

ГОСУДАРСТВЕННОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Оборудование и технология сварочного производства»

ПРОЕКТИРОВАНИЕ СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Методические указания к выполнению практических занятий



Могилев 2015

Содержание

Практическое занятие № 1. Расчет элементов сварных соединений, выполненных встык и нахлестку по предельному состоянию и допускаемым напряжениям (2 часа).....	3
Практическое занятие № 2 Расчет сварных соединений, выполненных контактной точечной сваркой (2 часа).....	11
Практическое занятие № 3 Расчет сварных соединений, выполненных из элементов, имеющих несимметричное сечение (2 часа)	15
Практическое занятие № 4 Расчет и подбор сечений двутавровых балок (4 часа).....	19
Практическое занятие № 5 Расчет и подбор сечений стоек и опорных коробчатых балок (4 часа).....	26
Практическое занятие № 6 Расчет конструкций оболочкового типа	32
(4 часа).....	32
Литература	

Практическое занятие № 1. Расчет элементов сварных соединений, выполненных встык и нахлестку по предельному состоянию и допускаемым напряжениям (2 часа)

Методы расчета сварных соединений на прочность подразделяются на 2 основные группы (рисунок 1).

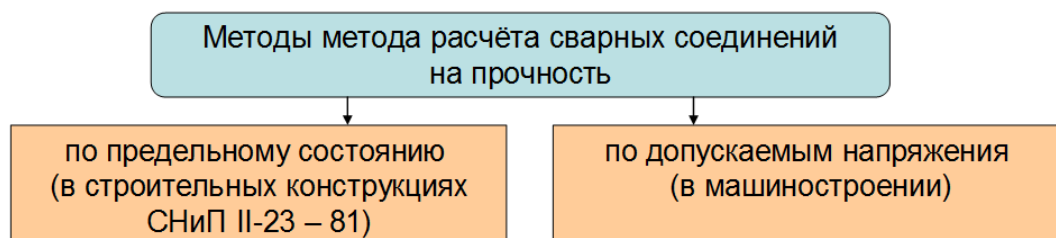


Рисунок 1 – Методы расчета сварных соединений на прочность

Расчеты по **предельному состоянию** (по несущей способности) приняты в строительных организациях. Существует несколько предельных состояний, ограничивающих возможность нормальной эксплуатации конструкций. Первое расчетное предельное состояние определяется несущей способностью конструкции: ее прочностью, устойчивостью, выносливостью при динамических и переменных нагрузках. Второе расчетное предельное состояние обусловлено наибольшей деформацией конструкции: прогибами при статических нагрузках, колебаниями при динамических. Третье расчетное предельное состояние характеризуется максимально допустимыми местными повреждениями, например, величиной раскрытия трещин, коррозией и т. п.

В большинстве случаев расчет металлических конструкций производится по первому предельному состоянию — по условию прочности, однако в отдельных случаях размеры частей конструкции устанавливают в зависимости от предельно допустимых деформаций. При этом расчет производится по условию жесткости.

В основу расчета по первому предельному состоянию положены так называемые **нормативные сопротивления $R^{норм}$** . В качестве нормативного сопротивления принят минимальный предел текучести стали σ_T (или предел прочности σ_B).

С учетом неоднородности свойств стали нормативные сопротивления заменяются **расчетными сопротивлениями R** . Расчетное сопротивление устанавливают равным пределу текучести σ_T , деленному на коэффициент надежности по материалу K_H , который для проката и труб равен $1,025 \div 1,1$.

Расчетные сопротивления сварных соединений для различных видов соединений и напряженных состояний приведены в табл. 1.

Таблица 1 - Расчетные сопротивления

сварных соединений

Тип сварного соединения	Напряженное состояние	Обозначение	Расчетные сопротивления сварных соединений по пределу текучести, МПа						
			тип сварочного материала						
			Э42 Э42А Св-08, Св-08А	Э46 Э46А Св-08ГА	Э50 Э50А Св-10ГА, Св-08Г2С	Э55	Э60 Э60А Св-10НМА, Св-10Г2	Э70	Э85 Св-10ХГ2 СМА
стыковое	Сжатие	$R_{CЖ}^{CB}$	210	260	280	340	380	440	530
	Растяжение, изгиб: а) автоматическая, механизированная и РДС с физическим контролем качества швов	R_P^{CB}	210	260	280	340	380	440	530
	б) механизированная и РДС (визуальный контроль)		180	220	250	-	-	-	-
	Срез	R_{CP}^{CB}	130	150	170	200	230	260	310
угловой	Срез	$R_{УГ}^{CB}$	150	180	200	220	240	280	340

При расчете по первому предельному состоянию находят величины допускаемых усилий в элементах. Допускаемые усилия определяют с учетом коэффициента возможной *перегрузки конструкции* и *коэффициента условий работы*, учитывающего специфический характер работы конкретных объектов рассматриваемой области техники. Коэффициенты перегрузки и условий работы определяют для стропильных ферм зданий, резервуаров, трубопроводов и т. п. на основе всестороннего изучения работы конструкции

Коэффициент перегрузки обычно принимают равным от 1 до 1,2; коэффициент условий работы для балок, колонн, резервуаров — от 0,8 до 0,9.

Допускаемые усилия в элементе при продольной силе определяют по формуле:

$$N_{\text{доп}} \leq R \frac{m}{n} A_w \quad (1.1)$$

где A_w — площадь сечения элемента.

Аналогичным путем находят допускаемый момент при изгибе:

$$M_{\text{доп}} \leq R \frac{m}{n} W. \quad (1.2)$$

где W — момент сопротивления расчетного сечения

Таким образом, основными расчетными формулами для проверки прочности являются выражения 1.1 и 1.2.

Задание №1. Требуется провести расчет сварного соединения с угловыми швами на действие усилия отрыва N (см. рисунок 2) по первому предельному состоянию.

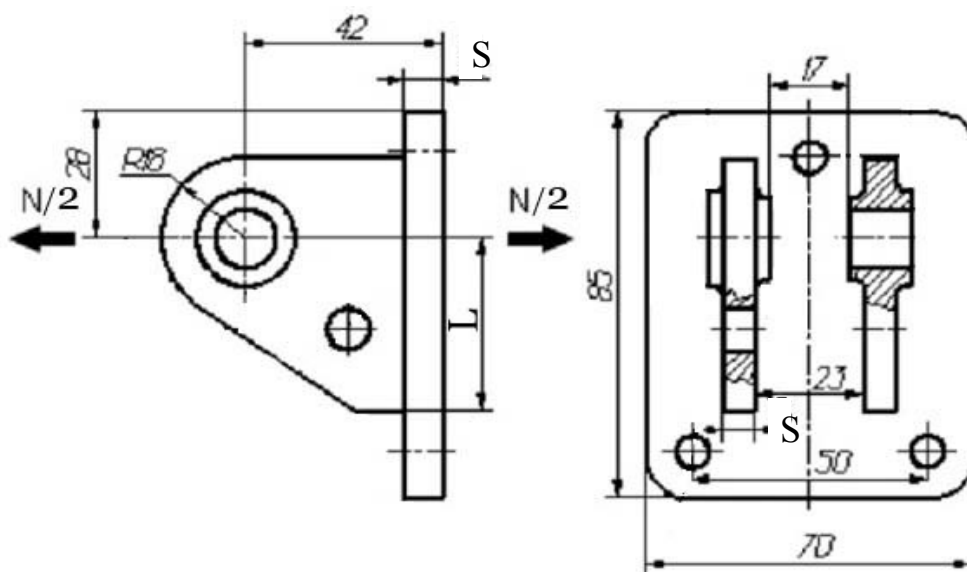


Рисунок 2 – Расчетная схема

Сила N и размеры, необходимые для проведения расчета, выбираются из таблицы 2 согласно варианту, выданному преподавателем.

Таблица 2 – Исходные данные для расчета

№Варианта	Способ сварки, положение сварки	Материал конструкции	Минимальный предел прочности стали σ_B^{min} , МПа	Сварочные материалы	Сила N , кН	Толщина S , мм	Длина изделия L , мм	Коэффициент условий работы γ_c
1	РДС, нижнее	09Г2С	450	Э50А Ø 3	40	3	30	1
2	механизир. в CO_2 , нижнее	09Г2С	450	Св-08Г2С Ø 1,2	50	4	30	
3	автомат.под флюсом, в лодочку	ВСт3сп	370	Св-08А Ø 1,6	85	5	40	
4	РДС, в лодочку	Сталь 20	390	Э42 Ø 4	80	6	40	

Решение. Сварные соединения с угловыми швами при действии продольной и поперечной сил согласно СНиП II-23-81 следует рассчитывать на срез (условный) по двум сечениям (рисунок3):

- по металлу шва (сечение 1)

$$N/(\beta_f K l_{шва}) \leq R_{wf} / \gamma_{wf} \gamma_c \quad (1.3)$$

- по металлу границы сплавления (сечение 2)

$$N/(\beta_z K l_{\text{шва}}) \leq R_{wz} \gamma_{wz} \gamma_c, \quad (1.4)$$

где $l_{\text{шва}}$ — эффективная длина шва, принимаемая меньше его полной длины на 10 мм при отсутствии выводных планок;

β_f и β_z — коэффициенты, принимаемые при сварке элементов из стали: с пределом текучести до 530 МПа — по таблице 3; с пределом текучести свыше 530 МПа 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 III₃, для которых $\gamma_{wf} = 0,85$ для всех сталей;

R_{wf} — расчетное сопротивление угловых швов срезу (условному) по металлу шва, МПа

R_{wz} — расчетное сопротивление угловых швов срезу (условному) по металлу границы сплавления, $R_{wz} = 0,45 \sigma_B^{\text{min}}$, МПа

Из формул 1.3 и 1.4 находим значения катета шва K для двух вариантов расчетных сечений и принимаем значение катета, обеспечивающее прочность сварного соединения.

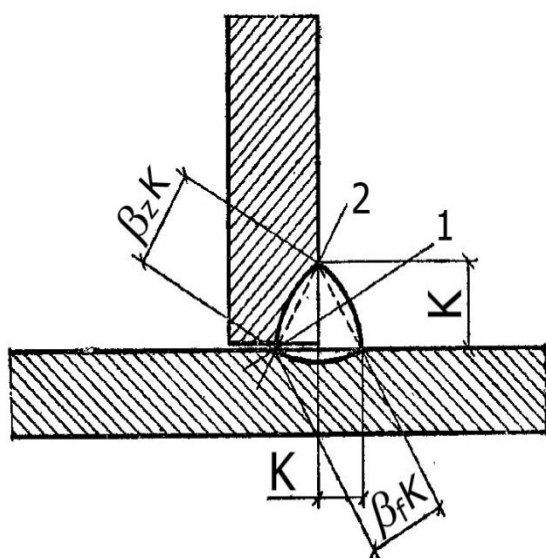


Рисунок 3 - Схема расчетных сечений сварного соединения с угловым швом: 1 — сечение по металлу шва; 2 — сечение по металлу границы сплавления

Таблица 3 – Значения коэффициентов β

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 $d=3—5$	В лодочку	β_f	1,1		0,7	
		β_z	1,15		1	
	Нижнее	β_f	1,1	0,9	0,7	
		β_z	1,15	1,05	1	
Автоматическая и полуавтоматическая при $d=1,4—2$	В лодочку	β_f	0,9	0,8	0,7	
		β_z	1,05	1		
	Нижнее, горизонтальное, вертикальное	β_f	0,9	0,8	0,7	
		β_z	1,05	1		
Ручная; полуавтоматическая проволокой сплошного сечения при $d<1,4$ или порошковой проволокой	В лодочку нижнее, горизонтальное, вертикальное, потолочное	β_f	0,7			
		β_z	1			

$$R_{wf} = 0,55 \frac{R_{wun}}{\gamma_{wm}} \quad (1.6)$$

где R_{wun} – нормативное сопротивление металла шва по временному сопротивлению, МПа.

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.

Для швов, выполняемых ручной сваркой, значения R_{wun} следует принимать равными значениям временного сопротивления разрыву металла шва σ_B^{min} . Для швов, выполняемых автоматической или механизированной сваркой, значение R_{wun} следует принимать по таблице 4.

