Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Кузбасский государственный технический университет
имени Т. Ф. Горбачева»

Кафедра технологии машиностроения

Составители
А. А. Кречетов, М. В. Пимонов

ПРОЕКТИРОВАНИЕ СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Методические указания к лабораторным занятиям

Рекомендовано учебно-методической комиссией
направления подготовки 15.03.01 Машиностроение
в качестве электронного издания
для использования в образовательном процессе

Кемерово 2019

Рецензенты:
Клепцов А. А., заведующий кафедрой технологии машиностроения

Андрей Александрович Кречетов
Пимонов Максим Владимирович
Проектирование сварных конструкций: методические указания к лабораторным работам [Электронный ресурс]: для обучающихся направления подготовки 15.03.01 Машиностроение, профиль 01 Оборудование и технология сварочного производства, всех форм обучения / сост. А. А. Кречетов, М. В. Пимонов; КузГТУ. – Электрон. дан. – Кемерово, 2019. – Систем. требования : Pentium IV ; ОЗУ 8 Мб ; Windows 95; мышь. – Загл. с экрана.

Методические указания предназначены для студентов, обучающихся по направлению 15.03.01 Машиностроение, профиль 01 Оборудование и технология сварочного производства, при изучении дисциплины «Проектирование сварных конструкций».

© КузГТУ, 2019
© Кречетов А. А.,
Пимонов М. В.,
составление, 2019

СОДЕРЖАНИЕ

Лабораторная работа №1. Проектирование сварных конструкций и соединений на статическую прочность..... 4
Лабораторная работа №2. Проектирование сварных конструкций и соединений на усталостную прочность……. 19
Лабораторная работа №3. Расчет стоек на прочность и устойчивость…….. 35
Лабораторная работа №4. Проектирование сварных балок... 56
Лабораторная работа №5. Расчёт барабана грузоподъёмного механизма…… 69
Лабораторная работа №6. Расчёт сварочных деформаций угловых и тавровых швов…….. 79
Список использованной литературы…… 93

Лабораторная работа №1

ПРОЕКТИРОВАНИЕ СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ И СОЕДИНЕНИЙ НА СТАТИЧЕСКУЮ ПРОЧНОСТЬ

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью работы является закрепление теоретического материала и овладение практическими навыками расчета сварных конструкций и соединений на статическую прочность

2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ [1, 2]

2.1. Расчет сварных конструкций на статическую прочность.

В данной работе рассматривается расчет стальных строительных конструкций и соединений на статическую прочность, который проводится в соответствии с ГОСТ 27751-88 и СНиП II-23-81.

Расчет на прочность элементов, подверженных центральному растяжению или сжатию выполняется по формуле

$$\frac{N}{A_n} \le R_y \gamma_c, \qquad (1)$$

где N – сила, действующая на элемент, Н; A_n – площадь поперечного сечения элемента, м^2; R_y – расчетное сопротивление, Па; γ_c – коэффициент условий работы.

Расчетное сопротивление определяется как

$$R_y = \frac{\sigma_m}{\gamma_m}, \qquad (2)$$

где σ_m – предел текучести материала, Па; γ_m – коэффициент надежности по материалу.

Значение коэффициента условий работы зависит от назначения элемента конструкции. Так, например, для сплошных балок и сжатых элементов ферм перекрытий под залами театров, клубов, кинотеатров, под трибунами γ_c=0,9; для колонн общественных зданий и опор водонапорных башен – γ_c=0,95 и т.д.

2.2. Расчет сварных соединений на статическую прочность

Сварные соединения должны быть равнопрочными с основным металлом элементов конструкций при всех температурах во время эксплуатации, а также при всех видах нагрузок (статических, ударных, вибрационных). Избыточная прочность сварного соединения по сравнению с целым элементом лишь удорожает конструкцию и не улучшает условий ее эксплуатации. Недостаточная прочность сварного соединения снижает несущую способность всей конструкции и не позволяет полностью использовать рабочие сечения ее элементов.

Поэтому из условия равнопрочности сварные соединения на статическую прочность рассчитываются по формуле

$$\frac{N}{A} \le [\sigma], \qquad (3)$$

где $[\sigma]$ – допускаемые напряжения, Па; A – площадь поперечного сечения сварного соединения, м^2.

В конструкциях со сварными соединениями в металле швов могут возникать напряжения двух родов: рабочие и связующие.

Сварные соединения, разрушение которых влечет за собой выход из строя конструкции, называются рабочими; напряжения, действующие в этих соединениях, – рабочими напряжениями (рис. 1, а).

Сварные соединения, нагружение которых происходит совместно с основным металлом и не опасные для прочности конструкций, называются связующими; напряжения, действующие в этих соединениях, – связующими напряжениями (рис. 1, б).

При расчете прочности сварных соединений определяют только рабочие напряжения.

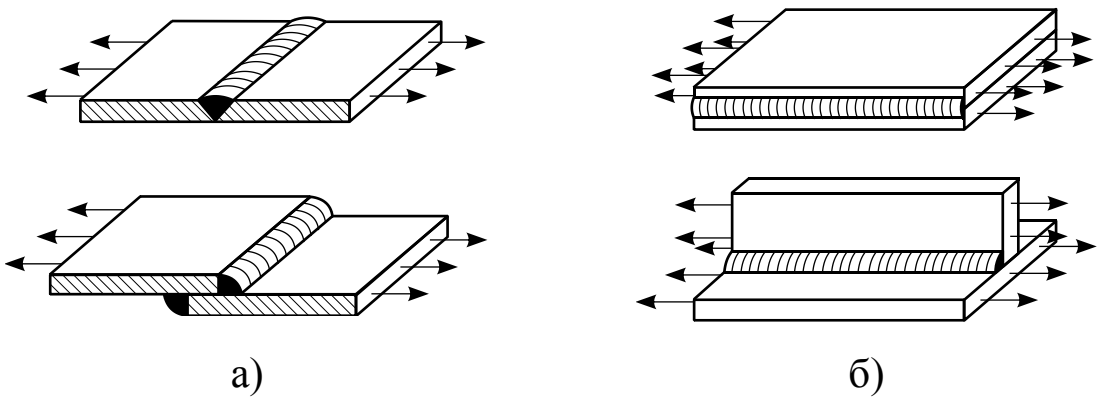


Рис. 1: а – рабочие соединения; б – связующие соединения.

2.2.1. Расчет стыковых соединений

В случае если сварное соединение работает на растяжение или сжатие, то допускаемое усилие определяется по формуле

$$P = [\sigma] s l, \qquad (4)$$

где $[\sigma]$ – допускаемые напряжения, Па; s – толщина основного металла (усиление шва не учитывается), м; l – длина шва, м.

2.2.2. Расчет нахлесточных соединений

В нахлесточных соединениях швы называются угловыми.

В зависимости от ориентации относительно действующего усилия угловые швы в нахлесточном соединении подразделяются на:

- лобовые – швы направлены перпендикулярно усилию;
- фланговые – швы направлены параллельно усилию;
- косые – швы направлены к усилию под некоторым углом.

Сочетание различных типов швов называется комбинированным соединением (рис. 2)

При статических нагрузках и треугольном очертании шва слабым сечением считают наименьшее сечение, совпадающее с биссектрисой прямого угла $a - a'$ (рис. 3).

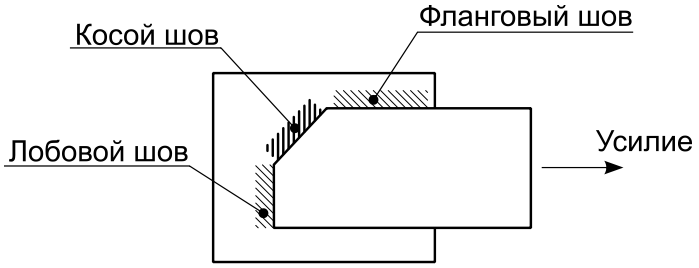


Рис. 2. Различные типы угловых швов

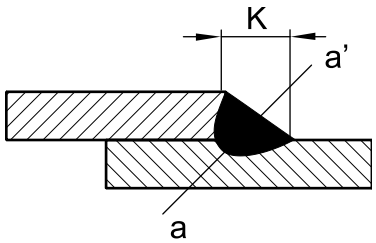


Рис. 3. Схема углового шва

Формула определения допускаемого усилия P для соединения, состоящего из одного шва, имеет следующий вид:

$$P = [\tau]\beta K l, \qquad (5)$$

где $[\tau]$ – допускаемые касательные напряжения, Па; K – катет углового шва (рисунок 2), м; β – коэффициент, учитывающий глубину проплавления в зависимости от технологического процесса сварки (табл. 1); l – длина шва, м.

Распределение усилий в отдельных швах, составляющих комбинированное соединение, не одинаково. Расчет прочности комбинированных соединений производится согласно принципу независимости действия сил:

$$P = \sum P_i, \qquad (6)$$

где P_i – усилие в i-м шве.

Таблица 1

Значения коэффициента β

Технологический процесс сварки	Значение коэффициента β
Ручная и многопроходная автоматическая и полуавтоматическая сварки	β=0,7
Двух- и трехпроходная автоматическая сварка и однопроходная полуавтоматическая сварка	β=0,9
Двух- и трехпроходная полуавтоматическая сварка	β=0,8
Однопроходная автоматическая сварка	β=1,1

В случае если нахлесточное соединение используется для присоединения уголка (один лобовой шов и два фланговых – рис.4), расчет допускаемого усилия проводится по формуле:

$$P = P_л + P_ф, \tag{7}$$

где $P_л$ – усилие, допускаемое для лобового шва, рассчитывается по формуле (5); $P_ф$ – усилие, допускаемое для фланговых швов.

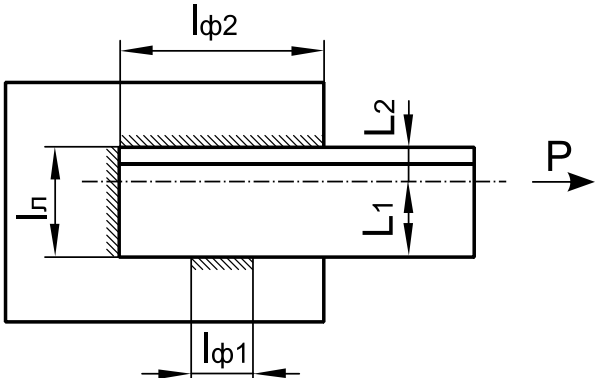


Рис. 4. Прикрепление уголка к несущей пластине с использованием комбинированного нахлесточного соединения

Усилие $P_ф$ распределяется между фланговыми швами обратно пропорционально расстоянию от оси уголка до обеих кромок:

$$P_ф = P_{ф1} + P_{ф2},\ P_{ф1} = P_ф L_2,\ P_{ф2} = P_ф L_1. \tag{8}$$

Длина фланговых швов может быть определена на основе отношения

$$\frac{l_{ф1}}{l_{ф2}} = \frac{L_2}{L_1}. \tag{9}$$

Касательные напряжения во фланговых швах рассчитываются по формулам

$$\tau_1 = \frac{P_{ф1}}{\beta K L_1}, \ \tau_2 = \frac{P_{ф2}}{\beta K L_2}. \qquad (10)$$

Расчетные значения касательных напряжений не должны превышать максимально допустимого значения.

2.2.3. Тавровые соединения

Тавровые соединения без разделки кромок (рисунок 5), применяющиеся для соединения элементов, расположенных во взаимно перпендикулярных плоскостях, рассчитывают на прочность по формуле

$$P = 2[\tau]\beta K l. \qquad (11)$$

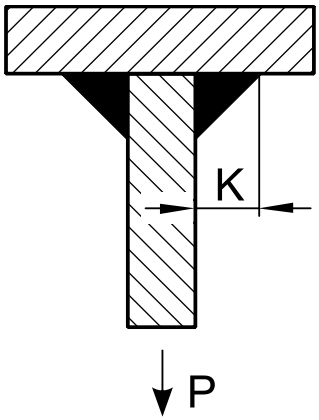


Рис. 5. Тавровое соединение

3. ВАРИАНТЫ ЗАДАНИЙ

В качестве задания предлагается проектирование конструкции, показанной на рис. 6. К некоторой балке с использованием таврового соединения приварена полоса 1 шириной L_1. К полосе 1 стыковым соединением приварена полоса 2, которая сужается

до ширины L_2. К полосе 2 с использованием комбинированного нахлесточного соединения в составе лобового и фланговых швов приварена тяга уголкового профиля. К тяге приложена сила P.

Требуется подобрать сечения элементов конструкции и определить геометрические параметры сварных швов конструкции.

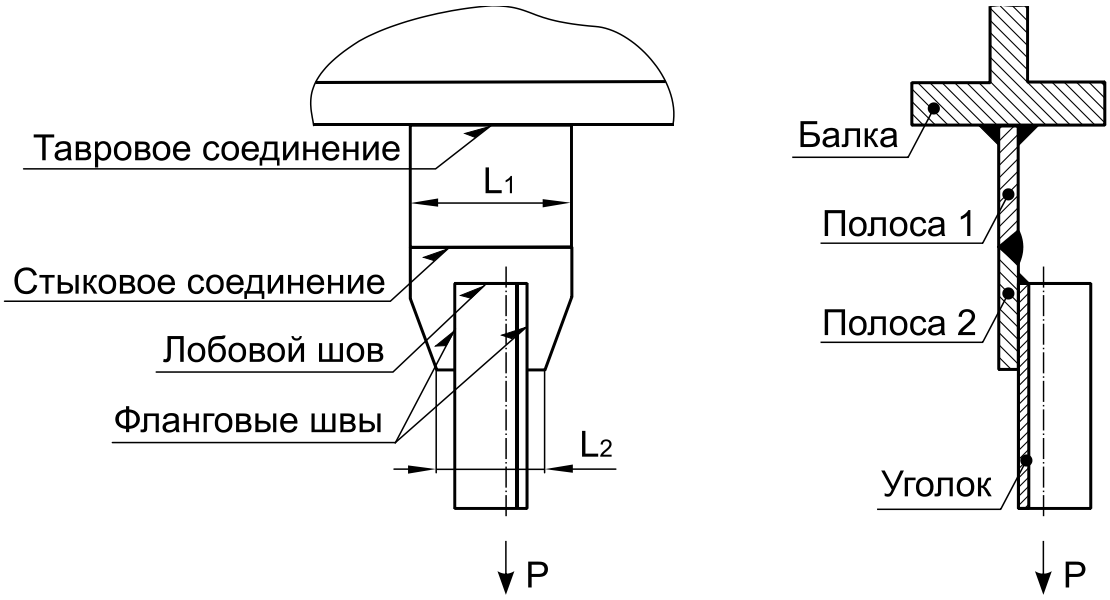


Рис. 6. Задание на проектирование

При проектировании следует принимать во внимание:

- масса конструкции должна быть минимальной;
- сварные соединения должны быть равнопрочными элементам конструкции;
- катеты лобового и флангового шва со стороны прикрепленной полки (фланговый шов 1 на рис. 4) не должны превышать толщины полки уголка;

- при проектировании нахлесточного соединения предполагается, что усилие в уголке действует в плоскости прикрепленной полки;
- моменты силы относительно центра тяжести швов не учитываются.

Варианты заданий приведены в табл. 2, необходимые справочные данные – в прил. 1.

Для всех вариантов:

- используемый материал – сталь Ст3пс;
- допускаемые напряжения $[\sigma]$=250 МПа, $[\tau]$=180 МПа;
- коэффициент надежности по материалу γ_m=1,05;
- коэффициент условий работы γ_c=0,9.

Таблица 2

Варианты заданий

№	ТП сварки	P, кН	L_1, м	L_2,м	№	ТП сварки	P, кН	L_1, м	L_2, м
1	1	250	0,25	0,15	13	1	430	0,25	0,19
2	2	265	0,26	0,17	14	2	445	0,26	0,21
3	3	280	0,27	0,19	15	3	460	0,27	0,23
4	4	295	0,28	0,21	16	4	475	0,28	0,15
5	5	310	0,25	0,23	17	5	490	0,25	0,17
6	6	325	0,26	0,15	18	6	505	0,26	0,19
7	7	340	0,27	0,17	19	7	520	0,27	0,21
8	4	355	0,28	0,19	20	4	535	0,28	0,23
9	8	370	0,25	0,21	21	8	550	0,25	0,15
10	9	385	0,26	0,23	22	9	565	0,26	0,17
11	3	400	0,27	0,15	23	3	580	0,27	0,19
12	4	415	0,28	0,17	24	4	595	0,28	0,21

Примечание: В табл. 2 технологический процесс сварки:

1. Ручная сварка
2. Двухпроходная автоматическая сварка
3. Двухпроходная полуавтоматическая сварка
4. Однопроходная автоматическая сварка
5. Многопроходная автоматическая сварка
6. Трехпроходная автоматическая сварка
7. Трехпроходная полуавтоматическая сварка
8. Многопроходная полуавтоматическая сварка
9. Однопроходная полуавтоматическая сварка

4. ПРИМЕР ВЫПОЛНЕНИЯ ЗАДАНИЯ

Исходные данные: $P = 305$ кН; $L_1 = 0{,}2$ м; $L_2 = 0{,}18$ м; сварка ручная дуговая.

