

Практическая работа №18
(продолжительность работы - 4 часа)

Тема: Расчет и проектирование сварной двутавровой балки

Цель: Научиться проводить расчет сварной балки на прочность и жесткость

Порядок выполнения:

1. Ознакомиться с теоретическими сведениями
2. Рассчитать и спроектировать сварную двутавровую балку в соответствии с вариантом
3. Ответить на контрольные вопросы в письменном виде
4. Представить **отчет по практической работе и ответы** на контрольные вопросы в электронном виде на проверку в течение трех дней со дня выдачи задания.

С уважением, *Гнатюк Ирина Николаевна*.

При необходимости вопросы можно задать по телефону: 072-136-54-46

Работы отправлять на электронную почту ira.gnatyuk.60@inbox.ru

Теоретические сведения

Порядок расчета сварной балки

1. Определение расчетного усилия и построение эпюр М и Q

1.1. Определение опорных реакций :

$$R_A = R_B = R = \frac{q \cdot l}{2} + P, \quad \text{кН}$$

Изгибающий момент посередине пролета:

$$M = R \cdot \frac{l}{2} - \frac{q \cdot l^2}{8} - P \left(\frac{l}{2} - d \right), \quad \text{кНм}$$

Изгибающий момент в сечении под грузом

$$M = R \cdot d - \frac{q \cdot d^2}{2}, \quad \text{кНм}$$

Поперечная сила под грузом

$$Q = R - q \cdot d, \quad \text{кН}$$

Поперечная сила на опоре

$$Q = R, \quad \text{кН}$$

2. Определение изгибающих моментов от действия q и P:

$$M_q = \frac{q \cdot l^2}{8}, \quad \text{кНм}$$

$$M_p = P \cdot d, \quad \text{кНм}$$

3. Определение необходимой высоты балки из условия жесткости и условия наименьшей массы:

$$h_{ж} = \frac{5 [\sigma]_P f l}{24 E I}, \text{ м}$$

$$h_c = 1,3 \dots 1,4 \sqrt{\frac{M}{[\sigma]_P * t_w * 10^{-3}}}, \text{ м}$$

где $[\sigma]_P = \sigma_T \cdot \frac{m}{n}$ - допустимое напряжение, МПа (см. табл. 1)

$E = 2,1 \cdot 10^5 \text{ МПа} = 2,1 \cdot 10^4 \text{ кН/см}^2$ - модуль продольной упругости для стали

$m = 0,9$ - коэффициент условий работы

$n = 1,2$ - коэффициент перегрузки

t_w – толщина вертикального листа (принимается предварительно 8-10 мм)

Принимается большее значение высоты балки.

Таблица 1

Расчетные сопротивления листового проката для стальных конструкций

Марка стали	Толщина проката, мм	Расчетное сопротивление, МПа	
		Предел текучести	Временное сопротивление
09Г2	4...10	310	440
	11...20	300	430
ВСт3кп1	4...10	220	345
	11...20	210	340
10Г2С1	4...9	330	465
	10...20	320	455
18пс	4...20	230	360
14Г2	4...9	320	440
	10...32	310	430

4. Определение поперечного сечения балки

4.1. Момент инерции вертикального листа

$$J_B = \frac{t_w h_w^3}{12}, \text{ см}^4$$

h_w – высота вертикального листа, см (принимается конструктивно)

Необходимый момент сопротивления поперечного сечения балки

$$W_{тр} = \frac{M}{[\sigma]_P}, \text{ см}^3$$

M - изгибающий момент в середине пролета, кН·см

$[\sigma]_P$ - допустимое напряжение кН/см²

Необходимый момент инерции поперечного сечения балки

$$J_{тр} = W_{тр} \frac{h}{2}, \text{ см}^4$$

где h - принятая высота балки (см. п.3), см

Необходимый момент инерции горизонтальных листов

$$J_f = J_{тр} - J_B, \text{ см}^4$$

Необходимая площадь поперечного сечения одного пояса

$$A_f = \frac{2J_f}{h_w^2}, \text{ см}^2$$

Окончательно принимается поперечное сечение горизонтального листа с учетом соотношений:

