

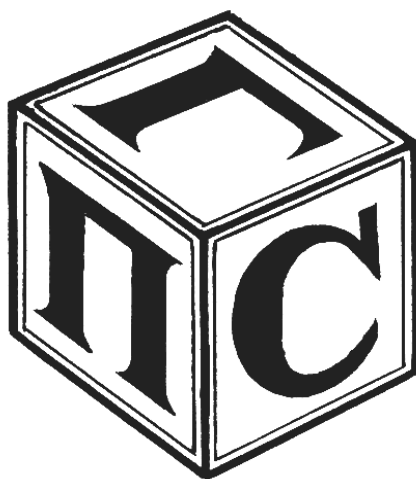
МЕЖГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Промышленное и гражданское строительство»

МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ КОНСТРУКЦИИ

*Методические рекомендации к практическим занятиям
для студентов специальности
6-05-0732-02 «Экспертиза и управление недвижимостью»
очной формы обучения*

Часть 1



Могилев 2025

УДК 674.012.45
ББК 38.5
М54

Рекомендовано к изданию
учебно-методическим отделом
Белорусско-Российского университета

Одобрено кафедрой «Промышленное и гражданское строительство»
«27» февраля 2025 г., протокол № 9

Составители: ст. преподаватель И. И. Мельянцова;
канд. техн. наук, доц. В. С. Михальков

Рецензент ст. преподаватель Н. В. Курочкин

Приведены рекомендации по выбору марок сталей для конструкций, расчету сварных и болтовых соединений, даны примеры расчета стыка балки на высокопрочных болтах, подбора и проверки сечения прокатной балки для студентов специальности 6-05-0732-02 «Экспертиза и управление недвижимостью» очной формы обучения.

Учебное издание

МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ КОНСТРУКЦИИ

Часть 1

Ответственный за выпуск	С. В. Данилов
Корректор	А. А. Подошевка
Компьютерная верстка	Н. П. Полевнича

Подписано в печать	. Формат 60×84/16.	Бумага офсетная.	Гарнитура Таймс.
Печать трафаретная. Усл. печ. л.	. Уч.-изд. л.	. Тираж 56 экз.	Заказ №

Издатель и полиграфическое исполнение:
Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования
«Белорусско-Российский университет».
Свидетельство о государственной регистрации издателя,
изготовителя, распространителя печатных изданий
№ 1/156 от 07.03.2019.
Пр-т Мира, 43, 212022, г. Могилев.

© Белорусско-Российский
университет, 2025

Содержание

Введение.....	4
1 Выбор марок сталей для конструкций.....	5
2 Конструирование и расчет сварных соединений.....	7
3 Конструирование и расчет болтовых соединений.....	13
4 Конструирование и расчет стыка балки на высокопрочных болтах.....	19
5 Подбор и проверка сечения прокатной балки.....	23
Список литературы.....	28

Введение

Методические рекомендации разработаны в соответствии с требованиями действующих ТНПА по проектированию стальных конструкций СП 5.04.01–2021 *Стальные конструкции*.

Методические рекомендации предназначены для студентов специальности 6-05-0732-02 «Экспертиза и управление недвижимостью» очной формы обучения при проведении практических занятий по учебной дисциплине и для самостоятельной работы студентов.

Материал методических рекомендаций рассчитан на получение практических навыков начального этапа освоения основ проектирования и расчета металлических конструкций и их соединений.

При использовании методических рекомендаций в процессе выполнения практических работ студентам целесообразно проверить действие технических нормативных правовых актов (ТНПА), обращая внимание на изменения и поправки к ним (при их наличии). Перечень действующих ТНПА доступен на <https://normy.by> и <https://tnpa.by>.

1 Выбор марок сталей для конструкций

В соответствии с [1] в зависимости от назначения, условий работы и наличия соединений конструкции подразделяют на четыре группы:

– группа 1: сварные конструкции или их элементы, работающие в особо тяжелых условиях, в том числе максимально стесняющих развитие пластических деформаций, или подвергающиеся непосредственному воздействию динамических, вибрационных или подвижных нагрузок (балки крановых путей; балки рабочих площадок; балки путей подвешного транспорта; элементы конструкций бункерных и разгрузочных эстакад, непосредственно воспринимающих нагрузки от подвижных составов; главные балки и ригели рам при динамической нагрузке; пролетные строения транспортерных галерей; фасонки ферм; стенки, окрайки днищ, кольца жесткости, плавающие крыши, покрытия резервуаров и газгольдеров; бункерные балки; оболочки параболических бункеров; стальные оболочки свободно стоящих дымовых труб; сварные специальные опоры больших переходов ВЛ высотой более 60 м; элементы оттяжек мачт и оттяжных узлов);

– группа 2: сварные конструкции или их элементы, работающие при статической нагрузке при наличии растягивающих напряжений (фермы; ригели рам; балки перекрытий и покрытий; косоуры лестниц; оболочки силосов; опоры ВЛ, за исключением сварных опор больших переходов; опоры ошиновки ОРУ подстанций; опоры транспортерных галерей; прожекторные мачты; элементы комбинированных опор антенных сооружений и другие растянутые, растянуто-изгибаемые и изгибаемые элементы), а также конструкции и их элементы группы 1 при отсутствии сварных соединений и балки подвесных путей при наличии сварных монтажных соединений;

– группа 3: сварные конструкции или их элементы, работающие при статической нагрузке, преимущественно на сжатие (колонны; стойки; опорные плиты; элементы настила перекрытий; конструкции, поддерживающие технологическое оборудование; вертикальные связи по колоннам с напряжениями в расчетных сечениях связей свыше $0,4 f_{yd}$; анкерные, несущие и фиксирующие конструкции (опоры, ригели жестких поперечин, фиксаторы) контактной сети транспорта; опоры под оборудование ОРУ, кроме опор под выключатели; элементы стволов и башен антенных сооружений; колонны бетоновозных эстакад; прогоны покрытий и другие сжатые и сжато-изгибаемые элементы), а также конструкции и их элементы группы 2 при отсутствии сварных соединений;

– группа 4: вспомогательные конструкции зданий и сооружений (связи, кроме указанных в группе 3; элементы фахверка; лестницы; трапы; площадки; ограждения; металлоконструкции кабельных каналов; вспомогательные элементы сооружений и т. п.), а также конструкции и их элементы группы 3 при отсутствии сварных соединений.

При назначении стали для конструкций зданий повышенного уровня ответственности номер группы конструкций уменьшают на единицу (для групп 2–4). При толщине проката $t > 40$ мм номер группы конструкций уменьшают на единицу (для групп 2–4); при толщине проката $t \leq 6$ мм – увеличивают на единицу

(для групп 1–3).

Рекомендуемые марки стали для групп 1–4 конструкций приведены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Рекомендуемые марки сталей для групп конструкций зданий и сооружений

Марка стали		Условие применения при расчетной температуре $t \geq -45\text{ °C}$ для группы конструкций			
		1	2	3	4
C235	Ст3кп2 Ст3пс2	–	–	+ ^{1),2)}	+
C245	Ст3пс6	–	+ ³⁾	×	×
C255	Ст3сп5 Ст3Гпс6	+	×	×	–
C285	Ст3сп5	+	×	×	–
C345	09Г2С	$\frac{3}{12}$	$\frac{1}{4}$ ⁴⁾	$\frac{1}{4}$ ⁴⁾	×
C375	10Г2С	+	×	–	–
¹⁾ Кроме опор ВЛ, ОРУ и контактных сетей. ²⁾ Кроме районов с расчетной температурой $-30\text{ °C} > t \geq -40\text{ °C}$ для неотапливаемых зданий и конструкций. ³⁾ Для районов с расчетной температурой $-30\text{ °C} > t \geq -40\text{ °C}$ для неотапливаемых зданий и конструкций применяют прокат толщиной не более 10 мм. ⁴⁾ Кроме специальных сооружений: магистральных и технологических трубопроводов, резервуаров специального назначения, кожухов доменных печей и воздухонагревателей и т. п. Стали для этих конструкций устанавливают соответствующими ТНПА					
<i>Примечание</i> – Обозначения, принятые в таблице: (+) – данную сталь применяют; (–) – данную сталь применять не рекомендуется; (×) – разрешается применять при соответствующем технико-экономическом обосновании. Для стали марок С345 и 09Г2С приведены категории требований по ударной вязкости: в числителе – по ГОСТ 27772–2015, в знаменателе – по ГОСТ 19281–2014. Прокат из стали с характеристическим значением предела текучести $f_{yk} \geq 390\text{ Н/мм}^2$ назначают исходя из [1, таблицы А.1 и А.2]					

При назначении стали для конструкций зданий и сооружений учитывают группы конструкций, требования к химическому составу и показателю ударной вязкости, приведенные в [1, приложение А].

