

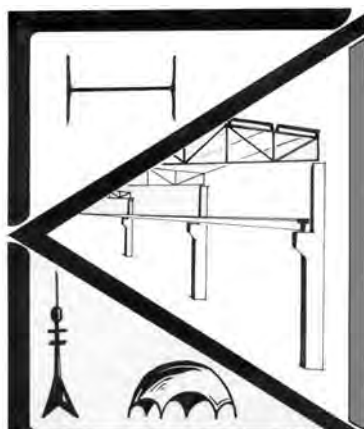
МЕЖГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Промышленное и гражданское строительство»

МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ КОНСТРУКЦИИ

*Методические рекомендации к практическим занятиям
для студентов специальности 1-70 02 01
«Промышленное и гражданское строительство»
очной и заочной форм обучения*

Часть 1



Могилев 2019

УДК 674.012.45
ББК 38.5
М54

Рекомендовано к изданию
учебно-методическим отделом
Белорусско-Российского университета

Одобрено кафедрой «Промышленное и гражданское строительство»
«18» октября 2019 г., протокол № 3

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

Рецензент канд. техн. наук, доц. О. В. Голушкова

В методических рекомендациях приведены порядок расчета углеродного эквивалента, методика расчета болтовых и сварных соединений стальных конструкций, а также примеры расчетов для студентов специальности 1-70 02 01 «Промышленное и гражданское строительство».

Учебно-методическое издание

МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ КОНСТРУКЦИИ

Часть 1

Ответственный за выпуск	Д. В. Михальков
Редактор	С. Н. Красовская
Компьютерная верстка	Н. П. Полевничая

Подписано в печать . Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.
Печать трафаретная. Усл. печ. л. . Уч.-изд. л. Тираж 76 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, Могилев.

© Белорусско- Российский
университет, 2019



Содержание

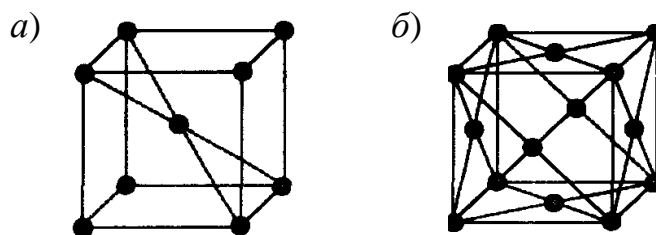
1 Оценка свариваемости сталей.....	4
2 Конструирование и расчет сварных соединений.....	7
3 Конструирование и расчет болтовых соединений.....	17
4 Конструирование и расчет укрупнительного стыка балки на высокопрочных болтах.....	22
Список литературы.....	26



1 Оценка свариваемости сталей

Сталь – это сплав железа с углеродом, содержащий легирующие добавки, улучшающие качество металла, и вредные примеси, которые попадают в металл из руды или образуются в процессе выплавки.

В твердом состоянии сталь является поликристаллическим телом, состоящим из множества различно ориентированных кристаллов (зерен). В каждом кристалле положительно заряженные ионы расположены упорядоченно в узлах пространственной решетки. Для стали характерны кубические кристаллические объемноцентрированная и гранецентрированная решетки (рисунок 1.1).



a – объемноцентрированная; *б* – гранецентрированная

Рисунок 1.1 – Кубическая кристаллическая решетка

Структура низколегированных сталей аналогична структуре малоуглеродистой стали. Низколегированные стали тоже содержат мало углерода, повышение их прочности достигается легированием – добавками, которые, как правило, находятся в твердом растворе с ферритом и, растворяясь, упрочняют его. Легирующие добавки образуют карбиды и нитриды, также упрочняющие ферритовую основу и способствующие образованию мелкозернистой структуры.

Рассмотрим основные химические элементы, применяемые при легировании.

Углеродистая сталь обыкновенного качества состоит из железа и углерода с некоторой добавкой кремния или алюминия, марганца, меди.

Углерод (У), повышая прочность стали, снижает ее пластичность и ухудшает свариваемость; поэтому в строительных сталях, которые должны быть достаточно пластичными и хорошо свариваемыми, углерод допускается в количестве не более 0,22 %.

Кремний (С) повышает прочность стали, ухудшает ее свариваемость и стойкость против коррозии. В малоуглеродистых сталях кремний применяется как хороший раскислитель; в малоуглеродистые стали добавляется до 0,3 % кремния, в низколегированные – до 1 %.

Алюминий (Ю) хорошо раскисляет сталь, нейтрализует вредное влияние фосфора, повышает ударную вязкость.

Марганец (Г) повышает прочность и вязкость стали, хороший раскислитель, соединяясь с серой, снижает ее вредное влияние. В малоуглеродистых сталях марганца содержится до 0,64 %, в легированных – до 1,5 %; при содержании марганца более 1,5 % сталь становится хрупкой.

Медь (Д) несколько повышает прочность стали и увеличивает стойкость ее против коррозии. Избыточное содержание (более 0,7 %) способствует старению стали.