Таблица 4 – Значения нормативного сопротивления металла шва

Марки проволоки (по ГОСТ 2246–70*) для автоматической или механизированной сварки		Марки порошковой проволоки (по ГОСТ 26271–84)	Значения нормативного сопротивления металла шва R_{wun} , МПа
под флюсом (ГОСТ 9087–81*)	в углекислом газе (по ГОСТ 8050–85) или в его смеси с аргоном (по ГОСТ 10157–79*)		
Св-08, Св-08А	–	–	410
Св-08ГА	–	–	450
Св-10ГА	Св-08Г2С	ПП-АН8, ПП-АНЗ	490
Св-10НМА, Св-10Г2	Св-08Г2С*	–	590
Св-09ХН2ГМЮ Св-08Х1ДЮ	Св-10ХГ2СМА Св-08ХГ2ДЮ	–	685
* При сварке проволокой Св-08Г2С значения R_{wun} следует принимать равным 590 МПа (6000 кгс/см ²) только для угловых швов с катетом $k_f \leq 8$ мм в конструкциях из стали с пределом текучести 440 МПа (4500 кгс/см ²) и более.			

Минимальный катет шва в машиностроении принимают равным 3 мм, исключения составляют конструкции, в которых толщина самого металла менее 3 мм. Верхний предел толщины швов не ограничен, но катеты свыше 20 мм встречаются крайне редко.

Задание №2. Требуется провести расчет стыкового сварного соединения (с толщиной деталей S) по допускаемым напряжениям. На шов действует усилие отрыва N (см. рисунок 3). В результате расчета необходимо найти длину шва L , при которой шов сможет воспринимать заданное усилие.

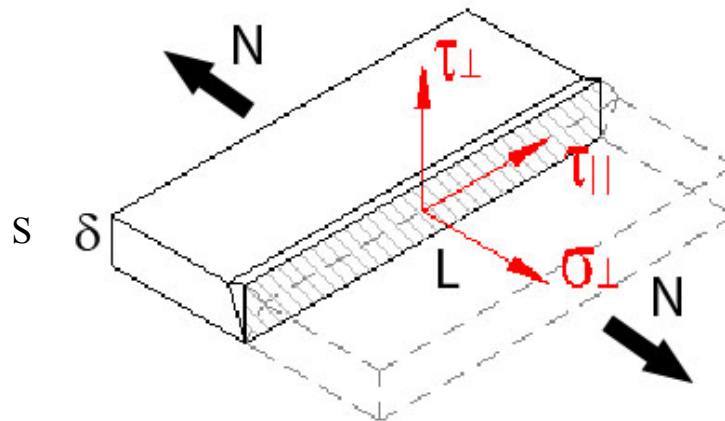


Рисунок 3 – Расчетная схема стыкового шва

Сила N и размеры, необходимые для проведения расчета, выбираются из таблицы 3 согласно варианту, выданному преподавателем.

Таблица 3– Исходные данные для расчета

№Варианта	Способ сварки, материал	Допускаемое напряжение на растяжение металла $[\sigma]_p$, МПа	Сварочные материалы	Толщина S , мм	Сила N , кН
1	РДС, Ст3.	160	Э42А Ø 3	3	20
2	РДС, Ст3.	144	Э42 Ø 4	4	30
3	под флюсом, Ст3.	160	Св-08А Ø 1,2	7	100
4	механизир. в CO_2 , Ст3.	160	Св-08Г2С Ø 1,2	3	50

Решение. В основу расчета машиностроительных конструкций и соединений положены **ДОПУСКАЕМЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ**, которые устанавливаются в зависимости от следующих факторов: свойств материалов, степени точности расчета прочности, рода усилий (растяжение, сжатие, изгиб и срез); качества технологического процесса; характера нагрузок (переменные или статические).

Допускаемые напряжения при **растяжении** $[\sigma]_p$ называют **ОСНОВНЫМИ**. Допускаемые напряжения при других видах усилий определяются как производные от $[\sigma]_p$ (см. таблицу 4). Допускаемые напряжения в швах машиностроительных конструкций устанавливаются в зависимости от допускаемых напряжений основного металла.

Например, при сварке низкоуглеродистой стали марки Ст. 3, для которой допускаемое напряжение $[\sigma]_p = 160$ МПа, допускаемые напряжения в швах, выполненных автоматической сваркой и электродами Э42А, будут следую-

щие: $[\sigma']_p = 160$ МПа; $[\sigma']_{сж} = 160$ МПа; $[\tau'] = 100$ МПа. При сварке электродами Э42 — $[\sigma]_p = 144$ МПа; $[\sigma']_{сж} = 160$ МПа; $[\tau'] = 96$ МПа, где $[\tau']$ -допускаемое напряжение в шве при срезе.

Таблица 4 Допускаемые напряжения для швов соединений низкоуглеродистых сталей обыкновенного качества

Род усилия	Тип шва	Процесс сварки	Допускаемое напряжение
Растяжение, сжатие	Стыковой	Дуговая, автоматическая и механизированная под флюсом, в CO_2	$[o]_p$
		Дуговая электродами Э42А, Э46А, Э50А	$[o]_p$
		Контактная, диффузионная	$[o]_p$
		Электроннолучевая	$[o]_p$
Срез	Угловой	Дуговая, автоматическая и механизированная под флюсом, в CO_2	$0,8[o]_p$
	Стыковой	Дуговая, автоматическая и механизированная под флюсом, в CO_2	$0,65[o]_p$

Сварные соединения сталей, выполненные дуговой сваркой, по определению допускаемых напряжений делят на две группы.

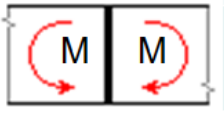
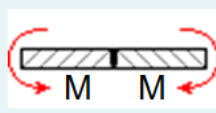
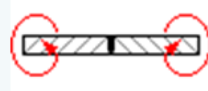
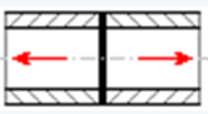
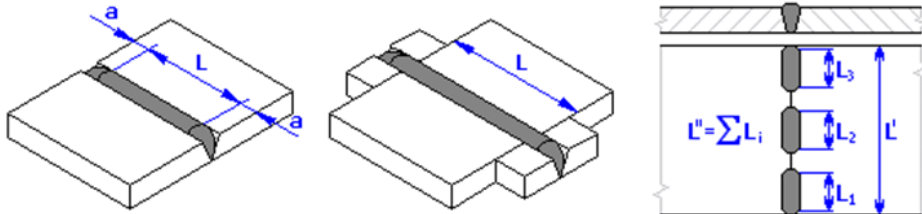
К первой группе относятся швы низкоуглеродистых сталей обыкновенного качества и низколегированных, у которых механические свойства швов и околошовной зоны соответствуют свойствам основного металла. Для швов второй группы сталей допускаемые напряжения назначаются на основе специально проведенных экспериментов в условиях, соответствующих работе проектируемой сварной конструкции, видам соединений и т. д.

Аналогичным образом допускаемые напряжения назначаются на основе специальных экспериментов для соединения сталей первой группы при холодной сварке, сварке трением, ультразвуком и другими специальными методами.

Для сварных швов, нагруженных комбинированной нагрузкой, результирующие эквивалентные напряжения в шве определяются следующим соотношением:

$S_w = \sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3 \cdot (\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)}$. Зависимости для определения отдельных компонент напряжений представлены в таблице 5.

Таблица 5 – Формулы для расчета компонент напряжений в стыковых швах

Схема нагружения	Компонента напряжений, МПа
Растяжение/ Сжатие 	$\sigma_{\perp} = \frac{N}{A_w} = \frac{N}{L \cdot a}$
Сдвиг (срез) 	$\tau_{\parallel} = \frac{N}{A_w} = \frac{N}{L \cdot a}$
Изгиб 	$\sigma_{\perp} = \frac{M}{W} = \frac{6 \cdot M}{a \cdot L^2}$
Изгиб 	$\sigma_{\perp} = \frac{M}{Z_w} = \frac{6 \cdot M}{L \cdot a^2}$
Кручение 	$\tau_{\perp} = \frac{T}{Z_w} = \frac{T}{\delta \cdot L \cdot a^2} \quad \delta \approx \frac{L}{3L + 1.8a}$
Растяжение косой шов 	$\sigma_{\perp} = \frac{N \cdot \cos(\delta)}{A_w} = \frac{N \cdot [\cos(\delta)]^2}{L \cdot a}$ $\tau_{\parallel} = \frac{N \cdot \sin(\delta)}{A_w} = \frac{N \cdot \sin(2\delta)}{2 \cdot L \cdot a}$
Растяжение Сжатие 	$\sigma_{\perp} = \frac{N}{A_w} = \frac{4 \cdot N}{\pi \cdot (D^2 - d^2)} \quad d = D - 2 \cdot a$
Эффективная длина сварного шва L 	

Исходя из условия равнопрочности шва и основного металла расчетные усилия определяют:

$$\text{- при растяжении } N \leq [\sigma]_p A_w \quad (1.7)$$

$$\text{- при сжатии } N \leq [\sigma]_{сж} F \quad (1.8)$$

$$\text{- при изгибе } N \leq [\sigma]_p W \quad (1.9)$$

Таким образом, основными расчетными формулами для проверки прочности являются выражения 1.7- 1.9.

Практическое занятие № 2 Расчет сварных соединений, выполненных контактной точечной сваркой (2 часа)

Контактную точечную сварку применяют в соединениях конструкций кузовов, в сельскохозяйственных машинах (комбайнах, сеялках, косилках, тракторах и т. п.), авиационных конструкциях, арматуре из железобетона и т.д. В большинстве случаев точечной сваркой сваривают листовые конструкции при условии расположения электродов с двух сторон свариваемых частей. Это предъявляет определенные требования к габариту конструкций (рисунок 4).

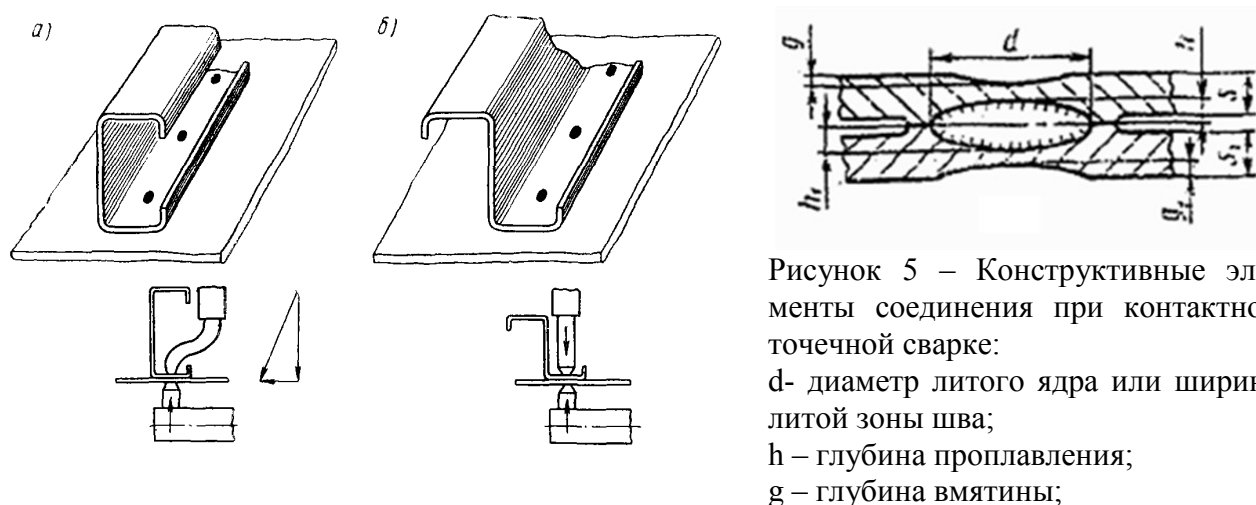


Рисунок 5 – Конструктивные элементы соединения при контактной точечной сварке:

d – диаметр литого ядра или ширина литой зоны шва;

h – глубина проплавления;

g – глубина вмятины;

Рисунок 4 - Примеры соединений при контактной точечной сварке:

а) нерациональная конструкция; б) рациональная конструкция

Прочность сварных соединений при контактной точечной сварке зависит от диаметра ядра точки d (рисунок 5), который устанавливается ГОСТ 15878-79 «Контактная сварка. Соединения сварные. Конструктивные элементы и размеры» в зависимости от толщины свариваемых деталей S . Минимальный диаметр ядра можно вычислить по следующей зависимости:

$$d = 2S + 3, \text{ мм} \quad (2.1)$$

Расстояние между центрами точек в соединении называется шагом t (рисунок 6), который назначается из технологических и конструктивных соображений. Для предотвращения шунтирования сварочного тока через соседние точки шаг должен быть равен:

$$t \geq (3 \div 5)d \quad (2.2)$$

Сварные соединения при точечной сварке могут работать на срез (рисунок 6, а) и отрыв (рисунок 6, б).