Выбор стали для стальных конструкций производят на основе вариантного проектирования и технико-экономического анализа с учетом требований норм. В целях упрощения заказа металла при выборе стали следует стремиться к большей унификации конструкций, сокращению количества сталей и профилей. Выбор стали зависит от следующих факторов, влияющих на работу материала:

– температуры среды, в которой монтируется и эксплуатируется конструкция. Этот фактор учитывает повышенную опасность хрупкого разрушения при пониженных температурах;

– характера нагружения, определяющего особенность работы материала и конструкций при динамической, вибрационной и переменной нагрузках;

– вида напряженного состояния (одноосное сжатие или растяжение, плоское или объемное напряженное состояние) и уровня возникающих напряжений (сильно или слабо нагруженные элементы);

– способа соединения элементов, определяющего уровень собственных напряжений, степень концентрации напряжений и свойства материала в зоне соединения;

– толщины проката, применяемого в элементах. Этот фактор учитывает изменение свойств стали с увеличением толщины.

Окончательный выбор стали в пределах каждой группы должен выполняться на основании сравнения технико-экономических показателей (расхода стали и стоимости конструкций), а также с учетом заказа металла и технологических возможностей завода-изготовителя. В составных конструкциях (например, составных балках, фермах и т. п.) экономически целесообразно применение двух сталей – более высокой прочности для сильно нагруженных элементов (поояса ферм, балок) и меньшей прочности для слабо нагруженных элементов (решетка ферм, стенки балок).

Приведенный подход к выбору сталей используют для конструкций массового применения. Для особо ответственных уникальных сооружений с высокой степенью обеспеченности надежности (атомные реакторы АЭС, сосуды давления, газгольдеры и резервуары большого объема) требования к качеству, а следовательно, и к выбору стали могут быть значительно более жесткими.

Задание для выполнения практической работы

На основании вышеизложенного материала обосновать выбор стали для изготовления стропильной фермы, выполненной из прокатной трубы, эксплуатирующейся при расчетной температуре минус 25 °С.

2 Конструирование и расчет сварных соединений

Расчет стыковых сварных швов

Напряжения в прямом стыковом сварном шве (рисунок 2.1), работающем на растяжение или сжатие, определяются по формуле

$$\frac{N_{Ed}}{t \cdot l_w} \leq f_{wy} \cdot \gamma_c, \quad (2.1)$$

где N_{Ed} – расчетное значение осевого усилия (продольная сила);

t – наименьшая толщина соединяемых элементов;

l_w – расчетная длина шва, равная полной его длине, уменьшенной на $2t$ или его полной длине в случае вывода концов шва за пределы стыка;

f_{wy} – расчетное значение прочности стыковых сварных соединений на растяжение, сжатие, изгиб по пределу текучести; $f_{wy} = f_{yd}$ – при физических методах

контроля шва и $f_{wy} = 0,85f_{yd}$ – при обычных методах контроля;

γ_c – коэффициент условий работы.

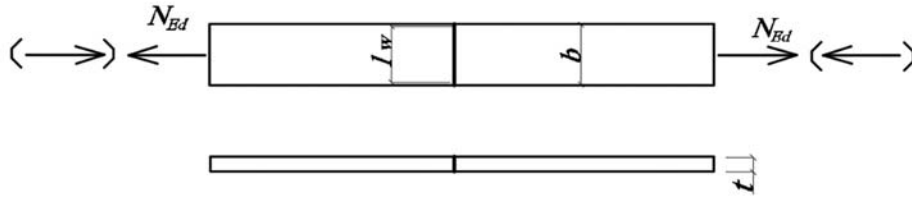


Рисунок 2.1 – Прямой стыковой сварной шов

Напряжения в косом стыковом сварном шве (рисунок 2.2), работающем на растяжение или сжатие, рассчитываются по формуле

$$\frac{N_{Ed} \cdot \sin \alpha}{t \cdot l_w} \leq f_{wy} \cdot \gamma_c \quad (2.2)$$

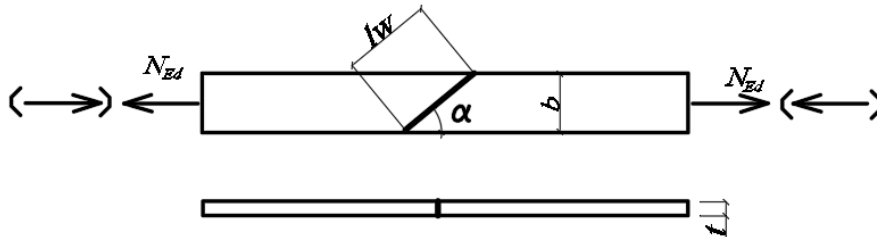


Рисунок 2.2 – Косой стыковой сварной шов

В косом шве возникают напряжения среза, которые проверяются по формуле

$$\tau = \frac{N_{Ed} \cdot \cos \alpha}{t \cdot l_w} \leq f_{ws} \cdot \gamma_c, \quad (2.3)$$

где f_{ws} – расчетное значение прочности стыковых сварных соединений на сдвиг.

При действии на соединяемые сварным швом элементы изгибающего момента M_{Ed} (рисунок 2.3) напряжения в шве определяются по формуле

$$\frac{M_{Ed}}{W_y} = \frac{6 \cdot M_{Ed}}{t \cdot l_w^2} \leq f_{wy} \cdot \gamma_c, \quad (2.4)$$

где W_y – момент сопротивления.

При работе соединения встык на срез касательные напряжения в сварном шве (рисунок 2.4) рассчитываются по формуле

$$\tau = \frac{V_{Ed} \cdot S}{I \cdot t} \leq f_{ws} \cdot \gamma_c, \quad (2.5)$$

где V_{Ed} – расчетное усилие сдвига (поперечная сила, сила сдвига);
 S – статический момент сопротивления шва;
 I – момент инерции.

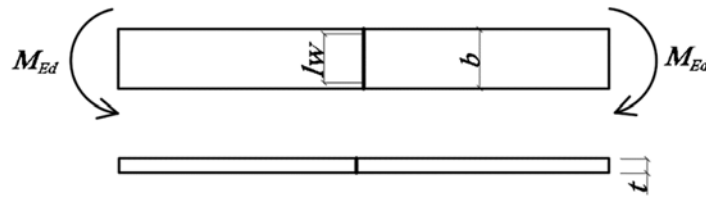


Рисунок 2.3 – К расчету стыкового сварного шва при действии изгибающего момента

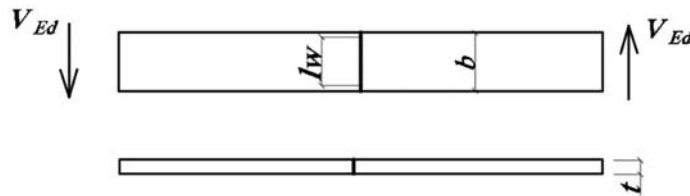
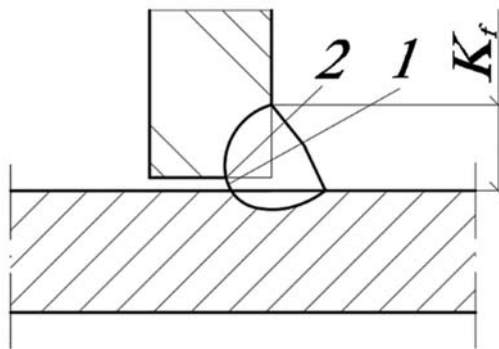


Рисунок 2.4 – К расчету стыкового сварного шва на срез

Расчет угловых сварных швов

При действии продольной и поперечной силы сварные соединения с угловыми швами рассчитывают на срез (условный) по двум сечениям (рисунок 2.5).