Молибден (М) и бор (Р) обеспечивают высокую устойчивость аустенита при охлаждении, что очень важно для получения высокопрочного проката больших толщин. После закалки и высокого отпуска сталь становится мелкозернистой, насыщенной карбидами. Такая сталь обладает высокой прочностью, удовлетворительной пластичностью и почти не разупрочняется при сварке.

Примечание – При обозначении марки стали каждому химическому элементу присвоена буква русского алфавита (указана в скобках около каждого элемента), содержание каждого элемента в процентах с округлением до целых значений указывается после буквы, обозначающей данный элемент (элемент, содержащийся в пределах 1 %, цифрами не указывается). Поскольку углерод содержится во всех сталях, его обозначение (буква У) не ставится, а количественное содержание указывается в сотых долях процента в начале обозначения марки. Так, 15Г2СФ означает, что в этой стали среднее содержание углерода 0,15 %, марганца – в пределах 1...2 %, кремния и ванадия – в пределах 1 % каждого.

Азот (А) в несвязанном состоянии способствует старению стали и делает ее хрупкой, особенно при низких температурах. Его не должно быть более 0,008 %.

Повышение механических свойств низколегированной стали осуществляется также присадкой металлов: марганец (Г), хром (Х), ванадий (Ф), вольфрам (В), молибден (М), титан (Т).

Вольфрам и молибден, значительно повышая твердость, снижают пластические свойства стали.

Вредные примеси: фосфор – повышает хрупкость стали, особенно при пониженных температурах (хладоломкость), и снижает пластичность при повышенных; сера – делает сталь красноломкой (склонной к образованию трещин при температуре 800...1000 °С). Поэтому содержание серы и фосфора в стали ограничивается: так, в углеродистой стали Ст3 серы должно быть не больше 0,05 % и фосфора – 0,04 %.

Вредное влияние на механические свойства стали оказывает насыщение ее газами, которые могут попасть из атмосферы в металл, находящийся в расплавленном состоянии. Кислород повышает хрупкость стали, несвязанный азот также снижает качество стали, водород (всего 0,0007 %) вызывает в микрообъемах высокие напряжения, что приводит к снижению сопротивления стали хрупкому разрушению, снижению временного сопротивления и ухудшению пластических свойств. Поэтому расплавленную сталь (например, при сварке) необходимо защищать от воздействия атмосферы.

Значительного повышения прочности, деформационных и других свойств стали, помимо легирования, достигают термической обработкой. Под влиянием температуры, а также режима нагрева и охлаждения изменяются структура, величина зерна и растворимость легирующих элементов стали.

Простейшим видом термической обработки является нормализация. Она заключается в повторном нагреве проката до температуры образования аустенита и последующего охлаждения на воздухе. После нормализации структура



стали получается более упорядоченной, снимаются внутренние напряжения, что приводит к улучшению прочностных и пластических свойств стального проката и его ударной вязкости.

В состав легированных сталей, помимо железа и углерода, входят специальные добавки, улучшающие их качество. Поскольку большинство добавок в той или иной степени ухудшают свариваемость стали, а также удорожают ее, в строительстве в основном применяют низколегированные стали с суммарным содержанием легирующих добавок не более 5 %.

Нормирование сталей. Основным стандартом, регламентирующим характеристики сталей для строительных металлических конструкций, является ГОСТ 27772–88. Согласно ГОСТу, фасонный прокат изготавливают из сталей С235, С245, С255, С275, С285, С345, С345к, С375, для листового и универсального проката и гнутых профилей используются также стали С390, С390К, С440 и С590К. Стали С345, С375, С390 и С440 могут поставляться с повышенным содержанием меди (для улучшения коррозионной стойкости) при этом к обозначению стали добавляют букву Д.

Буква С в наименовании означает сталь строительную, цифра показывает значение предела текучести в МПа, буква К – вариант химического состава.

Оценку свариваемости стали проводят по углеродному эквиваленту (в процентах):

$$C_s = \frac{\text{Марганец}}{6} + \frac{\text{Кремний}}{24} + \frac{\text{Хром}}{5} + \frac{\text{Никель}}{40} + \frac{\text{Медь}}{13} + \frac{\text{Ванадий}}{14} + \frac{\text{Фосфор}}{2}.$$

Если $C_s < 0,4$ %, то сварка стали не вызывает затруднений, при $0,4 \% < C_s < 0,55$ % сварка возможна, но требует принятия специальных мер по предотвращению возникновения трещин. При $C_s > 0,55$ % опасность появления трещин резко возрастает.

Легирующие добавки:

С – кремний	Р – бор	Д – медь
Г – марганец	Т – титан	К – кобальт
Х – хром	Ю – алюминий	Ц – цирконий
Н – никель	Ф – ванадий	П – фосфор
М – молибден	Б – ниобий	
В – вольфрам	А – азот	

1.1 Примеры

Пример 1.1 – Определить углеродный эквивалент для оценки свариваемости строительной стали 15ХСНД.

Решение

Для определения оценки свариваемостей определяем углеродный эквивалент:



$$C_9 = \frac{1}{5} + \frac{1}{24} + \frac{1}{40} + \frac{1}{13} = 0,34 \text{ \%}.$$

Сварка не вызывает затруднений.

