгибающий момент $M = 0,43 \text{ МН} \cdot \text{м}$ и поперечная сила $Q = 43,7 \text{ кН}$. Эквивалентные напряжения вычисляются на уровне верхней кромки вертикального листа в зоне резкого изменения ширины сечения. Вычислим в этом волокне балки напряжения от момента M :

$\sigma_I = M h_6 / (2J) = 0,43 \cdot 0,92 / (2 \cdot 0,00123132) = 157,2 \text{ МПа}$. В этом же волокне напряжение от поперечной силы Q

$$\tau_I = QS / J \cdot S_B = 0,0437 \cdot 819 \cdot 10^{-6} / (0,00123132 \cdot 0,8 \cdot 10^{-2}) = 3,65 \text{ МПа}.$$

Здесь $S = 18 \cdot 1 \cdot 45,5 = 819 \text{ см}^3$ – статический момент площади сечений горизонтального листа относительно центра тяжести.

Эквивалентное напряжение определяется по формуле

$$\sigma_{\text{экв}} = \sqrt{\sigma_I^2 + 3 \tau_I^2} = 157,4 \text{ МПа},$$

что меньше наибольшего нормального напряжения в крайнем волокне.

Переходим к расчету поясных швов. Катеты верхних и нижних поясных швов примем равными $K = 6 \text{ мм}$. В нижних поясных швах действуют касательные напряжения, равные $\tau = QS / (0,7 \cdot 2JK)$, где $Q = 113,75 \text{ Н}$; $S = 18 \cdot 1 \cdot 45,5 = 819 \text{ см}^3$; $J = 123132 \text{ см}^4$.

Отсюда $\tau = 0,11375 \cdot 819 \cdot 10^{-6} / (0,00123132 \cdot 2 \cdot 0,7 \cdot 0,006) = 9,2$ МПа.

Несмотря на то, что рабочие напряжения незначительны, по технологическим соображениям целесообразно оставить $K=6$ мм.

В верхних поясных швах при определении напряжений следует вычислять S с учетом приваренного рельса:

$$S = 18 \cdot 1 \cdot 45,5 + 5 \cdot 5 \cdot 48,5 = 2031 \text{ см}^3.$$

Момент инерции будем считать неизменившимся, как и положение центра тяжести балки. При этом

$$\tau = 0,11375 \cdot 2031 \cdot 10^{-6} / (0,00123132 \cdot 2 \cdot 0,7 \cdot 0,006) = 22,8 \text{ МПа.}$$

В верхних поясных швах к вычисленным напряжениям добавляются τ_r от сосредоточенной силы P . Как уже было установлено, длина зоны распределения сосредоточенной силы в вертикальном листе $z=18,7$ см (рисунок 6 з).

Таким образом, по формуле (9.34) [6] местное напряжение в шве ($n=0,4$) при $K=6$ мм

$$\tau_p = 0,4 \cdot 0,05 / (0,187 \cdot 2 \cdot 0,7 \cdot 0,006) = 12,7 \text{ МПа.}$$

Условное результирующее напряжение по формуле (9.35) [6]

$$\tau_{PEZ} = 26,1 \text{ МПа.}$$

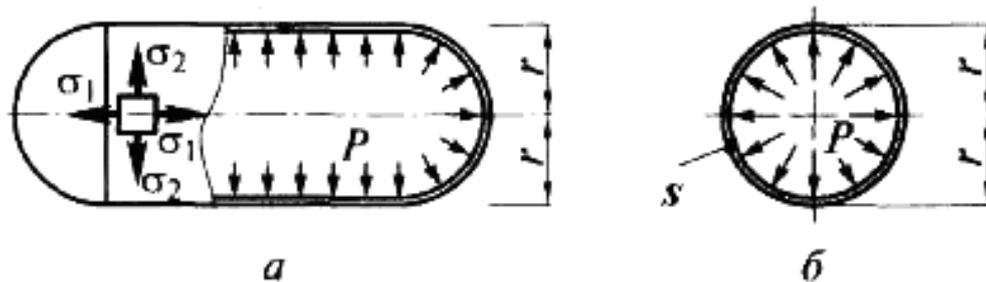
Допускаемое напряжение в поясных швах определим из соотношения $[\tau'] = 0,65[\sigma]_p = 104$ МПа.

Катеты швов, приваривающих ребра жесткости к поясам и стенкам, принимаем такими же, как и поясных швов, т.е. $K = 6$ мм. Эти швы не передают рабочих напряжений и расчету на прочность не подлежат.