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

Рисунок 2.5 – Схема расчетных сечений сварного соединения с угловым швом

Расчет сварных соединений с угловыми швами при действии расчетного осевого усилия N_{Ed} , проходящего через центр тяжести соединения, выполняют на срез (условный) по одному из двух сечений по условиям:

– при $\frac{\beta_f f_{wf}}{\beta_z f_{wz}} \leq 1$ – по металлу шва (сечение 1)

$$\frac{N_{Ed}}{\beta_f \cdot k_f \cdot l_w \cdot f_{wf} \cdot \gamma_c} \leq 1; \quad (2.6)$$

– при $\frac{\beta_f f_{wf}}{\beta_z f_{wz}} > 1$ – по металлу границы сплавления (сечение 2)

$$\frac{N_{Ed}}{\beta_f \cdot k_f \cdot l_w \cdot f_{wz} \cdot \gamma_c} \leq 1, \quad (2.7)$$

где l_w – расчетная длина швов в сварном соединении, равная суммарной длине всех его участков за вычетом 10 мм на каждом непрерывном участке шва;

k_f – высота катета шва;

β_f, β_z – коэффициенты для расчета углового шва по металлу шва и по металлу границы сплавления соответственно;

f_{wf}, f_{wz} – расчетное значение прочности угловых швов на срез (условный) по металлу шва и по металлу границы сплавления.

Для угловых швов, размеры которых установлены в соответствии с расчетом, для элементов из стали с пределом текучести до 285 МПа применяют электродные материалы, удовлетворяющие условиям:

– $f_{wf} > f_{wz}$ – при механизированной сварке;

– $1,1 f_{wz} \leq f_{wf} \leq \frac{f_{wz} \beta_z}{\beta_f}$ – при ручной сварке.

Для элементов из стали с пределом текучести более 285 МПа применяют электродные материалы, удовлетворяющие условию $f_{wz} \leq f_{wf} \leq \frac{f_{wz} \beta_z}{\beta_f}$.

Примеры

Пример 1 – Рассчитать соединение встык ручной сваркой при обычных методах контроля шва двух полос из стали С255 толщиной $t = 12$ мм, шириной $b = 200$ мм на действие растягивающих сил $N_{Ed} = 30$ т.

Решение

Согласно [1, таблица А.3] для стали С255 $f_{yd} = 240$ МПа. При обычных методах контроля качества сварного шва $f_{wy} = 0,85 \cdot f_{yd} = 0,85 \cdot 240 = 204$ МПа.

Напряжение в сварном стыковом шве определяем следующим образом:

$$\begin{aligned} \frac{N_{Ed}}{t \cdot l_w} &= \frac{300000}{0,012 \cdot (0,2 - 2 \cdot 0,012)} = 142,05 \cdot 10^6 \text{ Па} = \\ &= 142,05 \text{ МПа} < f_{wy} \cdot \gamma_c = 204 \cdot 1,0 = 204 \text{ МПа}, \end{aligned}$$

где l_w – расчетная длина шва, уменьшенная на $2t$.

Вывод: прямой стык обеспечивает прочность соединения.

Пример 2 – Какое растягивающее усилие могут выдержать листы из стали С245 сечением 250×12 мм, соединенные косым швом встык под углом $\alpha = 45^\circ$ к оси при ручной сварке с обычными методами контроля качества шва?

Решение

Для стали С245 согласно [1, таблица А.3] $f_{yd} = 230$ МПа.

При расчете стыковых швов $f_{wy} = 0,85 \cdot f_{yd} = 0,85 \cdot 230 = 195,5$ МПа.

Расчетное значение прочности стыковых сварных соединений на сдвиг определяем по формуле

$$f_{ws} = 0,58 \cdot \frac{f_{yk}}{\gamma_m}, \quad (2.8)$$

где f_{yk} – характеристическое (нормативное) значение предела текучести стали; для стали С245 $f_{yk} = 235$ МПа [1, таблица А.3];

Частный коэффициент по материалу $\gamma_m = 1,025$.

$$\text{Тогда } f_{ws} = 0,58 \cdot \frac{f_{yk}}{\gamma_m} = 0,58 \cdot \frac{235}{1,025} = 133 \text{ МПа.}$$

$$\text{Длина сварного шва } l_w = \frac{b}{\sin \alpha} - 2t = \frac{0,25}{0,707} - 2 \cdot 0,012 = 0,33 \text{ м.}$$

Максимальное растягивающее усилие для листов

$$N_l = f_{yd} \cdot b \cdot t = 230 \cdot 10^6 \cdot 0,25 \cdot 0,012 = 690000 \text{ Н} = 690 \text{ кН.}$$

Максимальное растягивающее усилие для шва

$$N_{шв} = f_{wy} \cdot \frac{l_w \cdot t}{\sin 45^\circ} = 195,5 \cdot 10^6 \cdot \frac{0,33 \cdot 0,012}{0,707} = 1095021 \text{ Н} = 1095,02 \text{ кН.}$$

Максимальное усилие при расчете шва на сдвиг

$$N_{сдвиг} = f_{ws} \cdot \frac{l_w \cdot t}{\cos 45^\circ} = 133 \cdot 10^6 \cdot \frac{0,33 \cdot 0,012}{0,707} = 744950 \text{ Н} = 744,95 \text{ кН.}$$

Вывод: расчетным является максимальное усилие для листов, т. к. расчетное осевое усилие, которое может выдержать сварное соединение, определяется по наименьшей несущей способности, в данном случае – по несущей способности листов.

Пример 3 – Определить снижение несущей способности элемента прокатного листа из стали С245 толщиной $t = 10$ мм при сварке его встык с полным проваром стенок ручной сваркой с обычными методами контроля качества шва

по сравнению с целым прокатным листом.

Решение

Расчетное значение прочности по пределу текучести для прокатного листа из стали С245 для толщин от 4 до 30 мм $f_{yd} = 230$ МПа [1, таблица А.3].

Расчетное значение прочности стыковых сварных соединений на растяжение, сжатие, изгиб по пределу текучести

$$f_{wy} = 0,85 \cdot f_{yd} = 0,85 \cdot 230 = 195,5 \text{ МПа.}$$

Снижение несущей способности

$$\frac{f_{yd} - f_{wy}}{f_{yd}} \cdot 100 \% = \frac{230 - 195,5}{230} \cdot 100 \% = 15 \%.$$

Пример 4 – Рассчитать сварное соединение внахлестку с двумя лобовыми швами (рисунок 2.6). Стальные полосы сечением 250×10 мм из стали С255 ($f_{yd} = 240$ МПа, $f_{uk} = 380$ МПа). Соединение воспринимает осевое усилие $N_{Ed} = 550$ кН. Сварка ручная. Электроды принять по [1, таблица Г.1].

Решение

Согласно [1, таблица Г.1] для стали с характеристическим значением предела текучести f_{yk} до 290 МПа принимаем электроды марки Э42. Тогда прочностные характеристики шва: $f_{wf} = 180$ МПа [1, таблица Г.2], $f_{wz} = 0,45 \cdot f_{uk} = 0,45 \cdot 380 = 171$ МПа [1, таблица 4].

Выбираем параметры шва по [1, таблица 40]. Принимаем положение шва при сварке нижнее; $\beta_f = 0,7$, $\beta_z = 1$.

Определяем расчетное сечение сварного шва:

$$\beta_f \cdot f_{wf} = 0,7 \cdot 180 = 126 \text{ МПа.}$$

Следовательно, расчет ведем по металлу шва. $\beta_z \cdot f_{wz} = 1 \cdot 171 = 171 \text{ МПа} > \beta_f \cdot f_{wf}$.

Расчетная суммарная длина швов в данном случае

$$\sum l_f = 2(25 - 1) = 48 \text{ см.}$$

Требуемый катет шва

$$k_f = \frac{N_{Ed}}{\beta_f \cdot \sum l_f \cdot f_{wf}} = \frac{550 \cdot 10^3}{0,7 \cdot 0,048 \cdot 180 \cdot 10^6} = 0,091 \text{ м} = 0,91 \text{ см.}$$

Принимаем катет шва $k_f = 10$ мм, длину нахлестки $5 \cdot t = 5 \cdot 10 = 50$ мм.