- Расчет толщины полосы 1

Из формулы (1)

$$A_{n1} = \frac{P\gamma_m}{[\sigma]\gamma_c} = \frac{305 \cdot 10^3 \cdot 1{,}05}{250 \cdot 10^6 \cdot 0{,}9} = 1{,}42 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2.$$

Тогда толщина полки

$$s_{n1} = \frac{A_{n1}}{L_1} = \frac{1{,}42 \cdot 10^{-3}}{0{,}2} = 7{,}12 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

Принимаем $s_{n1} = 8$ мм.

- Расчет толщины полосы 2

Аналогично полосе 1:

$$A_{n2} = \frac{P\gamma_m}{[\sigma]\gamma_c} = \frac{305 \cdot 10^3 \cdot 1{,}05}{250 \cdot 10^6 \cdot 0{,}9} = 1{,}42 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2,$$

$$s_{n2} = \frac{A_{n2}}{L_2} = \frac{1{,}42 \cdot 10^{-3}}{0{,}18} = 7{,}91 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

Принимаем $s_{n2} = 8$ мм.

- Подбор уголка

Из условия равнопрочности площадь поперечного сечения уголка принимаем равной площади поперечного сечения полос:

$$A_y = A_{n1} = A_{n2} = 1{,}42 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2.$$

По сортаменту назначаем уголок, имеющий ближайшую большую площадь поперечного сечения (см. прил. 1): уголок

№11, площадь поперечного сечения 15,15 см^2; толщина полки 7 мм; длина полки 110 мм.

- Расчет катета таврового шва

Из формулы (11):

$$K_m = \frac{P}{2\beta[\tau]l} = \frac{305 \cdot 10^3}{2 \cdot 0{,}7 \cdot 180 \cdot 10^6 \cdot 0{,}2} = 6{,}05 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Принимаем $K_m = 7$ мм.

- Расчет допускаемого усилия стыкового шва

По формуле (4):

$$P = [\sigma]sl = 250 \cdot 10^6 \cdot 8 \cdot 10^{-3} \cdot 0{,}2 = 400 \cdot 10^3 \text{ Н.}$$

Усилие, действующее в конструкции, не превышает допускаемого усилия стыкового шва.

- Проектирование нахлесточного соединения:

Принимаем катеты лобового и фланговых швов равными толщине полки уголка

$$K_л = K_ф = 7 \text{ мм.}$$

Принимаем длину лобового шва равную ширине полки $l_л = 110$ мм.

Тогда по формуле (5) усилие, воспринимаемое лобовым швом

$$P = [\tau]\beta Kl = 180 \cdot 10^6 \cdot 0{,}7 \cdot 7 \cdot 10^{-3} \cdot 0{,}11 = 97 \cdot 10^3 \text{ Н.}$$

Усилие, воспринимаемое фланговыми швами из формулы (7)

$$P_ф = P - P_л = 305 - 97 = 208 \text{ кН.}$$

Усилие, воспринимаемое 1 фланговым швом

$$P_{ф1} = 0{,}3P_{ф} = 0{,}3 \cdot 208 = 62{,}4 \text{ кН}.$$

Усилие, воспринимаемое 2 фланговым швом

$$P_{ф2} = P_{ф} - P_{ф1} = 208 - 62{,}4 = 145{,}6 \text{ кН}.$$

Тогда из формулы (5)

$$l_{ф1} = \frac{P_{ф1}}{[\tau]\beta K_{ф}} = \frac{62{,}4 \cdot 10^{3}}{180 \cdot 10^{6} \cdot 0{,}7 \cdot 7 \cdot 10^{-3}} = 0{,}071 \text{ м}.$$

$$l_{ф2} = \frac{P_{ф2}}{[\tau]\beta K_{ф}} = \frac{145{,}6 \cdot 10^{3}}{180 \cdot 10^{6} \cdot 0{,}7 \cdot 7 \cdot 10^{-3}} = 0{,}165 \text{ м}.$$

5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Назовите формулу расчет на прочность элементов, подверженных центральному растяжению или сжатию?

2. В чём отличие между связующими и рабочими соединениями?

3. Какие типы швов различают угловые швы в зависимости от ориентации относительно действующего усилия?

4. Какова формула расчёта прочности тавровых соединений без разделки кромок?

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Поперечные площади уголков стальных горячекатаных равнополочных (по ГОСТ 8509-93): b – ширина полки, мм; s – толщина полки, мм; A – площадь поперечного сечения, см^2.

Таблица П.1

№	b, мм	s, мм	A, см^2	№	b, мм	s, мм	A, см^2
2	20	3	1,13	3,2	32	3	1,86
		4	1,46			4	2,43
2,5	25	3	1,43	3,5	35	3	2,04
		4	1,86			4	2,67
2,8	28	3	1,62			5	3,28
3	30	3	1,74	4	40	3	2,35
		4	2,27			4	3,08
4,5	45	3	2,65	10	100	12	22,80
		4	3,48			14	26,28
		5	4,29			16	29,68
5	50	3	2,96	11	110	7	15,15
		4	3,89			8	17,20
		5	4,80	12,5	125	8	19,69
		6	5,69			9	22,00
5,6	56	4	4,38			10	24,33
		5	5,41			12	28,89
6,3	63	4	4,96			14	33,37
		5	6,13			16	37,77
		6	7,28	14	140	9	24,72
7	70	4,5	6,20			10	27,33
		5	6,86			12	32,49
		6	8,15	16	160	10	31,43
		7	9,42			11	34,42
		8	10,67			12	37,39
7,5	75	5	7,39			14	43,57
		6	8,78			16	49,07
		7	10,15			18	54,79

Продолжение табл. П.1

№	b, мм	s, мм	A, см^2	№	b, мм	s, мм	A, см^2
7,5	75	8	11,50	16	160	20	60,40
		9	12,83	18	180	11	38,80
8	80	5,5	8,63			12	42,19
		6	9,38	20	200	12	47,10
		7	10,85			13	50,85
		8	12,30			14	54,60
9	90	6	10,61			16	61,98
		7	12,28			20	76,54
		8	13,93			25	94,29
		9	15,60			30	111,54
10	100	6,5	12,82	22	220	14	60,38
		7	13,75			16	68,58
		8	15,60	25	250	16	78,40
		10	19,24			18	87,72
25	250	20	96,96	25	250	28	133,12
		22	106,12			30	141,96
		25	119,71			35	163,71

Лабораторная работа №2

ПРОЕКТИРОВАНИЕ СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ И СОЕДИНЕНИЙ НА УСТАЛОСТНУЮ ПРОЧНОСТЬ

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью работы является закрепление теоретического материала и овладение практическими навыками расчета сварных конструкций и соединений на прочность при усталостных нагрузках

2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Элементы конструкций и деталей машин, которые подвергаются воздействию переменных во времени и повторяющихся много раз усилий, разрушаются внезапно. При этом заметные остаточные деформации отсутствуют, а амплитудные значения действующих напряжений могут быть меньше предела текучести. При действии циклических нагрузок разрушение происходит не сразу, а после некоторого количества циклов нагружения. На основании этого ранее существовала гипотеза, что металл "устает", изменяет свою структуру, из пластического состояния переходит в хрупкое; отсюда появился термин – "усталостное" разрушение.

В настоящий момент установлено, что при переменных напряжениях принципиальных изменений в структуре металла не наблюдается, происходит процесс постепенного накопления повреждений, который приводит к образованию микроскопических

трещин. Длина трещин увеличивается, они объединяются, образуя первую макротрещину (длина порядка 0,1…0,5 мм). Макротрещина развивается, являясь концентратором напряжений ослабляет сечение, что приводит к внезапному разрушению.

Минимальное напряжение, при котором разрушения не происходит при достаточно большом количестве циклов нагружений, называется пределом выносливости.

Предел выносливости не является постоянной величиной и зависит от:

- формы и размеров конструкции;
- состояние поверхностного слоя элементов конструкции (так, упрочнение поверхностного слоя позволяет повысить предел выносливости в 2 и более раза);
- вида нагружения (изгиб, кручение, растяжение-сжатие);
- характеристики цикла нагружения (асимметрия цикла, частота)

Для сварных конструкций дополнительными факторами, влияющими на предел выносливости, являются:

- Концентрация напряжений, возникающая в области сварного шва;
- Неоднородность свойств в зонах наплавленного и основного металла;
- Наличие остаточных напряжений;

При наличии технологических дефектов (шлаковых включений, пор, окислов, трещин, непроваров и т.п.) концентрация

напряжений возрастает, и, как следствие, предел выносливости резко падает.

В соответствии со СНиП II-23-81 максимальное допускаемое напряжение в сварных соединениях при действии усталостных нагрузок определяется как

$$\sigma_{max} = \alpha R_m \gamma, \qquad (1)$$

где R_m – расчетное сопротивление по пределу текучести при воздействии циклических нагрузок; α – коэффициент, учитывающий ожидаемое количество циклов нагружений; γ – коэффициент, учитывающий вид напряженного состояния и асимметрию цикла нагружения.

Расчетное сопротивление по пределу текучести зависит от коэффициента концентрации напряжений для данной сварной конструкции. В СНИП II-23-81 сварные соединения разделены на 8 групп (табл. 1), чем выше номер группы, тем больше концентрация напряжений и меньше расчетное сопротивление по пределу текучести (табл. 2). Следует отметить, что, начиная с 3 группы, расчетные сопротивления по пределу текучести одинаковы для всех сталей вне зависимости от их прочности. Это объясняется увеличением влияния концентрации напряжений с ростом прочности сталей.

Ожидаемое количество циклов учитывается с помощью коэффициента α, который определяется: для соединений групп 1 и 2, как

$$\alpha = 0{,}64\left(\frac{n}{10^6}\right)^2 - 0{,}5\frac{n}{10^6} + 1{,}75; \qquad (2)$$

для групп с 3 по 8

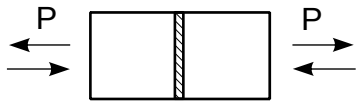
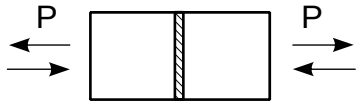
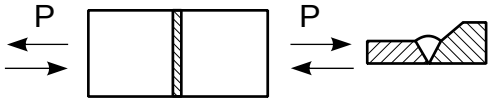
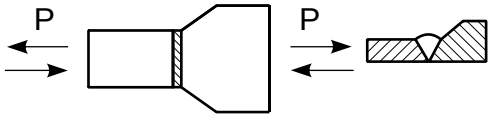
$$\alpha = 0{,}07\left(\frac{n}{10^6}\right)^2 - 0{,}64\frac{n}{10^6} + 2{,}2. \qquad (3)$$

В формулах (2)-(3) n – количество циклов нагружения.

При $n \geq 3{,}9 \cdot 10^6$ – $\alpha = 0{,}77$.

Таблица 1

Группы сварных соединений

Группа	Пример соединения	Характеристика соединения
1		Стыковой шов, выполненный на подкладном листе; обработанный стыковой шов
2		Необработанный стыковой шов
3		Стыковой шов, соединяющий элементы разной толщины
4		Стыковой необработанный шов, соединяющий элементы разной толщины и ширины

Продолжение таблицы 1

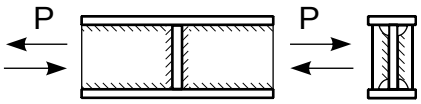
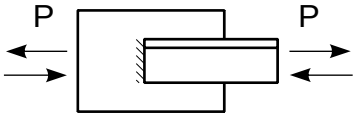
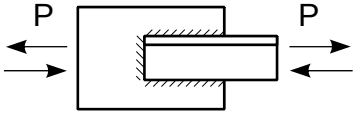
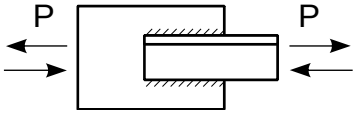
5		Основной металл растянутых поясов балок и элементов ферм вблизи диафрагм и ребер, приваренных угловыми швами
6		Основной металл в месте перехода к лобовому угловому шву без обработки
7		Основной металл в соединениях с фланговыми и лобовыми швами (в местах перехода от элемента к концам фланговых швов)
8		Основной металл в соединениях только с фланговыми швами (в местах перехода от элемента к концам фланговых швов)

Таблица 2

Расчетное сопротивление сварных соединений

по пределу текучести

Группа элементов	$\sigma_в$, МПа				
	До 420	420…440	440…520	520…580	580…675
1	120	128	132	136	145
2	100	106	108	110	116
3	90	90	90	90	90
4	75	75	75	75	75
5	60	60	60	60	60
6	45	45	45	45	45
7	36	36	36	36	36
8	27	27	27	27	27

Характер напряженного состояния учитывается с помощью коэффициента γ, который определяется по табл. 3.

Таблица 3

Значения коэффициента γ

Вид усилия	Коэффициент асимметрии цикла r	Значение коэффициента γ
Растяжение	$-1 < r < 0$	$\gamma = 2{,}5/(1{,}5 - r)$
	$0 < r < 0{,}8$	$\gamma = 2{,}0/(1{,}2 - r)$
	$0{,}8 < r < 1$	$\gamma = 1{,}0/(1 - r)$
Сжатие	$-1 < r < 1$	$\gamma = 2{,}0/(1 - r)$

В табл. 3 r – коэффициент асимметрии цикла:

$$r = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}}, \tag{4}$$

где σ_{min} и σ_{max} – минимальное и максимальное значения действующего напряжений, в том случае, если σ_{min} и σ_{max} имеют разные знаки, то коэффициент имеет знак минус.

3. ВАРИАНТЫ ЗАДАНИЙ

В качестве задания предлагается проектирование конструкции, показанной на рис. 1. К некоторой балке с использованием таврового соединения приварена полоса 1 шириной L_1. К полосе 1 стыковым соединением приварена полоса 2, которая сужается до ширины L_2. К полосе 2 с использованием комбинированного нахлесточного соединения в составе лобового и фланговых швов приварена тяга уголкового профиля. К тяге приложена сила P, которая циклически изменяется.

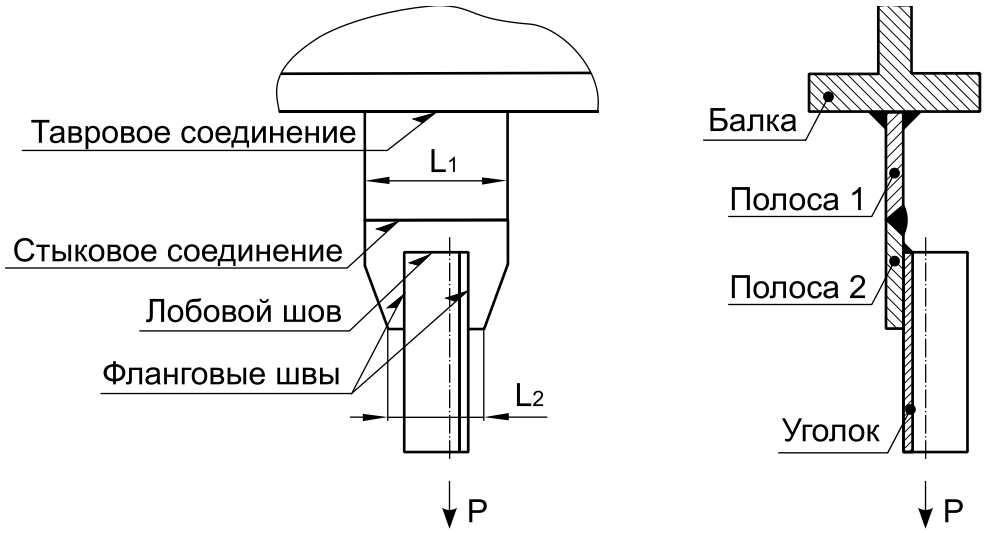


Рис. 1. Задание на проектирование

Требуется:

1. Подобрать толщину полосы 2 и площадь уголка по заданному количеству циклов и максимальной и минимальной величине действующего усилия;

2. Определить допускаемое количество циклов нагружения и по заданной толщине полосы 2, площади уголка и максимальной и минимальной величине действующего усилия.

Варианты для выполнения задания 1 приведены в табл. 4, для выполнения задания 2 – в табл. 5. В табл. 4 и 5 положительные усилия соответствуют растяжению, отрицательные – сжатию.

Для всех вариантов:

- используемый материал – сталь Ст3пс;
- расчет проводится для нахлесточного соединения, так как группа этого соединения имеет наибольший номер.