Пример 6. Выполнить проверочный расчет прочности стыковых сварных швов корпуса цилиндрического сварного сосуда со сферическими днищами (рисунок 7), цилиндрическая часть сосуда сварена из отдельных цилиндрических обечаек, каждая из которых имеет по одному продольному стыковому шву. Отдельные обечайки сварены между собой кольцевыми швами. Все стыковые швы корпуса выполнены двусторонними с полным проплавлением и проконтролированы на предмет отсутствия внутренних дефектов физическими неразрушающими методами контроля. Наружный диаметр сосуда 2000 мм, толщина цилиндрической стенки корпуса $s = 24$ мм. Сосуд изготовлен из стали 09Г2С ГОСТ 19281-89 с допускаемым напряжением в основном металле $[\sigma]_p = 220$ МПа (2200 кгс/см^2). Внутреннее избыточное давление в сосуде $P = 0,5$ МПа.

Для цилиндрической оболочки (рисунок 7 а) $r_2 = \text{const} = r$, поэтому величина кольцевых напряжений:

$$\sigma_2 = \frac{Pr}{s}. \quad (35)$$



a - цилиндрическая оболочка; *б* – поперечное сечение корпуса

Рисунок 7 – Расчетная схема осесимметричных оболочек, нагруженных давлением P

Меридиональные (продольные) напряжения в корпусе определяются давлением P на торцы оболочки. Уравнение равновесия на продольную ось:

$$P \cdot \pi \cdot r^2 = \sigma_1 2 \pi \cdot r \cdot s,$$

откуда

$$\sigma_1 = \frac{Pr}{2s}. \quad (36)$$

В бесконечно длинных оболочках (при отсутствии днищ) $\sigma_1 = 0$. Для сферической оболочки (полусферического днища) (рисунок 7 б) имеем $r_1 = r_2 = r$, поэтому

$$\sigma_2 = \sigma_1 = \frac{Pr}{2s}. \quad (37)$$

т.е. меридиональные и кольцевые напряжения в сферическом днище одинаковы.

Для обеспечения равнопрочности стенки сосуда и стыкового сварного шва корпуса необходимо выбрать соответствующие сварочные материалы (таблица 11), где для стали 09Г2С рекомендуется при сварке под флюсом следующее сочетание флюса и проволоки:

АН-348А+Св10ГА.

При двухосном напряженном состоянии надо проверить приведенное напряжение по четвертой энергетической теории прочности, которое может быть больше, чем каждое из значений σ_1 и σ_2 :

$$\sigma_{np} = \sqrt{\sigma_1^2 - \sigma_1 \cdot \sigma_2 + \sigma_2^2}. \quad (38)$$

$$\sigma_1 = \frac{Pr}{2s} \quad \sigma_1 = 0,5 \cdot 1,0/2 \cdot 0,0024 = 104,1 \text{ МПа}$$

$$\sigma_2 = \frac{Pr}{s} \quad \sigma_2 = 0,5 \cdot 1,0/0,0024 = 208,3 \text{ МПа}$$

$$\sigma_{np} = \sqrt{104,1^2 - 104,1 \cdot 208,3 + 208,3^2} = 180,4 \text{ МПа}. \quad 180,4 < 220 \text{ МПа}$$

Условие прочности выполнено.

План проведения практических занятий

Занятие 1. Построение линий влияния усилий в стержнях плоской фермы

Студент получает индивидуальное задание по геометрии плоской фермы и схему ее нагружения. Необходимо пронумеровать отдельно каждый узел и стержень фермы. Структуру фермы необходимо проверить на статическую определенность и геометрическую неизменяемость [6, п. 3.4.2].

Линией влияния усилия в каком-либо стержне фермы называется график, показывающий закон изменения этого усилия в зависимости от положения подвижного единичного груза

P = 1. Методика построения линий влияния изложена в учебном пособии [6, п. 3.5].

Линии влияния усилий в стержнях плоской фермы необходимо построить для всех стержней одного наиболее сложного узла фермы (согласовать с преподавателем).

Занятие 2. Расчет усилий в стержнях фермы при подвижной нагрузке

Подвижная нагрузка (для этого занятия) представляет собой двухосную тележку с заданными нагрузками на каждое колесо. По построенным ранее линиям влияния (занятие 1) для каждого из заданных стержней определить усилие в стержне при каждом положении тележки, когда колесо расположено над очередным узлом фермы. Результаты расчетов оформить таблицей усилий с определением максимального значения усилия для каждого стержня.

Занятие 3. Расчет по методу конечных элементов плоской сварной фермы

По выданному заданию на занятии 1 по программе 3D FERM ввести данные о геометрии фермы, указав координаты узлов фермы, наличие опор и внешних нагрузок (окно 1).

В окно 2 ввести данные о связях каждого из стержней фермы, площадь его поперечного сечения и модуль упругости материала стержня.