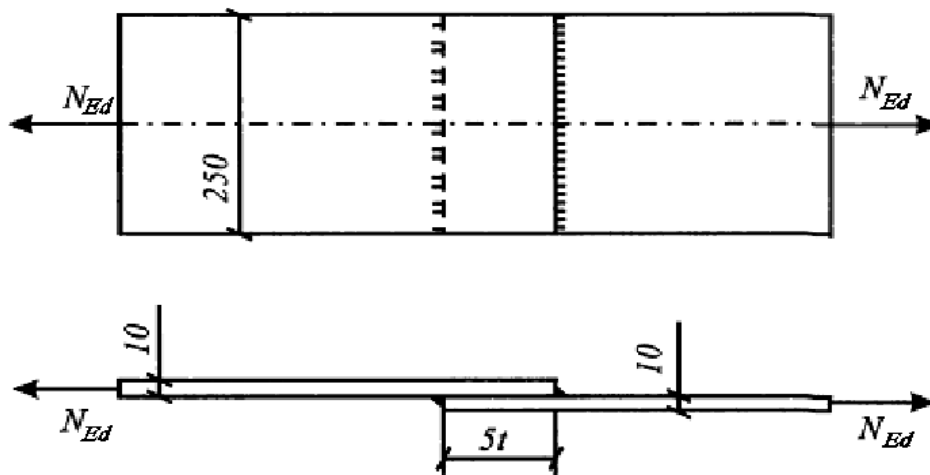


Рисунок 2.6 – К примеру 4

Задачи для самостоятельного решения

Задача 1. Рассчитать сварное соединение встык двух листов из стали С345 шириной $b = 200$ мм, толщиной $t_1 = 12$ мм и $t_2 = 8$ мм. Расчетное усилие, действующее на соединение, $N_{Ed} = 700$ кН. Сварка ручная, с визуальным контролем качества сварного шва. Тип электрода выбрать самостоятельно.

Задача 2. Рассчитать сварное соединение двух листов шириной $b = 250$ мм и одинаковой толщиной $t = 8$ мм по несущей способности листов. Листы изготовлены из стали С255.

Задача 3. Рассчитать сварное соединение внахлестку с двумя лобовыми швами стальных полос сечением 300×12 мм из стали марки С245. Соединение воспринимает расчетное усилие $N = 430$ кН. Сварка ручная. Необходимо выбрать тип электрода, установить катет шва и определить длину нахлестки.

3 Конструирование и расчет болтовых соединений

Расчетное усилие, которое может быть воспринято одним болтом, в зависимости от вида напряженного состояния определяют по следующим формулам:

– при работе на срез

$$N_{bs} = f_{bs} \cdot A_b \cdot n_s \cdot \gamma_b \cdot \gamma_c; \quad (3.1)$$

– при работе на смятие

$$N_{bp} = f_{bp} \cdot d_b \cdot \Sigma t \cdot \gamma_b \cdot \gamma_c; \quad (3.2)$$

– при работе на растяжение

$$N_{bt} = f_{bt} \cdot A_{b,n} \cdot \gamma_c, \quad (3.3)$$

где f_{bs}, f_{bp}, f_{bt} – расчетные значения прочности одноболтовых соединений срезом, смятию и растяжению соответственно;

d_b – наружный диаметр стержня болта;

$A_b, A_{b,n}$ – соответственно площадь сечения стержня болта брутто и резьбовой части нетто; принимают по [1, таблица Г.9];

Σt – наименьшая суммарная толщина соединяемых элементов, сминаемых в одном направлении;

n_s – число расчетных срезов одного болта;

γ_b – коэффициент условий работы соединения; определяют по [1, таблица 42] и принимают не более 1,0;

γ_c – коэффициент условий работы конструкций и элементов; определяют по [1, таблица Б.1].

При действии на болтовое соединение осевой силы, проходящей через центр тяжести соединения, распределение расчетного осевого усилия N_{Ed} между болтами принимают равномерным. В этом случае количество болтов в соединении определяют по формуле

$$n \geq \frac{N_{Ed}}{N_{b,min}}, \quad (3.4)$$

где $N_{b,min}$ – наименьшее из значений N_{bs}, N_{bp}, N_{bt} , определенных по формулам (3.1)–(3.3).

При действии на болтовое соединение момента, вызывающего сдвиг соединяемых элементов, распределение усилий на болты принимают пропорционально расстоянию от центра тяжести соединения до рассматриваемого болта.

Расчетное усилие в наиболее нагруженном болте $N_{b,max,Ed}$ не должно превышать меньшего из значений N_{bs} или N_{bp} , вычисленных по (3.1) и (3.2).

При одновременном действии на болтовое соединение осевого усилия и момента, действующих в одной плоскости и вызывающих сдвиг соединяемых элементов, болты проверяют на равнодействующее усилие. В наиболее нагруженном болте оно не должно превышать меньшего из значений N_{bs} или N_{bp} , вычисленных по (3.1) и (3.2).

Фрикционные соединения (на болтах с контролируемым натяжением)

Фрикционные соединения, в которых усилия передаются через трение, возникающее по соприкасающимся поверхностям соединяемых элементов вследствие натяжения высокопрочных болтов, применяют:

– в конструкциях из стали с характеристическим значением предела текучести более 375 Н/мм² и непосредственно воспринимающих подвижные, вибрационные и другие динамические нагрузки;

– в многоболтовых соединениях, к которым предъявляются повышенные требования в отношении ограничения деформативности.

Расчетное усилие, которое может быть воспринято каждой плоскостью трения элементов, стянутых одним высокопрочным болтом, определяют по формуле

$$Q_{bh} = \frac{f_{bh} \cdot A_{b,n} \cdot \mu}{\gamma_h}, \quad (3.5)$$

где f_{bh} – расчетное значение прочности на растяжение высокопрочного болта;

μ – коэффициент трения, принимаемый 0,58 – при дробеметной или дробеструйной обработке двух поверхностей дробью без консервации; 0,42 – при газопламенной обработке двух поверхностей без консервации; 0,35 – при обработке двух плоскостей стальными щетками без консервации; 0,25 – без обработки поверхности;

γ_h – коэффициент, принимаемый по [1, таблица 43].

При действии на фрикционное соединение продольной силы, проходящей через центр тяжести соединения, распределение расчетного осевого усилия N_{Ed} , вызывающее сдвиг соединяемых элементов, между болтами принимают равномерным. В этом случае количество болтов в соединении определяют по формуле

$$n \geq \frac{N_{Ed}}{Q_{bh} \cdot k \cdot \gamma_b \cdot \gamma_c}, \quad (3.6)$$

где k – количество плоскостей трения соединяемых элементов;

γ_b – коэффициент условий работы фрикционного соединения, зависящий от количества n болтов, необходимых для восприятия расчетного усилия; принимают равным:

- 0,8 при $n < 5$;
- 0,9 при $5 \leq n < 10$;
- 1,0 при $n \geq 10$.

Расчетное значение прочности на растяжение высокопрочных болтов f_{bh} классов прочности не ниже 10.9 определяют по формуле

$$f_{bh} = 0,7 \cdot f_{buk}, \quad (3.7)$$

где f_{buk} – характеристическое значение предела прочности стали болтов; принимают по [1, таблица Г.8].

Расчет на прочность соединяемых элементов, ослабленных отверстиями во фрикционном соединении, выполняют с учетом того, что половина осевого усилия, приходящегося на каждый болт, передана силами трения. При этом проверку ослабленных сечений выполняют при подвижных, вибрационных и других динамических нагрузках – по площади сечения нетто A_{net} ; при статических нагрузках – по площади сечения брутто A (при $A_{net} \geq 0,85A$) или по условной площади $A_{ef} = 1,18A_{net}$ (при $A_{net} < 0,85A$).