Таблица 4

Варианты для выполнения задания 1

№ варианта	n, циклов	P_{max}, кН	P_{min}, кН	L_2, м
1	700 000	100	-90	0,15
2	750 000	150	-80	0,16
3	800 000	200	-70	0,17
4	850 000	250	-60	0,18
5	900 000	300	-50	0,19
6	950 000	350	-40	0,2
7	1 000 000	400	-30	0,21

№ варианта	n, циклов	P_{max}, кН	P_{min}, кН	L_2, м
8	1 050 000	100	-20	0,22
9	1 100 000	150	-10	0,23
10	1 150 000	200	0	0,24
11	1 200 000	250	10	0,25
12	1 250 000	300	20	0,15
13	1 300 000	350	30	0,16
14	1 350 000	400	40	0,17
15	1 400 000	100	50	0,18
16	1 450 000	150	40	0,19
17	1 500 000	200	30	0,2
18	1 550 000	250	20	0,21
19	1 600 000	300	10	0,22
20	1 650 000	350	0	0,23
21	1 700 000	400	-10	0,24
22	1 750 000	100	-20	0,25
23	1 800 000	150	-25	0,15
24	1 850 000	200	-30	0,16

Таблица 5

Варианты для выполнения задания 2

№ варианта	P_{max}, кН	P_{min}, кН	s_{n2}, м	L_2, м	Уголок
1	200	-100	0,012	0,25	160×10
2	220	-80	0,013	0,26	140×12
3	240	-60	0,014	0,27	160×12
4	260	-40	0,015	0,28	180×12
5	280	-20	0,016	0,29	200×12
6	300	0	0,012	0,3	125×16
7	320	20	0,013	0,31	180×12

№ варианта	P_{max}, кН	P_{min}, кН	s_{n2}, м	L_2, м	Уголок
8	340	40	0,014	0,32	160×14
9	360	60	0,015	0,33	160×16
10	380	80	0,016	0,34	160×18
11	400	100	0,012	0,35	180×11
12	300	-100	0,013	0,25	140×12
13	320	-80	0,014	0,26	160×12
14	460	-60	0,015	0,27	180×12
15	480	-40	0,016	0,28	160×14
16	200	-20	0,012	0,29	160×11
17	220	0	0,013	0,3	180×11
18	370	20	0,014	0,31	160×14
19	360	40	0,015	0,32	200×12
20	350	60	0,016	0,33	200×14
21	300	80	0,012	0,34	180×12
22	380	100	0,013	0,35	200×12
23	340	-100	0,014	0,25	160×12
24	360	-80	0,015	0,26	180×11

4. ПРИМЕР ВЫПОЛНЕНИЯ ЗАДАНИЯ

Задание 1. Исходные данные: n=1 950 000 циклов; P_{max}=200 кН; $P_{min}=-40$ кН; L_2=0,18 м.

1. Расчет коэффициента α

Так как соединение относится к 7 группе (соединение с лобовыми и фланговыми швами), то для расчета коэффициента α воспользуемся формулой (3):

$$\alpha = 0{,}07\left(\frac{1{,}95\cdot 10^6}{10^6}\right)^2 - 0{,}64\frac{1{,}95\cdot 10^6}{10^6} + 2{,}2 = 1{,}218$$

2. Расчет коэффициента γ

Коэффициент γ зависит от вида напряженного состояния и коэффициента асимметрии цикла. Вид напряженного состояния можно определить по среднему значению напряжения в цикле:

$$P_{cp} = (P_{max} + P_{min}) / 2 = (200 - 40) / 2 = 80 \text{ кН}.$$

Так как среднее усилие имеет знак плюс, то вид напряженного состояния – растяжение.

Коэффициент асимметрии цикла r определяется по формуле (4), однако в явном виде воспользоваться этой формулой нельзя, так как, не зная площадь поперечного сечения элементов, невозможно определить действующие в элементе напряжения.

Поэтому r определяется по известным усилиям:

$$r = \frac{P_{min}}{P_{max}} = \frac{-40}{200} = -0{,}2.$$

Тогда в соответствии с табл. 3

$$\gamma = 2{,}5 / (1{,}5 + 0{,}2) = 1{,}471.$$

3. Определение расчетного сопротивления R_m Соединение относится к 7 группе (соединение с лобовыми и фланговыми швами), поэтому R_m=36 МПа.

- Определение максимально допустимого напряжения σ_{max}

В соответствии с формулой (1)

$$\sigma_{max} = 1{,}218 \cdot 36 \cdot 1{,}471 = 64{,}49 \text{ МПа}.$$

4. Подбор толщины полки и уголка

Площадь поперечного сечения полки и уголка, при которой действующие напряжения не превышают максимально допустимого значения, может быть определена как

$$A_{n2} = A_y = P_{max} / \sigma_{max} = 200 \cdot 10^3 / 64{,}49 \cdot 10^6 = 0{,}0031 \text{ м}^2.$$

Тогда толщина полки

$$s_{n2} = A_{n2} / L_2 = 0{,}0031 / 0{,}18 = 0{,}0172 \text{ м}.$$

Принимаем s_{n2} = 18 мм.

По прил. 1 принимаем уголок, имеющий ближайшую большую площадь поперечного сечения: уголок №16, толщина полки 10 мм.

Задание 2. Исходные данные: P_{max}=400 кН; $P_{min} = -40$ кН; s_{n2}=17 мм; L_2=0,28 м; уголок 200×12.

1. Определение площади поперченного сечения полки и уголка

Площадь поперечного сечения полки

$$A_{n2} = s_{n2} L_2 = 0{,}017 \cdot 0{,}28 = 0{,}00476 \text{ м}^2.$$

По прил. 1 площадь поперченного сечения уголка A_y=0,00471 м^2.

Так как площадь поперечного сечения уголка меньше, чем площадь поперечного сечения полки, дальнейший расчет будем проводить по площади поперечного сечения уголка.

2. Определение максимального напряжения, действующего в элементе

Максимальное напряжение, действующее в элементе, определяется как

$$\sigma_{max} = P_{max} / A_y = 400 \cdot 10^3 / 0{,}00471 = 84{,}93 \text{ МПа}.$$

3. Расчет коэффициента γ

Среднее усилие цикла

$$P_{cp} = (P_{max} + P_{min}) / 2 = (400 - 40) / 2 = 180 \text{ кН}.$$

Так как среднее усилие имеет знак плюс, то вид напряженного состояния – растяжение.

Коэффициент асимметрии цикла

$$r = \frac{P_{min}}{P_{max}} = \frac{-40}{400} = -0{,}1.$$

Тогда соответствии с табл. 3

$$\gamma = 2{,}5 / (1{,}5 + 0{,}1) = 1{,}563$$

4. Расчет коэффициента α

Из формулы (1)

$$\alpha = \frac{\sigma_{max}}{R_m \gamma} = \frac{84{,}93}{36 \cdot 1{,}563} = 1{,}51.$$

5. Определение допускаемого количества циклов нагружения

Так как соединение относится к 7 группе (соединение с лобовыми и фланговыми швами), допускаемое количество циклов нагружения будем находить из преобразованной формулы (3):

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

Подставляя значение α, получим квадратное уравнение

$$0{,}07\left(\frac{n}{10^6}\right)^2 - 0{,}64\frac{n}{10^6} + 0{,}69 = 0.$$

Дискриминант определяется как

$$D = 0{,}64^2 - 4 \cdot 0{,}07 \cdot 0{,}69 = 0{,}2163.$$

Тогда

$$\frac{n}{10^6} = \frac{0{,}64 - \sqrt{0{,}2163}}{2 \cdot 0{,}07} = 1{,}249,$$

Откуда n=1 249 000 циклов, принимаем n=1 200 000 циклов

5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое усталость металла?

2. От каких параметров зависит предел выносливости?

3. Что такое коэффициент асимметрии цикла?

4. Как определяется допускаемое количество циклов нагружения?

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Поперечные площади уголков стальных горячекатаных равнополочных (по ГОСТ 8509-93): b – ширина полки, мм; s – толщина полки, мм; A – площадь поперечного сечения, см^2.

Таблица П.1

№	b, мм	s, мм	A, см^2	№	b, мм	s, мм	A, см^2
2	20	3	1,13	3,2	32	3	1,86
		4	1,46			4	2,43
2,5	25	3	1,43	3,5	35	3	2,04
		4	1,86			4	2,67
2,8	28	3	1,62			5	3,28
3	30	3	1,74	4	40	3	2,35
		4	2,27			4	3,08
4,5	45	3	2,65	10	100	12	22,80
		4	3,48			14	26,28
		5	4,29			16	29,68
5	50	3	2,96	11	110	7	15,15
		4	3,89			8	17,20
		5	4,80	12,5	125	8	19,69
		6	5,69			9	22,00
5,6	56	4	4,38			10	24,33
		5	5,41			12	28,89
6,3	63	4	4,96			14	33,37
		5	6,13			16	37,77
		6	7,28	14	140	9	24,72
7	70	4,5	6,20			10	27,33
		5	6,86			12	32,49
		6	8,15	16	160	10	31,43
		7	9,42			11	34,42
		8	10,67			12	37,39
7,5	75	5	7,39			14	43,57
		6	8,78			16	49,07
		7	10,15			18	54,79

Продолжение табл. П.1

№	b, мм	s, мм	A, см^2	№	b, мм	s, мм	A, см^2
7,5	75	8	11,50	16	160	20	60,40
		9	12,83	18	180	11	38,80
8	80	5,5	8,63			12	42,19
		6	9,38	20	200	12	47,10
		7	10,85			13	50,85
		8	12,30			14	54,60
9	90	6	10,61			16	61,98
		7	12,28			20	76,54
		8	13,93			25	94,29
		9	15,60			30	111,54
10	100	6,5	12,82	22	220	14	60,38
		7	13,75			16	68,58
		8	15,60	25	250	16	78,40
		10	19,24			18	87,72
25	250	20	96,96	25	250	28	133,12
		22	106,12			30	141,96
		25	119,71			35	163,71

Лабораторная работа №3

№ 3 РАСЧЕТ СТОЕК НА ПРОЧНОСТЬ И УСТОЙЧИВОСТЬ

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью работы является закрепление теоретического материала и овладение практическими навыками расчета внецентренно-сжатых стоек на прочность и устойчивость

2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ [1, 2]

Стойкой называется стержневой элемент, работающий, в основном, на сжатие или растяжение. При приложении нагрузки к стойке возможно не только статическое или усталостное разрушение конструкции, но и потеря устойчивости конструкции. При этом, как правило, для потери устойчивости достаточно усилия меньшего, чем для разрушения конструкции.

При приложении к стойке нагрузки, линия действия которой не совпадает с осью стойки (рис. 1, а), возможно:

- разрушение стойки;
- потеря устойчивости в плоскости момента (рис. 1, б);
- потеря устойчивости в плоскости, перпендикулярной плоскости момента (рис 1, в).

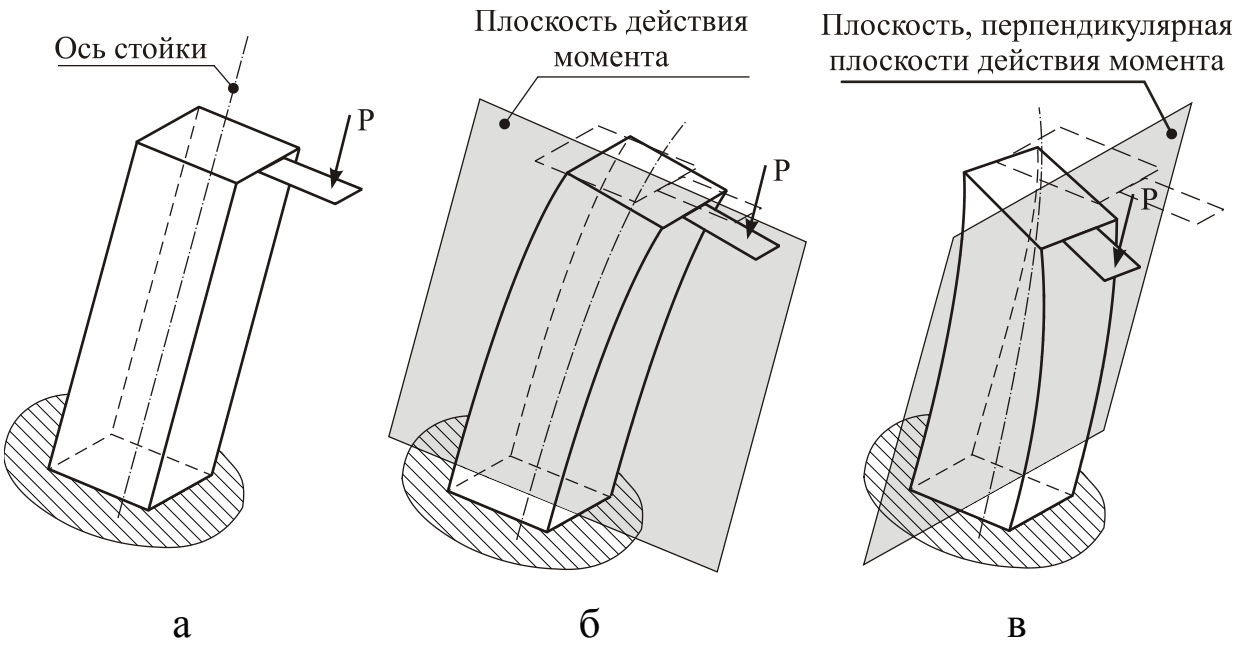


Рис. 1. Возможные формы потери устойчивости стойки при эксцентрично приложенной силе: а) схема нагружения; б) потеря устойчивости в плоскости действия момента – плоская форма потери устойчивости; в) потеря устойчивости в плоскости, перпендикулярной плоскости момента – изгибно-крутильная форма потери устойчивости

Условием прочности стойки при действии эксцентричной приложенной силы N и возникающего момента M будет

$$\sigma = \pm \frac{M}{W} - \frac{N}{A} \le [\sigma]_p, \qquad (1)$$

где W – момент сопротивления элемента в плоскости действия момента; A – площадь поперечного сечения элемента; $[\sigma]_p$ – допускаемое напряжение. Знак зависит от вида усилия, создаваемого моментом.

Как правило, стойку проектируют так, чтобы направление наибольшей жесткости сечения стойки совпадало с плоскостью действия момента. Устойчивость в плоскости действия момента проверяется с помощью выражения

$$\sigma = -\frac{N}{A\varphi_m} \le [\sigma]_p, \qquad (2)$$

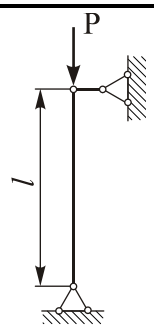
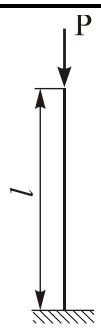
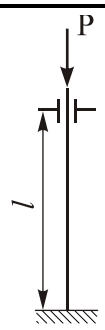
где φ_m – коэффициент, показывающий, насколько необходимо уменьшить возникающее напряжение, чтобы не произошло потери устойчивости.

Коэффициент φ_m зависит от гибкости элемента, материала, точки приложения силы и формы сечения стойки.

Формулы для определения гибкости элемента в зависимости от расчетной схемы приведены в табл. 1.

Таблица 1

Формулы для расчета гибкости стоек

Расчетная схема			
Гибкость	$\lambda = \frac{l}{i}$	$\lambda = \frac{2l}{i}$	$\lambda = \frac{0{,}5l}{i}$

В табл. 1 i – радиус инерции, определяющийся как

$$i = \sqrt{\frac{J}{A}}, \tag{3}$$

где J – момент инерции.

С увеличением предела текучести материала коэффициент устойчивости φ_m снижается. Для того чтобы учитывать такое уменьшение, коэффициент φ_m определяется по условной гибкости

$$\bar{\lambda} = \lambda \sqrt{\frac{R}{E}}, \tag{4}$$

где R – расчетное сопротивление, E – модуль Юнга.

Положение точки приложения силы учитывается расчетом относительного эксцентриситета

$$m = \frac{MA}{NW}. \tag{5}$$

Относительный эксцентриситет уточняется с помощью коэффициента формы η, который может быть принят равным 1,0…1,2.

После определения условной гибкости, относительного эксцентриситета и коэффициента формы коэффициент устойчивости φ_m можно определить по прил. 1.

Устойчивость в плоскости, перпендикулярной к плоскости действия момента, проверяется соотношением

$$\sigma = -\frac{N}{c\varphi_{min}A} \le [\sigma]_p, \tag{6}$$

где φ_{min} – коэффициент устойчивости, соответствующий направлению наименьшей жесткости сечения стойки, как правило, это направление перпендикулярно действию момента; c – коэффициент.

Если $m \le 5$, то коэффициент c определяется по формуле

$$c = \frac{\beta}{1 + \alpha m} \qquad (7)$$

где α и β – коэффициенты, зависящие от относительного эксцентриситета.

Для расчета c необходимо определить вспомогательные коэффициенты гибкости φ, считая стойку центрально сжатым стержнем (прил. 2): φ_y – по гибкости рассчитываемой стойки λ_y; φ_c – по гибкости $\lambda_c = 3{,}14\sqrt{E / R}$.

Коэффициенты α и β можно определить по таблице 2.

Таблица 2

Значения коэффициентов α и β

Тип сечения	Коэффициент α		Коэффициент β	
	$m \le 1$	$1 < m \le 5$	$\lambda_y \le \lambda_c$	$\lambda_y > \lambda_c$
Открытый	0,7	$0{,}65 + 0{,}05m$	1	$\sqrt{\varphi_c / \varphi_y}$
Закрытый	0,6	$0{,}55 + 0{,}05m$		

В случае если $m \ge 10$, коэффициент c рассчитывается как

$$c = \frac{1}{1 + m\varphi_y / \varphi_b}, \qquad (8)$$

где φ_b для замкнутых сечений равен 1,0.