$$t_f = (0,01 \dots 0 \dots 0,025)h, \text{ см}$$

$$b_f = (10 \dots 20 \dots 20) t_f, \text{ см}$$

5. Определение нормального напряжения в избранном поперечном сечении балки

$$\sigma = \frac{M}{J} Y_{\max} < [\sigma]_P$$

где $J = \frac{h_w^3 * t_w}{12} + 2\left(\frac{b_f * t_f^3}{12} + \left(\frac{h_w + t_f}{2}\right)^2 A_f\right)$ - момент инерции сечения, см^4

$$Y_{\max} = \frac{h_w}{2} + t_f, \text{ см}$$

$[\sigma]_P$ - допустимое напряжение кН/см^2

6. Определение необходимости в вертикальных ребрах жесткости для обеспечения местной стойкости балки

6.1. Прогиб балки в середине пролета от действия нагрузок q и P :

$$f_1 = \frac{5q * l^4}{384E * J} + \frac{P * d * l^2}{8E * J} \left[1 - \frac{4}{3} \left(\frac{d}{l}\right)^2\right], \text{ см}$$

По отношению $\frac{f_1}{l}$ определяется соответствие балки нормам жесткости

6.2. Необходимость постановки вертикальных ребер жесткости из условия обеспечения местной стойкости :

$$\frac{h_w}{t_w} \leq 120 \sqrt{\frac{2100}{\sigma_T}}$$

где σ_T – предел текучести стали, кгс/см^2 ($1 \text{ МПа} = 10 \text{ кгс/см}^2$)

Если стойкость вертикальной стенки обеспечена без использования ребер жесткости, то ребра следует установить на опорах и в местах приложения сосредоточенных сил. Если есть необходимость в ребрах жесткости, то их размеры определяются из соотношения

$$b_p \geq \frac{h_w}{30} + 40, \text{ мм}$$

$$t_p = \frac{1}{15} b_p, \text{ мм}$$

7. Расчет сварных соединений балки

7.1. Определение минимального катета углового шва:

$$k_p = \frac{t_p}{2}, \text{ мм}$$

где t_p – толщина ребра, мм

7.2. Определение минимального катета для поясных швов балки:

$$k_{II} = \frac{t_w}{2}, \text{ мм}$$

7.3. Проверка поясных швов на срез от максимальной перерезывающей силы ΣQ :

$$\tau_Q = \frac{\Sigma Q * 2b_f \left(\frac{h_w + t_f}{2}\right)}{J * 2\beta_f * k_n} < R_{cp} \frac{m}{n}$$

где β_f – коэффициент, который зависит от способа сварки (для всех вариантов $\beta_f = 0,8$)

$R_{cp} = 0,65 R_y$ – расчетное сопротивление проката (см. табл. 1)

ΣQ - суммарная поперечная сила (определяется из эпюры)

8. Определение массы балки $m = m_1 + 2 m_2$

8.1. Масса стержня $m_1 = b_f \cdot h_f \cdot l$

8.2. Масса пояса $m_2 = b_w \cdot h_w \cdot l$

$m = m_1 + 2 m_2$

Задание для практической работы

Подобрать поперечное сечение сварной балки двутаврового профиля и расставить ребра жесткости (норма жесткости f/l). Балка длиной l свободно опёрта по концам, нагружена равномерно распределенной нагрузкой q и двумя сосредоточенными силами P , приложенными на расстоянии d от концов балки.

Исходные данные по вариантам

№ варианта	P, кН	l, м	d, м	q, кН/м	f/l	Материал
1	80	8	1	20	1/200	09Г2
2	90	9	1	30	1/300	18пс
3	100	10	2	10	1/400	ВСт3кп1
4	110	11	2	20	1/500	14Г2
5	120	12	3	20	1/420	10Г2С1
6	130	13	3	30	1/200	09Г2
7	80	14	1	10	1/350	18пс
8	90	15	1	20	1/250	ВСт3кп1
9	100	8	2	30	1/400	14Г2
10	110	9	1	10	1/300	10Г2С1
11	120	10	2	20	1/420	09Г2
12	130	11	3	30	1/500	18пс
13	80	12	1	20	1/200	ВСт3кп1
14	90	13	2	20	1/300	14Г2
15	100	14	3	10	1/350	10Г2С1
16	110	15	1	30	1/400	09Г2
17	120	8	1	20	1/500	18пс
18	130	9	2	30	1/200	ВСт3кп1
19	80	10	2	10	1/420	14Г2
20	90	11	3	20	1/500	10Г2С1