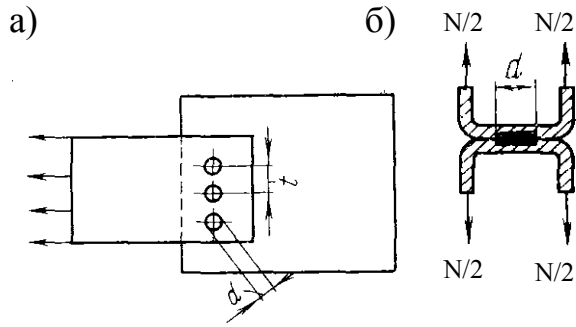


Рисунок 6 – Схемы точечных сварных соединений:

- а) работа точек на срез;
б) работа точек на отрыв

Точки в сварном соединении следует располагать таким образом, чтобы они **воспринимали преимущественно усилия среза, а не отрыва**. На рисунке 7, а представлена нерациональная конструкция, точки в ней работают на отрыв; на рисунке 7, б рациональная — точки работают на срез.

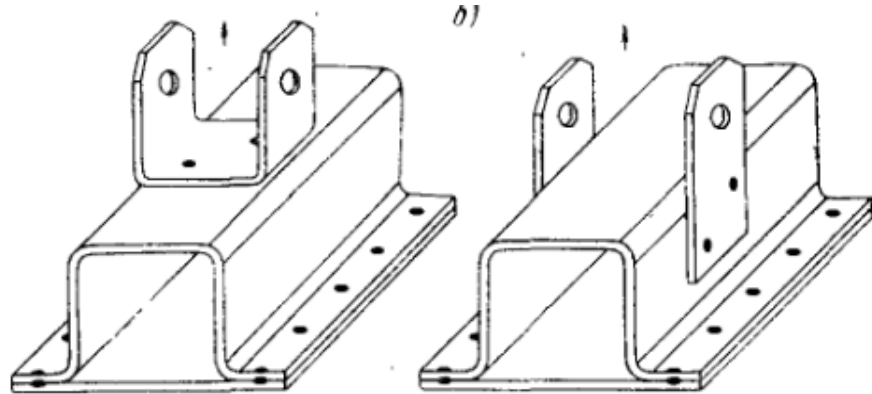


Рисунок 7—Детали, сваренные точечной сваркой: а) нерациональная конструкция; б) рациональная конструкция

При расчете сварных соединений, выполняемых контактной точечной сваркой, как правило, требуется определить требуемое количество точек исходя из следующей зависимости:

$$\tau = \frac{N}{A_{\text{среза}}} = \frac{N}{\frac{\pi d^2}{4} \cdot n} \leq [\tau'] \quad (2.3)$$

где $[\tau']$ - допускаемое напряжение в точке при срезе;

d – диаметр точки;

n – количество точек.

При назначении диаметра сварной точки согласно ГОСТ 15878-79 расчет прочности сварной точки можно производить только на срез. При работе сварной точки на отрыв расчетное напряжение будет равно:

$$\sigma = \frac{N}{A_{\text{отрыва}}} = \frac{N}{\frac{\pi d^2}{4} \cdot n} \leq [\sigma'] \quad (2.4)$$

где $[\sigma']$ - допускаемое напряжение в точке при отрыве ($[\sigma'] < [\tau']$).

Допускаемые напряжения для соединений, выполняемых контактной точечной сваркой, целесообразно назначать по результатам экспериментальных испытаний образцов-свидетелей.

Задание. Требуется определить диаметр и количество сварных точек, а также шаг между ними для сварной конструкции, представленной на рисунке 8.

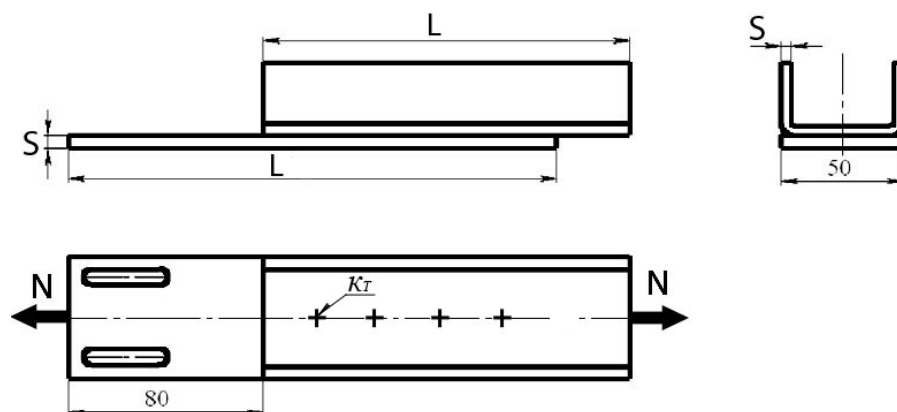


Рисунок 8 – Конструкция, выполняемая контактной точечной сваркой

Сила N и размеры, необходимые для проведения расчета, выбираются из таблицы 6 согласно варианту, выданному преподавателем.

Таблица 6 – Исходные данные для расчета

№Варианта	Допускаемое напряжение на срез в сварной точке $[\tau']$, МПа	Толщина S , мм	Сила N , кН	Длина L , мм
1	70	2	10	240
2		3	15	260
3		4	20	260
4		5	30	280

Решение. Для проведения расчета необходимо вначале определить минимальный диаметр литого ядра по формуле 2.1. Далее, из зависимости 2.3 выразить и рассчитать требуемое количество точек n .

Последним этапом расчета является расположение сварных точек на изделии и проверка габаритов. Проверка габаритов осуществляется исходя из следующих условий

- расстояние от края детали до сварной точки должно быть не менее 15-20 мм;
- для предотвращения шунтирования сварочного тока шаг между точками t должен быть не менее значения, вычисляемого по формуле 2.2;
- диаметр стандартных сварочных электродов составляет не менее 20 мм (в рассматриваемом примере ширина верхней детали должна обеспечивать возможность токоподвода).

После проведения теоретических расчетов необходимо сравнить полученные данные с результатами, полученными на основе компьютерной модели. На рисунке 9 представлена конечно-элементная модель сварного соединения с результатами расчета для варианта №1 (толщина $S=2$ мм, $N=10$ кН).

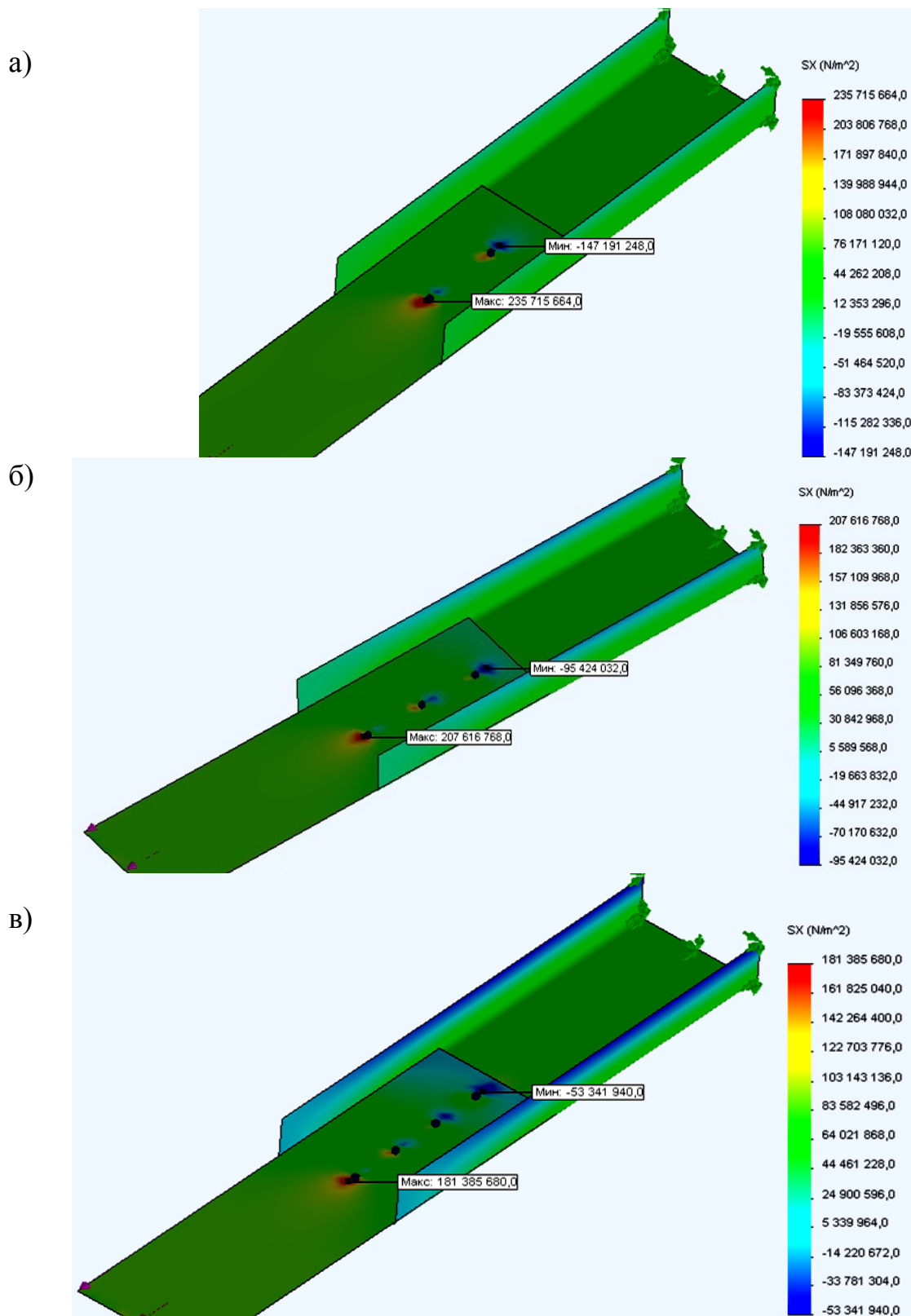


Рисунок 9 – Распределение нормальных напряжений в основном металле сварной конструкции: а – две сварные точки; б – три сварные точки; в – четыре сварные точки

Практическое занятие № 3 Расчет сварных соединений, выполненных из элементов, имеющих несимметричное сечение (2 часа)

Расчет прочности швов, прикрепляющих уголки и работающих под действием продольной силы, имеет некоторые особенности. Рассмотрим задачу, когда усилие N действует в плоскости прикрепления полки уголка (рисунок 10).

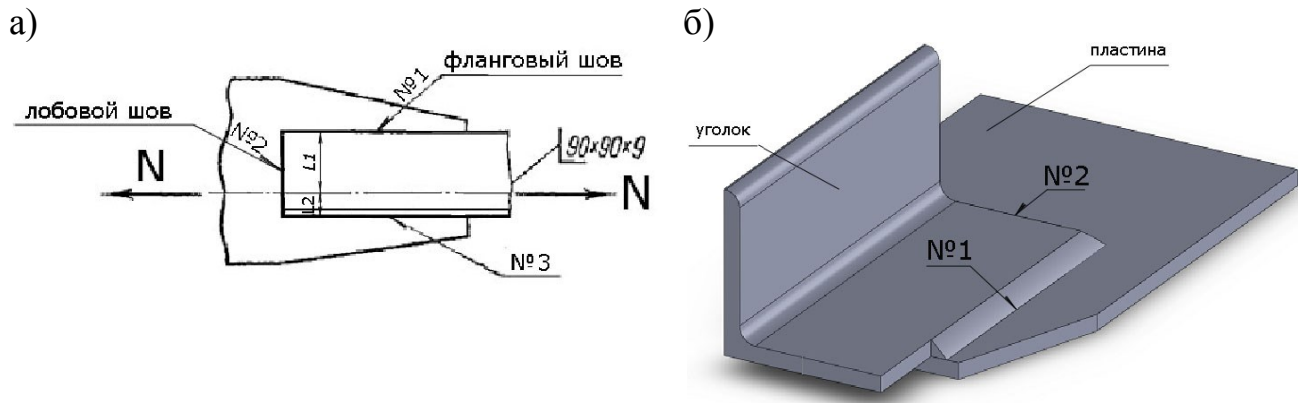


Рисунок 10 – Расчет сварного соединения: а – схема нагружения; б – 3D-модель

Усилие, воспринимаемое лобовым швом (рисунок 10, шов №2), равно:

$$N_{\text{л}} = [\tau'] \beta K L_{\text{л}} \quad (3.1)$$

$$L_{\text{л}} = L_1 + L_2$$

Тогда, усилие, передаваемое на 2 фланговых шва:

$$N_{\text{фл}} = N - N_{\text{л}} \quad (3.2)$$

Это усилие распределяется между швами обратно пропорционально расстоянию от оси уголка до обеих кромок.