Если $5 < m < 10$, то

$$c = c_5(2 - 0{,}2m) + c_{10}(0{,}2m - 1), \qquad (9)$$

где c_5 – коэффициент c, определяемый по формуле (7) при $m = 5$; c_{10} – коэффициент c, определяемый по формуле (8) при $m = 10$.

Необходимую площадь поперечного сечения стойки определяют методом последовательного приближения. Если пренебречь напряжением от момента, то требуемая площадь сечения

$$A = \frac{N}{[\sigma]_p \varphi}. \qquad (10)$$

Задаваясь пониженным значением $\varphi = 0{,}4...0{,}6$, определяют A. Далее конструируют поперечное сечение и производят проверку прочности и устойчивости. Если напряжения отклоняются от допускаемого более чем на 5%, то размеры сечения корректируют и опять производят проверку прочности и устойчивости. Процедуру повторяют до тех пор, пока напряжения не станут близкими к допускаемому (разница не более 5%).

3. ВАРИАНТЫ ЗАДАНИЙ

В качестве задания предлагается проектирование стойки, показанной на рис. 2. На стойке длиной l установлен груз массой m_1, на кронштейне длиной e установлен груз массой m_2. Требуется подобрать площадь поперечного сечения стойки, если стойка имеет сечение в виде сварного двутавра и коробчатое сечение. На основе результатов выбрать наиболее рациональное сечение стойки для данных условий нагружения. Варианты заданий приведены в табл. 3.

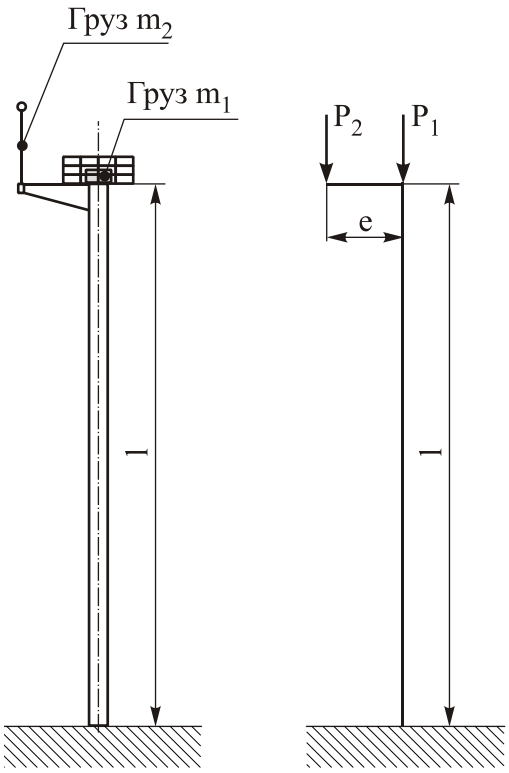


Рис. 2. Постановка задачи и схема нагружения

Таблица 3

Варианты заданий

№	l, м	e, м	m_1, т	m_2, т	№	l, м	e, м	m_1, т	m_2, т
1	5	0,1	20	4	**13**	5	0,3	32	1,5
2	6	0,2	21	3,5	**14**	6	0,4	33	1
3	7	0,3	22	3	**15**	7	0,5	34	4
4	8	0,4	23	2,5	**16**	8	0,6	35	3,5
5	9	0,5	24	2	**17**	9	0,7	34	3
6	10	0,6	25	1,5	**18**	10	0,8	33	2,5
7	5	0,7	26	1	**19**	5	0,9	32	2
8	6	0,8	27	4	**20**	6	1,0	31	1,5
9	7	0,9	28	3,5	**21**	7	0,1	30	1
10	8	1,0	29	3	**22**	8	0,2	29	4
11	9	0,1	30	2,5	**23**	9	0,3	28	3,5
12	10	0,2	31	2	**24**	10	0,4	27	3

Для всех вариантов:

- материал Ст3сп;
- σ_m=250 МПа;
- коэффициент условий работы γ_c=0,95;
- коэффициент надежности по материалу γ_m=1,05;

4. ПРИМЕР ВЫПОЛНЕНИЯ ЗАДАНИЯ

Исходные данные: l = 5 м; e = 0,4 м; m_1 = 21000 кг; m_2 = 1000 кг.

4.1. Расчет стойки, сечение – сварной двутавр (рис. 3).

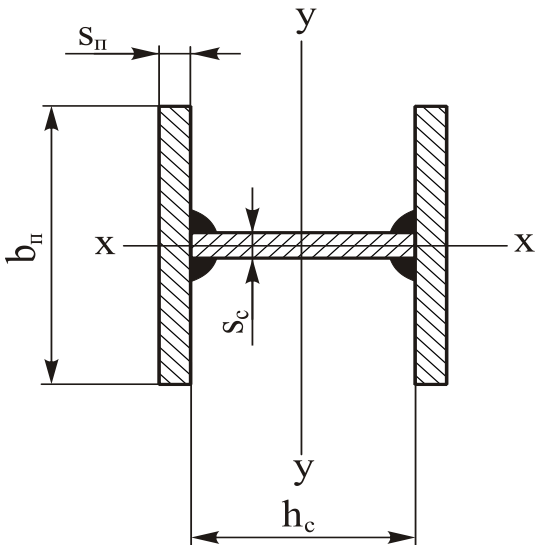


Рис. 3. Сварной двутавр

Допускаемое напряжение

$$[\sigma]_p = \frac{\sigma_m}{\gamma_m}\gamma_c = \frac{250}{1{,}05}0{,}95 = 226 \text{ МПа}.$$

Расчетное сопротивление

$$R = \frac{\sigma_m}{\gamma_m} = \frac{250}{1{,}05} = 238 \text{ МПа}.$$

Определяем действующие нагрузки от веса грузов:

$$P_1 = m_1 g = 21000 \cdot 9{,}8 = 205800 \text{ Н};$$

$$P_2 = m_2 g = 1000 \cdot 9{,}8 = 9800 \text{ Н};$$

$$N = P_1 + P_2 = 205800 + 9800 = 215600 \text{ Н}.$$

В первом приближении пренебрегаем действием изгибающего момента, принимаем φ=0,4. Тогда первоначальная площадь поперечного сечения по формуле (10)

$$A = \frac{215600}{226 \cdot 10^6 \cdot 0{,}4} = 0{,}002383 \text{ м}^2.$$

Принимаем сечение в виде сварного двутавра с параметрами: s_n=8 мм; b_n=0,115 м; s_c=6 мм; h_c =0,095 м; A=0,00241 м^2.

Момент инерции относительно оси y:

$$J_y = 2\left(\frac{s_n^3 b_n}{12} + s_n b_n \left(h_c / 2 + s_n / 2\right)^2\right) + \frac{h_c^3 s_c}{12} =$$

$$= 2\left(\frac{0{,}008^3 \cdot 0{,}115}{12} + 0{,}008 \cdot 0{,}115\left(0{,}095 / 2 + 0{,}008 / 2\right)^2\right) +$$

$$+ \frac{0{,}095^3 \cdot 0{,}006}{12} = 5{,}319 \cdot 10^{-6} \text{ м}^4.$$

Момент сопротивления сечения

$$W_y = \frac{J_y}{h_c / 2 + s_n} = \frac{5{,}319 \cdot 10^{-6}}{0{,}095 / 2 + 0{,}008} = 9{,}583 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3.$$

Действующий изгибающий момент

$$M = P_2 e = 9800 \cdot 0{,}4 = 3920 \text{ Н·м}.$$

Производим первую проверку по формуле (1)

$$\sigma = -\frac{3920}{9{,}583 \cdot 10^{-5}} - \frac{215600}{0{,}00241} = -130 \text{ МПа}.$$

Действующие напряжения из условия прочности не превышают максимально допустимое значение, значит, выбранное сечение обеспечивает прочность проектируемой стойки.

Радиус инерции по формуле (3)

$$i_y = \sqrt{\frac{5{,}319 \cdot 10^{-6}}{0{,}00241}} = 0{,}047 \text{ м.}$$

Гибкость по табл. 1

$$\lambda_y = \frac{2l}{i} = \frac{2 \cdot 5}{0{,}047} = 213$$

Относительный эксцентриситет по формуле (5)

$$m = \frac{3920 \cdot 0{,}00241}{215600 \cdot 9{,}583 \cdot 10^{-5}} = 0{,}46.$$

Коэффициент η принимаем $\eta = 1{,}2$. Произведение $m\eta = 0{,}55$.

Условная гибкость по формуле (4)

$$\bar{\lambda} = 213 \cdot \sqrt{\frac{238 \cdot 10^6}{200 \cdot 10^9}} = 7{,}35.$$

Тогда по прил. 1 коэффициент устойчивости $\varphi_m = 0{,}173$.

Производим вторую проверку по формуле (2)

$$\sigma = -\frac{215600}{0{,}00241 \cdot 0{,}173} = -517 \text{ МПа.}$$

Действующие напряжения из условия устойчивости в плоскости действия момента превышают максимально допускаемое значение почти в 2 раза. В связи с этим необходимо скорректировать принятое сечение. Принимаем сечение с параметрами: s_n=8 мм; b_n=0,18 м; s_c=6 мм; h_c =0,16 м; A=0,00384 м^2.

Первую проверку производить нет необходимости, так как при увеличении площади поперечного сечения увеличиваются

знаменатели составляющих формулы (1), значение напряжения уменьшается.

Рассчитываем параметры сечения для проверки устойчивости в плоскости действия момента.

$$J_y = 2\left(\frac{0{,}008^3 \cdot 0{,}18}{12} + 0{,}008 \cdot 0{,}18(0{,}16/2 + 0{,}008/2)^2\right) +$$

$$+\frac{0{,}16^3 \cdot 0{,}006}{12} = 2{,}239 \cdot 10^{-5}\ \text{м}^4.$$

$$W_y = \frac{2{,}239 \cdot 10^{-5}}{0{,}16/2 + 0{,}008} = 2{,}544 \cdot 10^{-4}\ \text{м}^3.$$

$$i_y = \sqrt{\frac{2{,}239 \cdot 10^{-5}}{0{,}00384}} = 0{,}076\ \text{м}.$$

$$\lambda_y = \frac{2 \cdot 5}{0{,}076} = 131.$$

$$m = \frac{3920 \cdot 0{,}00384}{215600 \cdot 2{,}544 \cdot 10^{-4}} = 0{,}275.$$

$$m\eta = 0{,}33$$

$$\bar{\lambda} = 131 \cdot \sqrt{\frac{238 \cdot 10^6}{200 \cdot 10^9}} = 4{,}52.$$

$$\varphi_m = 0{,}380$$

Производим проверку по формуле (2)

$$\sigma = -\frac{215600}{0{,}00384 \cdot 0{,}380} = -148\ \text{МПа}.$$

Действующие напряжения из условия устойчивости в плоскости действия момента для вновь принятого сечения не превышают максимально допустимого.

Рассчитываем параметры для третьей проверки.

Определяем момент инерции сечения относительно оси x:

$$J_x = 2\frac{b_n^3 s_n}{12} + \frac{s_c^3 h_c}{12} = 2\cdot\frac{0{,}18^3\cdot 0{,}008}{12} + \frac{0{,}006^3\cdot 0{,}016}{12} = 7{,}779\cdot 10^{-6}\ \text{м}^4.$$

Радиус инерции:

$$i_x = \sqrt{\frac{7{,}779\cdot 10^{-6}}{0{,}00384}} = 0{,}045\ \text{м}.$$

Гибкость

$$\lambda_x = \frac{2\cdot 5}{0{,}045} = 222.$$

По прил. 2.

$$\varphi_{\min} = 0{,}147.$$

Так как $m \le 5$, то коэффициент c определяем по формуле (7):

$$c = \frac{\beta}{1+\alpha m}$$

Коэффициент $\alpha = 0{,}7$ (табл. 2), гибкость

$$\lambda_c = 3{,}14\sqrt{E/R} = 3{,}14\cdot\sqrt{200\cdot 10^9 / 238\cdot 10^6} = 91.$$

Коэффициент $\varphi_c = 0{,}542$ (прил. 2).

Так как в данном случае $\lambda_y > \lambda_c$, то коэффициент β будет равен $\beta = \sqrt{\varphi_c/\varphi_y} = \sqrt{0{,}542/0{,}147} = 1{,}92$.

$$c = \frac{1{,}92}{1 + 0{,}7 \cdot 0{,}275} = 1{,}624.$$

Производим третью проверку

$$\sigma = -\frac{215600}{1{,}624 \cdot 0{,}147 \cdot 0{,}00384} = -235 \text{ МПа}.$$

Сечение подобрано удовлетворительно, так как максимальное напряжение отличается от предельного допускаемого значения не более чем на 5%.

4.2. Расчет стойки, коробчатое сечение (рис. 4).

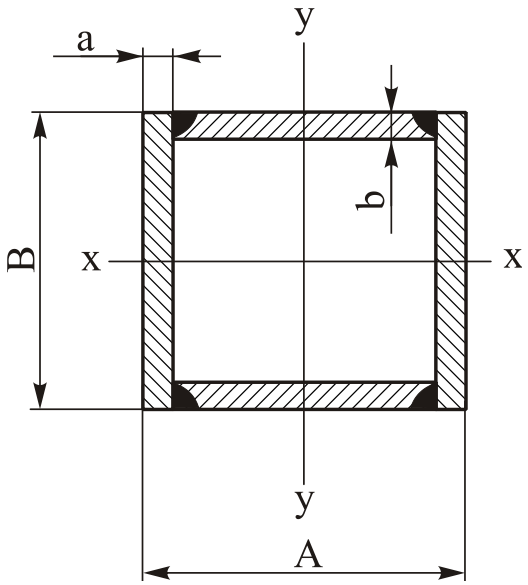


Рис. 4. Коробчатое сечение

В первом приближении пренебрегаем действием изгибающего момента, принимаем φ=0,4. Тогда первоначальная площадь поперечного сечения по формуле (10)

$$A = \frac{215600}{226 \cdot 0{,}4} = 0{,}002383 \text{ м}^2.$$

Принимаем коробчатое сечение с размерами: $A = 0{,}091$ м; $b = 0{,}01$ м; $B = 0{,}06$ м; $a = 0{,}008$ м; $A = 0{,}00246$ м^2.

Момент инерции относительно оси $\boldsymbol{y}$:

$$J_y = 2\left((A - 2a)^3 \frac{b}{12} + B\frac{a^3}{12} + Ba\left(\frac{A-a}{2}\right)^2 \right) =$$

$$= 2 \cdot \left(\begin{array}{l} (0{,}0091 - 2 \cdot 0{,}008)^3 \dfrac{0{,}01}{12} + 0{,}06\dfrac{0{,}008^3}{12} + \\ + 0{,}06 \cdot 0{,}008\left(\dfrac{0{,}091 - 0{,}008}{2}\right)^2 \end{array} \right) = 2{,}362 \cdot 10^{-6} \text{ м}^4.$$

Момент сопротивления сечения

$$W = \frac{2J_y}{A} = \frac{2 \cdot 2{,}362 \cdot 10^{-6}}{0{,}091} = 5{,}19 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3.$$

Действующий изгибающий момент

$$M = P_2 e = 9800 \cdot 0{,}4 = 3920 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Производим первую проверку по формуле (1)

$$\sigma = -\frac{3920}{5{,}19 \cdot 10^{-5}} - \frac{215600}{0{,}00246} = -163 \text{ МПа}.$$

Действующие напряжения из условия прочности не превышают максимально допустимое значение, значит, выбранное сечение обеспечивает прочность проектируемой стойки.

Радиус инерции по формуле (3)

$$i_y = \sqrt{\frac{2{,}362 \cdot 10^{-6}}{0{,}00246}} = 0{,}031 \text{ м}$$

Гибкость по табл. 1

$$\lambda_y = \frac{2l}{i} = \frac{2 \cdot 5}{0{,}031} = 323.$$

Относительный эксцентриситет по формуле (5)

$$m = \frac{3920 \cdot 0{,}00246}{215600 \cdot 5{,}19 \cdot 10^{-5}} = 0{,}86.$$

Коэффициент η принимаем $\eta = 1{,}2$. Произведение $m\eta = 1{,}034$.

Условная гибкость по формуле (4)

$$\bar{\lambda} = 323 \cdot \sqrt{\frac{238 \cdot 10^6}{200 \cdot 10^9}} = 11{,}14.$$

Тогда по прил. 1 коэффициент устойчивости $\varphi_m = 0{,}128$.

Производим вторую проверку по формуле (2)

$$\sigma = -\frac{215600}{0{,}00246 \cdot 0{,}128} = -685 \text{ МПа}.$$

Действующие напряжения из условия устойчивости в плоскости действия момента значительно превышают максимально допускаемое значение. В связи с этим необходимо скорректировать сечение таким образом, чтобы уменьшить гибкость конструкции. Принимаем сечение с параметрами: $A = 0{,}15$ м; $b = 0{,}012$ м; $B = 0{,}1$ м; $a = 0{,}009$ м; $A = 0{,}004968$ м^2.