Убедиться в правильности построения фермы, открыв окно «Изображение конструкции».

Занятие 4. Расчет усилий в стержнях фермы от заданной нагрузки по методу конечных элементов

Получить задание на геометрию грузовой тележки и значения внешних нагрузок. По программе 3D FERM, перемещая тележку с грузами из узла в узел, провести расчет усилий в заданных на занятии 1 каждом из стержней фермы

при каждом положении груза. Для заданных стержней составить таблицу с результатами изменения усилия от положения внешней нагрузки.

Определить по таблице максимальное значение усилия для каждого из заданных стержней.

Занятие 5. Подбор сечений сжатых и растянутых стержней фермы

По заданию руководителя изучить механические характеристики основного металла (стали строительные) σ_T , σ_B , R_y [2]. По методике, изложенной в разделе 7.5 и 8.5 [6] подобрать сечение стержней, заданного руководителем, узла фермы.

Подбор сечений сжатых элементов. Предельное состояние сжатых элементов ферм определяется их устойчивостью, поэтому проверка несущей способности этих элементов выполняется по формуле

$$N/(\varphi A) \leq R_y \gamma_c, \quad (38)$$

где γ_c - коэффициент условий работы, принимаемый по СНиП II-23-81 «Стальные конструкции».

Формула (38) содержит два неизвестных: площадь сечения A и коэффициент φ , являющийся функцией гибкости $\lambda = l_{ef}/i$ и типа сечения.

Для подбора сечения необходимо наметить тип сечения, задаться гибкостью стержня, определить по таблице 7.1 [6] коэффициент φ и найти требуемую площадь сечения

$$A_{mp} = N/(\varphi R_y \gamma_c). \quad (39)$$

При предварительном подборе можно принять для поясов легких ферм $\lambda = 60 \dots 80$ и для решетки $\lambda = 100 \dots 120$. Большие значения гибкости принимаются при меньших усилиях.

По требуемой площади подбирается по сортаменту подходящий профиль, определяются его фактические геометрические характеристики A , i_x , i_y , находятся $\lambda_x = l_x/i_x$; $\lambda_y = l_y/i_y$. По большей гибкости уточняется коэффициент φ и проводится проверка устойчивости по формуле (38). Если гибкость стержня предварительно была задана неправильно и проверка показала перенапряжение или значительное недонапряжение, то проводят корректировку сечения, принимая промежуточное между предварительно заданным и фактическим значениями гибкости. Обычно второе приближение достигает цели.

Подбор сечения растянутых элементов. Предельное состояние растянутых элементов определяется либо их разрывом $\sigma > \sigma_B$, где σ_B – временное сопротивление стали (предел прочности другими словами), либо развитием чрезмерных пластических деформаций $\sigma > \sigma_T$, где σ_T – предел текучести.

Стали с нормативным пределом текучести $R_{yn} < 44$ кН/см² имеют развитую площадку текучести, поэтому, как правило, несущая способность элементов из таких сталей проверяется исходя из условия развития пластических деформаций по формуле

$$\sigma = N/A_n < R_y \gamma_c, \quad (40)$$

где A_n - площадь сечения нетто.

Результаты расчетов оформить в виде таблицы (таблица 8.1) [6].

Занятие 6. Проектирование сварных соединений стержней в узле фермы

Подобранные на занятии 5 стержни необходимо приварить к узловой фасонке. Первоначально определяется способ дуговой сварки. Для заданной ранее строительной стали и выбранного способа сварки по таблице 55 [6] определить материалы для сварки, соответствующие классу стали, а по таблице 56 [6] определить расчетное сопротивление металла швов сварных соединений с угловыми швами R_{wf} . Расчет сварных соединений выполнять по СНиП II-23-81 (стр. 163 [6]), вычисляя при этом необходимый и достаточный катет шва и длину шва.

Занятие 7. Конструирование сварного узла фермы

Основы конструирования сварных узлов ферм изложены в разделах 8.5 и 8.6 [6].

Приступая к конструированию узла фермы, соблюдать требование: *осевые линии всех стержней узла фермы должны пересекаться в одной точке*. Вычертить на бумаге или с помощью компьютерной графики узел фермы с соблюдением углов наклона стержней. Правило конструирования легких и средних ферм рекомендует пояса ферм по возможности не разрезать, а выполнять из одного наибольшего профиля, что упрощает технологию изготовления ферм, несколько увеличивая расход металла. Вычертить пояс фермы в масштабе и наметить центр узла и оси всех стержней. Условно разместить прямоугольную пластину (фасонку) по центру узла без ограничения размеров фасонки. Надвигать условно стержень к поясному элементу до тех пор, пока наименьшее расстояние между надвигаемым стержнем и соседними стержнями будет равно (не менее) 3 толщин фасонки. При этом зафиксированном положении конца стержня отмерить в масштабе ранее вычисленную длину сварного шва (шов может быть как с двух сторон стержня, так и с четырех, например при стержнях из сдвоенных уголков или швеллеров). Найденная крайняя точка сварного шва будет краем фасонки. Соблюдая эти правила сконструировать присоединение всех стержней в узел.