Таким образом, усилие во фланговом шве №1, будет

$$N_1 = 0,3 N_{\text{фл}} \quad (3.3)$$

Усилие во фланговом шве №3 будет

$$N_2 = 0,7 N_{\text{фл}} \quad (3.4)$$

Тогда касательные напряжения во фланговых швах:

$$\tau_1 = \frac{N_1}{\beta K L_{\text{фл1}}}; \quad \tau_2 = \frac{N_2}{\beta K L_{\text{фл2}}}$$

$L_{\text{фл}}$ – длина флангового шва.

Задание №1. Спроектировать сварное соединение (рисунок 10, а), равнопрочное уголку, сварка однопроводная, механизированная ($\beta=0,8$).

Таблица 7 – Исходные данные для расчета

№Варианта	Допускаемые напряжения в металле уголка, МПа	Размеры уголка, мм	Площадь сечения уголка А, см ²
0	[σ]р = 200 МПа, [τ]р = 120 МПа.	90х90х6	10,61
1		80х80х6	9,38
2		75х75х5	7,39
3		70х70х5	6,86
4		63х63х4	4,96

Решение (для варианта №0).

Определяем допускаемое растягивающее усилие в металле уголка:

$$N = [\sigma]_p A = 200 \cdot 10^6 \cdot 10,61 \cdot 10^{-4} = 212,2 \text{ кН}$$

Т.о. металл уголка выдерживает $N=212,2\text{кН}$. Теперь необходимо найти длины сварных швов (L_L и $L_{\Phi L}$), которые смогут воспринимать усилие N и обеспечить равнопрочность сварного соединения и уголка.

Принимаем максимально возможный катет для лобового и флангового швов (не более толщины полки уголка), т.е. $K = 6$ мм.

Тогда усилие, допускаемое на лобовой швов с катетом 6мм равно ($L_L=90$ мм ,т.е равна ширине полки уголка):

$$N_L = [\tau'] \beta K L_L = 120 \cdot 0,8 \cdot 6 \cdot 90 = 51,84 \text{ кН}$$

Остальная часть усилия должна быть распределена между двумя фланговыми швами:

$$N_{\Phi L} = N - N_L = 212,2 - 51,84 = 160,36 \text{ кН}$$

Усилие, передаваемое на фланговый шов №1:

$$N1 = 0,3 N_{\Phi L} = 0,3 \cdot 160,36 = 48,1 \text{ кН}$$

Тогда, требуемая длина шва флангового шва №1 при $k=6\text{мм}$:

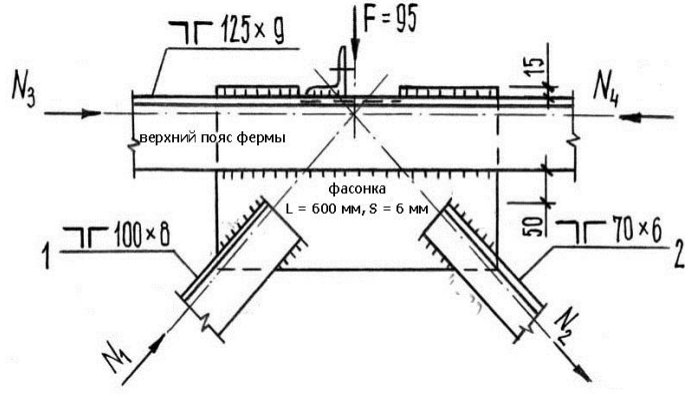
$$L_{\Phi L} = N1 / ([\tau'] \beta K) = 48,1 \cdot 10^3 / (120 \cdot 10^6 \cdot 0,8 \cdot 0,006) = 84 \text{ мм}$$

Конструктивно длину флангового шва №3 следует также принять 84 мм. Тогда рассчитаем катет сварного шва №3:

$$K_{\Phi L \text{ №3}} = N2 / ([\tau'] \beta L_{\Phi L}) = 160,36 \cdot 0,7 \cdot 10^3 / (120 \cdot 10^6 \cdot 0,8 \cdot 0,084) = 14 \text{ мм}$$

Задание №2. Сконструировать промежуточный узел фермы, состоящей из парных равнополочных уголков (рисунок 11,а). Расчетное сопротивление сварных швов $R_{wf} = 185 \text{ МПа}$, коэффициенты условий работы $\gamma_{wf} = 1$, $\gamma_c = 1$, коэффициент формы шва $\beta_w = 0,8$.

№ Варианта	Нагрузки в элементах фермы, кН			
	N ₁	N ₂	N ₃	N ₄
0	405,9	319,6	394,2	500,9
1	450,5	350,8	400,7	480,2
2	420,7	300	380,9	500
3	418,6	321,5	300	510,8
4	398,7	348,9	410,5	530,7

Исходные данные для расчета	 Рисунок 11а – Узел сопряжения верхнего пояса фермы с раскосами 1, 2
-----------------------------	---

Для раскоса №1 проведем расчет длин сварных швов по формулам:

$$L_w^{об} = N_{об} / (2 R_{wf} \gamma_{wf} \gamma_c \beta_w K) = 0,7 * N_1 / (2 \cdot 185 \cdot 10^6 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0,8 \cdot 0,008) = 0,120 \text{ м}$$

$$L_w^{п} = N_{п} / (2 R_{wf} \gamma_{wf} \gamma_c \beta_w K) = 0,3 * N_1 / (2 \cdot 185 \cdot 10^6 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0,8 \cdot 0,006) = 0,070 \text{ м}$$

Полученные расчетом длины сварных швов округляют в большую сторону до 10 мм. Результаты расчета сводят в таблицу.

Номер стрелы	Сечение	N, кН	Шов по обуху			Шов по перу		
			N _{об} , кН	K, мм	L _{w^{об}} , мм	N _п , кН	K, мм	L _{w^п} , мм
1	2L 100 x 8	405,9	284,13	8	120	121,77	6	70
2	2L 70 x 6	319,6	223,72	6	130	95,88	4	90

Конструктивно принимаем длину фасонки 600 мм. Тогда длина сварных швов крепления верхнего пояса фермы к фасонке составит $L_w^{\Phi} = 4 * (60 - 1) = 236 \text{ см}$. Определяем катет шва, прикрепляющего фасонку к верхнему поясу по формуле:

$$k = \frac{\sqrt{(N_4 - N_3)^2 + F^2}}{\beta_w \cdot L_w^{\Phi} \cdot R_{wf} \cdot \gamma_{wf} \cdot \gamma_c} = \frac{\sqrt{(500,9 - 394,2)^2 + 95^2}}{0,8 \cdot 0,236 \cdot 185 \cdot 1 \cdot 1} = 4,1 \text{ мм}$$

Принимаем $k=5 \text{ мм}$.

Задание №3. На основе 3D- модели сварного соединения изучить распределения напряжений в лобовых и фланговых швах (рисунок 11).

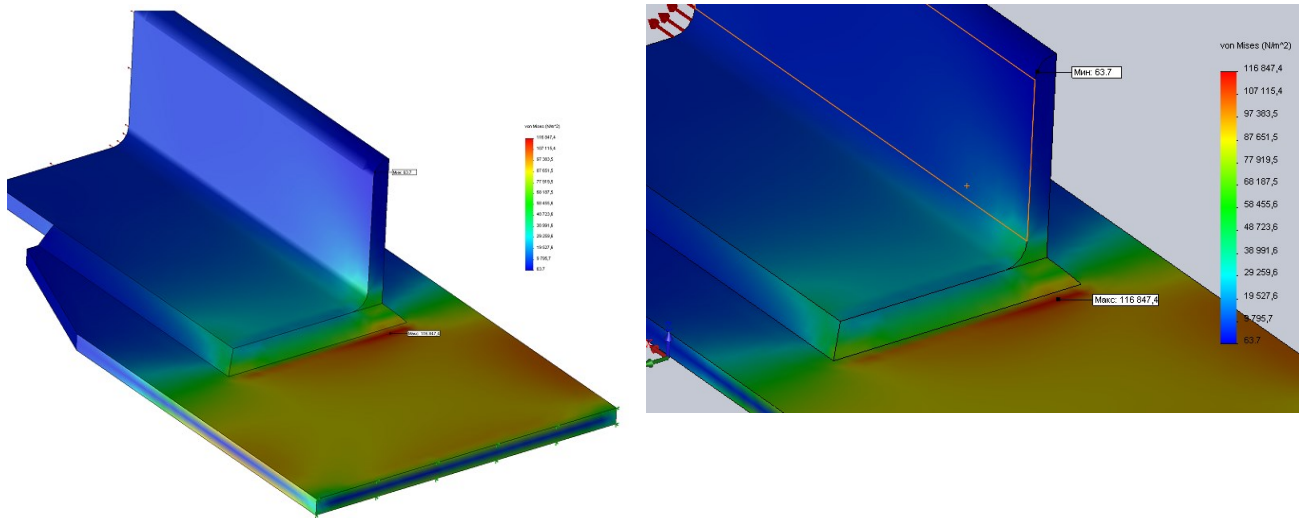


Рисунок 11б – Результаты расчета модели сварного соединения

Длина лобовых швов L_L не ограничивается. Длина фланговых швов ограничивается, так как с увеличением их длины возрастает неравномерность распределения напряжений по длине шва $L_{фл} < 60k$. Сварные швы располагают так, чтобы они в соединении были нагружены равномерно. При проектировании соединения уголков с косынками длины фланговых швов принимают обратно пропорциональными расстояниям до центра тяжести уголка.

Практическое занятие № 4 Расчет и подбор сечений двутавровых балок (4 часа)

В общем случае расчет балок включает следующую последовательность действий:

- 1) Определение опорных реакций и построение эпюр силовых факторов (изгибающего момента и поперечной силы (M_n , Q));
- 2) Определение максимальных значений силовых факторов и соответствующих сечений;
- 3) Подбор поперечного сечения балки;
- 4) Расчет сварных соединений;
- 5) Проверка на местную и общую устойчивость.

Задание №1. Рассмотрим балку пролетом L (см. таблицу 8), свободно установленную концами на опоры и нагруженную равномерно распределенной нагрузкой от собственного веса q и сосредоточенной силой N , приложенной в середине пролета.

Требуется подобрать поперечное сечение сварной балки двутаврового профиля. Материал балки Ст 3. Допускаемое напряжение для основного металла при растяжении - 160 МПа.

Таблица 8- Исходные данные для расчета

Номер варианта	Длина балки l , м	Распределенная нагрузка q , кН/м	Сила N , кН	Норма жесткости $\frac{f}{l}$
0	16	10	190	1/400
1	18	8	180	1/400
2	20	10	150	1/400
3	22	9	160	1/400
4	24	6	200	1/400

Решение. Определение опорных реакций и построение эпюр силовых факторов производим теоретически и сравниваем их с данными, полученными при помощи расчетной программы BEAM.exe. Результаты расчетов приведены на рисунке 12.