Пример 1.2 – Определить углеродный эквивалент для оценки свариваемости строительной стали 12Г2СМФ.

Решение

Определяем углеродный эквивалент:

$$C_9 = \frac{2}{6} + \frac{1}{24} + \frac{1}{14} = 0,446 \text{ \%}.$$

Сварка возможна.

Задачи для самостоятельного решения

Задача 1.1. Определить углеродный эквивалент для оценки свариваемости строительной стали 10ХНДП.

Задача 1.2. Определить углеродный эквивалент для оценки свариваемости строительной стали 20ХГ2С.

Задача 1.3. Определить углеродный эквивалент для оценки свариваемости строительной стали 35ХГФ.

2 Конструирование и расчет сварных соединений

2.1 Расчет стыковых сварных швов

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

$$\frac{N}{t \cdot l_w} \leq R_{wy} \cdot \gamma_c, \quad (2.1)$$

где R_{wy} – расчетное сопротивление стыковых сварных соединений сжатию, растяжению и изгибу по пределу текучести; $R_{wy} = R_y$ – при физических методах контроля шва, $R_{wy} = 0,85R_y$ – при обычных методах контроля;

γ_c – коэффициент условий работы;

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.

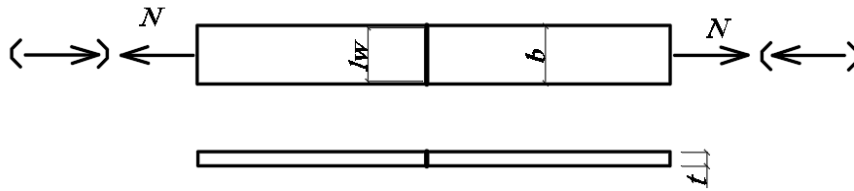


Рисунок 2.1 – Прямой сварной шов встык

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

$$\frac{N \cdot \sin \alpha}{t \cdot l_w} \leq R_{wy} \cdot \gamma_c \quad (2.2)$$

В косом шве возникают напряжения среза, которые проверяются по формуле

$$\tau = \frac{N \cdot \cos \alpha}{t \cdot l_w} \leq R_{ws} \cdot \gamma_c \quad (2.3)$$

где R_{ws} – расчетное сопротивление стыковых сварных соединений сдвигу.

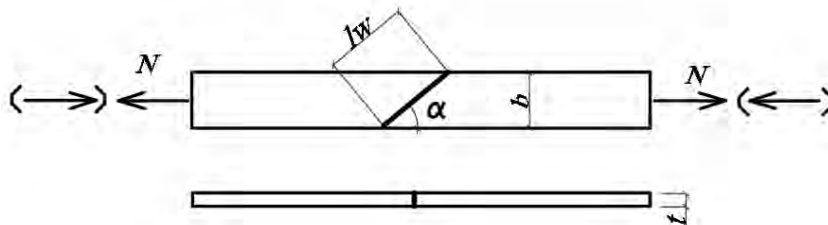


Рисунок 2.2 – Косой сварной шов встык

При действии на соединяемые сварным швом элементы изгибающего момента M (рисунок 2.3) напряжения в шве определяются по формуле

$$\frac{M}{W_y} = \frac{6 \cdot M}{t \cdot l_w^2} \leq R_{wy} \cdot \gamma_c \quad (2.4)$$

где W_y – момент сопротивления.

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

$$\tau = \frac{Q \cdot S}{I \cdot t} \leq R_{ws} \cdot \gamma_c, \quad (2.5)$$

где Q – поперечная сила;
 S – статический момент сопротивления шва;
 I – момент инерции.

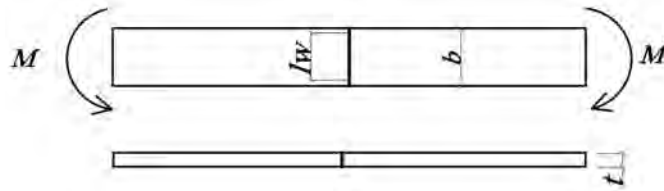


Рисунок 2.3 – К расчету стыкового сварного шва при действии изгибающего момента

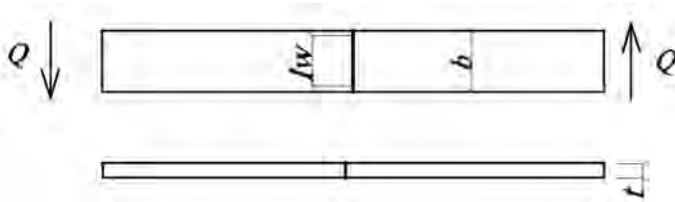


Рисунок 2.4 – К расчету стыкового сварного шва на срез

Если изгибающий момент действует на соединение совместно с нормальной силой (рисунок 2.5), то напряжения в стыковом шве проверяются по формуле

$$\sigma = \frac{N}{A_w} + \frac{M}{W_w} = \frac{N}{t \cdot l_w} + \frac{6 \cdot M}{t \cdot l_w^2} \leq R_{wy} \cdot \gamma_c \quad (2.6)$$