Пример выполнения практической работы

Задание

Определить расчетные усилия и общие изгибающие моменты сварной двутавровой балки

Исходные данные

Балка длиной $l=8\text{ м}$ свободно оперта по концам, нагруженная равномерно распределенной нагрузкой $q=10\text{ кН/м}$ и двумя сосредоточенными силами $P=100\text{ кН}$, приложенными на расстояния $d=3\text{ м}$ от концов балки.

Решение

Определение расчетного усилия и построение эпюр M и Q

1. Определение опорных реакций :

$$R_A = R_B = R = \frac{q \cdot l}{2} + P = \frac{10 \cdot 8}{2} + 100 = 140\text{ кН}$$

2. Изгибающий момент посередине пролета:

$$M = R \cdot \frac{l}{2} - \frac{q \cdot l^2}{8} - P \left(\frac{l}{2} - d \right) = 140 \cdot \frac{8}{2} - \frac{10 \cdot 8^2}{8} - 100 \left(\frac{8}{2} - 3 \right) = 380\text{ кНм}$$

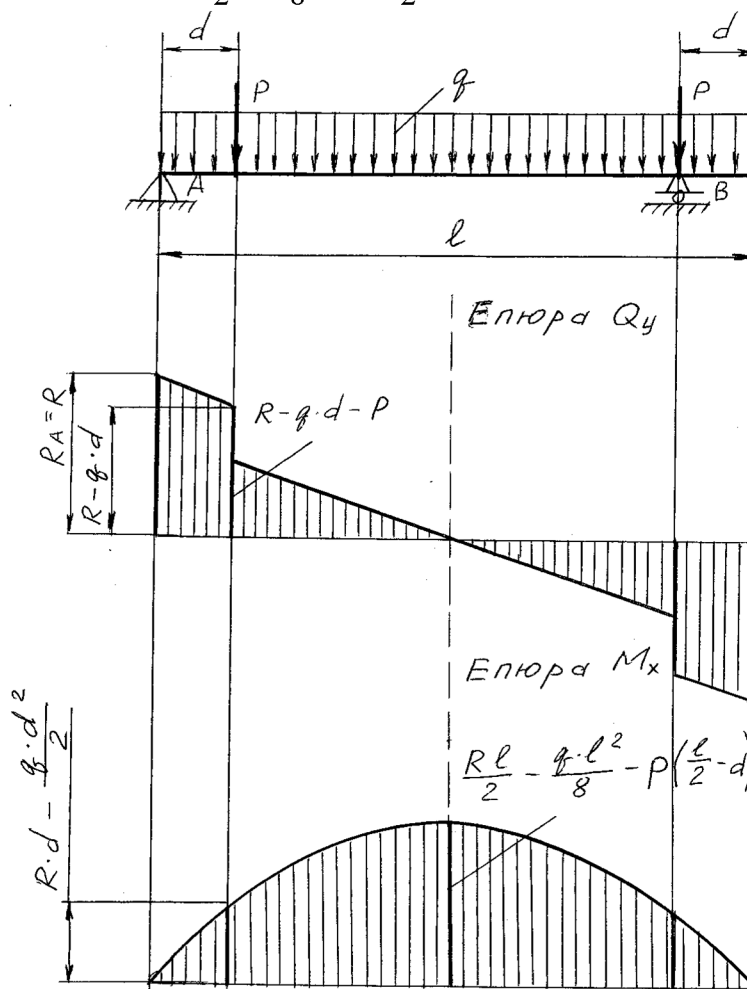


Рисунок 1 - Схема нагрузки балки и построение эпюр M_x и Q_y

3. Изгибающий момент в сечении под грузом

$$M = R \cdot d - \frac{q \cdot d^2}{2} = 140 \cdot 3 - \frac{10 \cdot 3^2}{2} = 375 \text{ кНм}$$