Тогда, требуемый момент сопротивления балки при максимальном изгибающем моменте $M_{max} = 1080 \text{ кН*м}$ (см. рисунок 12) вычисляем по формуле:

$$W = \frac{M_{\max}}{[\sigma]p} = \frac{1080000}{160} = 6750 \text{ см}^3 \quad (4.1)$$

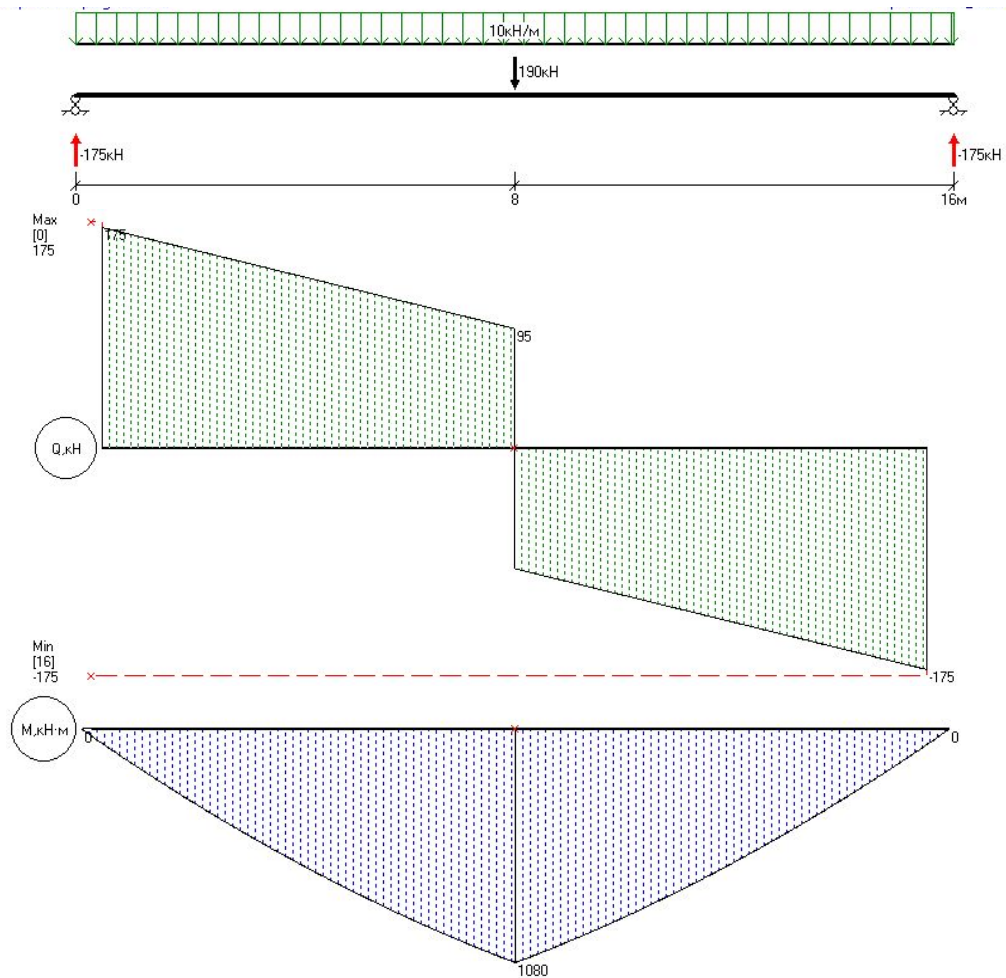


Рисунок 12 – Результаты расчета определения опорных реакций и построения эпюр силовых факторов

Переходим к подбору симметричного сечения составной двутавровой балки (рисунок 13).

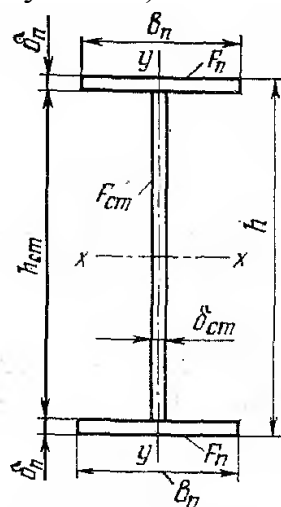


Рисунок 13 – Размеры симметричного сечения сварной двутавровой балки:

h – высота балки;
 h_{cm} – высота стенки;
 b_f, δ_f – ширина и толщина пояса;
 F_{cm}, F_f – площадь сечения стенки и пояса соответственно

Минимальная высота балки h_{min} определяется из нормы жесткости (предельного прогиба $\frac{f}{l}$) исходя из следующего соотношения:

$$h_{\min} = \frac{5}{24} \cdot \frac{[\sigma] \cdot l}{E \cdot \frac{f}{l}} = \frac{5}{24} \cdot \frac{160 \cdot 16}{210 \cdot 1/400} = 1.015 \text{ м}$$

Далее определяем высоту балки из условия прочности и экономии металла $h_{\text{опт}}$:

$$h_{\text{опт}} = 1,3 \div 1,4 \sqrt{\frac{M}{\delta_{\text{ст}} \cdot [\sigma]}} = 1,4 \sqrt{\frac{1080000}{0,01 \cdot 160 \cdot 10^6}} = 1,15 \text{ м} \quad (4.3)$$

где ориентировочно $\delta_{\text{ст}} = 7 + 3h_{\min} = 7 + 3 \cdot 1.015 = 10.045 \text{ мм}$.

Принимаем $\delta_{\text{ст}} = 10 \text{ мм}$.

Высота балки назначается по бóльшей из величин $h_{\text{опт}}$ и $h_{\min}$ с кратностью модуля 100 мм, т.е. принимаем высоту балки $h = 1,2 \text{ м}$. Соотношение $h/\delta_{\text{ст}}$ должно находиться в пределах, рекомендуемых таблицей 10.

Таблица 10 – Рекомендуемые соотношения высоты составной балки h и толщины стенки $\delta_{\text{ст}}$

$h, \text{м}$	1	1.5	2	3	4	5
$\delta_{\text{ст}}, \text{мм}$	8-10	10-12	12-14	16-18	20-22	22-24
$h/\delta_{\text{ст}}$	100-125	125-150	145-165	165-185	185-200	210-230

В нашем случае $h/\delta_{\text{ст}} = 1,2/0,01 = 120$ находится в пределах, рекомендуемых таблицей, и его корректировка не требуется.

Высоту стенки $h_{\text{ст}}$ предварительно выбираем на $2 \div 6 \text{ см}$ меньше высоты балки, т.е. $h_{\text{ст}} = 1200 - 40 = 1160 \text{ мм}$.

Для определения площади пояса балки вначале находим требуемый момент инерции симметричного сечения:

$$I_{\text{тр}} = \frac{W \cdot h}{2} = \frac{6750 \cdot 120}{2} = 405000 \text{ см}^4 \quad (4.4)$$

Требуемый момент инерции будет равен сумме момента инерции стенки $I_{\text{ст}}$ и инерции двух полок $2I_{\text{п}}$:

$$I_{\text{тр}} = I_{\text{ст}} + 2I_{\text{п}} \quad (4.5)$$

Зная размеры стенки балки, находим момент инерции стенки:

$$I_{\text{ст}} = \frac{h_{\text{ст}}^3 \cdot \delta_{\text{ст}}}{12} = \frac{116^3 \cdot 1}{12} = 130074 \text{ см}^4 \quad (4.6)$$

Откуда:

$$I_{\text{п}} = \frac{I_{\text{тр}} - I_{\text{ст}}}{2} = \frac{405000 - 130074}{2} = 137463 \text{ см}^4$$

Тогда,

$$F_n = \frac{I_n}{\left(\frac{h_{ст} + \delta_n}{2}\right)^2} = \frac{137463}{\left(\frac{116 + 2}{2}\right)^2} = 39,5 \text{ см}^2 \quad (4.7)$$

$$b_n = \frac{F_n}{\delta_n} = \frac{39,5}{2} = 19,75 \quad (4.8)$$

С учетом ГОСТ 103–76 «Полоса стальная горячекатаная» (при ширине листа до 200 мм) или ГОСТ 82–70 «Сталь широкополосная универсальная» (при ширине листа более 200 мм) принимают $b_n = 200$ мм. При этом соотношение $b_n/(2\delta_n)$ должно быть не более указанного в таблице 11.

Таблица 11 – Наибольшие значения $b_n/(2\delta_n)$, обеспечивающие местную устойчивость сжатых полок сварных балок

Сталь	ВСтЗпс, ВСтЗсп, ВСтЗкп	09Г2С	10ХСНД, 14Г2АФ
$b_n/(2\delta_n)$	15	13	11

$b_n/(2\delta_n) = 200/(2 \cdot 20) = 5$ – условие выполняется.

Все геометрические параметры сечения рассчитаны. Проводим проверку полученного составного сечения на прочность. Для этого определяем момент инерции сечения:

$$\begin{aligned} I_x &= I_{ст} + 2I_n = \frac{h_{ст}^3 \cdot \delta_{ст}}{12} + 2\left(\frac{\delta_n^3 \cdot b_n}{12} + \delta_n \cdot b_n \left(\frac{h_{ст}}{2} + \frac{\delta_n}{2}\right)^2\right) = \\ &= \frac{116^3 \cdot 1}{12} + 2\left(\frac{2^3 \cdot 20}{12} + 2 \cdot 20 \left(\frac{116}{2} + \frac{2}{2}\right)^2\right) = 130074 + 2(13,3 + 139240) = 408581 \text{ см}^4 \end{aligned} \quad (4.9)$$

Наибольшее нормальное напряжение в опасном сечении балки:

$$\sigma_1 = \frac{M}{W} = \frac{M}{I} \cdot \frac{h}{2} = \frac{1080000}{408581 \cdot 10^{-8}} \cdot \frac{1,2}{2} = 158,6 \text{ МПа} < [\sigma]_p = 160 \text{ МПа} \quad (4.10)$$

Определим касательные напряжения на уровне центра тяжести балки в опорном сечении по формуле Журавского:

$$\tau = \frac{Q \cdot S}{I \cdot \delta_{ст}} = \frac{190000 \cdot 2360 \cdot 10^{-6}}{408581 \cdot 10^{-8} \cdot 0,01} = 11 \text{ МПа}, \quad (4.11)$$

где S – статический момент площади сечения, см^3 ;

Q — поперечная сила, Н; I — главный осевой момент инерции полного сечения, м^4 ;

$\delta_{ст}$ - ширина сечения в той точке, для которой находится напряжение.

Из формулы следует, что касательные напряжения меняются по высоте сечения в соответствии с параболической зависимостью, причём максимальные значения, наблюдаются на нейтральной линии, проходящей через центр площади сечения.

$$S = b_{\Pi} \cdot \delta_{\Pi} \cdot \left(\frac{h_{\text{ст}}}{2} + \frac{\delta_{\Pi}}{2} \right) = 20 \cdot 2 \cdot \left(\frac{116}{2} + \frac{2}{2} \right) = 2360 \text{ см}^3 \quad (4.12)$$

Определяем эквивалентные напряжения:

$$\sigma_{\text{ЭКВ}} = \sqrt{\sigma_1^2 + 3 \cdot \tau_1^2} = \sqrt{158,6^2 + 3 \cdot 11^2} = 159,7 \text{ МПа} < [\sigma] = 160 \text{ МПа} \quad (4.13)$$

Расчетное напряжение не должно превышать допускаемое более, чем на 0,5%.

Задание 2. Сварную двутавровую балку (см. задание 1) необходимо проверить на общую и местную устойчивость, определить количество ребер жесткости, рассчитать сварные соединения.

Решение. Для обеспечения общей устойчивости балки необходимо ограничивать свободную длину изгибаемого элемента путем установки горизонтальных связей. Например, две параллельные изгибаемые балки 1 и 2 (см. рис. 14) взаимно соединены горизонтальными связями на расстоянии l_0 .

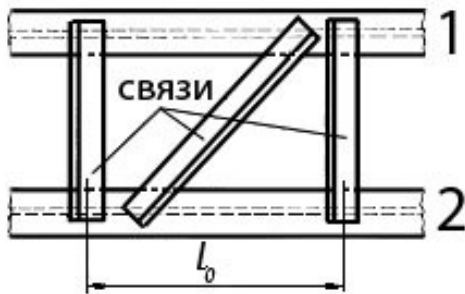


Рисунок 14 – Закрепление балки в горизонтальной плоскости

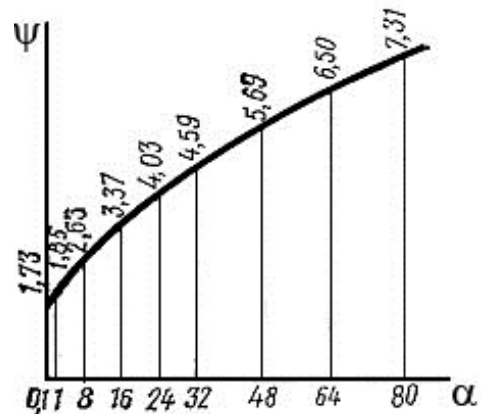


Рисунок 15 – Функция $\psi(\alpha)$

Зададимся расстоянием между закреплениями:

$$l_0 = (10 \div 20) b_{\Pi} = 15 \cdot 0,2 = 3 \text{ м} \quad (4.14)$$

Для заданного сечения балки вычисляем параметр α :

$$\alpha = 8 \cdot \left[\frac{l_0 \cdot \delta_{\Pi}}{b_{\Pi} \cdot h} \right]^2 \cdot \left(1 + \frac{h \cdot \delta_{\text{ст}}^3}{2 \cdot b_{\Pi} \cdot \delta_{\Pi}^3} \right) = 8 \cdot \left[\frac{300 \cdot 2}{20 \cdot 120} \right]^2 \cdot \left(1 + \frac{120 \cdot 1^3}{2 \cdot 20 \cdot 2^3} \right) = 0,688 \quad (4.15)$$

По графику (рисунок 15) определяем значение коэффициента $\psi=1.8$.