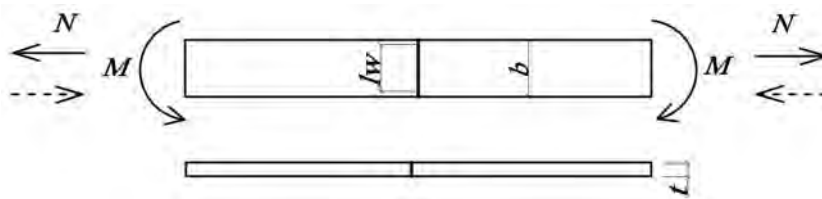


Рисунок 2.5 – К расчету стыкового сварного шва при совместном действии изгибающего момента и нормальной силы

При действии изгибающего момента и поперечной силы на стыковое соединение напряжения в шве определяются по формуле

$$\sqrt{\sigma_{wx}^2 - \sigma_{wx} \cdot \sigma_{wy} + \sigma_{wy}^2 + 3 \cdot \tau_{wxy}^2} \leq 1,15 \cdot R_{wy} \cdot \gamma_c, \quad (2.7)$$

где σ_{wx}, σ_{wy} – нормальные напряжения от изгиба;

τ_{wxy} – среднее касательное напряжение от срезающей силы Q , определенное из условия равномерного распределения напряжений по сечению,

$$\tau_{wxy} = \frac{Q}{t \cdot l_w}.$$

2.2 Расчет угловых сварных швов

При действии продольной и поперечной силы сварные соединения с угловыми швами рассчитывают на срез (условный) по двум сечениям (рисунок 2.6):

– по металлу шва (сечение 1)

$$\frac{N}{\beta_f \cdot k_f \cdot l_w} \leq R_{wf} \cdot \gamma_{wf} \cdot \gamma_c; \quad (2.8)$$

– по металлу границы сплавления (сечение 2)

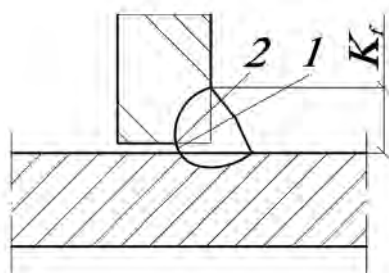
$$\frac{N}{\beta_z \cdot k_f \cdot l_w} \leq R_{wz} \cdot \gamma_{wz} \cdot \gamma_c, \quad (2.9)$$

где l_w – расчетная длина шва, принимаемая меньше его полной длины на 10 мм;

k_f – высота катета шва;

β_f и β_z – коэффициенты, принимаемые при сварке элементов из стали с пределом текучести до 580 МПа [4, таблица 34]; для стали с пределом текучести выше 580 МПа $\beta_f = 0,7$, $\beta_z = 1$;

γ_{wf} и γ_{wz} – коэффициенты условий работы шва, равные 1 во всех случаях, кроме конструкций, возводимых в климатических районах I₁, I₂, II₂, II₃, для которых эти коэффициенты равны 0,85.



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

Рисунок 2.6 – Схема расчетных сечений сварного соединения с угловым швом

Для угловых швов, размеры которых установлены в соответствии с расчетом, в элементах из стали с пределом текучести до 285 МПа следует применять электроды или сварочную проволоку, для которых расчетные сопротивления срезу по металлу шва R_{wf} должны быть более R_{wz} , а при ручной сварке – не ме-

нее чем в 1,1 раза превышать расчетные сопротивления срезу по металлу границы сплавления R_{wz} , но не превышать значений $R_{wz} \cdot \beta_z / \beta_f$; в элементах из стали с пределом текучести свыше 285 МПа допускается применять электроды или сварочную проволоку, для которых выполняется условие

$$R_{wz} < R_{wf} \leq R_{wz} \cdot \beta_z \cdot \beta_f . \quad (2.10)$$

При выборе электродов или сварочной проволоки следует учитывать группы конструкций и климатические районы, указанные в [4, таблица 55*].

Расчет сварных соединений с угловыми швами на действие момента в плоскости, перпендикулярной плоскости расположения швов (рисунок 2.7), следует производить по двум сечениям по формулам:

– по металлу шва

$$\frac{M}{W_f} \leq R_{wf} \cdot \gamma_{wf} \cdot \gamma_c ; \quad (2.11)$$

– по металлу границы сплавления

$$\frac{M}{W_z} \leq R_{wz} \cdot \gamma_{wz} \cdot \gamma_c , \quad (2.12)$$

где W_f – момент сопротивления расчетного сечения по металлу шва;

W_z – то же по металлу границы сплавления.