Примеры

Пример 1 – Запроектировать стык листов сечением 500×12 мм из стали С245 с ($f_{yd} = 230$ МПа; $f_{uk} = 370$ МПа). На стык действует растягивающее усилие $N_{Ed} = 1000$ кН. Стык запроектировать симметричным с двумя накладками толщиной $t = 8$ мм каждая (рисунок 3.1). Коэффициент условий работы $\gamma_c = 1,0$; коэффициент условий работы соединения $\gamma_b = 1,0$. Стык запроектировать в двух вариантах: на болтах класса точности А и на высокопрочных болтах.

Решение

Вариант 1.

Стык осуществляем на болтах класса точности А диаметром $d_b = 20$ мм класса прочности 5.8, имеющих $f_{bs} = 210$ МПа [1, таблица Г.5]. Для стали с $f_{uk} = 370$ МПа по [1, таблица Г.6] $f_{bp} = 580$ МПа. Для болтов класса точности А диаметр отверстия $d = d_b$.

Определяем расчетное усилие, которое может быть воспринято одним болтом:

- на срез

$$N_{bs} = f_{bs} \cdot A_b \cdot n_s \cdot \gamma_b \cdot \gamma_c = 210 \cdot 10^6 \cdot 3,14 \cdot 10^{-4} \cdot 2 \cdot 1 \cdot 1 = 131880 \text{ Н} = 131,88 \text{ кН};$$

- на смятие листа

$$N_{bp} = f_{bp} \cdot d_b \cdot \Sigma t \cdot \gamma_b \cdot \gamma_c = 580 \cdot 10^6 \cdot 0,02 \cdot 0,012 \cdot 1 \cdot 1 = 139200 \text{ Н} = 139,2 \text{ кН},$$

где $\Sigma t = t_l = 12$ мм, т. к. $t_{накл} = 2 \cdot 8 = 16$ мм $> t_l = 12$ мм.

Количество болтов на полунакладке рассчитываем следующим образом:

$$n \geq \frac{N_{Ed}}{N_{b,min}} = \frac{1000}{131,88} = 7,58 \text{ шт.}$$

Принимаем два ряда по четыре болта в каждом (см. рисунок 3.1).

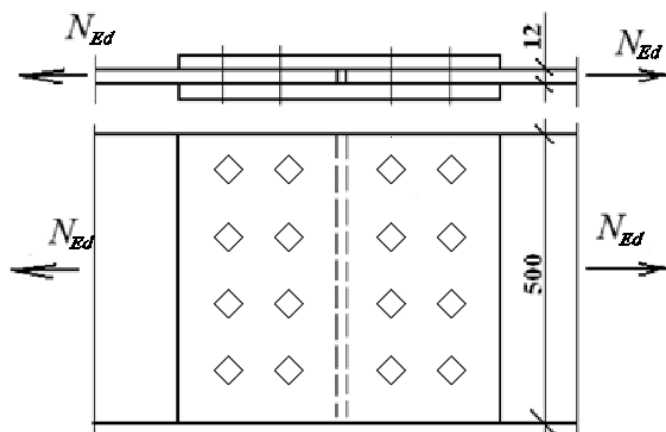


Рисунок 3.1 – К примеру 1

Проверим ослабленное сечение листа

$$\sigma = \frac{N_{Ed}}{A_{net}} = \frac{1000}{0,012 \cdot (0,5 - 4 \cdot 0,02)} = 198412698 \text{ Па} =$$

$$= 198,412 \text{ МПа} < f_{yd} = 230 \text{ МПа}.$$

Вариант 2.

Осуществляем тот же стык на высокопрочных болтах $d_b = 20$ мм из стали 40Х с $f_{bh} = 755$ МПа при газопламенной обработке двух поверхностей без консервации.

По [1, таблица 43] $\gamma_h = 1,12$; количество плоскостей трения соединяемых элементов $k = 2$; коэффициент условий работы фрикционного соединения, зависящий от количества n болтов, необходимых для восприятия расчетного усилия примем равным $\gamma_b = 0,9$.

Для высокопрочных болтов диаметр отверстия $d = d_b$.

Расчетное усилие, которое может быть воспринято каждой плоскостью трения элементов, стянутых одним высокопрочным болтом, определяют по формуле

$$Q_{bh} = \frac{f_{bh} \cdot A_{b,n} \cdot \mu}{\gamma_h} = \frac{755 \cdot 10^6 \cdot 2,45 \cdot 10^{-4} \cdot 0,42}{1,12} = 69365,63 \text{ Н}.$$

Вычисляем количество болтов на полунакладке:

$$n = \frac{N_{Ed}}{Q_{bh} \cdot k \cdot \gamma_b \cdot \gamma_c} = \frac{1000}{69,365 \cdot 2 \cdot 0,9 \cdot 1} = 8 \text{ шт.}$$

Принимаем два ряда по четыре болта в каждом.

Для проверки несущей способности листа определяем расчетную площадь его ослабленного сечения. Площадь сечения листа:

- брутто $A = 1,2 \cdot 50 = 60 \text{ см}^2$;
- нетто $A_{net} = 1,2 \cdot (50 - 4 \cdot 2,0) = 50,4 \text{ см}^2$.

$$\text{Отношение площадей } \frac{A_{net}}{A} = \frac{50,4}{60} = 0,84 < 0,85.$$

Тогда определяем условную площадь $A_{ef} = 1,18 \cdot A_{net} = 1,18 \cdot 50,4 = 59,47 \text{ см}^2$.

Проверим ослабленное сечение листа по условной площади:

$$\sigma = \frac{N_{Ed}}{A_{ef}} = \frac{1000 \cdot 10^3}{59,47 \cdot 10^{-4}} = 1681520009 \text{ Па} = 168,152 \text{ МПа} < f_{yd} = 230 \text{ МПа}.$$

Пример 2 – Рассчитать прикрепление верхнего пояса стропильной фермы к колонне на болтах (рисунок 3.2). Растягивающее расчетное усилие в поясе

$N_{Ed} = 150$ кН; материал конструкций и болтов – сталь С245. Коэффициент условий работы $\gamma_c = 1,0$.

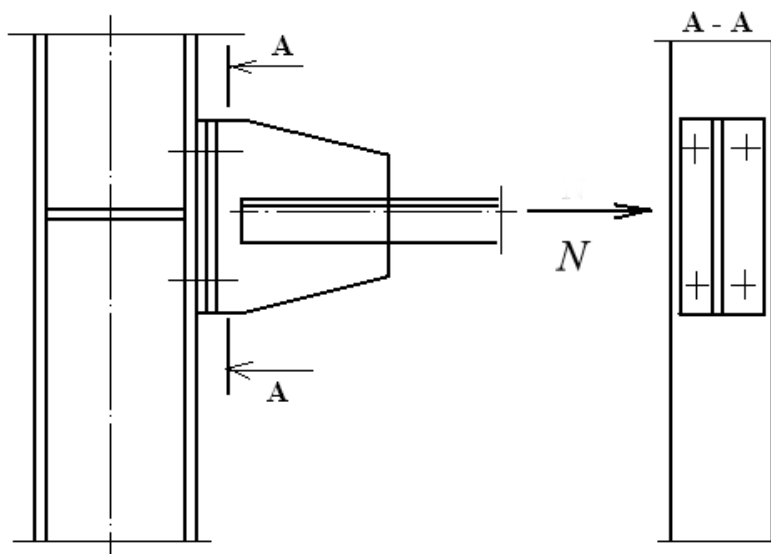


Рисунок 3.2 – Схематичное изображение соединения верхнего пояса стропильной фермы к колонне к примеру 2

Решение

Принимаем болты диаметром $d_b = 20$ мм, класса точности А, класса прочности 5.6, имеющих $f_{bt} = 225$ МПа [1, таблица Г.5], $A_{b,n} = 2,45$ см².

Число болтов, необходимое для прикрепления пояса,

$$n = \frac{N_{Ed}}{N_{b,min}},$$

где $N_{b,min} = N_{bt} = f_{bt} \cdot A_{b,n} \cdot \gamma_c = 225 \cdot 10^6 \cdot 2,45 \cdot 10^{-4} \cdot 1 = 55125$ Н.

Тогда

$$n = \frac{150000}{55125} = 2,72 \text{ шт.}$$

Принимаем четыре болта диаметром $d_b = 20$ мм (для симметричной конструкции).