Момент инерции балки относительно вертикальной оси равен:

$$I_y = \frac{h_{ст} \cdot \delta_{ст}^3}{12} + 2 \cdot \frac{b_{п}^3 \cdot \delta_{п}}{12} = \frac{116 \cdot 1^3}{12} + 2 \cdot \frac{20^3 \cdot 2}{12} = 2676 \text{ см}^4 \quad (4.16)$$

Определяем значение коэффициента уменьшения допускаемых напряжений в балке с учетом обеспечения ее устойчивости φ

$$\varphi = \psi \frac{I_y}{I_x} \cdot \left(\frac{h}{l_0}\right)^2 \cdot 10^3 = 1.8 \frac{2675}{408581} \cdot \left(\frac{120}{300}\right)^2 \cdot 1000 = 1.88 \quad (4.17)$$

Коэффициент $\varphi > 1$, значит, что при расчете можно принять $\varphi = 1$ и устойчивость балки при наличии закреплений на расстоянии $l_0 = 3 \text{ м}$ обеспечена.

Чтобы обеспечить местную устойчивость вертикального листа, следует приварить к нему ребра жесткости. Зададимся расстоянием между ними:

$$a = 1.5 \cdot h_{ст} = 1.5 \cdot 1.16 = 1.74 \text{ м} \quad (4.18)$$

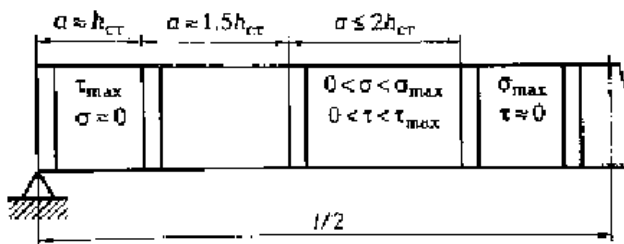


Рисунок 16 – Постановка ребер жесткости

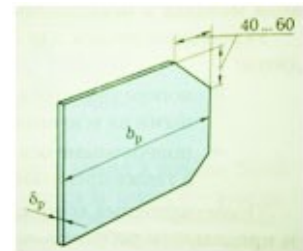


Рисунок 17 – Размеры ребер

Ширину и толщину ребра жесткости принимают:

$$b_p = h_{ст} / 30 + 40 = 1160 / 30 + 40 = 78,6 \text{ мм} \quad (4.19)$$

$$\delta_p \geq b_p / 15 \geq 78,6 / 15 = 5,24 \text{ мм} \quad (4.20)$$

Принимаем $b_p = 78 \text{ мм}$ и $\delta_p = 6 \text{ мм}$.

Для обеспечения местной устойчивости стенки балки должно удовлетворяться следующее условие:

$$\sqrt{(\sigma_1 / \sigma_0 + \sigma_M / \sigma_{M0})^2 + (\tau / \tau_0)^2} \leq 1 \quad (4.21)$$

где σ_1 - нормальное напряжение в верхнем волокне вертикального листа (см. формулу 4.10), $\sigma_1 = 158,6 \text{ МПа}$;

σ_M - местное напряжение под сосредоточенной силой;

$$\sigma_M = \frac{m \cdot N}{\delta_{ст} \cdot z} = \frac{1 \cdot 190000}{0.01 \cdot 0.122} = 155,3 \text{ МПа}, \quad (4.22)$$

где m – коэффициент условий работы балки ($m=0.9$ для тяжело нагруженных балок; $m=1$ – для легких условий работы);

$$z = 3.25 \sqrt{\frac{\delta_{п}^3 \cdot b_{п}}{3} \cdot \frac{1}{\delta_{ст}}} = 3.25 \sqrt{\frac{2^3 \cdot 20}{3} \cdot \frac{1}{1}} = 12,2 \text{ см} \quad (4.23)$$

где τ – среднее касательное напряжение от поперечной силы:

$$\tau = \frac{Q_{\max}}{h_{\text{ст}} \cdot \delta_{\text{ст}}} = \frac{190000}{1,16 \cdot 0,01} = 16,4 \text{ МПа} \quad (4.24)$$

где $\sigma_0, \sigma_{M0}, \tau_0$ – условные силовые факторы, зависящие от размеров сечения балки.

$$\sigma_0 = 75 \cdot 10^3 \frac{\delta_{\text{ст}}}{h_{\text{ст}}} = 75 \cdot 10^3 \frac{10}{1160} = 646 \text{ МПа} \quad (4.25)$$

$$\sigma_{M0} = K_1 \left(\frac{\delta_{\text{ст}}}{a} \right)^2 \cdot 10^{12} = 8,6 \left(\frac{0,01}{1,74} \right)^2 \cdot 10^6 = 284 \text{ МПа} \quad (4.26)$$

Значения K_1 связаны с соотношением $a/h_{\text{ст}}$. При соотношении $a/h_{\text{ст}}=1,5$ коэффициент $K_1 = 8,6$ (см. таблицу).

Таблица – Зависимость коэффициента K_1 от соотношения $a/h_{\text{ст}}$

$a/h_{\text{ст}}$	0,5	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0
K_1	2,21	3,65	4,85	6,08	7,68	9,49	11,46	13,86

$$\tau_0 = \left(125 + \frac{95}{v^2} \right) \left(\frac{100 \cdot \delta_{\text{ст}}}{d} \right)^2 = \left(125 + \frac{95}{1,5^2} \right) \left(\frac{100 \cdot 0,01}{1,16} \right)^2 = 125 \text{ МПа} \quad (4.27)$$

$$v = \frac{a}{h_{\text{ст}}} = 1,5; \quad d = h_{\text{ст}} = 1,16$$

$$\text{Тогда, } \sqrt{(\sigma_1 / \sigma_0 + \sigma_M / \sigma_{M0})^2 + (\tau / \tau_0)^2} = \sqrt{(158,6 / 646 + 155,3 / 284)^2 + (16,4 / 125)^2} = 0,8 \leq 1$$

Устойчивость стенки балки обеспечена.

Проверяем устойчивость в опорном сечении ($\sigma_1=0$) по формуле 4.21.

$$\text{На опоре } \tau_{\text{Ra}} = \frac{Q_{\text{Ra}}}{h_{\text{ст}} \cdot \delta_{\text{ст}}} = \frac{175000}{1,16 \cdot 0,01} = 15,1 \text{ МПа}$$

$$\sqrt{(\sigma_M / \sigma_{M0})^2 + (\tau / \tau_0)^2} = \sqrt{(155,3 / 284)^2 + (15,1 / 125)^2} = 0,56 \leq 1$$

Устойчивость в опорном сечении обеспечена лучше, чем в середине пролета.

Расчет поясных сварных швов. Пояса балок соединяются со стенкой с помощью угловых швов с минимальным катетом, равным $K_{\min} \geq 0,5 \delta_{\text{ст}}$.

Под действие изгибающего момента в поясных швах возникают нормальные напряжения, которые считаются связующими и касательные напряжения, которые считаются рабочими. Касательные напряжения возникают от действия поперечной силы, при этом срезающее усилие, приходящееся на единицу длины на уровне кромки вертикального листа равно $T = \frac{Q \cdot S}{I}$, где S – статический момент площади пояса относительно центра тяжести всего сечения;

Для угловых швов без разделки кромок:

$$\tau = \frac{Q \cdot S}{I \cdot 2 \beta K} \leq [\tau]$$

Принимаем катеты угловых швов $K = 5$ мм.

Допускаемое напряжение в поясных швах $[\tau] = 0,65 [\sigma]_p = 104 \text{ МПа}$

$$\tau = \frac{Q \cdot S}{I \cdot 2\beta K} = \frac{190000 \cdot 2360 \cdot 10^{-6}}{408581 \cdot 10^{-8} \cdot 2 \cdot 0,8 \cdot 0,005} = 13,7 \text{ МПа} \leq [\tau] = 104 \text{ МПа}$$

Швы, которыми привариваются ребра жесткости являются связующими и расчету не подлежат.

Практическое занятие № 5 Расчет и подбор сечений стоек и опорных коробчатых балок (4часа)

Стойка (колонна) – вертикальный элемент конструкции, работающий преимущественно на сжатие. Стойки передают нагрузку от вышележащих конструкций (балок, ферм) на фундамент. В стойках различают 3 основных части: верхнюю – оголовок 1, воспринимающий нагрузку; среднюю – стержень 2, несущий нагрузку; нижнюю – базу 3, передающую давление стойки на фундамент 4 (рисунок 18).

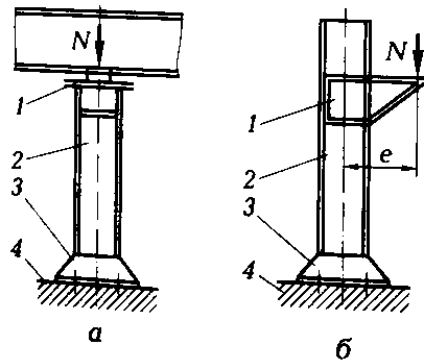


Рисунок 18 – Основные конструктивные части стоек: а – центрально-сжатой; б – внецентренно-сжатой; 1- оголовок; 2-стержень; 3-база; 4- фундамент; N- продольная сила; e - эксцентриситет

В зависимости от значения нагрузки и высоты стойки применяют различные типы поперечных сечений стержней (см. рисунок 19)

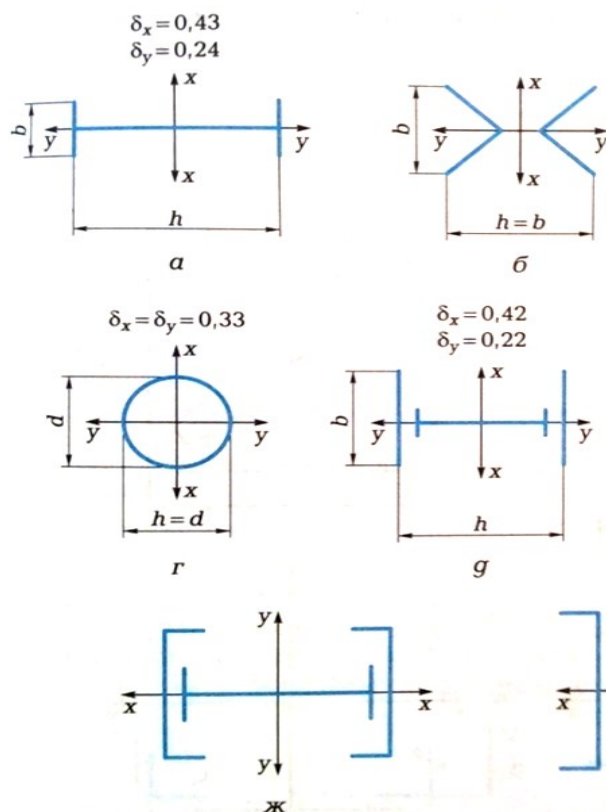


Рисунок 19 – Распространенные типы сечений стержней центрально-сжатых колонн

Расчет стоек включает в себя предварительный подбор сечения и его окончательную проверку. Предварительный подбор сечения стержня сплошной сварной стойки осуществляется в следующем порядке:

1. Определяем требуемую площадь поперечного сечения по формуле:

$$F_{TP} = \frac{N}{\varphi \cdot [\sigma]} \quad (5.1)$$

Использование формулы 5.1 затруднено тем, что в нее входят неизвестные величины φ и F_{TP} . В этом случае подбор сечения производится способом последовательных приближений, задаваясь первоначальным значением коэффициента продольного изгиба $\varphi_0 = 0,5-0,8$.

2. Компонуют сечение и находят наименьшее значение момента I_{min} и радиуса инерции r_{min} , наибольшую гибкость $\lambda_{max} = \mu l / r_{min}$

(5.2)

и коэффициент φ_1 , соответствующий значению λ_{max} .

3. Определяют напряжение в спроектированном сечении по формуле

$$\sigma = \frac{N}{\varphi \cdot F_{TP1}} \quad (5.3)$$

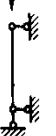
Полученное напряжение должно быть близким к $[\sigma]$. Допустимы отклонения в пределах $\pm 5\%$. В противном случае размеры поперечных сечений изменяют в требуемом направлении. Обычно на 2 или 3 стадии подбора сечения результаты оказываются удовлетворительными.