Первую проверку производить нет необходимости, так как при увеличении площади поперечного сечения увеличиваются знаменатели составляющих формулы (1), значение напряжения уменьшается.

Рассчитываем параметры сечения для проверки устойчивости в плоскости действия момента:

$$J_y = 2\cdot\left(\begin{array}{l}(0{,}15-2\cdot 0{,}009)^3\dfrac{0{,}012}{12}+0{,}1\dfrac{0{,}009^3}{12}+\\ +0{,}1\cdot 0{,}009\left(\dfrac{0{,}15-0{,}009}{2}\right)^2\end{array}\right)=1{,}356\cdot 10^{-5}\ \text{м}^4;$$

$$W=\frac{2J_y}{A}=\frac{2\cdot 1{,}356\cdot 10^{-5}}{0{,}15}=1{,}81\cdot 10^{-4}\ \text{м}^3;$$

$$i_y=\sqrt{\frac{1{,}356\cdot 10^{-5}}{0{,}004968}}=0{,}052\ \text{м}.$$

$$\lambda=\frac{2\cdot 5}{0{,}052}=191.$$

$$m=\frac{3920\cdot 0{,}004968}{215600\cdot 1{,}81\cdot 10^{-4}}=0{,}5.$$

$$m\eta=0{,}6$$

$$\bar{\lambda}=191\cdot\sqrt{\frac{238\cdot 10^6}{200\cdot 10^9}}=6{,}61.$$

$$\varphi_m=0{,}196.$$

Производим проверку по формуле (2)

$$\sigma=-\frac{215600}{0{,}004968\cdot 0{,}196}=-221\ \text{МПа}.$$

Действующие напряжения из условия устойчивости в плоскости действия момента для вновь принятого сечения не превышают максимально допустимого.

Рассчитываем параметры для третьей проверки.

Определяем момент инерции сечения относительно оси x:

$$J_x = 2\left(B^3 \frac{a}{12} + (A-2a)\frac{b^3}{12} + (A-2a)b\left(\frac{B-b}{2}\right)^2 \right) =$$

$$= 2 \cdot \left(\begin{array}{l} 0{,}1^3 \dfrac{0{,}009}{12} + (0{,}15 - 2 \cdot 0{,}009)\dfrac{0{,}012^3}{12} + \\ + (0{,}15 - 2 \cdot 0{,}009)0{,}012\left(\dfrac{0{,}1-0{,}012}{2}\right)^2 \end{array} \right) = 7{,}633 \cdot 10^{-6} \text{ м}^4.$$

Радиус инерции:

$$i_x = \sqrt{\frac{7{,}633 \cdot 10^{-6}}{0{,}004968}} = 0{,}039 \text{ м}.$$

Гибкость

$$\lambda_x = \frac{2 \cdot 5}{0{,}039} = 255.$$

По прил. 2.

$$\varphi_{min} = 0{,}147.$$

Так как $m \le 5$, то коэффициент c определяем по формуле (7):

$$c = \frac{\beta}{1 + \alpha m}.$$

Коэффициент $\alpha = 0{,}6$ (табл. 2), гибкость

$$\lambda_c = 3{,}14\sqrt{E / R} = 3{,}14 \cdot \sqrt{200 \cdot 10^9 / 238 \cdot 10^6} = 91.$$

Коэффициент $\varphi_c = 0{,}542$.

Так как в данном случае $\lambda_y > \lambda_c$, то коэффициент β будет равен (табл. 2) $\beta = \sqrt{\varphi_c / \varphi_y} = \sqrt{0{,}542 / 0{,}147} = 1{,}92$.

$$c = \frac{1{,}92}{1 + 0{,}6 \cdot 0{,}5} = 1{,}477.$$

Производим третью проверку

$$\sigma = -\frac{215600}{1{,}477 \cdot 0{,}147 \cdot 0{,}004968} = -200 \text{ МПа}.$$

4.3. Вывод

При данных условиях нагружения для этой конструкции рациональным является сечение в виде сварного двутавра, так как требуемая устойчивость обеспечивается сечением с меньшей площадью.

5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое стойка?

2. Возможные формы потери устойчивости стойки при эксцентрично приложенной силе?

3. От чего зависит формула для определения гибкости элемента?

4. Как изменяется коэффициент устойчивости φ_m в зависимости от предела текучести материала?

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Таблица П.1

Значения коэффициента устойчивости φ_m внецентренно сжатых стержней в плоскости действия момента, совпадающей с плоскостью действия симметрии

Условная гибкость $\bar{\lambda}$	Произведение $m\eta$																				
	0,1	0,25	0,5	0,75	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	6,0	7,0	8,0	9,0	10,0	12,0	14,0	20,0
0,5	967	922	850	782	722	620	538	469	417	370	337	307	280	237	222	210	164	150	125	106	077
1,0	925	854	778	711	653	563	484	427	382	341	307	283	259	225	209	196	157	142	121	103	074
1,5	875	804	716	647	593	507	439	388	347	312	283	262	240	207	195	182	148	134	114	099	070
2,0	813	742	653	587	536	457	397	352	315	286	260	240	222	193	182	170	138	125	107	094	067
2,5	742	672	587	526	480	410	357	317	287	262	238	220	204	178	168	158	130	118	101	090	065
3,0	667	597	520	465	425	365	320	287	260	238	217	202	187	166	156	147	123	112	097	086	063
3,5	587	522	455	408	375	325	287	258	233	216	198	183	172	153	145	137	115	106	092	082	060
4,0	505	447	394	356	330	289	256	232	212	197	181	168	158	140	135	127	108	098	088	078	057
4,5	418	382	342	310	288	257	229	208	192	178	165	155	146	130	125	118	101	093	083	075	055
5,0	354	326	295	273	253	225	205	188	175	162	150	143	135	120	117	111	095	088	079	072	053
5,5	302	280	256	240	224	200	184	170	158	148	138	132	124	112	108	104	089	084	075	069	051
6,0	258	244	223	210	198	178	166	153	145	137	128	120	115	104	100	096	084	079	072	066	049
6,5	223	213	196	185	176	160	149	140	132	125	117	112	106	097	094	089	080	074	068	062	047
7,0	194	186	173	163	157	145	136	127	121	115	108	102	098	091	087	083	074	070	064	059	045
8,0	152	146	138	133	128	117	113	106	100	095	091	087	083	078	076	074	065	062	057	053	041
9,0	122	117	112	107	103	098	093	088	085	082	079	075	072	066	065	064	058	055	051	048	038
10,0	100	097	093	091	090	081	079	075	072	070	069	065	062	059	058	057	052	049	046	043	035
11,0	083	079	077	076	075	071	068	063	062	061	060	057	055	052	051	050	046	044	040	038	032
12,0	069	067	064	063	062	059	058	055	054	053	052	051	050	048	047	046	042	040	037	035	029
13,0	062	061	054	053	052	051	049	049	048	048	047	045	044	042	041	041	038	037	035	033	027
14,0	052	049	049	048	048	047	045	044	043	043	042	041	040	039	039	038	036	036	034	032	026

Примечания:

1) при приведенной гибкости более 14 коэффициент φ следует принимать по последней строке таблицы;

2) значения коэффициента φ в таблице умножены на 1000.

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Таблица П.2

Значения коэффициента устойчивости φ

центрально-сжатых элементов

Гибкость, λ	Расчетное сопротивление R_y, МПа											
	200	240	280	320	360	400	440	480	520	560	600	640
10	988	987	985	984	983	982	981	980	979	978	977	977
20	967	962	959	955	952	949	946	943	941	938	936	934
30	939	931	924	917	911	905	900	895	891	887	883	879
40	906	894	883	873	863	854	846	839	832	825	820	814
50	869	852	836	822	809	796	785	775	764	746	729	712
60	827	805	785	766	749	721	696	672	650	628	608	588
70	782	754	724	687	654	623	595	568	542	518	494	470
80	734	686	641	602	566	532	501	471	442	414	386	359
90	665	612	565	522	483	447	413	380	349	326	305	287
100	599	542	493	448	408	369	335	309	286	267	250	235
110	537	478	427	381	338	306	280	258	239	223	209	197
120	479	419	366	321	287	260	237	219	203	190	178	167
130	425	364	313	276	247	223	204	189	175	163	153	145
140	376	315	272	240	215	195	178	164	153	143	134	126
150	328	276	239	211	189	171	157	145	134	126	118	111
160	290	244	212	187	167	152	139	129	120	112	105	099
170	259	218	189	167	150	136	125	115	107	100	094	089
180	233	196	170	150	135	123	112	104	097	091	085	081
190	210	177	154	136	122	111	102	094	088	082	077	073
200	191	161	140	124	111	101	093	086	080	075	071	067
210	174	147	128	113	102	093	085	079	074	069	065	062

Примечания:

1) при гибкости более 210 коэффициент φ следует принимать по последней строке таблицы;

2) значения коэффициента φ в таблице умножены на 1000.

Лабораторная работа №4

ПРОЕКТИРОВАНИЕ СВАРНЫХ БАЛОК

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью работы является закрепление теоретического материала и овладение практическими навыками проектирования сварных балок.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ [1, 2]

Балкой называется конструкция, которая работает, в основном, на изгиб. Элементы балки, воспринимающие основную нагрузку и расположенные перпендикулярно плоскости действующего момента, называются полками. Элементы балки, связующие полки, называются стенками (рис. 1). Площадь поперечного сечения полок должна быть больше, чем площадь поперечного сечения стенок.

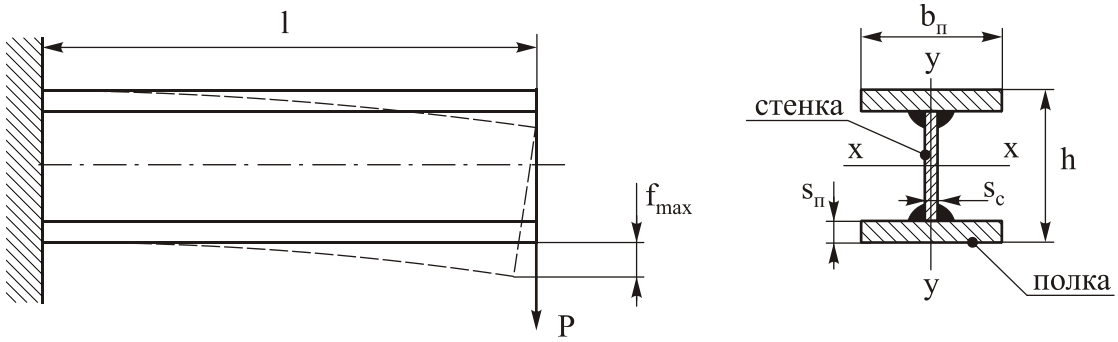


Рис. 1. Консольная балка с сечением в виде сварного двутавра

Показателем экономичности сечения балки является отношение

$$\frac{W}{A}, \tag{1}$$

где W – момент сопротивления профиля балки; A – площадь поперечного сечения профиля балки.

Это отношение можно увеличить путем увеличения толщины полок и уменьшения толщины стенки. Однако чрезмерное уменьшение толщины стенки может привести к потере местной устойчивости, и, как следствие, к разрушению конструкции.

Основным требованием к балкам является соблюдение необходимой жесткости, то есть прогиб балки f от максимальной нагрузки не должен превышать допустимых значений.

Так как прогиб балки зависит не только от действующей нагрузки, но и от ее длины, то в нормативных документах определяется предельно допустимое отношение

$$\frac{f_{max}}{l}, \tag{2}$$

где f_{max} – максимальный прогиб балки от максимальной нагрузки; l – длина балки.

Норма жесткости для балок разного назначения различна. Так, например, для подкрановых балок отношение (2) должно быть в пределах 1/600…1/700, для главных балок междуэтажных перекрытий – 1/400 и т.д.

Чтобы обеспечить необходимую жесткость, высота балки должна быть не менее некоторой предельной. Для сварной консольной балки, имеющей сечение в виде двутавра, высота балки из условия обеспечения жесткости может быть приблизительно определена как

$$h_f \approx 1{,}6 \sqrt[3]{\frac{Ml^2}{s_c E f_{max}}} \qquad (3)$$

где h_f – высота балки из условия обеспечения жесткости, м; M – действующий момент, Н·м; s_c – толщина стенки балки, м; f_{max} – максимальный прогиб балки от максимальной нагрузки, м; l – длина балки, м; E – модуль Юнга, Па.

Толщина стенки балки в первом приближении может быть принята в диапазоне 5…10 мм.

Высота балки из условия минимума площади поперечного сечения профиля, обеспечивающая требуемую прочность, может быть приблизительно определена как

$$h_\sigma \approx 1{,}3 \sqrt{\frac{M}{s_c [\sigma]}}, \qquad (4)$$

где h_σ – оптимальная высота балки из условия минимума площади поперечного сечения профиля, м; M – действующий момент, Н·м; s_c – толщина стенки балки, м; $[\sigma]$ – допускаемые напряжения, Па.

Высота балки, при которой с одинаковыми коэффициентами прочности выполняются условия прочности и жесткости определяется как

$$h_* = \frac{[\sigma]\ l^2}{Ef_{max}}. \qquad (5)$$

Высота балки, рассчитанная по формулам (3)-(5), может значительно различаться. В зависимости от получившихся значений можно определить оптимальную высоту балки (табл. 1).

Таблица 1

Оптимальная высота балки

Результаты расчета h_f, h_σ и h_*	Оптимальная высота
$h_f < h_*$, $h_\sigma < h_*$	h_f
$h_f > h_*$, $h_\sigma > h_*$	h_σ
$h_f > h_*$, $h_\sigma < h_*$	h_*
$h_f < h_*$, $h_\sigma > h_*$	Выбирается высота h_f или h_σ, при которой площадь поперечного сечения меньше

После определения оптимальной высоты балки определяют момент инерции сечения в плоскости действия момента. Если принятая высота $h \le h_*$ то

$$J = \frac{Ml^2}{2Ef}; \qquad (6)$$

если $h > h_*$, то

$$J = \frac{hM}{2[\sigma]}. \qquad (7)$$

После определения момента инерции определяется площадь поперечного сечения полок:

$$2A_n = \frac{1{,}6J}{h^2}. \qquad (8)$$

Далее, задаваясь толщиной полки s_n (10…30 мм), по площади поперечного сечения полки определяют ширину полки:

$$b_n = \frac{A_n}{s_n}. \qquad (9)$$

После определения геометрических размеров сечения проводят проверку на прочность:

$$\sigma = \frac{Mh}{2J_{ут}} \le [\sigma]. \qquad (10)$$

В выражении (10) уточненный момент инерции $J_{ут}$ необходимо рассчитать по формуле

$$J_{ут} = 2\left(\frac{s_n^3 b_n}{12} + s_n b_n \left(\frac{h - s_n}{2}\right)^2\right) + \frac{(h - 2s_n)^3 s_c}{12}. \qquad (11)$$

В случае, если проверка (10) не выполняется, размеры сечения корректируют.

Помимо проверки на прочность необходимо выполнить проверку на общую и местную устойчивость. Потеря общей устойчивости может произойти в полке, потеря местной устойчивости – в стенке.

Проверка на общую устойчивость производят по выражению

$$\sigma = \frac{Mh}{2J_{ym}} \le [\sigma]\varphi_b, \qquad (12)$$

где φ_b – коэффициент, определяется по вспомогательной величине

$$\varphi_1 = \psi \frac{J_{ym\ y}}{J_{ym\ x}} \left(\frac{h}{l}\right)^2 10^3. \qquad (13)$$

В выражении (13) $J_{ym\ x}$ соответствует J_{ym}, определенному по формуле (11); $J_{ym\ y}$ вычисляется как

$$J_{ym\ y} = 2\frac{b_n^3 s_n}{12} + \frac{s_c^3(h - 2s_n)}{12}. \qquad (14)$$

Для определения коэффициента ψ необходимо рассчитать параметр α:

$$\alpha = 8\left(\frac{ls_n}{b_n h}\right)^2 \left(1 + \frac{hs_c^3}{2b_n s_n^3}\right). \qquad (15)$$

Зная α, коэффициент ψ определяют по табл. 2.

Таблица 2

Значения коэффициента ψ

α	0,1	1,0	8,0	16,0	32,0	64,0
ψ	1,73	1,85	2,63	3,37	4,59	6,50

Значения коэффициента φ_b принимаются: при $\varphi_1 \le 0{,}85$ $\varphi_b = \varphi_1$; при $\varphi_1 > 0{,}85$ $\varphi_b = 0{,}68 + 0{,}21\varphi_1$, но не более 1,0.

Местная устойчивость проверяется по формуле:

$$\frac{(h-2s_n)}{s_c} \le 80\sqrt{\frac{210}{\sigma_m}}, \qquad (16)$$

где σ_m – предел текучести, МПа.

В случае если проверка на прочность выполняется, но не выполняется проверка на общую устойчивость, необходимо уменьшить толщину полки s_n и увеличить ее ширину b_n.

Если не выполняется условие местной устойчивости, необходимо увеличить толщину стенки s_c.