Задачи для самостоятельного решения

Задача 1. Рассчитать соединение двух листов с помощью накладок сечением 600×16 мм из стали С255. На стык действует растягивающее усилие $N_{Ed} = 1000$ кН. Стык запроектировать симметричным с двумя накладками толщи-

ной $t = 10$ мм каждая. Коэффициент работы конструкции $\gamma_c = 1,0$. Стык запроектировать на болтах класса точности А, класса прочности 5.8.

Задача 2. Рассчитать соединение двух листов по условию предыдущей задачи. Стык запроектировать на высокопрочных болтах.

4 Конструирование и расчет стыка балки на высокопрочных болтах

Стыки балок могут быть заводскими и монтажными. Монтажные стыки выполняют для балок большой длины. На заводе-изготовителе производят отправочные марки, которые перевозят на строительную площадку, где и выполняют укрупнительную сборку конструкции.

Стыки балок могут быть сварными и на болтах. В последнее время стыки балок выполняют на высокопрочных болтах взамен сварного соединения. Основным преимуществом такого соединения является отсутствие начальных и остаточных напряжений; кроме того, для его устройства такого соединения не требуется высококвалифицированной рабочей силы. Однако болтовые соединения более металлоемкие и трудоемкие в изготовлении.

При выполнении стыка на высокопрочных болтах стыки стенки и поясов перекрывают накладками, которые крепятся высокопрочными болтами. Несущая способность болта зависит от способов натяжения болтов и обработки соединяемых поверхностей.

Пример расчета стыка балки на высокопрочных болтах

Рассчитать монтажный стык балки на накладках с использованием высокопрочных болтов. Сечение балки представлено на рисунке 4.1. Материал балки – листовая сталь С255 ($f_{yd} = 240$ МПа). Расчетный момент в балке $M_{Ed, \max} = 3427$ кН·м. Пролет балки $l = 12$ м. Стык проектируем на расстоянии $l_1 = 0,5l$.

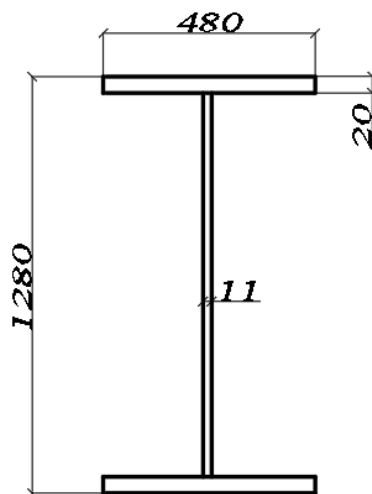


Рисунок 4.1 – Исходное сечение балки

Максимальный расчетный момент в балке $M_{Ed,max} = 342700$ кН·см. Распределим этот момент между стенкой и поясами балки. Момент инерции всего двутавра $I = 936822$ см⁴, момент инерции стенки $I_w = 174774$ см⁴, тогда доля момента, приходящаяся на стенку,

$$M_{Ed,w} = M_{Ed,max} \cdot \frac{I_w}{I}. \quad (4.1)$$

$$M_{Ed,w} = 342700 \cdot \frac{174774}{936822} = 63934,29 \text{ кН·см.}$$

Доля момента, приходящаяся на пояса,

$$M_{Ed,f} = 342700 - 63934,29 = 278765,71 \text{ кН·см.}$$

Стык стенки и пояса рассчитываются отдельно, каждый на свою долю момента.

Расчет стыка полки балки

Стык полок перекрываем накладками толщиной 11 мм. Ширину первой накладки принимаем равной ширине полки балки. Необходимые зазоры между накладками и их размеры представлены на рисунке 4.2.

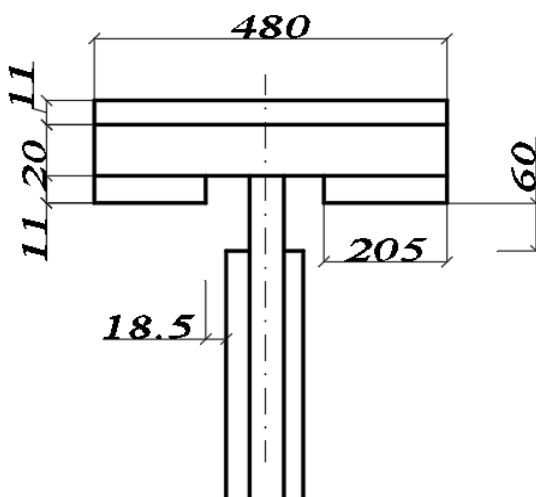


Рисунок 4.2 – К определению размеров накладок

Определим площадь поперечного сечения накладок в стыке, которая должна быть больше поперечного сечения пояса балки:

$$A_{накл} = 48 \cdot 1,1 + 2 \cdot 20,5 \cdot 1,1 = 97,9 \text{ см}^2 > A_f = 96 \text{ см}^2.$$

Раскладываем момент, приходящийся на пояса, на пару сил:

$$N_{Ed,f} = \frac{M_{Ed,f}}{h_0} = \frac{278765,71}{126} = 2212 \text{ кН},$$

где h_0 – расстояние между осями поясов.

Для определения необходимого количества болтов принимаем: способ обработки соединяемых поверхностей – газопламенный без консервации; по [1, таблица 43] $\gamma_h = 1,12$; $d_b = 24$ мм ($A_{b,n} = 3,53 \text{ см}^2$) из стали 40Х с $f_{bh} = 755 \text{ МПа}$.

Расчетное усилие, воспринимаемое одной поверхностью трения одного болта,

$$Q_{bh} = \frac{755 \cdot 10^6 \cdot 3,53 \cdot 10^{-4} \cdot 0,42}{1,12} = 99943 \text{ Н}.$$

Необходимое число болтов в стыке

$$n = \frac{N_{Ed,f}}{Q_{bh} \cdot k \cdot \gamma_b \cdot \gamma_c} = \frac{2212 \cdot 10^3}{99943 \cdot 2 \cdot 1 \cdot 1} = 11,06,$$

где k – количество поверхностей трения, в нашем примере $k = 2$;

γ_b – коэффициент условий работы болтового соединения $\gamma_b = 1$. При количестве болтов свыше 10 равен 1.

Принимаем четное количество болтов $n = 12$.

Болты размещаем с каждой стороны на расстоянии согласно [1, таблица 41].

Края накладок могут иметь скос, соответствующий размещению болтов. Мы применим прямоугольную накладку с тремя рядами болтов по четыре в каждом.

Расчет стыка стенки балки

Стыковые накладки на стенке принимаем равными толщине стенки балки – 11 мм, расстояние между накладками полок и стенки – 24 мм (рисунок 4.3). Расстояние от края накладки до центра ближайшего болта принимаем равным 60 мм. Расстояние между верхними и нижними болтами $a_1 = 1050$ мм.

Момент, приходящийся на стенку балки, $M_{Ed,w} = 63934,29 \text{ кН} \cdot \text{см}$. Этот момент уравнивается суммой внутренних пар усилий, действующих на болты, расположенные на стыковой накладке стенки, $N_i \cdot a_i$:

$$M_{Ed,w} = \sum N_i \cdot a_i = mN_1 \cdot a_1 + N_2 \cdot a_2 + \dots, \quad (4.2)$$

где m – число вертикальных рядов болтов по одну сторону от стыка стенки. Для сокращения ширины накладки принимают число рядов $m = 2$;

N – усилия, воспринимаемые парами болтов;

a – расстояния между парами болтов, симметрично расположенными относительно оси x .