4. Поперечная сила под грузом

$$Q = R - q \cdot d = 140 - 10 \cdot 3 = 110 \text{ кН}$$

5. Поперечная сила на опоре

$$Q = R = 140 \text{ кН}$$

6. Определение изгибающих моментов от действия q и P :

$$M_q = \frac{q \cdot l^2}{8} = \frac{10 \cdot 8^2}{8} = 80 \text{ кНм}$$

$$M_p = P \cdot d = 100 \cdot 3 = 300 \text{ кНм}$$

7. Определение необходимой высоты балки из условия жесткости и условия наименьшей массы:

$$h_{ж} = \frac{5 [\sigma]_p l}{24 E f} = \frac{5 \cdot 158}{24 \cdot 2,1 \cdot 10^5} \cdot \frac{500}{1} \cdot 8 = 0,55 \text{ м}$$

$$h_e = 1,3 \dots 1,4 \sqrt{\frac{M}{[\sigma]_p \cdot t_w \cdot 10^{-3}}} = 1,3 \dots 1,4 \sqrt{\frac{380 \cdot 10^{-3}}{140 \cdot 10 \cdot 10^{-3}}}$$
$$= 0,676 \dots 0,728 \text{ м}$$

$$\text{где } [\sigma]_p = \sigma_T \cdot \frac{m}{n} = 210 \cdot \frac{0,9}{1,2} = 158 \text{ МПа} - \text{допускаемое напряжение}$$

$E = 2,1 \cdot 10^5$ МПа - модуль продольной упругости для стали

$m = 0,9$ - коэффициент условий работы

$n = 1,2$ - коэффициент перегрузки

$t_w = 10$ мм – предварительно принятая толщина вертикального листа

Принимается большее значение высоты балки, т.е. $h_e = 0,70$ м

8. Определение размеров поперечного сечения балки

8.1. Момент инерции вертикального листа

$$J_b = \frac{t_w h_w^3}{12} = \frac{1 \cdot 68^3}{12} = 26202 \text{ см}^4$$

$h_w = 68$ см – высота вертикального листа (принимается конструктивно)

8.2. Необходимый момент сопротивления поперечного сечения балки

$$W_{тр} = \frac{M}{[\sigma]_p} = \frac{380 \cdot 10^2}{15,8} = 2405 \text{ см}^3$$

M - изгибающий момент в середине пролета, кНсм

$[\sigma]_p$ - допустимое напряжение кН/см²

8.3. Необходимый момент инерции поперечного сечения балки

$$J_{тр} = W_{тр} \frac{h}{2} = 2405 \cdot \frac{70}{2} = 84175 \text{ см}^4$$

где $h = 80$ см - принятая высота балки

8.4. Необходимый момент инерции вертикальных листов

$$J_f = J_{тр} - J_b = 84175 - 26202 = 57973 \text{ см}^4$$

8.5. Необходимая площадь поперечного сечения одного пояса

$$A_f = \frac{2J_f}{h_w^2} = \frac{2 * 57973}{68^2} = 25,07 \text{ см}^2$$

Окончательно принимается поперечное сечение горизонтального листа с учетом соотношений:

$$t_f = (0,01 \dots 0 \dots 0,025)68 = (0,01 \dots 0,025)80 = 0,68 \dots 1,7 \text{ см}$$

$$b_f = (10 \dots 20 \dots 20) t_f = (10 \dots 20)1,7 = 17 \dots 34 \text{ см}$$

Принимаем окончательно размеры поперечного сечения горизонтального листа

$$t_f \times b_f = 10 \times 260 \text{ мм}$$

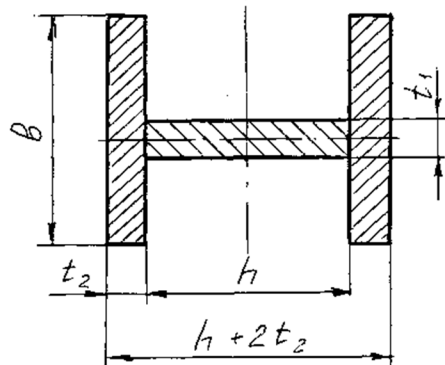


Рисунок 1 – Размеры поперечного сечения балки

9. Определение нормального напряжения в выбранном поперечном сечении балки

$$\sigma = \frac{M}{J} Y_{\max} = \frac{380 * 10^2}{88100} * 35 = 15,09 \text{ кН/см}^2 < [\sigma]_p = 15,8 \text{ кН/см}^2$$