3. ВАРИАНТЫ ЗАДАНИЙ

В качестве задания предлагается проектирование консольной балки, имеющее сечение в виде сварного двутавра (рис. 2). Известна длина балки l и действующая сила P. Задан максимально допустимый прогиб f_{max}. Необходимо определить геометрические параметры сечения балки. Варианты заданий приведены в табл. 3. При проектировании балки следует руководствоваться соотношением $h_c/b_п$=1,2÷3,2

Таблица 3

Варианты заданий

№	l, м	P, кН	f_{max}, мм	№	l, м	P, кН	f_{max}, мм
1	1	100	2	**13**	1	300	15
2	1,2	150	10	**14**	1,2	100	20
3	1,4	200	15	**15**	1,4	150	18
4	1,6	250	20	**16**	1,6	200	14
5	1,8	100	18	**17**	1,8	250	8
6	2	150	14	**18**	2	100	2
7	1	200	8	**19**	1	150	10
8	1,2	250	2	**20**	1,2	200	15
9	1,4	100	10	**21**	1,4	250	20
10	1,6	150	15	**22**	1,6	100	18
11	1,8	200	20	**23**	1,8	150	13
12	2	250	18	**24**	2	200	17

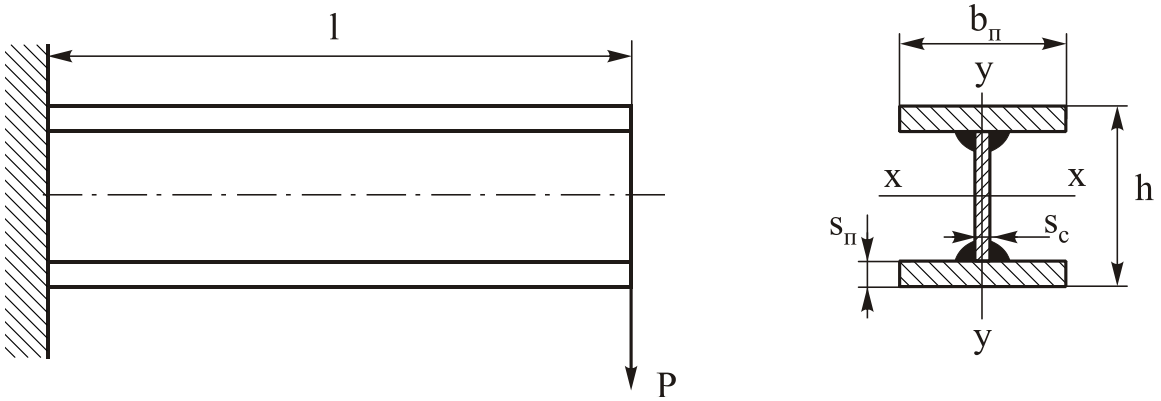


Рис. 2. Задание

Для всех вариантов:

- σ_m = 275 МПа;

- $[\sigma] = 250$ МПа.

4. ПРИМЕР ВЫПОЛНЕНИЯ ЗАДАНИЯ

Исходные данные: $l = 1{,}1$ м; $P = 300$ кН; $f_{max} = 15$ мм.

Действующий момент:

$$M = Pl = 300 \cdot 1{,}1 = 330 \text{ кН·м}.$$

Принимаем толщину стенки $s_c = 7$ мм.

Высота из условия жесткости (3):

$$h_f \approx 1{,}6 \sqrt[3]{\frac{Ml^2}{s_c E f_{max}}} = 1{,}6 \sqrt[3]{\frac{330 \cdot 10^3 \cdot 1{,}1^2}{7 \cdot 10^{-3} \cdot 200 \cdot 10^9 \cdot 15 \cdot 10^{-3}}} = 0{,}427 \text{ м}.$$

Высота из условия минимума площади поперечного сечения (4):

$$h_\sigma \approx 1{,}3 \sqrt{\frac{M}{s_c [\sigma]}} = 1{,}3 \sqrt{\frac{330 \cdot 10^3}{7 \cdot 10^{-3} \cdot 250 \cdot 10^6}} = 0{,}565 \text{ м}.$$

Высота балки, при которой с одинаковыми коэффициентами прочности выполняются условия прочности и жесткости (5):

$$h_* = \frac{[\sigma]\ l^2}{E f_{max}} = \frac{250 \cdot 10^6 \cdot 1{,}1^2}{200 \cdot 10^9 \cdot 15 \cdot 10^{-3}} = 0{,}101 \text{ м}.$$

Так как в данном случае $h_f > h_*$ и $h_\sigma > h_*$, то оптимальной высотой балки является $h = h_\sigma$ (табл. 1).

Оптимальная высота больше, чем h_*, поэтому требуемый момент инерции рассчитывается по формуле (7):

$$J = \frac{hM}{2[\sigma]} = \frac{0{,}565 \cdot 330 \cdot 10^3}{2 \cdot 250 \cdot 10^6} = 3{,}73 \cdot 10^{-4} \text{ м}^4.$$

Площадь поперечного сечения полки (8)

$$A_n = \frac{1{,}6J}{2h^2} = \frac{1{,}6 \cdot 3{,}73 \cdot 10^{-4}}{2 \cdot 0{,}565^2} = 9{,}35 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2.$$

Принимаем толщину полки $s_n = 15$ мм. Тогда ширина полки по формуле (9):

$$b_n = \frac{A_n}{s_n} = \frac{9{,}35 \cdot 10^{-4}}{0{,}015} = 0{,}062 \text{ м}.$$

Для проверки спроектированной балки на прочность рассчитывается уточненный момент инерции по формуле (11):

$$J_{ут} = 2\left(\frac{s_n^3 b_n}{12} + s_n b_n \left(\frac{h - s_n}{2}\right)^2\right) + \frac{(h - 2s_n)^3 s_c}{12} =$$

$$= 2 \cdot \left(\frac{0{,}015^3 \cdot 0{,}062}{12} + 0{,}015 \cdot 0{,}062 \cdot \left(\frac{0{,}565 - 0{,}015}{2}\right)^2\right) +$$

$$+ \frac{(0{,}565 - 2 \cdot 0{,}015)^3 \cdot 0{,}007}{12} = 2{,}31 \cdot 10^{-4} \text{ м}^4.$$

Проверка на прочность по формуле (10)

$$\sigma = \frac{Mh}{2J_{ут}} = \frac{330 \cdot 10^3 \cdot 0{,}565}{2 \cdot 2{,}31 \cdot 10^{-4}} = 404 \text{ МПа}.$$

Напряжения, действующие в балке, значительно превосходят допускаемые. Следует скорректировать сечение таким образом, чтобы момент инерции увеличился, а так же восстановить соотношение между высотой балки и шириной полки. Геометрические размеры балки будут иметь значения $s_п = 10$ мм, $b_п = 0{,}19$ м, $s_с = 7$ мм, $h_с = 0{,}565$ м.

Тогда

$$J_{ym}=2\cdot\left(\frac{0{,}01^3\cdot 0{,}19}{12}+0{,}01\cdot 0{,}19\cdot\left(\frac{0{,}565-0{,}01}{2}\right)^2\right)+$$

$$+\frac{(0{,}565-2\cdot 0{,}01)^3\cdot 0{,}007}{12}=3{,}87\cdot 10^{-4}\ \text{м}^4.$$

$$\sigma=\frac{Mh}{2J_{ym}}=\frac{330\cdot 10^3\cdot 0{,}565}{2\cdot 3{,}87\cdot 10^{-4}}=240\ \text{МПа}.$$

Далее производится проверка на общую устойчивость. Рассчитывается параметр α:

$$\alpha=8\left(\frac{ls_n}{b_n h}\right)^2\left(1+\frac{hs_c^3}{2b_n s_n^3}\right)=8\cdot\left(\frac{1{,}1\cdot 0{,}01}{0{,}19\cdot 0{,}565}\right)^2\left(1+\frac{0{,}565\cdot 0{,}007^3}{2\cdot 0{,}19\cdot 0{,}01^3}\right)=0{,}13\cdot$$

По табл. 2 принимаем $\psi=1{,}73$. Момент инерции в плоскости, перпендикулярной плоскости действия момента по формуле (14):

$$J_{ym\ y}=2\frac{b_n^3 s_n}{12}+\frac{s_c^3(h-2s_n)}{12}=2\cdot\frac{0{,}19^3\cdot 0{,}01}{12}+$$

$$+\frac{0{,}007^3(0{,}565-2\cdot 0{,}01)}{12}=1{,}15\cdot 10^{-5}\ \text{м}^4.$$

Тогда φ_1 по формуле (13)

$$\varphi_1 = \psi \frac{J_{ym\ y}}{J_{ym\ x}} \left(\frac{h}{l}\right)^2 10^3 = 1{,}73 \cdot \frac{1{,}15 \cdot 10^{-5}}{3{,}87 \cdot 10^{-4}} \cdot \left(\frac{0{,}565}{1{,}1}\right)^2 \cdot 10^3 = 13{,}5$$

Так как $\varphi_1 > 0{,}85$, то $\varphi_b = 0{,}68 + 0{,}21 \cdot 13{,}15 = 3{,}51$, принимаем $\varphi_b = 1$.

В связи с тем, что $\varphi_b = 1$ проверка на общую устойчивость по формуле (12) совпадает с проверкой на прочность по формуле (10). Значит, условие общей устойчивости выполняется.

Проверка на местную устойчивость (16):

$$\frac{(h - 2s_n)}{s_c} \le 80\sqrt{\frac{210}{\sigma_m}};$$

$$\frac{(h - 2s_n)}{s_c} = \frac{(0{,}565 - 2 \cdot 0{,}01)}{0{,}007} = 72{,}1;$$

$$80\sqrt{\frac{210}{\sigma_m}} = 80\sqrt{\frac{210}{275}} = 69{,}9;$$

$$77{,}8 > 69{,}9.$$

Условие местной устойчивости не соблюдается. Значит необходимо увеличить толщину стенки. Принимаем $s_c = 8$ мм. Тогда левая часть неравенства

$$\frac{(h - 2s_n)}{s_c} = \frac{(0{,}565 - 2 \cdot 0{,}01)}{0{,}008} = 68{,}13 \cdot$$

Таким образом, консольная балка длиной $l = 1{,}1$ м нагруженная силой $P = 300$ кН при условии, что прогиб не превышает

$f_{max} = 15$ мм должна иметь сечение с размерами: $s_п = 10$ мм, $b_п = 0{,}19$ м, $s_с = 8$ мм, $h_с = 0{,}565$ м.

5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое балка?

2. К чему может привести чрезмерное уменьшение толщины стенки?

3. Чем определяется показатель жёсткости балки?

4. Из каких условий определяется минимальная высота балки?

Лабораторная работа №5

РАСЧЁТ БАРАБАНА ГРУЗОПОДЪЁМНОГО МЕХАНИЗМА

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью работы является закрепление теоретического материала и овладение практическими навыками расчёта барабана грузоподъёмного механизма.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ [2]

Барабаны используют в шаровых мельницах, в центрифугах, но особенно часто их применяют в грузоподъемных машинах. и шахтных подъемниках. Размеры барабанов различны. Диаметры их колеблются в широких пределах – от нескольких десятков миллиметров до нескольких метров. Длина барабана зависит от его назначения. Толщина листов, образующих барабан, может достигать 75 мм и более.

В большинстве случаев барабан представляет собой сварную конструкцию, изготовленную из листов. Однако в некоторых изделиях основой барабана служит каркас, сконструированный из профильного материала. Каркас представляет собой пространственную жесткую систему, к которой приваривают барабанную обшивку. Такие конструкции встречаются сравнительно редко и главным образом в крупных шахтных подъемниках.

Барабаны соединяют с торцовыми стенками (днищами). Последние представляют собой плоские круглые листы, к которым

приварены цапфы. В одних конструкциях цапфы барабанов насажены на валы, не имеющие разрывов, в других – на валы с разрывом.

Для барабанов малых диаметров используют трубы или отливки, для средних и больших диаметров корпуса барабанов вальцуют из одного или нескольких листов.

Для удобства навивки каната на поверхности барабана предусматривают канавки, соответствующие диаметру этого каната (рис. 1).

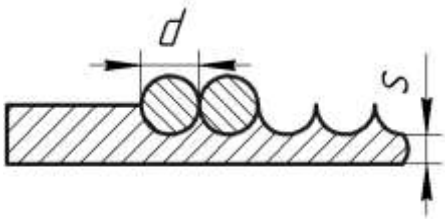


Рис 1.

Толщина листов барабана должна быть значительной, чтобы канавки не могли ослабить сечение барабана. Канат вызывает в барабане сжатие. Если напряжения сжатия превзойдут величину, которая называется критической, то оболочка потеряет устойчивую форму равновесия и выпучится (рис. 2).

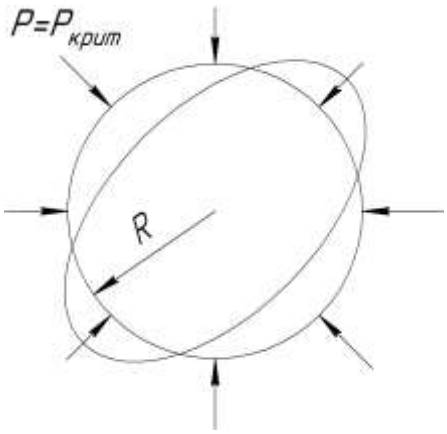


Рис 2

Во избежание потери устойчивости повышают жесткость оболочки, для этого приваривают кольцевые элементы жесткости: полосы, швеллеры, приваренные на ребро, различные штампованные профили. Все соединения листов должны производиться встык продольными и поперечными швами автоматической сваркой под слоем флюса.

Соединения барабана с торцовой стенкой весьма ответственны, так как передают рабочие усилия значительной величины. Наиболее рациональным является соединение барабана со стенкой, стыковым швом, допускается соединение угловыми швами с подготовкой кромок.

Расчет прочности барабана производят на сжатие, изгиб и кручение.

Рассмотрим элемент обода под канатом (рис. 3). Усилие в ободе N уравновешивает силу P, приложенную к канату.

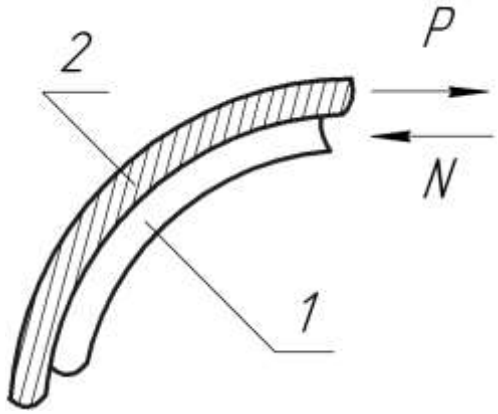


Рис 3

Поэтому напряжение сжатия в ободе равно

$$\sigma = \frac{P}{d \cdot s_{\text{полн}}} \qquad (1)$$

где d – ширина обода, равна диаметру каната;

s – толщина обода.

Рассмотрим, в какой степени сжимающие напряжения могут быть опасны для обода с точки зрения потери устойчивости. Допустим, что труба, не имеющая торцовых стенок, сжимается нагрузкой, равномерно распределенной по ее окружности. Из теории упругости известно, что потеря устойчивости наступает при нагрузке

$$p_{кр} = \frac{3 \cdot E \cdot J}{R^3}, \qquad (2)$$

где E – модуль упругости;

J – момент инерции сечения стенки трубы относительно собственной оси;

R – радиус трубы;

Установим зависимость между P и p. В цилиндрическом теле, нагруженном по поверхности нагрузкой p, образуется усилие

$$N = P = p \cdot R \qquad (3)$$

Подставим вместо p его значение из формулы (2), тогда получим

$$P_{\text{кр}} = \frac{E \cdot d \cdot R}{4}\left(\frac{s}{R}\right)^3, \qquad (4)$$

Если принять коэффициент запаса на устойчивость, равным 2, то допускаемая сила по устойчивости барабана выразится формулой

$$P_{\text{доп}} = \frac{E \cdot d \cdot R}{8}\left(\frac{s}{R}\right)^3, \qquad (5)$$

Напряжение в барабане, допустимое с учетом устойчивости, составляет

$$\sigma_{\text{расч}} < 0{,}5 \cdot [\sigma]_{\text{кр}}, \qquad (6)$$

Торцовые стенки повышают устойчивость барабана, по сравнению с ее допустимым значением $P_{\text{доп}}$, полученным по формуле (5). Если $P_{\text{расч}} > 0{,}5P_{\text{кр}}$, то барабан следует усилить постановкой кольцевых элементов жесткости.

Кроме проверки на устойчивость, оболочка должна быть проверена также на прочность в зависимости от величин изгибающего и крутящего моментов.

Наибольший изгибающий момент имеет место в середине пролета

$$M = \frac{P \cdot l}{4} \tag{7}$$

где l – расстояние между опорами барабана.

Напряжения от изгиба равно

$$\sigma = \frac{M}{W} \tag{8}$$

Осевой момент сопротивления барабана находится так же, как в кольцевом сечении

$$W = \frac{J}{R_1} \tag{9}$$

где R_1 – внешний радиус.