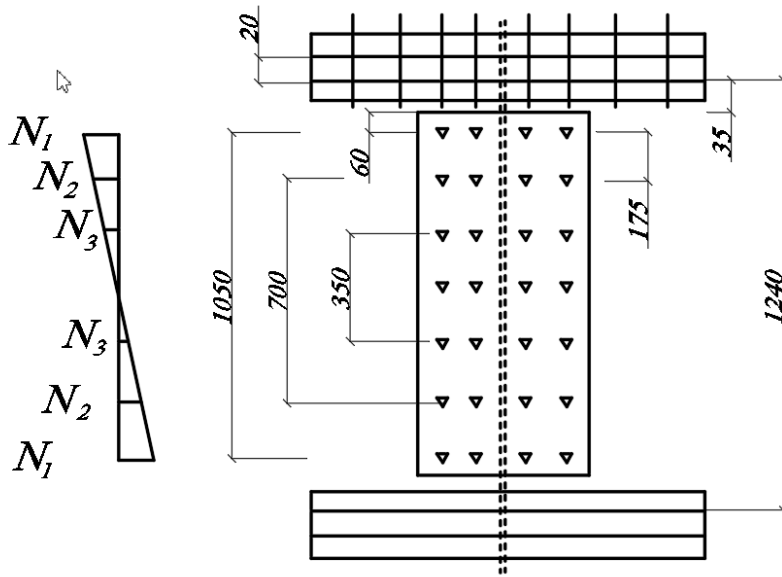


Рисунок 4.3 – Стык стенки главной балки

Примем для стыка стенки те же болты, те же способы обработки поверхностей, что и для стыка поясов.

Для определения необходимого количества болтов вычисляем коэффициент α .

$$\alpha = \frac{M_{Ed,w}}{m \cdot k \cdot y_{\max} \cdot Q_{bh} \cdot \gamma_b}, \quad (4.3)$$

где $y_{\max}$ – расстояние между крайними болтами, симметрично расположенными относительно оси x в метрах ($y_{\max} = a_{\max}$).

$$\alpha = \frac{M_{Ed,w}}{m \cdot k \cdot y_{\max} \cdot Q_{bh} \cdot \gamma_b} = \frac{639,34}{2 \cdot 2 \cdot 1,05 \cdot 99,943 \cdot 1} = 1,52.$$

По таблице 4.1 определяем необходимое количество болтов в накладке стенки.

Таблица 4.1 – Коэффициенты стыка стенки балки

Число рядов по вертикали k	6	7	8	9	10	11	12
Коэффициент α	1,40	1,55	1,71	1,87	2,04	2,20	2,36

При $\alpha = 1,52$ принимаем семь рядов болтов вдоль накладки стенки, при нечетном количестве горизонтальных рядов болтов центральный ряд попадает на нейтральную ось балки.

Расстояние между центрами болтов

$$\frac{\alpha_{\max}}{k-1} = \frac{1050}{7-1} = 175 \text{ мм.}$$

Примем семь болтов и шесть расстояний между ними (см. рисунок 4.3). Компонуем стык, размещая болты с одинаковым шагом по накладке, и проверяем прочность наиболее нагруженного болта:

$$N_{b,\max} = \frac{M_{Ed,w} \cdot \alpha_{\max}}{m \cdot k \cdot (\sum a_i^2)} = \frac{639,34 \cdot 1,05}{2 \cdot 2 \cdot (1,05^2 + 0,7^2 + 0,35^2)} = 97,86 \text{ кН} < Q_{bh} = 99,943 \text{ кН.}$$

Прочность самого нагруженного болта обеспечена.

Если $N_{b,\max} > Q_{bh}$, то следует добавить еще один горизонтальный ряд болтов, перекомпоновать стык (соблюдая правила размещения болтов) и вновь проверить нагрузку на самый нагруженный болт.

5 Подбор и проверка сечения прокатной балки

В зависимости от назначения и условий эксплуатации конструкций расчет изгибаемых элементов (балок) выполняют без учета или с учетом пластических деформаций в соответствии с классом элементов [1, п. 4.2.5]. Балки 1-го класса применяют для нагрузок всех видов и рассчитывают в пределах упругих деформаций; балки 2-го и 3-го класса применяют для статических нагрузок и рассчитывают с учетом развития пластических деформаций.

Расчет на прочность разрезных балок 2-го и 3-го класса сечения в соответствии с [1] при изгибе в плоскости наибольшей жесткости ($I_x > I_y$) выполняют по формуле

$$\frac{M_{Ed}}{c_x \cdot \beta \cdot W_{n,\min} \cdot f_{yd} \cdot \gamma_c} \leq 1, \quad (5.1)$$

где M_{Ed} – максимальный изгибающий момент;

c_x – коэффициент, учитывающий развитие пластических деформаций [1, приложение Е];

β – коэффициент; $\beta = 1$ при $\tau_x \leq 0,5f_s$; при $0,5f_s < \tau_x \leq 0,9f_s$ определяют по [1, п. 8.2.3];

$W_{n,\min}$ – момент сопротивления сечения балки, взятый из сортамента;

f_{yd} – расчетное значение предела текучести стали балки настила [1, таблицы А.4–А.5];

γ_c – коэффициент условий работы конструкций и элементов

[2, таблица Б.1]).

При действии в сечении поперечной силы прочность на сдвиг определяется по формуле

$$\frac{V_{Ed} \cdot S}{I \cdot t_w \cdot f_s \cdot \gamma_c} \leq 1, \quad (5.2)$$

где V_{Ed} – наибольшая поперечная сила;

S , t_w , I – геометрические характеристики сечения, принимаемые для балки из сортамента;

f_s – расчетное значение прочности стали балки настила на сдвиг.

$$f_s = \frac{0,58 \cdot f_{yk}}{\gamma_m}, \quad (5.3)$$

где f_{yk} – характеристическое значение предела текучести стали балки настила, [1, таблицы А.4–А.5];

γ_m – частный коэффициент по материалу, $\gamma_m = 1,025$.

Согласно требованиям [2] проверки предельных состояний эксплуатационной пригодности следует выполнять из условия

$$E_d \leq C_{d, \lim}, \quad (5.4)$$

где $C_{d, \lim}$ – предельное расчетное значение критерия оценки эксплуатационной пригодности;

E_d – расчетное значение эффектов воздействий в единицах критериев эксплуатационной пригодности, определяемое при соответствующих сочетаниях воздействий (характеристического, частого и практически постоянного сочетаний).

Для балок, как и других пролетных конструкций, основными определяющими критериями пригодности к нормальной эксплуатации являются прогибы.

Для однопролетной балки, нагруженной равномерно распределенной нагрузкой, проверка деформативности производится по формуле

$$f_{\max} = \frac{5}{384} \cdot \frac{q_n \cdot l_2^4}{E \cdot I_x} \leq f_u, \quad (5.5)$$

где q_n – действительное характеристическое значение погонной нагрузки на балку, кН/м²; определяется без учета коэффициентов надежности для постоянных и переменных воздействий γ_G и γ_Q с использованием значений, соответствующих выбранной балке;

l_2 – пролет балки, м;

E – модуль упругости прокатной стали, $E = 2,06 \cdot 10^5$ МПа;

I_x – момент инерции сечения балки;

f_u – предельное значение прогиба; устанавливается в соответствии с [1, таблица 49].

Пример – Подобрать сечение двутавровой прокатной балки настила в балочной клетке нормального типа и выполнить проверочные расчеты подобранного сечения по первому предельному состоянию по следующим исходным данным: характеристическое значение погонной нагрузки $q_k = 35$ кН/м; расчетное значение погонной нагрузки на балку $q_k = 40$ кН/м; размеры балочной клетки $l_1 = 13,5$ м, $l_2 = 7,8$ м. Материал балки – сталь С245 ($f_{yd} = 240$ МПа, $f_{yk} = 245$ МПа). Коэффициент условий работы $\gamma_c = 1$.

Расчетная схема балки представлена на рисунке 5.1.

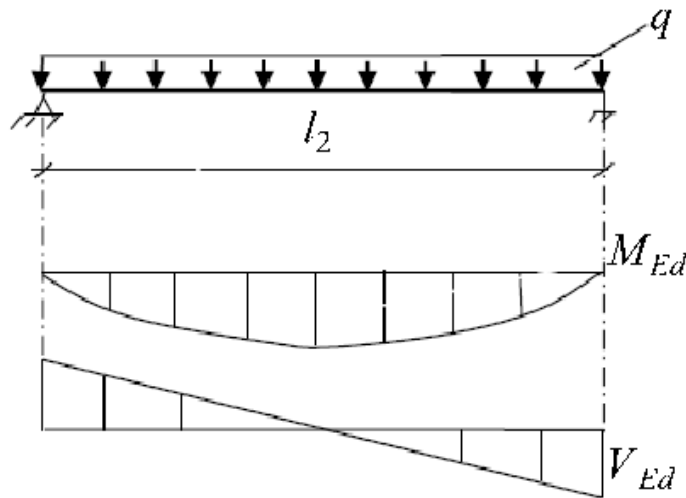


Рисунок 5.1 – Расчетная схема балки (однопролетная разрезная балка)

Решение

Выполним предварительный подбор сечения балки без учета ее собственного веса.