По выполненному эскизу узла окончательно определить размеры фасонки с учетом масштаба чертежа.

Занятие 8. Проверка прочности узла от действия на него сочетания всех нагрузок

При наличии в узле фермы двух раскосов появляется в узле суммарная сдвигающая сила, действующая обычно вдоль пояса. Для предотвращения такого сдвига необходимо приварить фасонку с поясом. При расчете такого сварного шва использовать сварочные материалы и расчетное сопротивление металла швов сварных соединений с угловыми швами R_{wf} а также методику расчета по

занятию 6. По заданию руководителя проверить возможность вырыва растянутого раскоса с частью фасонки. При вероятности вырыва увеличить толщину фасонки или увеличить ее размеры. После корректировки геометрии расчет повторить.

Занятие 9. Расчет элементов стальных конструкций на выносливость

Стальные конструкции и их элементы непосредственно воспринимающие многократно действующие нагрузки с количеством циклов нагружений 10^5 и более следует проектировать с применением таких конструктивных решений, которые не вызывают значительной концентрации напряжений, и проверять расчетом на выносливость. Методика расчета приведена в соответствии с СНиП II-23-81 [6, Приложение]. В расчетах узла фермы учесть класс строительной стали, группу элемента конструкции по таблице 83, количество циклов нагружения, сжат или растянут элемент и коэффициент асимметрии цикла.

Расчет на выносливость следует производить по формулам (16), (17) и (18) методических указаний.

Занятие 10. Изучение сварных соединений выполняемых сваркой плавлением

Сварка плавлением дуговая и электрошлаковая являются основными способами соединения при изготовлении металлических конструкций.

Изучить стандарты на способы сварки:

- ручная дуговая по ГОСТ 5264-80;
- дуговая под слоем флюса по ГОСТ 8713-79;
- дуговая в среде защитных газов по ГОСТ 14771-76.

Сварные соединения под острыми и тупыми углами сваркой плавлением выполняются по ГОСТ 11533-75, ГОСТ 11534-75, ГОСТ 23518-79. Стандарты доступны в интернете.

Изучить буквенно-цифровые обозначения сварных швов, геометрические параметры подготовки кромок, сборки деталей под сварку и геометрию выполненных швов. Выполнить эскиз собранного под сварку соединения заданной толщины и эскиз выполненного шва.

Занятие 11. Условные обозначения сварных соединений в документации

Сварные соединения обозначаются по ГОСТ 2.312-72. Линия соединения двух деталей обозначается на чертеже сплошной основной линией. От линии шва вычерчивается односторонняя стрелка указатель на горизонтальной полке которой указывается ГОСТ на способ сварки, буквенно-цифровое обозначение шва, метод выполнения шва, катет шва, если такой параметр предусмотрен ГОСТ, длина шва или размеры прерывистого шва и дополнительные знаки [6, таблица 4.10].

Вычертить эскизы с обозначениями стыкового, углового и таврового сварных швов.

Занятие 12. Расчет сварных соединений, работающих на изгиб

При работе металлической пластины (стержня) на изгиб, силовым фактором является *изгибающий момент* $M_{изг}$, а фактором сопротивления пластины изгибу является геометрическая характеристика сечения – *момент сопротивления* W . В результате деления $M_{изг}$ на W мы получаем величину максимальных напряжений $\sigma_{изг}$, действующих на максимальном удалении от центра тяжести анализируемого сечения изгибаемой пластины.

Для заданных руководителем исходных данных выполнить расчет сварного таврового соединения стальной пластины с основанием в виде массивной плиты при полном проплавлении в корне шва [6, рисунок 4.11, *a*]. Сварочные материалы выбрать по рекомендации СНиП II-23-81. При условии полного проплавления корня шва и проведения физического неразрушающего метода контроля сварного шва расчетное сопротивление металла шва на отрыв можно принять равным R_Y для основного металла.

Занятие 13. Спроектировать нахлесточное сварное соединение равнопрочное привариваемой пластине при работе пластины и сварного шва на изгиб

Требование равнопрочности сварного соединения и основной несущей конструкции часто указывается в технических условиях изделия. При этом напряженно деформированное состояние конструкции не достаточно изучено, поэтому нет сведений о воздействиях на сварной шов, в этих условиях требование равнопрочности может быть с некоторым запасом, но обеспечит работоспособность проектируемой конструкции.