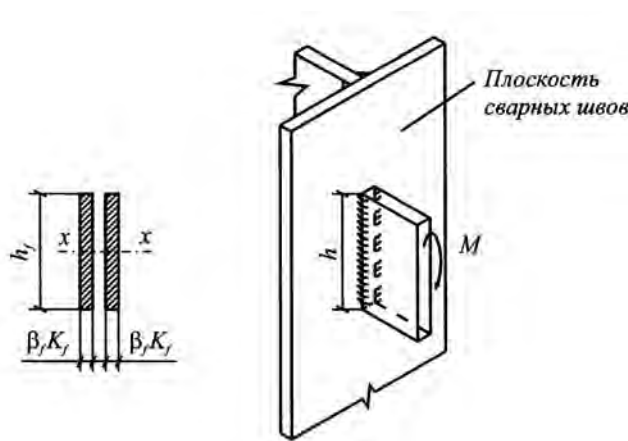


Рисунок 2.7 – К расчету угловых сварных соединений на действие момента в плоскости, перпендикулярной плоскости расположения швов

Расчет сварных соединений с угловыми швами на действие момента в плоскости расположения этих швов (рисунок 2.8) следует производить по двум сечениям по формулам:

– по металлу шва

$$\frac{M}{J_{fx} + J_{fy}} \cdot \sqrt{x^2 + y^2} \leq R_{wf} \cdot \gamma_{wf} \cdot \gamma_c ; \quad (2.13)$$

– по металлу границы сплавления

$$\frac{M}{J_{zx} + J_{zy}} \cdot \sqrt{x^2 + y^2} \leq R_{wz} \cdot \gamma_{wz} \cdot \gamma_c , \quad (2.14)$$

где J_{fx} и J_{fy} – моменты инерции расчетного сечения по металлу шва относительно его главных осей;

J_{zx} и J_{zy} – то же по металлу границы сплавления;

x и y – координаты точки шва, наиболее удаленной от центра тяжести расчетного сечения швов, относительно главных осей этого сечения.

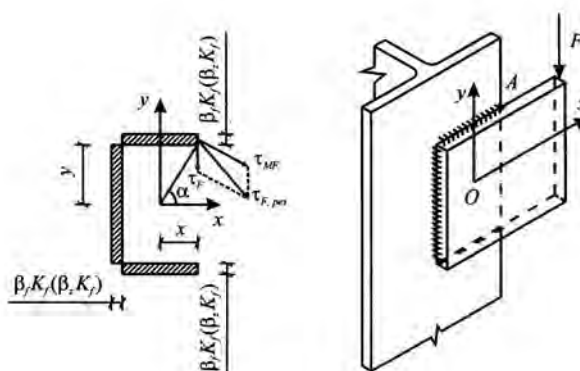


Рисунок 2.8 – К расчету угловых сварных соединений на действие момента в плоскости расположения этих швов

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

$$\tau_f \leq R_{wf} \cdot \gamma_{wf} \cdot \gamma_c \quad \text{и} \quad \tau_z \leq R_{wz} \cdot \gamma_{wz} \cdot \gamma_c . \quad (2.15)$$

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

2.3 Примеры

Пример 2.1 – Рассчитать соединение встык ручной сваркой двух полос из стали 10Г2С1 толщиной $t = 12$ мм, шириной $b = 200$ мм на действие растягивающих сил $N = 56$ т.

Решение

Для сварки принимаем электроды типа Э42. По [4, таблица 8] при расчете стыковых швов $R_{wy} = 0,85 \cdot R_y$. Для стали 10Г2С1 по [4, таблица 6] это соответствует стали С375 по ГОСТ 27772–88 [4, таблица 7] $R_y = 345$ МПа.

Тогда $R_{wy} = 0,85 \cdot 345 = 293$ МПа.

Напряжение в сварном шве определяем следующим образом:

$$\frac{N}{t \cdot l_w} = \frac{560000}{12 \cdot (200 - 2 \cdot 12)} = 265 \text{ МПа} < R_{wy} \cdot \gamma_c = 293 \cdot 1,0 = 293 \text{ МПа},$$

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

Вывод: прямой стык обеспечивает прочность соединения.

Пример 2.2 – Какое растягивающее усилие могут выдержать листы из стали Вст3кп2 сечением 250×12 мм, соединенные косым швом встык под углом $\alpha = 45^\circ$ к оси при ручной сварке?

Решение

При расчете стыковых швов $R_{wy} = 0,85 \cdot R_y = 0,85 \cdot 230 = 195,5$ МПа;

$$R_{ws} = 0,58 \cdot \frac{R_{yn}}{\gamma_m} = 0,58 \cdot \frac{235}{1,025} = 133 \text{ МПа}.$$

Для стали Вст3кп2 $R_y = 230$ МПа; $R_{yn} = 235$ МПа; $\gamma_m = 1,025$ – коэффициент надежности по материалу.

$$\text{Длина сварного шва } l_w = \frac{b}{\sin \alpha} - 10 = \frac{250}{0,707} - 10 = 344 \text{ мм}.$$

Максимальное растягивающее усилие для листов

$$N_l = R_y \cdot l_w \cdot t = 230 \cdot 250 \cdot 12 = 690000 \text{ Н} = 690 \text{ кН}.$$

Максимальное растягивающее усилие для шва

$$N = 195,5 \cdot \frac{344 \cdot 12}{0,707} = 1141477 \text{ Н} = 1141,5 \text{ кН}.$$



Максимальное усилие при расчете шва на срез

$$N_s = R_{ws} \cdot \frac{l_w \cdot t}{\cos 45^\circ} = 133 \cdot \frac{344 \cdot 12}{0,707} = 776554 \text{ Н} = 776,6 \text{ кН.}$$

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 2.3 – Определить снижение несущей способности элемента прокатного листа из стали ВстЗпсб 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 сопротивление для прокатного профиля из стали ВстЗпсб (С245) для толщин от 2 до 10 мм $R_y = 240$ МПа.