Максимальный изгибающий момент M_{Ed} находим по формуле

$$M_{Ed} = \frac{q \cdot l_2^2}{8} = \frac{40 \cdot 7,8^2}{8} = 304,2 \text{ кН} \cdot \text{м}. \quad (5.6)$$

Тогда требуемый момент сопротивления сечения балки для случая упруго-пластической работы при изгибе балки в одной из главных плоскостей можно определить по формуле

$$W_{n,cal} = \frac{M_{Ed}}{c_x \cdot \beta \cdot f_{yd} \cdot \gamma_c}. \quad (5.7)$$

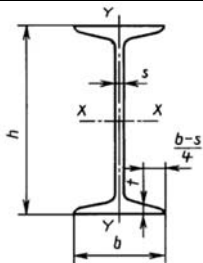
Принимаем в первом приближении $c_x = 1,12$, тогда

$$W_{n,cal} = \frac{304200}{1,12 \cdot 240 \cdot 10^6 \cdot 1} = 0,00113 \text{ м}^3 = 1130 \text{ см}^3.$$

В таблице 5.1 представлена выборка из ГОСТ 8239–89 для подбора сечения балки.

Таблица 5.1 – Балки двутавровые (выборка из ГОСТ 8239–89)

Но- мер про- филя	Размер, мм				A , см ²	G , кг/м	I_x , см ⁴	W_x , см ³	S_x , см ³	i_x , см	I_y , см ⁴	W_y , см ³	i_y , см
	h	b	t	s									
10	100	55	7,2	4,5	12	9,46	198	39,7	23	4,06	17,9	6,49	1,22
12	120	64	7,3	4,8	14,7	11,5	350	58,4	33,7	4,88	27,9	8,72	1,38
14	140	73	7,5	4,9	17,4	13,7	572	81,7	46,8	5,73	41,9	11,5	1,55
16	160	81	7,8	5	20,2	15,9	873	109	62,3	6,57	58,6	14,5	1,7
18	180	90	8,1	5,1	23,4	18,4	1290	143	81,4	7,42	82,6	18,4	1,88
20	200	100	8,4	5,2	26,8	21	1840	184	104	8,28	115	23,1	2,07
22	220	110	8,7	5,4	30,6	24	2550	232	131	9,13	157	28,6	2,27
24	240	115	9,5	5,6	34,8	27,3	3460	289	163	9,97	198	34,5	2,37
27	270	125	9,8	6	40,2	31,5	5010	371	210	11,2	260	41,5	2,54
30	300	135	10,2	6,5	46,5	36,5	7080	472	268	12,3	337	49,9	2,69
33	330	140	11,2	7	53,8	42,2	9840	597	339	13,5	419	59,9	2,79
36	360	145	12,3	7,5	61,9	48,6	13380	743	423	14,7	516	71,1	2,89
40	400	155	13	8,3	72,6	57	19062	953	545	16,2	667	86,1	3,03
45	450	160	14,2	9	84,7	66,5	27696	1231	708	18,1	808	101	3,09
50	500	170	15,2	10	100	78,5	39727	1598	919	19,9	1043	123	3,23
55	550	180	16,5	11	118	92,6	55962	2035	1181	21,8	1356	151	3,39
60	600	190	17,8	12	138	108	78806	2560	1491	23,6	1725	182	3,54



Примечание – A – площадь поперечного сечения; h – высота балки; G – масса 1 м, кг; b – ширина полки; I – момент инерции; t – толщина полки; W – момент сопротивления; s – толщина стенки; S – статический момент полусечения; i – радиус инерции

Принимаем прокатный двутавр № 45, имеющий следующие характеристики сечения: $h = 450$ мм, $b_f = 160$ мм, $t_f = 14,2$ мм, $t_w = 9$ мм, $A = 84,7$ см², $G = 66,5$ кг/м, $I_x = 27696$ см⁴, $W_x = 1231$ см³, $S_x = 708$ см³, $i_x = 18,1$ см, $I_y = 808$ см⁴, $W_y = 101$ см³, $i_y = 3,09$ см.

Уточняем расчетную нагрузку на балку с учетом ее собственного веса

$$q' = q + G \cdot \gamma_G = 40 + 0,665 \cdot 1,2 = 40,798 \text{ кН/м},$$

где γ_G – частный коэффициент для постоянного воздействия; от собственного веса стальных конструкций $\gamma_G = 1,2$.

$$M_{Ed} = \frac{q' \cdot l_2^2}{8} = \frac{40,798 \cdot 7,8^2}{8} = 310,27 \text{ кН} \cdot \text{м};$$

$$V_{Ed} = \frac{q' \cdot l_2}{2} = \frac{40,798 \cdot 7,8}{2} = 159,11 \text{ кН}.$$

Выполняем проверку прочности балки по изгибающему моменту по формуле (5.1):

$$\frac{M_{Ed}}{c_x \cdot \beta \cdot W_{n,\min} \cdot f_{yd} \cdot \gamma_c} = \frac{310,27 \cdot 10^3}{1,11 \cdot 1 \cdot 1231 \cdot 10^{-6} \cdot 240 \cdot 10^6 \cdot 1} = 0,946 < 1,$$

где $c_x = 1,11$ [1, таблица Е.1], т. к.

$$\frac{A_f}{A_w} = \frac{b_f \cdot t_f}{t_w \cdot (h - 2t_f)} = \frac{160 \cdot 14,2}{9 \cdot (450 - 2 \cdot 14,2)} = 0,6.$$

Выполним проверку прочности по поперечной силе в опорной части балки:

$$\frac{V_{Ed} \cdot S}{I \cdot t_w \cdot f_s \cdot \gamma_c} = \frac{159,11 \cdot 10^3 \cdot 708 \cdot 10^{-6}}{27696 \cdot 10^{-8} \cdot 0,009 \cdot 138,6 \cdot 10^6 \cdot 1} = 0,33 < 1,$$

где

$$f_s = \frac{0,58 \cdot f_{yk}}{\gamma_m} = \frac{0,58 \cdot 245}{1,025} = 138,6 \text{ МПа}.$$

Условия выполняются.

Список литературы

- 1 Стальные конструкции (с поправкой) : СП 5.04.01–2021. – Введ. 01.10.2021 (с отменой СНиП II-23–81*). – Минск: Минстройархитектуры, 2021. – 153 с.
- 2 Основы проектирования строительных конструкций : СН 2.01.01–2022. – Введ. 23.11.2022 (взамен СН 2.01.01–2019). – Минск: Минстройархитектуры, 2022. – 65 с.
- 3 **Кудишин, Ю. И.** Металлические конструкции: учебник / Ю. И. Кудишин, Е. И. Беленя, В. С. Игнатьева; под ред. Ю. И. Кудишина. – 13-е изд., испр. – М.: Академия, 2011. – 688 с.
- 4 **Горев, В. В.** Металлические конструкции: учеб. пособие для строительных вузов: в 3 т. Т. 1: Элементы стальных конструкций / В. В. Горев, Б. Ю. Уваров, В. В. Филиппов; под ред. В. В. Горева. – М.: Высш. шк., 2004. – 551 с.
- 5 **Нехаев, Г. А.** Металлические конструкции в примерах и задачах: учеб. пособие / Г. А. Нехаев, З. А. Захарова. – М.: АСВ, 2010. – 128 с.
- 6 **Жабинский, А. Г.** Металлические конструкции. Расчет и конструирование прокатных и сварных балок: учеб.-метод. пособие по выполнению курсовой работы для студентов строит. факультета / А. Н. Жабинский, А. Г. Вербицкий, А. Н. Кеда. – Минск: БНТУ, 2013. – 87 с.