Руководитель занятия определяет студенту материал пластины и ее геометрию. Максимальный изгибающий момент $M_{изг}$ для изгибаемого стержня определится как функция момента сопротивления поперечного сечения W . Найденный $M_{изг}$ определяет и несущую способность нахлесточного сварного шва. Расчет предусматривает расчленение сварного шва на вертикальную и горизонтальные составляющие [6, п. 4.3 и рисунок 4.12]. В результате расчета должен быть определен катет шва и длина нахлестки пластины на основание.

Занятие 14. Знакомство со сварными соединениями выполняемыми контактными способами сварки

Контактные способы сварки относятся к классу сварки давлением. В процессе сварки давлением собранные детали сдавливают усилием P и нагревают зону сварки проходящим через контакт электрическим током высокой плотности при малом времени сварки [6, п. 4.5].

Стыковые сварные соединения стержней и труб получают при *контактной стыковой сварке сопротивлением или оплавлением*. Площадь поперечных сечений деталей, свариваемых контактной стыковой сваркой приближается к 1000 см^2 . Специальный расчет прочности стыков, сваренных контактным способом и работающих при статической нагрузке, не производится.

При *контактной точечной сварке* свариваемые детали устанавливаются внахлестку, сжимаются в месте постановки сварной точки электродами из медных сплавов и через контакт пропускается импульс тока высокой плотности, что приводит к расплавлению металла между электродами с последующей кристаллизацией и образованием литого ядра точки. Точечной контактной сваркой наиболее часто соединяют детали, имеющие малые толщины – от долей до нескольких миллиметров.

Для повышения качества соединений точечную сварку иногда заменяют *рельефной точечной сваркой*, при этом более точно фиксируется зона пропуска тока, уменьшается эффект шунтирования.

Точки в сварном соединении следует располагать таким образом, чтобы они воспринимали преимущественно усилия среза, а не отрыва.

При *контактной шовной сварке* между соединяемыми внахлестку элементами образуется шов путем постановки ряда точек, перекрывающих друг друга. Шовная сварка допускает возможность соединения элементов от весьма малых толщин до суммарной толщины 4–6 мм из сталей и цветных сплавов.

Изучить по учебному пособию [6] и ГОСТ 15878–79 основные способы контактной сварки.

Занятие 15. Проектирование точечного сварного соединения

В большинстве случаев контактной точечной сваркой соединяют изделия при условии расположения электродов с двух сторон относительно свариваемых частей. Точки в сварном соединении следует располагать таким образом, чтобы они воспринимали преимущественно усилия среза.

Чем больше расстояние между сварными точками, тем меньше шунтирование сварочного тока, следовательно, стабильнее результаты сварки. Диаметр точки d назначается в зависимости от толщины свариваемых элементов и может быть определен по эмпирической формуле: $d = 2 \cdot s + (2-3)$ мм, где s – толщина свариваемых листов. Диаметр электрода d_e контактной машины назначается исходя из необходимого диаметра точки d . При необходимости по условиям прочности постановки большого количества точек, их располагают в несколько рядов [6, рисунок 4.20]. При расчете прочности точечного соединения определяется площадь среза и максимальное усилие, которое точка выдержит при работе на срез.

Спроектировать точечное сварное соединение двух стальных полос равнопрочное основной полосе с меньшими размерами. Разместить многорядное точечное соединение по рекомендациям [6].

Занятие 16. Изучение электрошлаковых сварных соединений

Способ электрошлаковой сварки (ЭШС) разработан коллективом Института электросварки им. Е.О. Патона (Киев) в середине прошлого века. Он отличается тем, что источником нагрева при сварке служит тепло, выделяющееся в ванне расплавленного флюса при прохождении через нее тока от электрода к изделию. Способ применяется при изготовлении металлических конструкций тол-

щиной, как правило, > 20 мм. ЭШС можно наиболее эффективно соединять металл практически неограниченной толщины [8, глава 6].

Шлаковая ванна образуется в результате расплавления сварочного флюса. В течение всего процесса глубина шлаковой ванны, находящейся в зазоре между свариваемыми кромками, закрытыми с боков формирующими водоохлаждаемыми устройствами (ползунами, накладками) или остающимися стальными пластинами, сохраняется, как правило, постоянной. Сварочный ток, проходя через шлаковую ванну между погруженными в нее электродами (проволочными, пластинчатым или плавящимся мундштуком) и металлической ванной, поддерживает высокую температуру и электропроводность шлака. Металлическая ванна, кристаллизуясь, образует сварной шов.