где $J = \frac{h_w^3 * t_w}{12} + 2 \left(\frac{b_f * t_f^3}{12} + \left(\frac{h_w + t_f}{2} \right)^2 \right) = \frac{68^3 * 1}{12} + 2 \left(\frac{26 * 1}{12} + \left(\frac{68 + 1}{2} \right)^2 * 26 \right) = 88100 \text{ см}^4$ - момент инерции сечения,

$$Y_{\max} = \frac{h_w}{2} + t_f = \frac{68}{2} + 1 = 35 \text{ см} - \text{расстояние от крайней точки}$$

поперечного сечения до вертикальной оси координат

$M = 380 \text{ кНм}$ - изгибающий момент посередине пролета

$[\sigma]_p = 15,8 \text{ кН/см}^2$ - допустимое напряжение

10. Определение необходимости в вертикальных ребрах жесткости для обеспечения местной устойчивости балки

10.1. Прогиб балки в середине пролета от действия нагрузок q и P :

$$f_1 = \frac{5q * l^4}{384E * J} + \frac{P * d * l^2}{8E * J} \left[1 - \frac{4}{3} \left(\frac{d}{l} \right)^2 \right]$$

$$\frac{5 * 10 * 10^{-2} * 800^4}{384 * 2,1 * 10^4 * 88100} + \frac{100 * 300 * 800^2}{8 * 2,1 * 10^4 * 88100} \left[1 - \frac{4}{3} \left(\frac{300}{800} \right)^2 \right] = 1,58 \text{ см}$$

где $E = 2,1 * 10^5 \text{ МПа}$ - модуль продольной упругости для стали,

$l = 8 \text{ м} = 800 \text{ см}$ - длина балки,

$J = 88100 \text{ см}^4$ - момент инерции сечения,

Определим отношение

$$\frac{f_1}{l} = \frac{1,58}{800} = \frac{1}{506}$$

и определим соответствие балки нормам жесткости (таблица 1)

Таблица 1 - Предельные отношения f_{max}/L

Назначение балок	Предельные отношения f_{max}/L
Подкрановые балки:	
- при ручных кранах	1/500
- при электокранах грузоподъемностью до 50 т	1/600
- при электокранах грузоподъемностью > 50 т	1/750
Монорельсовые пути	1/400
Балки рабочих площадок производственных зданий:	
- главные при отсутствии рельсовых путей	1/400
- при наличии узкоколейных путей	1/400
- при наличии ширококолейных путей	1/600
- прочие	1/250
Балки междуэтажных перекрытий:	
- главные	1/400
- прочие	1/250
Балки покрытий и чердачных перекрытий:	
- главные	1/250
- прогоны	1/200

Так как по умолчанию балка является частью перекрытия и значение

$$\frac{f_1}{l} = \frac{1}{506} \text{ не превышает максимально допустимого значения } 1/400 ,$$

то балка соответствует нормам жесткости

10.2. Необходимость постановки вертикальных ребер жесткости из

условия обеспечения местной устойчивости : $\frac{h_w}{t_w} \leq 120 \sqrt{\frac{210}{\sigma_T}}$

$$\frac{68}{1} \leq 120 \sqrt{\frac{210}{210}} = 120$$

где $\sigma_T = 210$ МПа – предел текучести стали

Местная устойчивость обеспечена без использования вертикальных ребер жесткости.

Следовательно, ребра следует установить на опорах и в местах приложения сосредоточенных сил. Размеры ребер жесткости определяются из соотношений:

$$b_p \geq \frac{h_w}{30} + 40 = \frac{680}{30} + 40 = 62,7 \text{ мм, принимаем } b_p = 65 \text{ мм}$$

$$t_p = \frac{1}{15} b_p = \frac{1}{15} \times 65 = 4,3 \text{ мм, принимаем } t_p = 4 \text{ мм}$$