Осевой момент инерции кольца равен

$$J = \frac{\pi}{4}(R_1^4 - R_2^4) \tag{10}$$

где для упрощения расчёта принимается, $R_1 = R + s_{\text{полн}}$, $R_2 = R + s$

Величина крутящего момента зависит от конструкции привода. Если момент, вращающий вал, передается на него с одной стороны, то

$$M_{\text{кр}} = P \cdot R \tag{11}$$

Напряжение от кручения равно

$$\tau = \frac{M_{\text{кр}}}{W_{\text{кр}}} \qquad (12)$$

где $W_{\text{кр}}$ – полярный момент сопротивления, равен удвоенному осевому моменту сопротивления.

В большинстве случаев напряжения от изгиба и кручения в барабанах незначительны по сравнению с напряжениями сжатия.

3. ВАРИАНТЫ ЗАДАНИЙ

В качестве задания предлагается проектирование конструкции барабана грузоподъёмного механизма, показанного на рис. 4. Материал сварной конструкции Ст3пс. Геометрические размеры приведены в таблице 1.

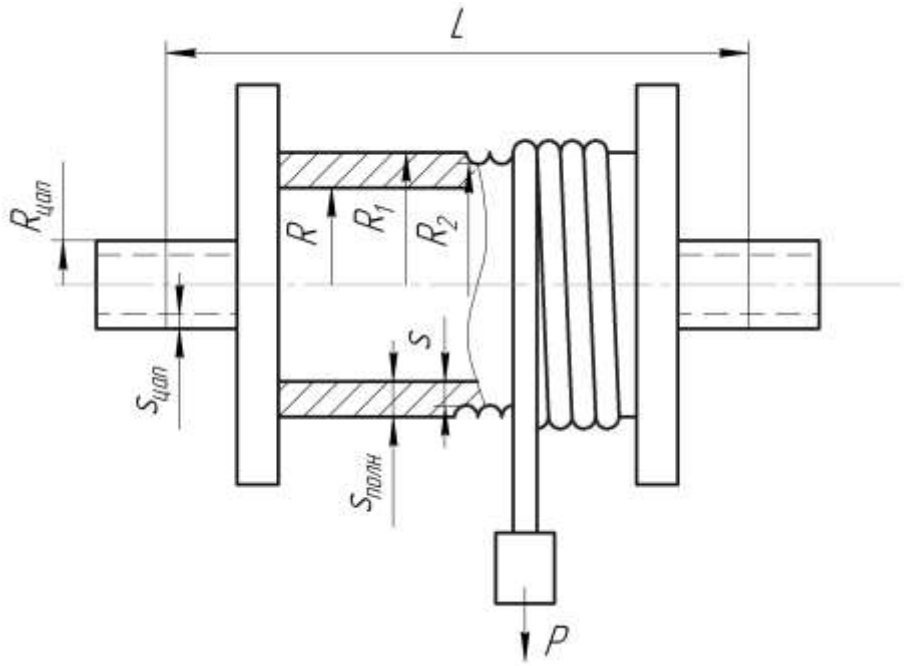


Рис. 4. Задание

Таблица 1

Варианты заданий

№	R, м	$d_{кан}$, м	P, кН	l, м	$R_{цап}$, м	$S_{цап}$, м
1	1,2	0,05	200	2,5	0,3	0,05
2	1,3	0,03	200	2,5	0,3	0,09
3	0,9	0,01	150	1,5	0,1	0,03
4	1,0	0,03	180	2	0,3	0,1
5	0,8	0,04	160	1,3	0,15	0,04
6	0,8	0,02	170	3	0,2	0,05
7	0,7	0,04	200	1,4	0,2	0,02
8	1,0	0,02	110	2,2	0,4	0,02
9	0,5	0,03	600	3,5	0,2	0,05
10	1,5	0,02	110	2,2	0,3	0,1
11	1,2	0,02	110	3,2	0,15	0,05
12	1,5	0,04	200	5	0,5	0,1
13	1,2	0,025	170	2,6	0,2	0,05
14	1,2	0,03	155	2	0,3	0,05
15	0,9	0,02	145	1,8	0,15	0,03
16	1,5	0,03	180	2,8	0,25	0,02
17	0,2	0,01	100	1,3	0,1	0,02
18	1,4	0,01	115	3	0,1	0,03
19	1,7	0,03	150	2,8	0,4	0,1
20	1,5	0,03	100,5	3,2	0,4	0,05
21	1,2	0,03	140	1,3	0,15	0,05
22	1,0	0,02	125	2,6	0,15	0,05
23	1,0	0,015	132,5	2,5	0,15	0,05
24	1,1	0,03	120	2,2	0,1	0,05

4. ПРИМЕР ВЫПОЛНЕНИЯ ЗАДАНИЯ

Исходные данные: R = 2,2 м; $d_{кан}$ = 0,04 м; P = 130 кН; l = 2,5 м; $R_{цап}$ = 0,3 м; $S_{цап}$ = 0,05 м

1. Расчёт из условия устойчивости необходимой толщины листов барабана.

Определить необходимую толщину листов барабана из формулы возможно выразив толщину s из формулы (5).

$$s = R \cdot \sqrt[3]{\frac{8 \cdot P}{E \cdot d \cdot R}} = 2{,}2 \cdot \sqrt[3]{\frac{8 \cdot 130000}{2 \cdot 10^{11} \cdot 0{,}04 \cdot 2{,}2}} = 0{,}086 \text{ м}$$

Полная толщина оболочки барабана определяется:

$$s_{\text{полн}} = s + \frac{d}{2} = 0{,}086 + \frac{0{,}04}{2} = 0{,}106 \text{ м}$$

Напряжение сжатия в оболочке

$$\sigma = \frac{P}{d \cdot s_{\text{полн}}} = \frac{130000}{0{,}04 \cdot 0{,}106} = 30\,660\,377{,}36 \text{ Па}$$

2. Расчёт прочности барабана на изгиб

Определяем момент, вызванный в барабане изгибом

$$M = \frac{P \cdot l}{4} = \frac{130000 \cdot 2{,}5}{4} = 81\,250 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Определяем осевой момент инерции кольца

$$R_1 = R + s_{\text{полн}} = 2{,}2 + 0{,}106 = 2{,}306 \text{ м}$$

$$R_2 = R + s = 2{,}2 + 0{,}061 = 2{,}286 \text{ м}$$

$$J = \frac{\pi}{4}(R_1^4 - R_2^4) = \frac{3{,}14}{4}\left(2{,}306^4 - 2{,}286^4\right) = 0{,}76 \text{ м}^3$$

Осевой момент сопротивления барабана определяется

$$W = \frac{J}{R_1} = \frac{0{,}76}{2{,}306} = 0{,}3296 \text{ м}^4$$

Напряжения от изгиба равно

$$\sigma = \frac{M}{W} = \frac{81250}{0{,}3296} = \ 246\,510{,}92 \text{ Па}$$

3. Расчёт прочности барабана на кручение

Момент кручения при двигателе, находящемся с одной стороны вала определяется

$$M_{\text{кр}} = P \cdot R = 130000 \cdot 2{,}2 = 286\,000 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Полярный момент сопротивления равен удвоенному осевому моменту сопротивления

$$W_{\text{кр}} = 2 \cdot W = 2 \cdot 0{,}3296 = 0{,}6592 \text{ м}^4$$

Определяем напряжение от кручения

$$\tau = \frac{M_{\text{кр}}}{W_{\text{кр}}} = \frac{286000}{0{,}6592} = \ 433\,859{,}22 \text{ Па}$$

4. Расчёт цапфы привода барабана

Определяем осевой момент инерции цапфы:

$$R_1 \ = R_{\text{цап}} = 0{,}3 \text{ м}$$

$$R_2 \ = R_{\text{цап}} - s_{\text{цап}} = 0{,}3 - 0{,}05 = 0{,}25 \text{ м}$$

$$J = \frac{\pi}{4}(R_1^4 - R_2^4) = \frac{3{,}14}{4}\left(0{,}3^4 \ - 0{,}25^4\ \right) = 0{,}0033 \text{ м}^3$$

Осевой момент сопротивления барабана определяется

$$W = \frac{J}{R_1} = \frac{0{,}0033}{0{,}3} = 0{,}011 \text{ м}^4$$

Определяем напряжение от кручения в цапфе и в шве, соединяющем цапфу с торцовой стенкой:

$$\tau = \frac{M_{\text{кр}}}{W_{\text{кр}}} = \frac{286000}{0{,}011} = \ 13\,000\,000 \text{ Па}$$

5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Назовите область применения барабанов?

2. Какие виды стандартных изделий применяются для барабанов различного диаметра?

3. Чему равны допускаемые напряжения с учётом устойчивости барабана?

Лабораторная работа №6.
РАСЧЁТ СВАРОЧНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ УГЛОВЫХ И ТАВРОВЫХ ШВОВ

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью работы является закрепление теоретического материала и овладение практическими навыками расчёта сварочных деформаций конструкций с протяженными швами.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ [3, 4, 5, 6]

Деформации металла при сварке.

Расширение и сокращение металла вследствие неравномерного нагрева, охлаждения и структурных превращений являются основными причинами сварочных деформаций. Различают следующие виды деформаций:

а) температурные деформации $\varepsilon_\alpha = \alpha T$, где α – коэффициент температурного удлинения, 1/°С; Т – изменение температуры точки тела, °С;

б) наблюдаемые деформации $\varepsilon_н$ и $\gamma_н$, характеризующие изменение размеров тела – линейные и угловые;

в) собственные (внутренние) деформации, которые состоят из упругих $\varepsilon_{упр}$ и $\gamma_{упр}$ и пластических $\varepsilon_{пл}$ и $\gamma_{пл}$ деформаций.

Деформации связаны между собой следующими соотношениями:

$$\varepsilon_н = \varepsilon_{упр} + \varepsilon_{пл} + \varepsilon_\alpha \quad (1)$$

$$\gamma_н = \gamma_{упр} + \gamma_{пл} \quad (2)$$

Уравнения (1) и (2) могут быть записаны для различных осей и плоскостей. Если до протекания какого-либо процесса возникли начальные деформации ε_0 и γ_0, вызванные предшествующими пластическими деформациями, то уравнения (1) и (2) преобразуются в следующий вид:

$$\varepsilon_н = \varepsilon_{упр} + \varepsilon_{пл} + \varepsilon_\alpha + \varepsilon_0 \quad (3)$$

$$\gamma_н = \gamma_{упр} + \gamma_{пл} + \gamma_0 \quad (4)$$

Напряжения при сварке являются следствием упругих деформаций тела и связаны с ними следующими зависимостями:

$$\begin{cases} \sigma_x = \dfrac{\mu E\left(\varepsilon_{x_{\text{упр}}} + \varepsilon_{y_{\text{упр}}} + \varepsilon_{z_{\text{упр}}}\right)}{(1+\mu)(1-2\mu)} + \dfrac{E}{1+\mu}\varepsilon_{x_{\text{упр}}} \\ \sigma_y = \dfrac{\mu E\left(\varepsilon_{x_{\text{упр}}} + \varepsilon_{y_{\text{упр}}} + \varepsilon_{z_{\text{упр}}}\right)}{(1+\mu)(1-2\mu)} + \dfrac{E}{1+\mu}\varepsilon_{y_{\text{упр}}} \\ \sigma_z = \dfrac{\mu E(\varepsilon_{x_{\text{упр}}} + \varepsilon_{y_{\text{упр}}} + \varepsilon_{z_{\text{упр}}})}{(1+\mu)(1-2\mu)} + \dfrac{E}{1+\mu}\varepsilon_{z_{\text{упр}}} \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} \tau_{xy} = G\gamma_{xy_{\text{упр}}} \\ \tau_{yz} = G\gamma_{yz_{\text{упр}}} \\ \tau_{zx} = G\gamma_{zx_{\text{упр}}} \end{cases} \quad (6)$$

где E, G и μ — соответственно модули упругости 1-го и 2-го рода и коэффициент Пуассона, в общем случае зависящие от температуры.

В отличие от напряжений и деформаций, создаваемых нагрузками, собственные деформации и напряжения существуют в теле при отсутствии внешних сил. Собственные напряжения классифицируют в зависимости:

а) от причины, их вызвавшей;

б) от периода времени существования;

в) от степени многоосности;

г) от объемов, в которых они взаимно уравновешены.

Собственные напряжения 1-го рода всегда уравновешены в пределах любого сечения, полностью пересекающего тело.

Наблюдаемые деформации вызывают перемещения отдельных точек сварной конструкции. Они связаны между собой следующими зависимостями:

Перемещения элементов сварных конструкций обычно характеризуют прогибами f (рис. 1, а), углами поворота β (рис. 1, б), укорочениями Δ (рис. 1, в), величинами w выхода точек из плоскости (рис, 1, г) и др.

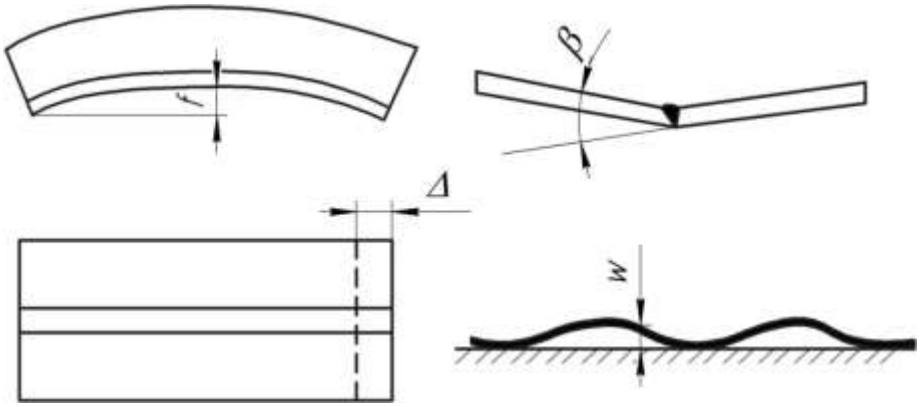


Рис. 1. Виды перемещений в элементах сварных конструкций

$$\varepsilon_{x_{\text{н}}} = \frac{\partial u}{\partial x};\ \varepsilon_{y_{\text{н}}} = \frac{\partial v}{\partial y};\ \varepsilon_{z_{\text{н}}} = \frac{\partial w}{\partial z} \tag{7}$$

$$\gamma_{xy_{\text{н}}} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x};\ \gamma_{zx_{\text{н}}} = \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x};\ \gamma_{yz_{\text{н}}} = \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \tag{8}$$

Перемещения могут быть временные и остаточные. Их определяют либо расчетными, либо экспериментальными методами.

Из приближенных методов наиболее известны методы, разработанные Г. А. Николаевым и Н. О. Окербломом.

В графорасчетном методе, разработанном Г. А. Николаевым предусматривается определение напряжений в двух поперечных сечениях и приняты некоторые допущения.

1. При сварке пластин достигается предельное температурное состояние.

2. Возникающие напряжения одноосны; поперечные сечения не искривляются.

3. Диаграмма металла соответствует диаграмме идеально упругопластического тела; принимается схематизированная зависимость предела текучести от температуры. Модуль упругости E от температуры не зависит.

В методе Н. О. Окерблома используют те же допущения, что и в методе Г. А. Николаева. Для определения остаточных напряжений и деформаций на стадии нагрева и остывания рассматривают не одно, а несколько сечений, расположенных друг за другом. По алгоритмам рассмотренных методов для машинного решения задач на ЭВМ разработаны программы. В этом методе, рассматривают серию поперечных сечений при допущениях 1 и 2. Модуль упругости и предел текучести зависят от температуры, приближенно учитывают упрочнение металла при пластической деформации.

На основе расчетных и экспериментальных данных сложились следующие представления о величине и характере распределения остаточных напряжений в сварных соединениях. Наиболее устойчивый характер имеют продольные остаточные напряжения σ_x. В низкоуглеродистых и аустенитных сталях максимальные напряжения наблюдаются в шве и примерно равны пределу текучести металла. Большие уровни напряжений соответствуют мощным быстродвижущимся источникам тепла при сварке. Ширина зоны растягивающих напряжений несколько меньше ширины зо-

ны пластических деформаций $2b_п$, в приближенных оценках можно считать их одинаковыми. В сваренных полосах равной ширины растягивающие напряжения уравновешены сжимающими напряжениями $\sigma_{сж}$ за пределами зоны $2b_п$, средняя величина последних зависит от $P_{ус}$ и ширины сваренной пластины $2B$:

$$\sigma_{сж} \approx \frac{P_{ус}}{2 \cdot B \cdot \delta} \qquad (9)$$

Один из наиболее простых и рациональных расчетных методов определения перемещений сварных конструкций состоит в расчленении всей задачи расчета на два самостоятельных этапа. На первом этапе экспериментальным или расчетным путем находят деформации и перемещения в зоне сварных соединений (термомеханическая часть задачи), а на втором этапе методами сопротивления материалов или теории упругости определяют перемещения (деформационная часть задачи), используя результаты, полученные на первом этапе. Удобство такого приема состоит в том, что одни и те же результаты из термомеханической части задачи, будучи полученными один раз, могут многократно использоваться при решении деформационных задач.