Задание 1. Требуется подобрать сечение стержня стойки, нагруженной расчетной сжимающей нагрузкой N , приложенной вертикально в центре оголовка. Исходные данные представлены в таблице 11 и 12

Таблица 11 – Исходные данные

№ варианта	Нагрузка N, H	Длина стойки $l, м$	№ расчетной схемы	Материал сталь	Допускаемое напряжения, МПа	Сечение
0	940	8	3	C46/33 (09Г2С)	240	См. рисунок 13
1	940	5	1	C46/33 (09Г2С)	240	
2	940	10	2	C46/33 (09Г2С)	240	
3	940	11	3	C46/33 (09Г2С)	240	
4	940	12	4	C46/33 (09Г2С)	240	

Таблица 12 – Расчетные схемы

№ расчетной схемы	Схема крепления стойки	Закрепление конца стержня		Коэффициент расчетной длины μ
		верхнего	нижнего	
1		закрепления нет	жесткое	2,0
2		шарнирное	жесткое	0,7
3		шарнирное	шарнирное	1,0
4		жесткое	жесткое	0,5

Решение. Задаем в первом приближении коэффициентом $\varphi_1 = 0,6$. Определяем требуемую площадь сечения стержня колонны по формуле 5.1:

$$F_{TP} = \frac{0,94}{0,6 \cdot 240} = 0,00652 \text{ м}^2 = 65,2 \text{ см}^2$$

Назначаем габаритные размеры сечения исходя из следующих условий: для увеличения радиуса инерции 80% общей площади сечения должно приходиться на долю поясов, а толщина стенки обычно составляет $\delta_{ст} = 6-16$ мм, толщина пояса $\delta_{п} = 8-40$ мм.

Распределяем найденную требуемую площадь сечения на 2 пояса из листов 280×10 мм и стенку 200×8 мм, при этом $F_1 = 72 \text{ см}^2$.

Для определения гибкости стержня находим моменты и радиусы инерции стержня. Для этого определяем I_x, I_y найденного сечения

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

$$I_y = 2 \cdot 28^3 \cdot 1/12 + 0,8^3 \cdot 20/12 = 3659 \text{ см}^4.$$

Наименьший радиус инерции:

$$r_y = \sqrt{I_y / F_1} = \sqrt{3659 / 72} = 7,13 \text{ см}$$

Тогда наибольшая гибкость стойки равна:

$$\lambda = \mu l / r = 1 \cdot 800 / 7,13 = 112$$

По таблице 13 определяем коэффициент φ при $\lambda = 112$ и подставляем в формулу 5.3.

$$\sigma = \frac{0,94}{0,4 \cdot 72 \cdot 10^{-4}} = 326 \text{ МПа} > [\sigma] = 240 \text{ МПа}$$

Увеличиваем размеры так, чтобы возросла его площадь и радиус инерции (полки 320×10 мм и стенка 250×8 мм):

$$F_2 = 32 \cdot 2 \cdot 1 + 25 \cdot 0,8 = 84 \text{ см}^2$$

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

Радиус инерции равен

$$r_y = \sqrt{5462 / 84} = 8,06$$

Гибкость $\lambda = 800 / 8,1 = 100$; $\varphi = 0,482$.

Затем находим напряжение сжатия:

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

$$\Delta = \frac{240 - 232}{240} = 3,3\% < 5\%$$

Сечение подобрано хорошо.

Таблица 13

Коэффициенты φ для стоек из I и низколегированных сталей

Гибкость элементов $\lambda = l/r$	С 38/23	С 44/29	С 4
	Ст3	Ст4	
0	1,000	1,000	1,
10	0,988	0,987	0,
20	0,970	0,968	0,
30	0,943	0,935	0,
40	0,905	0,892	0,
50	0,867	0,843	0,
60	0,820	0,792	0,
70	0,770	0,730	0,
80	0,715	0,660	0,
90	0,655	0,592	0,
100	0,582	0,515	0,
110	0,512	0,440	0,
120	0,448	0,383	0,
130	0,397	0,330	0,
140	0,348	0,289	0,
150	0,305	0,250	0,
160	0,270	0,220	0,
170	0,240	0,195	0,
180	0,216	0,175	0,
190	0,196	0,158	0,
200	0,175	0,142	0,
210	0,160	0,130	0,
220	0,146	0,119	0

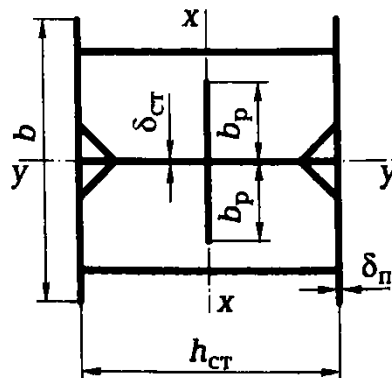
Обеспечение местной устойчивости.

Если не выполняется условие $\frac{h_{ст}}{\delta_{ст}} \leq 40 \sqrt{\frac{E}{[\sigma]}} + 0,4\lambda \leq 75$, то стойку необходимо укреплять ребрами жесткости.

$$\frac{0,25}{0,008} \leq 40 \sqrt{\frac{210}{240}} + 0,4 \cdot 100 \leq 75$$

$$77,4 > 75$$

Условие не выполняется. Стенку необходимо укрепить посередине парным продольным ребром жесткости шириной $b_p \geq 10\delta_{ст}$ и толщиной $\delta_p \geq 0,75\delta_{ст}$.



Расчет поясных сварных швов стоек. Формально, в центрально нагруженных стойках нет поперечной силы Q , но из-за неточности изготовления и монтажа в стойках имеется небольшое искривление оси, что вызывает ее появление. Экспериментально установлено, что для низкоуглеродистых и низколегированных сталей $Q=200F$ ($F, \text{см}^2$), для сталей повышенной прочности $Q=400F$ ($F, \text{см}^2$).

Касательные напряжения возникают от действия поперечной силы определяют по формуле:

$$\tau = \frac{Q \cdot S}{I \cdot 2\beta K} \leq [\tau]$$

где S – статический момент площади пояса относительно центра тяжести всего сечения.

Принимаем катеты угловых швов K=5 мм (минимальный катет 4 мм).

Допускаемое напряжение в поясных швах $[\tau]=0.65[\sigma]_p=156\text{МПа}$.

Условная поперечная сила:

$$Q=400F=400 \cdot 84=33600 \text{ Н.}$$

Момент инерции сечения:

$$\begin{aligned} I &= \frac{h_{\text{ст}} \cdot \delta_{\text{ст}}^3}{12} + 2 \cdot \left(\frac{\delta_{\text{п}}^3 \cdot b_{\text{п}}}{12} + \delta_{\text{п}} \cdot b_{\text{п}} \left(\frac{h_{\text{ст}}}{2} + \frac{\delta_{\text{п}}}{2} \right)^2 \right) = \\ &= \frac{0,8 \cdot 25^3}{12} + 2 \cdot (32 \cdot 1^3 / 12 + 32 \cdot 1 (25/2 + 1/2)^2) = 11863 \text{ см}^4 \end{aligned}$$

Статический момент пояса относительно центральной оси:

$$S = \delta_{\text{п}} \cdot b_{\text{п}} \left(\frac{h_{\text{ст}}}{2} + \frac{\delta_{\text{п}}}{2} \right) = 32 \cdot 1 \cdot 13 = 416 \text{ см}^3$$

$$\tau = \frac{Q \cdot S}{I \cdot 2\beta K} = \frac{0.0336 \cdot 416 \cdot 10^{-6}}{11863 \cdot 10^{-8} \cdot 2 \cdot 0.7 \cdot 0.005} = 16.8 \text{ МПа} \leq [\tau] = 156 \text{ МПа}$$

Практическое занятие № 6 Расчет конструкций оболочково-го типа (4 часа)

К оболочковым конструкциям относят вертикальные цилиндрические резервуары с плоскими и сферическими днищами, сферические резервуары, газгольдеры, ресиверы, трубопроводы и т.д.

Расчетными нагрузками для оболочковых конструкций, как правило, являются гидростатическое или избыточное давление. Кроме того, для газгольдеров и трубопроводов к указанным нагрузкам добавляются изгибающие момент и усилия, вызываемые перепадами температур.

В вертикальной стенке цилиндрических резервуаров, а также в цилиндрических частях газгольдеров, резервуаров и трубопроводов под действием внутреннего давления возникает двухосное напряженное состояние. При этом компоненты напряжений рассчитывают по формулам таблицы 14.

Таблица 14 – Напряжения в цилиндрических и сферических оболочках

Конструкция	Напряжения		
	меридиональные σ_1	кольцевые σ_2	касательные
Стенка цилиндрического резервуара, находящегося под внутренним давлением жидкости γ и газа p	$\frac{p \cdot r}{2\delta}$	$\frac{(\gamma \cdot y + p) \cdot r}{\delta}$	-
Стенка цилиндрического сосуда, находящегося под внутренним (+) или наружным (-) давлением газа p	$\pm \frac{p \cdot r}{2\delta}$	$\pm \frac{p \cdot r}{\delta}$	-
Стенка сферического сосуда, находящегося под внутренним (+) или наружным (-) давлением газа p	$\pm \frac{p \cdot r}{2\delta}$	$\pm \frac{p \cdot r}{2\delta}$	-
δ - толщина стенки сосуда; r – радиус срединной поверхности; y - расстояние от поверхности жидкости до рассматриваемого сечения			

Задание 1. Определить кольцевые напряжения в стенке у дна стального цилиндрического резервуара. Исходные данные представлены в таблице 15.

Таблица 15 – Исходные данные к задаче 1.

вариант	Диаметр резервуара D , м	Толщина стенки δ , мм	Высота налива жидкости h , м	Плотность жидкости γ , кг/м ³	Избыточное давление, МПа	Допускаемое напряжение, МПа
0	12	6	6	800	0,02	160
1	18	5	5	800	0,03	
2	16	5	7	800	0,04	
3	16	4	8	800	0,05	
4	16	4	7	800	0,06	

Решение. Рабочее давление определяют как сумму гидростатического и избыточного давлений с учетом коэффициентов перегрузки:

$$p = 1,1p_{\text{гидростат}} + 1,2p_{\text{изб}} = 1,1\gamma h g + 1,2p_{\text{изб}} = 1,1 \cdot 800 \cdot 6 \cdot 9,8 \cdot 10^{-6} + 1,2 \cdot 0,02 = 0,0517 + 0,024 = 0,0757 \text{ МПа}$$

Тогда, кольцевые напряжения в стенке у дна резервуара:

$$\sigma_k = \frac{p \cdot r}{\delta} = \frac{0,0757 \cdot 10^6 \cdot 6}{0,006} = 75,7 \text{ МПа} \leq [\sigma]$$

Задание 2. Рассчитать толщину стенки сферического резервуара с объемом V. Исходные данные представлены в таблице 16.

Таблица 16 – Исходные данные к задаче 2.

вариант	Объем резервуара V, м ³	Плотность жидкости γ, г/см ³	Избыточное давление, МПа	Предел прочности σ _в , МПа
0	600	0,8	0,2	500
1	800	0,8	0,2	320
2	1000	0,8	0,2	380
3	1200	0,8	0,2	400
4	2000	0,8	0,2	420

Решение. Объем сферического резервуара вычисляют по формуле:

$$V = \frac{4}{3} \pi r^3$$

где r - радиус внутренней поверхности резервуара, м ;

V - объем резервуара, м³ .

$$\text{Тогда, диаметр резервуара } D = 2r = 2 \cdot \sqrt[3]{\frac{3 \cdot V}{4\pi}} = 2 \cdot \sqrt[3]{\frac{3 \cdot 600}{4 \cdot 3,14}} = 10,5 \text{ м}$$

Определяем расчетное давление:

$$p = 1,1p_{\text{гидростат}} + 1,2p_{\text{изб}} = 1,1\gamma h g + 1,2p_{\text{изб}} = 1,1 \cdot 800 \cdot 10,5 \cdot 9,8 \cdot 10^{-6} + 1,2 \cdot 0,2 = 0,091 + 0,24 = 0,331 \text{ МПа}$$

Находим расчетную толщину оболочки согласно СТБ ЕН 13445 «Сосуды, работающие под давлением»:

$$Sp = \frac{pD}{4\phi[\sigma] - p} = \frac{0,331 \cdot 10,5}{4 \cdot 142,86 - 0,33} = 0,00608 \text{ м}$$

где φ - коэффициент снижения допускаемых напряжений на сварные соединения по сравнению с допускаемым напряжением на основной металл, φ=1.

$$[\sigma] = \frac{\sigma_B}{n} = \frac{500}{3,5} = 142,86 \text{ МПа}$$

n – коэффициент запаса прочности, для сферических резервуаров n=3,5.

Окончательная толщина стенки с учетом вытяжки металла при вальцовке или штамповке $C1$, а также прибавки на коррозию $C2$ увеличивается примерно на 2 мм.

$$S_{CT} = S_p + C1 + C2 = 6 + 1 + 1 = 8 \text{ мм.}$$

Задача 3. Определить геометрические параметры стального вертикального цилиндрического резервуара (РВС). Исходные данные представлены в таблице 17.

Таблица 17 – Исходные данные к задаче 3.