Расчетное сопротивление сварного шва растяжению

$$R_{wy} = 0,85 \cdot R_y = 0,85 \cdot 240 = 204 \text{ МПа.}$$

Снижение несущей способности

$$\frac{R_y - R_{wy}}{R_y} \cdot 100 \% = \frac{240 - 204}{240} \cdot 100 \% = 15 \%.$$

Пример 2.4 – Рассчитать соединение встык ручной сваркой двутавровой балки № 40 ($A_w = 72,6 \text{ см}^2$; $W_w = 953 \text{ см}^3$) из стали марки ВстЗпсб, нагруженной изгибающим моментом $M_x = 174 \text{ кН}\cdot\text{м}$ и поперечной силой $Q = 25,2 \text{ т}$.

Решение

Принимаем для сварки электроды типа Э42 с расчетным сопротивлением $R_{wy} = 0,85 \cdot R_y = 0,85 \cdot 240 = 204$ МПа.

Нормальные напряжения в шве

$$\sigma_x = \frac{M_x}{W_x} = \frac{174 \cdot 10^3}{953 \cdot 10^{-6}} = 182,6 \text{ МПа.}$$



Средние касательные напряжения в шве

$$\tau_x = \frac{Q}{A_w} = \frac{252000}{72,6 \cdot 10^{-4}} = 34,7 \text{ МПа.}$$

$$\begin{aligned} & \text{Приведенные напряжения в соединении (здесь } \sigma_y = 0; \tau_y = 0) \sqrt{\sigma_x^2 + 3 \cdot \tau_x^2} = \\ & = \sqrt{182,6^2 + 3 \cdot 34,7^2} = 193 \text{ МПа} < 1,15 \cdot R_{wy} \cdot \gamma_c = 1,15 \cdot 204 \cdot 1,0 = 235 \text{ МПа.} \end{aligned}$$

Пример 2.5 – Проверить монтажное соединение встык двух частей колонны, выполненное из сварных двутавров № 17 ($A_w = 283 \text{ см}^2$; $W_w = 7980 \text{ см}^3$) из стали С245, нагруженных сжимающей силой $N = 425 \text{ т}$ и изгибающим моментом $M_x = 400 \text{ кН}\cdot\text{м}$.

Решение

Для сварки принимаем электроды типа Э42 с расчетным сопротивлением при работе на сжатие $R_{wy} = 0,85 \cdot R_y = 0,85 \cdot 240 = 204 \text{ МПа}$, где для стали С245 $R_y = 240 \text{ МПа}$.

Напряжения в сварном шве

$$\begin{aligned} \sigma &= \frac{N}{A_w} + \frac{M}{W_w} = \frac{425 \cdot 10^3}{283 \cdot 10^{-4}} + \frac{400 \cdot 10^3}{7980 \cdot 10^{-6}} = 65,14 \text{ МПа} < \\ &< R_{wy} \cdot \gamma_c = 204 \cdot 1,0 = 205 \text{ МПа.} \end{aligned}$$

Прочность соединения обеспечена.

Пример 2.6 – Рассчитать сварное соединение внахлестку с двумя лобовыми швами (рисунок 2.9). Стальные полосы сечением $250 \times 10 \text{ мм}$ из стали марки ВСтЗпсб ($R_y = 240 \text{ МПа}$, $R_{um} = 370 \text{ МПа}$). Соединение воспринимает осевое усилие $N = 550 \text{ кН}$. Сварка ручная, $\gamma_c = \gamma_{wf} = \gamma_{wz} = 1$.

Решение

Выбираем параметры шва по [4, таблица 34*]. Принимаем положение шва при сварке нижнее; $\beta_f = 0,7$, $\beta_z = 1$.

Прочностные характеристики шва выбираем по [4, таблица 56].

$R_{wf} = 180 \text{ МПа}$; $R_{wz} = 0,45 R_{um} = 0,45 \cdot 370 = 166,5 \text{ МПа}$ [4, таблица 3].

Определяем расчетное сечение сварного шва:

$$\beta_f \cdot R_{wf} = 0,7 \cdot 180 = 126 \text{ МПа};$$

$$\beta_z \cdot R_{wz} = 1 \cdot 166,5 = 166,5 \text{ МПа} > \beta_f \cdot R_{wf}.$$

Следовательно, расчет ведем по металлу шва.