Изучить по учебному пособию [8] сущность ЭШС, познакомиться по ГОСТ 15164-78 с типами сварных соединений и геометрией подготовки свариваемых кромок и сварных швов.

Занятие 17. Изучение конструкции и методики расчета решетчатых мостов

Конструктивно пролетное строение решетчатого моста состоит из плоских систем – вертикально расположенных главных ферм, горизонтальных ферм связей и балочной клетки проезжей части моста. Продольные и поперечные балки проезжей части, работая на изгиб под действием вертикальной нагрузки от веса поезда, передают эту нагрузку через узлы нижнего пояса на главные фермы. Таким образом, главные фермы работают под нагрузкой, действующей в их плоскостях. Фермы связей работают под нагрузкой, направление действия которой также совпадает с их плоскостями [7].

Расчет ферм на прочность и жесткость проводится с предположительными условиями, что нагрузка к ферме приложена в узлах и стержни ферм работают исключительно на осевые (продольные) усилия. По действующим в настоящее время СНиП 2.05.03-84 расчет усилий в стержнях выполняется по линиям влияния.

Наряду с графо-аналитическим методом расчета по линиям влияния сейчас разработан метод конечных элементов (МКЭ), который для стержневых систем типа ферм является точным методом расчета [6]. По методу МКЭ имеется программа 3D FERM, позволяющая численно описать объемную стержневую конструкцию решетчатого моста, установить в узлах все виды нагрузок: собственный вес, вес движущегося поезда (автотранспорта), боковые ветровые нагрузки и продольные силы торможения. При таком сочетании нагрузок, постепенно загружая мост с шагом на одну панель подвижной нагрузкой можно смоделировать движение поезда (автотранспорта) по мосту и в итоге определить величину максимальных усилий в каждом из стержней моста, рассчитать необходимое и достаточное сечение каждого стержня. В созданную программой 3D FERM модель моста ввести найденные площади поперечного сечения каждого из стержней (программа DVV) и при полном загрузении моста рассчитать максимальный вертикальный прогиб моста как показатель критерия необходимой жесткости наряду с прочностью металлоконструкции.

Занятие 18. Изучение конструкции и методики расчета вертикальных цилиндрических резервуаров для хранения нефтепродуктов

Наземные вертикальные цилиндрические резервуары проектируют, как правило, с плоским днищем. Типовые резервуары разработаны для нефтепродуктов объемом 100-5000 м³ [9]. Имеются проекты резервуаров вместимостью на 10000, 20000 и до 100000 м³. Основными расчетными конструктивными элементами наземного резервуара являются стенка (корпус) и покрытие. Днище испытывает только сжатие от давления жидкости и изготавливается обычно из стальных листов толщиной 4 мм. Однако в соединении днища со стенкой требуется проверка местных напряжений, возникающих при действии опорных краевых моментов.

Толщину стенки резервуара определяют по расчету на прочность от гидростатического давления столба жидкости и назначают вверху резервуара не менее 4 мм. По высоте резервуара листы стенки можно располагать встык при толщине 6 мм и более. Листы соединяют сплошными двусторонними стыковыми швами. Кромки листов, соединяемых встык, строгают в единый размер на 5 мм и более с каждой стороны. Монтажные соединения полотнищ днища и корпуса выполняют внахлестку. Для экономии металла нижние пояса резервуаров 10000 м³ и более проектируют из низколегированной стали повышенной прочности.

Покрытие резервуаров обычно проектируют коническим из крупноразмерных щитов заводского изготовления. Щиты состоят из тонких покрывающих листов толщиной 2,5-3 мм, уложенных на каркас, выполняемый из двутавров, швеллеров или уголков. Центральная стойка (трубчатая или решетчатая) используется и как каркас для рулонирования стенки резервуара.

В резервуарах специальных типов вместимостью 10000-100000 м³ для хранения легкоиспаряющихся жидкостей (бутана, сырой нефти и др.) применяют плавающие крыши или понтоны и стационарные покрытия, позволяющие значительно сократить потери жидкостей при испарении.

Занятие 19. Изучение конструкции и методики расчета сферических резервуаров для сжиженных газов

Сферические резервуары экономичнее цилиндрических по количеству израсходованного металла на 1 м³ хранимого продукта, поэтому они используются для хранения жидкостей и сжиженных газов под высоким избыточным внутренним давлением от 0,25 до 1,80 МПа. После опорожнения резервуаров и при понижении температуры в них возможен вакуум [4].

Резервуар представляет собой сферическую оболочку, установленную на стальных опорах. Объем резервуаров обычно не превышает 4000 м³. Чаще всего используются резервуары объемом 600 и 2000 м³, имеющие диаметр соответственно 10,5 и 16 м.