Для низкоуглеродистых и низколегированных сталей с пределом текучести до 30 кгс/мм^3 в случае сварки плавлением элементов встык, втавр или внахлестку за один проход установлена следующая зависимость усадочной силы $P_{ус}$ от режима сварки и жесткости свариваемого элемента:

$$P_{\text{ус}} = \frac{P_{\text{ус.ж.}}}{1 - \frac{P_{\text{ус.ж.}}}{\sigma_{\text{т}}} \cdot \left(\frac{\text{e}_1^2}{J_1} + \frac{\text{e}_2^2}{J_2} + \frac{1}{F}\right)} \quad (10)$$

где $P_{\text{ус. ж}}$ – усадочная сила, возникающая при укладке шва на свариваемый элемент (балку, пластину) весьма высокой жесткости, кгс; $\sigma_{\text{т}}$ – предел текучести металла, кгс/см^2; J_1, J_2 – моменты инерции относительно главных центральных осей 1-1 и 2-2, см^4 (рис. 2); F – площадь поперечного сечения, см^2; e_1, e_2 – эксцентриситеты приложения усадочной силы относительно осей 1-1 и 2-2, см.

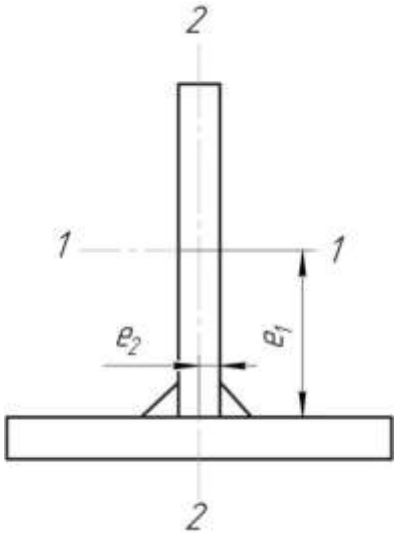


Рис. 2. Положение главных осей и эксцентриситеты e_1 и e_2 приложения усадочной силы.

$$J_1 = \left(\frac{s_{\text{п}}^3 \cdot b_{\text{п}}}{12} + s_{\text{п}} \cdot b_{\text{п}} \cdot \left(\frac{h - s_{\text{п}}}{2}\right)^2\right) + \frac{(h - 2 \cdot s_{\text{п}})^3 \cdot s_c}{12}$$

$$J_2 = \frac{b_{\text{п}}^3 \cdot s_{\text{п}}}{12} + \frac{s_c^3 \cdot (h - 2 \cdot s_{\text{п}})}{12} \quad (11)$$

$$F = \left(s_c \cdot (h - s_{\text{п}})\right) + (b \cdot s_{\text{п}}) \quad (12)$$

Знаменатель в формуле (10) всегда меньше единицы; он учитывает влияние ограниченной жесткости балки или пластины на увеличение $P_{ус}$ по сравнению с $P_{ус.ж.}$

Величину $P_{ус.ж.}$ (в кгс) определяют в зависимости от режима сварки:

$$P_{ус.ж.} = \left(\frac{23000}{q_0 + 12600} + 0{,}36\right) \cdot \frac{q}{V_{св}} \qquad (13)$$

где q – эффективная мощность, Дж/с; $V_{св}$ – скорость сварки, см/с;

q_0 – удельная погонная энергия сварки, Дж/см^2,

$q_0 = \frac{q}{V_{св} \cdot \delta_{расч}}$;

$\delta_{расч}$ – расчетная толщина свариваемого элемента $\delta_{расч} = \frac{1}{2}(2 \cdot s_п + s_с)$ см,

Продольные швы l (рис. 3, а) создают усадочную силу $P_{ус}$, которая вызывает изгиб и укорочение балки.

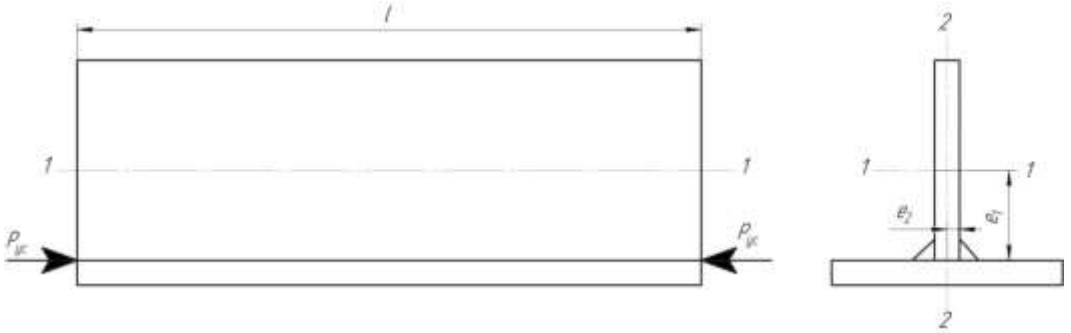


Рис. 3. Сварная балка таврового профиля под действием усадочной силы $P_{ус}$, вызывающей изгиб и укорочение

Продольное укорочение:

$$\Delta_{\text{пр}} = \frac{P_{\text{ус}} \cdot l}{E \cdot F} \tag{14}$$

угловой поворот концов:

$$\theta = \frac{M \cdot l^2}{E \cdot J_1} \tag{15}$$

максимальный прогиб:

$$f = \frac{M \cdot l^2}{8 \cdot E \cdot J_1} \tag{16}$$

где

$$M = \mathrm{P}_{\text{ус}} \cdot e_1 \tag{17}$$

3. ВАРИАНТЫ ЗАДАНИЙ

В качестве задания предлагается проектирование балки, имеющее сечение в виде сварного двутавра (рис. 4). Известна габаритные размеры и длина балки, а так же режимы сварки. Необходимо определить возникающие сварочные деформации в результате сварки сварных швов нижнего пояса. Варианты заданий приведены в таблице 1. Материалом сварной балки сталь класса С255.

Таблица 1

Варианты заданий

№	L, м	h, м	b, м	$s_п$, мм	$s_с$, мм	$I_{св}$, А	U, В	$V_{св}$, мм/мин
1	2,5	0,15	0,25	8	6	250	25	650
2	3,0	0,2	0,3	8	8	300	30	700
3	3,5	0,25	0,4	10	6	350	35	750
4	4,0	0,3	0,45	10	8	400	28	800
5	4,5	0,3	0,5	10	10	450	34	850
6	5,0	0,4	0,7	12	8	500	36	900
7	5,5	0,4	0,8	12	10	550	40	950
8	6,0	0,5	0,9	14	12	600	45	1000
9	5,5	0,3	0,5	6	6	250	25	650
10	6,0	0,4	0,7	8	6	300	30	700
11	5,0	0,4	0,8	8	4	350	35	750
12	4,5	0,5	0,9	10	6	400	28	800
13	4,0	0,15	0,25	10	10	450	34	850
14	3,5	0,2	0,3	12	12	500	36	900
15	3,0	0,25	0,5	12	10	550	40	950
16	2,0	0,3	0,4	14	12	600	45	1000
17	6,0	0,3	0,5	8	10	450	34	850
18	4,0	0,4	0,7	12	8	500	36	900
19	3,5	0,6	1,0	10	10	550	40	950
20	5,0	0,4	0,8	14	8	600	45	1000
21	3,5	0,5	0,9	10	6	400	28	800
22	3,0	0,15	0,25	10	10	450	34	850
23	3,0	0,3	0,8	14	10	500	36	900
24	2,5	0,2	0,45	8	6	250	25	650

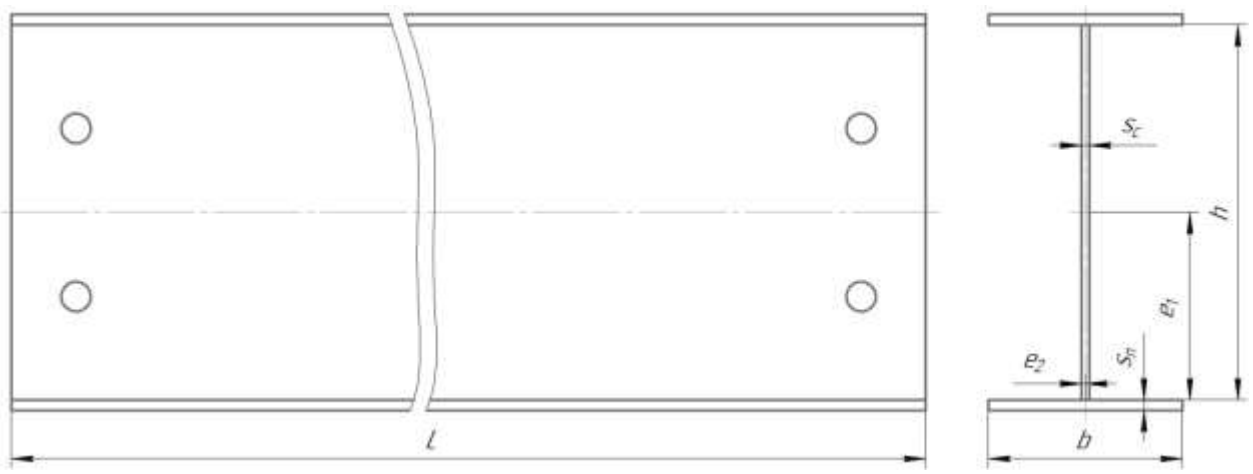


Рис. 4. Общий вид балки для проектирования

4. ПРИМЕР ВЫПОЛНЕНИЯ ЗАДАНИЯ

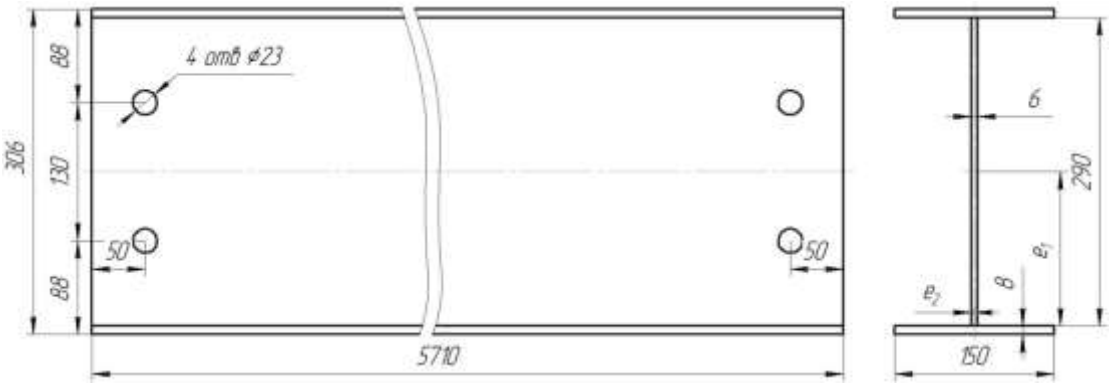


Рис. 4. Общий вид балки

Исходные данные: $I_{\text{св}} = 450$ А, $U_{\text{д}} = 28$ В,

$V_{\text{св}} = 900\ \dfrac{\text{мм}}{\text{мин}} = 1{,}5\ \dfrac{\text{см}}{\text{с}}$

1. Определение удельной погонной энергия сварки:

$$q = 450 \cdot 28 = 12600\ \frac{\text{Дж}}{\text{с}}$$

$$\delta_{\text{расч}} = \frac{1}{2}(2 \cdot s_{\text{п}} + s_{\text{с}}) = \frac{1}{2}(2 \cdot 8 + 6) = 11\ \text{мм} = 1{,}1\ \text{см}$$

$$q_0 = \frac{q}{V_{\text{св}} \cdot \delta_{\text{расч}}} = \frac{12600}{1{,}5 \cdot 1{,}1} = 7636{,}4\ \frac{\text{Дж}}{\text{см}^2}$$

2. Определение усадочной силы, возникающей при укладке шва на свариваемый элемент:

$$P_{\text{ус.ж.}} = \left(\frac{23000}{q_0 + 12600} + 0{,}36\right) \cdot \frac{q}{V_{\text{св}}} =$$

$$= \left(\frac{23000}{7636{,}4 + 12600} + 0{,}36\right) \cdot \frac{12600}{1{,}5} =$$

$$= 12600\ \text{кгс} = 123563{,}79\ \text{Н}$$

3. Определение моментов инерции сечения относительно главных центральных осей и площади сечения:

$$J_1 = \left(\frac{s_{\text{п}}^3 \cdot b_{\text{п}}}{12} + s_{\text{п}} \cdot b_{\text{п}} \cdot \left(\frac{h - s_{\text{п}}}{2}\right)^2\right) + \frac{(h - 2 \cdot s_{\text{п}})^3 \cdot s_c}{12}$$

$$= \left(\frac{0{,}8^3 \cdot 15}{12} + 0{,}8 \cdot 15 \cdot \left(\frac{29{,}8 - s_{\text{п}}}{2}\right)^2\right)$$

$$+ \frac{(29{,}8 - 2 \cdot 0{,}8)^3 \cdot 0{,}6}{12} = 3644{,}9\ \text{см}^4$$

$$J_2 = \frac{b_{\text{п}}^3 \cdot s_{\text{п}}}{12} + \frac{s_c^3 \cdot (h - 2 \cdot s_{\text{п}})}{12} =$$

$$= \frac{15^3 \cdot 0{,}8}{12} + \frac{0{,}6^3 \cdot (29{,}8 - 2 \cdot 0{,}8)}{12} = 225\ \text{см}^4$$

$$F = \left(s_c \cdot (h - s_{\text{п}})\right) + (b \cdot s_{\text{п}}) =$$

$$= \left(0{,}6 \cdot (30{,}6 - 0{,}8)\right) + (15 \cdot 0{,}8) = 29{,}9\ \text{см}^2$$

4. Определение эксцентриситетов приложения усадочной силы относительно главных осей:

Эксцентриситеты определяются по чертежу (рис. 4).

$$e_1 = 14{,}5 \text{ см}; \quad e_2 = 0{,}3 \text{ см}$$

5. Определение усадочной силы:

Предел текучести для стали класса С255 в соответствии с ГОСТ 27772-88 $\delta_т = 2294{,}36$ кгс

$$P_{ус} = \frac{P_{ус.ж.}}{1 - \frac{P_{ус.ж.}}{\sigma_т} \cdot \left(\frac{e_1^2}{J_1} + \frac{e_2^2}{J_2} + \frac{1}{F}\right)} =$$

$$= \frac{12600}{1 - \frac{12600}{2294{,}36} \cdot \left(\frac{14{,}5^2}{3644{,}9} + \frac{0{,}3^2}{225} + \frac{1}{29{,}9}\right)} =$$

$$19090{,}9 \text{ кгс} = 187217{,}8 \text{ Н}$$

6. Определение максимального прогиба, угла поворот концов балки и продольного укорочения:

$$\Delta_{пр} = \frac{P_{ус} \cdot l}{\varepsilon \cdot F} = \frac{19090{,}9 \cdot 571}{2039400 \cdot 29{,}9} = 0{,}23 \text{ см} = 2{,}3 \text{ мм}$$

$$M = P_{ус} \cdot e_1 = 19090{,}9 \cdot 14{,}5 = 276818{,}1 \text{ кгс}$$

$$\theta = \frac{M \cdot l^2}{\varepsilon \cdot J_1} = \frac{276818{,}1 \cdot 571^2}{2039400 \cdot 3644{,}9} = 16{,}0^\circ$$

$$f = \frac{M \cdot l^2}{8 \cdot \varepsilon \cdot J_1} = \frac{276818{,}1 \cdot 571^2}{8 \cdot 2039400 \cdot 3644{,}9} = 2{,}0 \text{ см} = 20{,}0 \text{ мм}$$

Вывод: В балке длиной 5,7 м, при сварке нижнего пояса возникает усадочная сила 187,2 кН и возникает максимальный

прогиб 20 мм, угловой поворот концов балки 16°, продольное укорочение 2,3 мм.

5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Чем вызвано появление сварочных деформаций?

2. Какие существуют виды сварочных деформаций?

3. Какие существуют виды реремещений элементов сварных конструкций?

4. Как влияет величина погонной энергии на величину сварочных деформаций?

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. СНиП II-23-81. Стальные конструкции.

2. Николаев, Г. А. Сварные конструкции. Расчет и проектирование / Г. А. Николаев, В. А. Винокуров. – Москва: Высшая школа, 1990. – 446 с.

3. Сварка в машиностроении: Справочник: в 4-х т. / ред. кол.: Г. А. Николаев (пред.) и др. – Москва: Машиностроение, 1979. – Т. 3 / под ред. В. А. Винокурова. 1979. – 567 с., ил.

4. Винокуров, В. А. Сварочные деформации и напряжения. – Москва: Машиностроение, 1968. – 236 с.

5. Гатовский, К. М. Определение сварочных деформаций и напряжений с учетом структурных превращений металла // Сварочное производство. – 1973. – № 11. – С. 3–6.

6. Талыпов, Г. Б. Сварочные деформации и напряжения. – Ленинград: Машиностроение, 1973. – 280 с.