Расчетная суммарная длина швов в данном случае

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

Требуемый катет шва

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

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

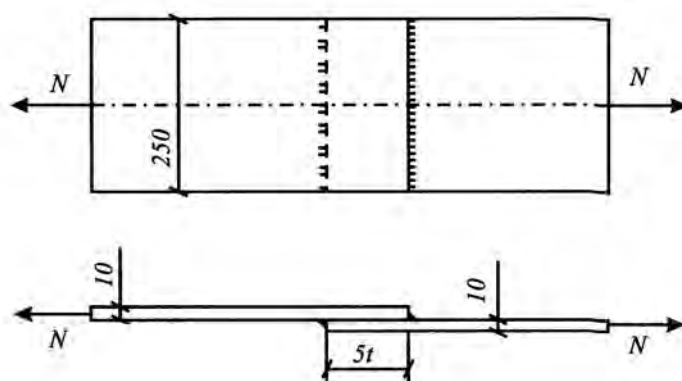


Рисунок 2.9 – К задаче 2.6

Задачи для самостоятельного решения

Задача 2.1. Рассчитать сварное соединение встык двух листов из стали 09Г2С шириной $b = 200$ мм, толщиной $t_1 = 12$ мм и $t_2 = 8$ мм. Расчетное усилие, действующее на соединение, $N = 700$ кН. Сварка ручная, с визуальным контролем качества сварного шва. Тип электрода выбрать самостоятельно.

Задача 2.2. Рассчитать сварное соединение двух листов шириной $b = 250$ мм и одинаковой толщиной $t = 8$ мм по несущей способности листов. Листы изготовлены из стали ВСт3псб.

Задача 2.3. Рассчитать сварное соединение внахлестку с двумя лобовыми швами стальных полос сечением 300×12 мм из стали марки ВСт3кп2. Соединение воспринимает расчетное усилие $N = 670$ кН. Сварка ручная, $\gamma_c = \gamma_{wf} = \gamma_{wz} = 1$. Необходимо выбрать тип электрода, установить катет шва и определить длину нахлестки.

3 Конструирование и расчет болтовых соединений

Расчетное усилие, воспринимаемое одним болтом, определяют по формулам:

– на срез

$$N_b = R_{bs} \cdot \gamma_b \cdot A \cdot n_s; \quad (3.1)$$

– на смятие

$$N_b = R_{bp} \cdot \gamma_b \cdot d \cdot \Sigma t; \quad (3.2)$$

– на растяжение

$$N_b = R_{bt} \cdot A_{bn}, \quad (3.3)$$

где d – наружный диаметр стержня болта;

A – площадь сечения болта нетто, $A = 0,25 \cdot \pi \cdot d^2$;

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

n_s – число расчетных срезов одного болта;

γ_b – коэффициент условий работы соединения, принимаемый по [4];

R_{bs} , R_{bp} , R_{bt} – расчетные сопротивления болтового соединения срезу, смятию и растяжению соответственно, принимаются по [4].

Требуемое количество болтов при действии на соединение продольной силы N определяют по формуле

$$n \geq \frac{N}{\gamma_c \cdot N_{\min}}, \quad (3.4)$$

в которой принимают меньшее из значений N_b , определенных по формулам (3.1)–(3.3).

При одновременной работе болтов на срез и растяжение их проверяют отдельно на срез и растяжение, при одновременной работе на срез от действия продольной силы и момента – на равнодействующее усилие. При действии на соединение момента, вызывающего сдвиг соединяемых элементов, усилие на болты принимают пропорционально расстояниям от центра тяжести соединения до рассматриваемого болта.



3.1 Расчет соединений на высокопрочных болтах

Соединения на высокопрочных болтах – сдвигоустойчивые соединения, в которых сдвигающие усилия воспринимаются силами трения между соприкасающимися плоскостями, возникающими от натяжения болтов. Широко применяются в качестве монтажных соединений в конструкциях, воспринимающих динамические и вибрационные нагрузки.

Расчетное усилие, воспринимаемое одним высокопрочным болтом на каждую плоскость трения,

$$Q_{bh} = \frac{R_{bh} \cdot \gamma_b \cdot A_{bh} \cdot \mu}{\gamma_h}, \quad (3.5)$$

где R_{bh} – расчетное сопротивление растяжению высокопрочных болтов, $R_{bh} = 0,7R_{bun}$;

μ – коэффициент трения, принимаемый 0,58 – при дробеметной или дробеструйной обработке двух поверхностей дробью без консервации; 0,50 – то же с консервацией, механизацией, распылением цинка или алюминия, а также при обработке одной поверхности дробью с консервацией полимерным клеем и посыпкой карборундовым порошком, а другой – стальными щетками 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_b – коэффициент условий работы соединения, принимаемый в зависимости от количества n болтов: $\gamma_b = 0,8$ при $n < 5$; $\gamma_b = 0,9$ при $5 \leq n \leq 10$; $\gamma_b = 1,0$ при $n \geq 10$;

γ_h – коэффициент надежности, принимаемый по [4].

Количество высокопрочных болтов в соединении с k поверхностями трения соединяемых элементов (распределение усилия между болтами принимается равномерным)

$$n \geq \frac{N}{k \cdot \gamma_c \cdot Q_{bh}}. \quad (3.6)$$

3.2 Примеры

Пример 3.1 – Запроектировать стык листов сечением 500×12 из стали С235 с $R_y = 230$ МПа и $N_b = 420$ МПа. На стык действует растягивающее усилие $N = 1100$ кН. Стык спроектировать симметричным двумя накладками толщиной $t = 8$ мм каждая (рисунок 3.1). Коэффициент работы конструкции $\gamma_c = 1,0$. Стык спроектировать в двух вариантах: на болтах нормальной точности и на высокопрочных болтах.