Резервуары оборудуют приемо-раздаточными патрубками, предохранительными клапанами и приборами для замера уровня и давления продукта.

Вверху и внизу корпуса размещают люки-лазы диаметром 500 мм, а оболочку в этих местах усиливают накладками.

Оболочки резервуаров изготавливают из сталей классов С345 – С440. Толщина их может достигать 36 мм.

Корпус резервуара собирают и сваривают на монтаже из отдельных лепестков, изготавливаемых на заводе. Число и размеры лепестков зависят от схемы раскроя оболочки, которая определяется размерами корпуса и типом опорной конструкции и влияет на количество отходов металла и на протяженность сварных швов.

Размеры лепестков увязываются с размерами стандартных листов, а их количество в экваториальном сечении — с длиной окружности резервуара и обычно принимается кратным 4. Контуры лепестков вырезают из плоских заготовок, состоящих из одного или нескольких предварительно состыкованных листов с учетом вытяжки металла.

Для придания лепесткам требуемой двойкой кривизны их на заводе подвергают штамповке или вальцовке.

Форма разделки кромок лепестков зависит от толщины листов, способа сварки, положения стыка в пространстве при сварке с вращением или без вращения сферы.

Метод сварки лепестков зависит от способа их монтажа, определяющего пространственное положение стыка во время выполнения сварного шва. Существуют три основных способа монтажа.

1 Изготовление оболочки при вращении на манипуляторе с автоматической сваркой под флюсом. При этом возможна горизонтальная или вертикальная ориентация меридиональных лепестков или укрупненных блоков. Сварка производится снаружи и внутри корпуса только в нижнем положении. Способ дорогостоящий, ограничивающий условия сборки резервуара и приводящий к большой продолжительности сроков монтажа.

2 Изготовление оболочки с периодическим поворотом при сборке и полуавтоматической сваркой горизонтальных швов на вертикальной плоскости. Способ предполагает горизонтальную ориентацию меридиональных лепестков оболочки и поворот ее вокруг горизонтальной оси по мере установки лепестков или блоков из них.

3 Сборка и сварка оболочки в проектном положении. При этом монтируемая оболочка опирается непосредственно на опорные стойки или опорное кольцо, а сварка производится в различных пространственных положениях. Таким способом удобно собирать оболочки с многопоясным раскроем из блоков, состоящих из двух-трех лепестков. Монтаж начинают с установки нижнего днища, затем собирают сначала нижнюю полусферу из блоков лепестков, а после выполнения сварочных работ – верхнюю полусферу. Внутри и снаружи резервуара устанавливают поворотные лестницы. Сварка может быть ручная, полуавтоматическая, а также автоматическая с принудительным формированием шва.

Расчет стенки оболочки на прочность производится на действие внутреннего избыточного давления и гидростатического давления продукта в полностью заполненном резервуаре.

Минимальную расчетную толщину стенки в нижней точке корпуса определяют из условия прочности сварных стыковых швов.

Устойчивость стенки сферической оболочки проверяется при действии вакуума в пустом резервуаре.

Занятие 20. Изучение конструкции и методики расчета металлоконструкций мостовых кранов со сплошной стенкой

Металлические конструкции грузоподъемных машин (мостовых кранов) выполняют сварными из стальных листов, стального фасонного проката, гнутых и штампованных профилей. Расчетные (несущие) элементы металлоконструкций кранов тяжелого режима работы изготавливают из стали СтЗсп. С целью снижения веса металлоконструкций кранов, размеры сечений расчетных элементов которых определяются не условиями жесткости, а условиями прочности, применяют низколегированные стали марок 10ХСНД, 15ХСНД, 10Г2СД и др.

Мосты кранов в зависимости от назначения, грузоподъемности и пролета выполняют двухбалочными и однобалочными. В двухбалочных мостах металлоконструкция выполняется составленной из двух коробчатых пространственно жестких балок, соединенных между собой с концевыми коробчатыми балками, в которых установлены ходовые колеса крана. При этом основные вертикальные и горизонтальные инерционные нагрузки воспринимаются всем сечением балок, размеры конструкции которых должны обеспечивать пространственную жесткость системы. Крановая тележка перемещается по рельсам, уложенным на верхних поясах основных балок.

Основные параметры и размеры кранов различной грузоподъемности и пролетов приведены в справочной литературе [10; 13].

Пример расчета сварной металлоконструкции моста крана с коробчатыми балками приведен в [11].

Занятие 21. Изучение конструкции и методики расчета решетчатых металлоконструкций мостовых кранов

Мосты кранов в зависимости от назначения, грузоподъемности и пролета выполняют двухбалочными и однобалочными. В двухбалочных мостах металлоконструкция выполняется в виде пространственной системы, составленной из двух вертикальных и двух горизонтальных ферм.