Вариант	Объем резервуара V , м^3	Плотность нефти γ , г/см^3
0	20000	0,9
1	21000	0,9
2	22000	0,9
3	24000	0,9
4	25000	0,9

Решение. Выбираем высоту резервуара. Для этого используем рекомендации таблицы 18. Для резервуара объемом $V = 20000 \text{ м}^3$ принимаем номинальную высоту резервуара $H_n = 16 \text{ м}$.

Для изготовления стенки выбираем стальной лист с размерами в поставке $2000 \times 8000 \text{ мм}$. С учетом обработки кромок листа с целью получения правильной прямоугольной формы при дальнейших расчетах принимаются следующие его размеры $1990 \times 7990 \text{ мм}$.

Соответственно количество поясов в резервуаре будет равно восьми ($N_n = 8$). Точная высота резервуара

$$H = 1990 \cdot 8 = 15920 \text{ мм.}$$

Радиус резервуара определяется из формулы для объема цилиндра:

$$V = \pi \cdot r^2 \cdot H,$$

$$r = \sqrt{\frac{V}{\pi H}} = \sqrt{\frac{20000 \cdot 10^3}{\pi \cdot 15920}} = 20002 \text{ мм.}$$

Периметр резервуара L_n и число листов в поясе N_l

$$L_n = 2 \cdot \pi \cdot r = 2 \cdot \pi \cdot 20002 = 125613 \text{ мм.}$$

$$N_l = \frac{L_n}{L} = \frac{125613}{7990} = 15,7.$$

Предпочтительней округлять число листов в поясе до целого или выбрать последний лист равным половине длины листа.

Таблица 18 -Объемы резервуаров рекомендуемого параметрического ряда, м³.

Высота стенки, м	Внутренний диаметр стенки, м																			
	4,73	6,63	7,58	8,53	10,43	12,33	15,18	18,98	20,92	22,80	28,50	34,20	39,90	45,60	50,70	55,80	60,70	66,00	71,10	
6,0	105	207	271	343	513	716	1086	1698	2062	2450										
7,5	132	259	338	429	641	896	1357	2122	2578	3062										
9,0	158	311	406	514	769	1075	1629	2546	3094	3675										
10,5	185	362	474	600	897	1254	1900	2971	3609	4287										
12,0	211	414	542	686	1025	1433	2172	3395	4125	4899	7655	11024	15004	19598	24226	29345	34726	41054	47644	
13,5	237	466	609	771	1153	1612	2443	3820	4640	5512	8612	12402	16880	22047	27255	33014	39066	46186	53600	
14,0											8931	12861	17505	22864	28264	34236	40513	47897		
15,0	264	518	677	857	1282	1791	2715	4244	5156	6124	9569	13779	18755	24497	30283	36682	43407	51318		
16,0											10207	14698	20006	26130	32302	39127	46301			
16,5	290	570	745	943	1410	1970	2986	4668	5671	6737	10526	15157	20631	26947	33311	40350	47748			
18,0	316	621	812	1029	1538	2149	3258	5093	6187	7349	11483	16535	22507	29396	36339	44018	52088			
19,5	343	673	880	1114	1666	2328	3529	5517	6703	7961	12440	17913	24382	31846	39368	47686				
20,0	351	690	903	1143	1709	2388	3620	5659	6875	8166	12759	18373	25007	32663	40377	48909				
21,0	369	725	948	1200	1794	2507	3801	5942	7218	8574	13397	19291	26258	34296	42396	51354				
22,0	387	760	993	1257	1880	2627	3982	6225	7562	8982	14035	20210	27508	35929	44415					
23,0											14673	21129	28758	37562	46434					
24,0											15311	22047	30009	39195	48453					
25,0											15948	22966	31259	40828	50471					

Принимаем число листов в поясе $N_n = 16$. Тогда периметр резервуара

$$L_n = 16 \cdot 7990 = 127840 \text{ мм},$$

а окончательный радиус

$$r = \frac{L_n}{2 \cdot \pi} = \frac{127840}{2 \cdot \pi} = 20346 \text{ мм}.$$

Уточненный объем резервуара.

$$V = \pi \cdot r^2 \cdot H = \pi \cdot 20,346^2 \cdot 15920 \approx 20704 \text{ м}^3.$$

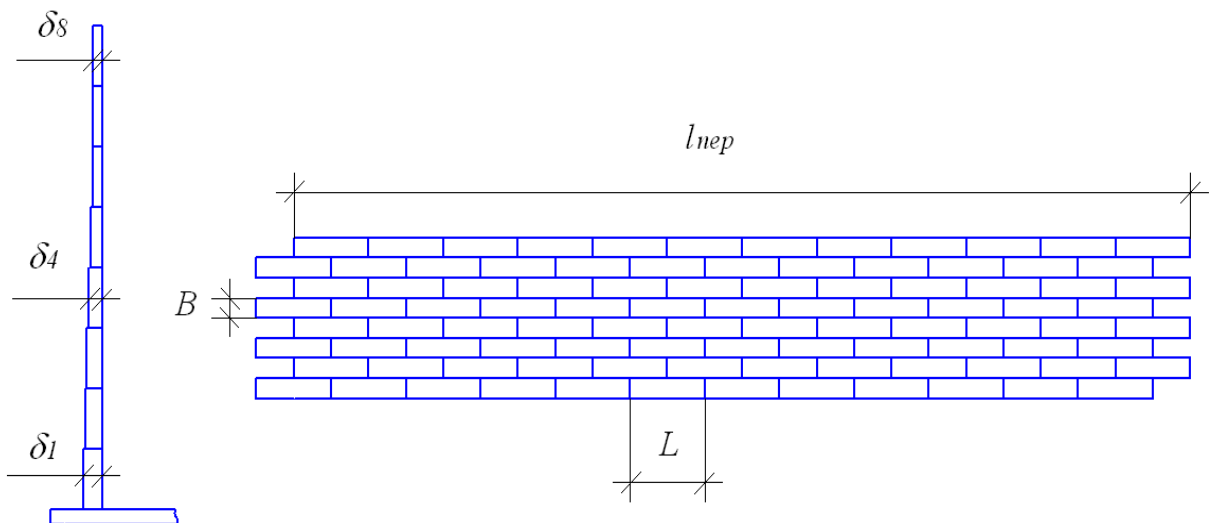


Рисунок 20 - Развертка и сечение стенки вертикального резервуара

Номинальная толщина каждого пояса стенки резервуара t_U рассчитывается по формуле

$$t_U = (\rho g (H_i - \theta_L) + 1,2p) \frac{r}{R} + \Delta t_{cU} + \Delta t_{mU},$$

$$\text{где } \theta_L = \sqrt{r \cdot (t_L - \Delta t_{cU} - \Delta t_{mU})};$$

t_L – назначенная номинальная толщина пояса стенки, примыкающего снизу к i -му стыку, м;

Δt_{cU} – припуск на коррозию пояса стенки, примыкающего к i -му стыку снизу, м;

Δt_{mU} – минусовой допуск на прокат пояса стенки, примыкающего к i -му стыку снизу, м;

R – расчетное сопротивление материала пояса стенки по пределу текучести, Па;

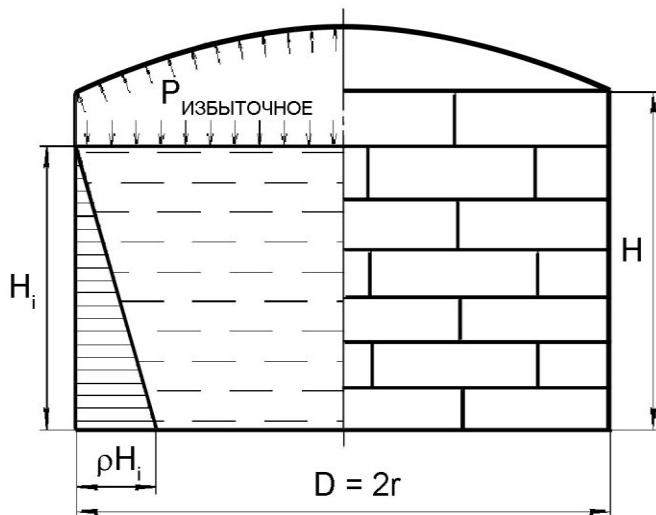
r – окончательный радиус резервуара, м

ρ – плотность нефтепродукта, кг/м³;

p – нормативное избыточное давление в газовом пространстве, МПа;

g – ускорение свободного падения, $g = 9,8$ м/с²;

H_i – расстояние от зеркала продукта до i -го стыка поясов при эксплуатации, м.



Расчетное сопротивление материала стенки резервуаров по пределу текучести определяется по формуле

$$R = \frac{R_{yn} \cdot \gamma_c \cdot \gamma_t}{\gamma_m \cdot \gamma_n},$$

где R_{yn} – нормативное сопротивление растяжению металла стенки, равное минимальному значению предела текучести, принимаемому по государственным стандартам на листовой прокат, для стали 09Г2С

$$R_{yn} = 325 \text{ МПа};$$

γ_c – коэффициент условий работы, $\gamma_c = 0,7$ – для нижнего пояса, $\gamma_c = 0,8$ для остальных поясов;

γ_t – температурный коэффициент, $\gamma_t = 1$;

γ_m – коэффициент надежности по материалу, $\gamma_m = 1,025$;

γ_n – коэффициент надежности по ответственности, для I класса опасности $\gamma_n = 1,2$; для II класса $\gamma_n = 1,1$; для III класса $\gamma_n = 1,05$; для IV класса $\gamma_n = 1$.

Номинальная толщина первого пояса стенки резервуара:

$$t_{U1} = (900 \cdot 9,8 \cdot (15,92 - 0) + 0) \frac{20,346}{201,77 \cdot 10^6} + 0,001 + 0,001 = 0,0166 \text{ м}$$

$$\theta_{L1} = 0;$$

$$R_{1\text{пояс}} = \frac{325 \cdot 0,7 \cdot 1}{1,025 \cdot 1,1} = 201,77 \text{ МПа}.$$

Таблица 19–Минимально допустимая толщина листов стенки резервуара

Диаметр резервуара, м	Минимально допустимая толщина листов стенки, мм
До 15 включ.	5
Св. 15 до 25	6
Св. 25 до 40	8
Св. 40 до 65	10

Номинальная толщина второго пояса стенки резервуара:

$$t_{U2} = (900 \cdot 9,8 \cdot (13,93 - 0,545) + 0) \frac{20,346}{230,6 \cdot 10^6} + 0,001 + 0,001 = 0,0124 \text{ м}$$

$$\theta_{L2} = \sqrt{20,357 \cdot (0,0166 - 0,001 - 0,001)} = 0,545 \text{ м}$$

$$R_{2\text{пояс}} = \frac{325 \cdot 0,8 \cdot 1}{1,025 \cdot 1,1} = 230,6 \text{ МПа}.$$

Результаты расчета толщины t_U каждого пояса стенки следует округлить до целого числа в большую сторону в соответствии со значениями толщины проката по ГОСТ 19903, сравнить с минимальной толщиной стенки (таблица 19) и свести все данные в таблицу 20.

Таблица 20– Номинальная толщина стенки резервуара

Номер пояса	Номинальная толщина пояса t_U , мм	Δt_{cU} , мм	Δt_{mU} , мм	Минимальная толщина стенки t_{min} , мм	Принятая толщина пояса t , мм
1	16,6	1	1	10	17
2	12,4				13
3	11,2				12
4	9,7				10
5	8,1				10
6	6,6				10
7	5,1				10
8	3,5				10

Список литературы

- 1 **Николаев, Г.А.** Сварные конструкции. Расчет и проектирование / Г.А.Николаев, В.А.Винокуров. — М.:Высш.шк., 1990. — 446с.
- 2 **Николаев, Г.А.** Сварные конструкции. Технология изготовления, механизация, автоматизация и контроль качества / Г.А.Николаев, С.А.Куркин.—М.: Высш.шк., 1991. — 398с.
- 3 **Николаев, Г.А.** Сварные конструкции. Прочность сварных соединений и деформация конструкций / Г.А.Николаев, С.А.Куркин, В.А.Винокуров.—М.: Высш.шк., 1982. — 272с.
- 4 **Николаев, Г.А.** Сварные конструкции. Технология изготовления, автоматизация производства и проектирование сварных конструкций / Г.А.Николаев, С.А. Куркин, В.А.Винокуров.—М.:Высш.шк., 1983. — 344с.
- 5 **Серенко, А.Н.** Расчет сварных соединений и конструкций. Примеры и задачи / А.Н. Серенко, М.Н.Крутбольт, К.В.Бадрянский.—Киев: Ви-щашк, 1977 — 366с.