11. Расчет сварных соединений балки

11.1. Определение минимального катета углового шва:

$$k_p = \frac{t_p}{2} = \frac{4}{2} = 2 \text{ мм}$$

где $t_p = 4$ мм – толщина ребра

11.2. Определение минимального катета для поясных швов балки:

$$k_{II} = \frac{t_w}{2} = \frac{10}{2} = 5 \text{ мм}$$

11.3. Проверка поясных швов на срез от максимальной перерезывающей силы ΣQ по условию:

$$\tau_Q = \frac{\Sigma Q * 2b_f \left(\frac{h_w + t_f}{2} \right)}{J * 2\beta_f * k_n} < R_{cp} \frac{m}{n}$$

$$\tau_Q = \frac{\Sigma Q * 2b_f \left(\frac{h_w + t_f}{2} \right)}{J * 2\beta_f * k_n} = \frac{250 * 2 * 26 \left(\frac{68 + 1}{2} \right)}{88100 * 2 * 0,8 * 0,5} = 9,67 \text{ кН/см}^2 = 96,7 \text{ МПа}$$

$$R_{cp} \frac{m}{n} = 143 \cdot \frac{0,9}{1,2} = 104,25 \text{ МПа}$$

где $\beta_f = 0,8$ – коэффициент, зависящий от способа сварки (по таблице 1)

$m = 0,9$ - коэффициент условий работы

$n = 1,2$ - коэффициент перегрузки

$R_{cp} = 0,65[\sigma]_p = 0,65 \cdot 220 = 143 \text{ МПа}$ – расчетное сопротивление проката

$\Sigma Q = 250 \text{ кН}$ - суммарная поперечная сила

Условие $\tau_Q < R_{cp} \frac{m}{n}$ выполняется

Таблица 2 - Значения коэффициентов β_f и β_z

Сварка	[σ] _r , МПа	Положение шва	Коеф	Значения β_f и β_z при катетах швов, мм			
				3-8	9-12	14-16	Более 18
Автоматическая при d = 3...5	До 580	В «лодочку»	β_f	1,1			0,7
			β_z	1,15			1,0
		Нижнее	β_f	1,1	0,9	0,7	
			β_z	1,15	1,05	1,0	
Автоматическая и полуавтоматическая d = 1,4...2	До 580	В «лодочку»	β_f	0,9	0,8	0,7	
			β_z	1,05		1,0	
		Нижнее	β_f	0,9	0,8	0,7	
			β_z	1,05	1,0		
Ручная и полуавтоматическая сплошной или порошковой паволокой независимо от диаметра:	-	Любое	β_f	0,7			
			β_z	1,0			

12. Определение массы балки

$$m = m_1 + 2 m_2$$

$$12.1. \text{ Масса стержня } m_1 = b_f \cdot h_f \cdot l \cdot \rho = 26 \cdot 1 \cdot 800 \cdot 7,85 = 163280 \text{ г} = 163,3 \text{ кг}$$

$$12.2. \text{ Масса пояса } m_2 = t_w \cdot h_w \cdot l \cdot \rho = 1 \cdot 68 \cdot 800 \cdot 7,85 = 427041 \text{ г} = 427,04 \text{ кг}$$

где $\rho = 7,8 \text{ г/см}^3$ – удельная масса стали

$$m = m_1 + 2 m_2 = 163,3 + 2 \cdot 427,04 = 1017,4 \text{ кг}$$

Контрольные вопросы:

1. Что называется балкой?
2. Составьте систему уравнений статики, из которых были определены опорные реакции балки
3. В каком сечении балки возникает максимальный изгибающий момент?
4. С какой целью балка на одной опоре закрепляется неподвижно, а на другой — имеет продольную подвижность?
5. На какие усилия производят расчет прочности балки?
6. Какие усилия следует найти, чтобы иметь возможность начать подбор поперечного сечения балки?
7. Как учитываются при определении допускаемого напряжения коэффициенты условий работы и перегрузки?
8. Каково рациональное оформление швов, приваривающих ребра жесткости?
9. По какому условию проводится проверка поясных швов?
10. Каким образом была определена суммарная перерезывающая сила ΣQ ?
11. Что такое жесткость балки и чем она измеряется?
12. От чего зависит необходимость в вертикальных ребрах жесткости?
13. Из каких соотношений определяют размеры ребер жесткости?