Вертикальная ферма, воспринимающая через рельсы, уложенные на ее верхнем поясе, основную нагрузку от веса тележки с грузом, является главной фермой. Параллельно главной ферме располагается вспомогательная вертикальная ферма, соединяющаяся с главной фермой двумя горизонтальными вспомогательными фермами, которые воспринимают горизонтальные нагрузки, возникающие при торможении крана. Главные и вспомогательные фермы крепят к концевым балкам, в которых располагаются ходовые колеса крана. Механизм

передвижения моста этого типа обычно располагают на верхней горизонтальной вспомогательной ферме.

Основные параметры и размеры кранов с решетчатыми фермами различной грузоподъемности и пролетов приведены в справочной литературе [10; 13].

Пример расчета сварной металлоконструкции кранового моста с решетчатыми фермами приведен в книге [12].

Список литературы

- 1 СНИП. 2.01.07-85. Нагрузки и воздействия. Взамен главы СНИП II-6-74. Введ. 1987-01-01.
- 2 СНИП II-23-81*. Стальные конструкции. Взамен СНИП II В.3-72; СНИП II-И.9-62; СН 376-67. Введ. 1982-01-01. С изм. и доп.
- 3 Казаков С. И., Гончаров А. Е. Свариваемость. Свариваемые и сварочные материалы. Прочность и деформации : справочное пособие. Ч. 1: Свариваемость. Курган : Изд-во Курганского гос. ун-та, 2009. 156 с.
- 4 Кудишин Ю. И., Беленя Е. И., Игнатьева В. С. и др. Металлические конструкции : учебник для студ. высш. учеб. заведений / под ред. Ю.И. Кудишина. 11-е изд. М.: «Академия», 2008. 688 с.
- 5 Петропавловский А. А., Богданов Н. Н. и др. Проектирование металлических мостов / под ред. А. А. Петропавловского. М. : Транспорт, 1982. 320 с.
- 6 Казаков С. И. Проектирование сварных конструкций : учебное пособие. Курган : Изд-во Курганского гос. ун-та, 2012. 175 с.
- 7 Денисов Ю. А. Проектирование металлических пролетных строений железнодорожных мостов с решетчатыми фермами : учебное пособие. Курган : Изд-во Курганского гос. ун-та, 2001. 205 с.
- 8 Казаков С. И. Сварка плавлением и термическая резка металлов : учебное пособие. Курган : Изд-во Курганского гос. ун-та, 2014. 365 с.
- 9 Мандриков А. П. Примеры расчета металлических конструкций : учебное пособие. 3-е изд. СПб. : Лань, 2012. 432 с.
- 10 Справочник по кранам/ под ред. А. И. Дукельского. М.: Машгиз, 1983. 340 с.
- 11 Руденко Н. Ф., Александров М. П., Лысяков А. Г. Курсовое проектирование грузоподъемных машин. М. : Машиностроение, 1971. 464 с.
- 12 Николаев Г. А и др. Расчет, проектирование и изготовление сварных конструкций : учебное пособие для вузов. М.: Высш. школа, 1971. 760 с.
- 13 Справочник по кранам : в 2 т. Т. 2. Характеристики и конструктивные схемы кранов / Александров М. П., Гохберг М. М., Ковин А.А. и др.; под ред. М. М. Гохберга. М.: Машиностроение, 1988. 559 с.
- 14 Общемашиностроительные нормативы времени на электрошлаковую сварку. М. : Экономика, 1990. 75 с.
- 15 ГОСТ 31385-2008. Резервуары вертикальные цилиндрические стальные для нефти и нефтепродуктов. Введ. 2010-07-01. М. :Стандартинформ, 2010. 53 с.
- 16 Куркин С. А., Ховов В. М., Рыбачук А. М. Технология, механизация и автоматизация производства сварных конструкций: Атлас : учеб. пособие для студентов вузов. М. : Машиностроение, 1989. 328 с.

Казаков Сергей Иванович

ПРОЕКТИРОВАНИЕ СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Методические указания
для проведения практических занятий
для студентов специальности 150202.65 и
направления 15.03.01.62
(профиль «Оборудование и технология сварочного производства»)

Редактор Е. А. Могутнова

Подписано в печать	Формат 60x84x1/16	Бумага 65 г/м ²
Печать цифровая	Усл. печ. л. 3,25	Уч.-изд. л. 3,25
Заказ	Тираж 25	Не для продажи

РИЦ Курганского государственного университета.
640000, г. Курган, ул. Советская, 63/4.
Курганский государственный университет.