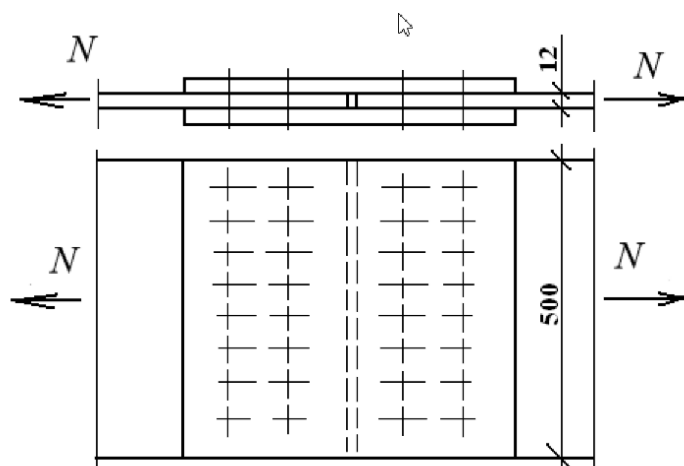


Рисунок 3.1 – К примеру 3.1

Решение

Вариант 1.

Стык осуществляем на болтах нормальной точности диаметром $d = 20$ мм класса прочности 5.8, имеющих $R_{bs} = 200$ МПа. Отверстия для болтов $d = 23$ мм просверлены в листах и накладках по кондукторам (тип В).

Определяем несущую способность одного болта, имеющего два рабочих среза:

– на срез

$$N_b = R_{bs} \cdot \gamma_b \cdot A \cdot n_s = 200 \cdot 0,9 \cdot 3,14 \cdot 2 = 113 \text{ кН};$$

– на смятие листа

$$N_b = R_{bp} \cdot \gamma_b \cdot d \cdot \Sigma t = 42 \cdot 0,9 \cdot 20 \cdot 1,2 = 90,7 \text{ кН},$$

где принято $\Sigma t = t_n = 12$ мм, т. к. $\Sigma t = 2 \cdot 8 = 16$ мм $>$ 12 мм.

Количество болтов на полунакладке рассчитываем следующим образом:

$$n \geq \frac{N}{\gamma_c \cdot N_{\min}} = \frac{1100}{1,0 \cdot 90,7} = 12,1 \text{ шт.}$$

Принимаем два ряда по шесть болтов в каждом (см. рисунок 3.1).

Проверяем несущую способность листа, ослабленного отверстиями для болтов (с учетом упругопластической работы элементов и накладок в зоне стыка путем введения $\gamma_c = 1,1$):

$$N = A \cdot R_y \cdot \gamma_c = (1,2 \cdot 50 - 6 \cdot 2,3) \cdot 23 \cdot 1,1 = 1168 \text{ кН.}$$



Вариант 2.

Осуществляем тот же стык на высокопрочных болтах $d = 20$ мм из стали 40Х «селект», имеющей $R_y = 1100$ МПа с газопламенной очисткой соединяемых поверхностей. Определяем несущую способность одного болта, считая, что разность между номинальными диаметрами болта и отверстия превышает 1 мм и $\gamma_b = 0,85$:

$$Q_{bh} = \frac{R_{bh} \cdot \gamma_b \cdot A_{bh} \cdot \mu \cdot k}{\gamma_h} = \frac{110 \cdot 0,85 \cdot 2,45 \cdot 0,42 \cdot 2}{1,02} = 132 \text{ кН.}$$

Вычисляем количество болтов на полунакладке:

$$n \geq \frac{N}{\gamma_c \cdot Q_{bh}} = \frac{1100}{1,0 \cdot 132} = 8,2 \text{ шт.}$$

Принимаем два ряда по четыре болта в каждом.

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

– брутто

$$A_{\text{бр}} = 1,2 \cdot 50 = 60 \text{ см}^2;$$

– нетто

$$A = 1,2 \cdot (50 - 4 \cdot 2,3) = 48,96 \text{ см}^2;$$

– отношение площадей

$$\frac{A}{A_{\text{бр}}} = \frac{48,96}{60} = 0,82 < 0,85.$$

Условная расчетная площадь сечения листа

$$A_{\text{усл}} = 1,18 \cdot A = 1,18 \cdot 48,96 = 57,77 \text{ см}^2.$$

Проверяем несущую способность листа (без допущения упругопластической работы элементов соединения):

$$N = A_{\text{усл}} \cdot R_y \cdot \gamma_c = 57,77 \cdot 23 \cdot 1,0 = 1328 \text{ кН} > 1100 \text{ кН.}$$

Сравнение вариантов 1 и 2 показывает, что стык на высокопрочных болтах требует меньше болтов и дает более высокую несущую способность соединения.



Пример 3.2 – Рассчитать прикрепление верхнего пояса стропильной фермы к колонне на болтах (рисунок 3.2). Растягивающее расчетное усилие в поясе $N = 10$ т; материал конструкций и болтов ВСтЗпс2.

Решение

Принимаем болты диаметром $d = 18$ мм. $A_{bn} = 1,75$ см².

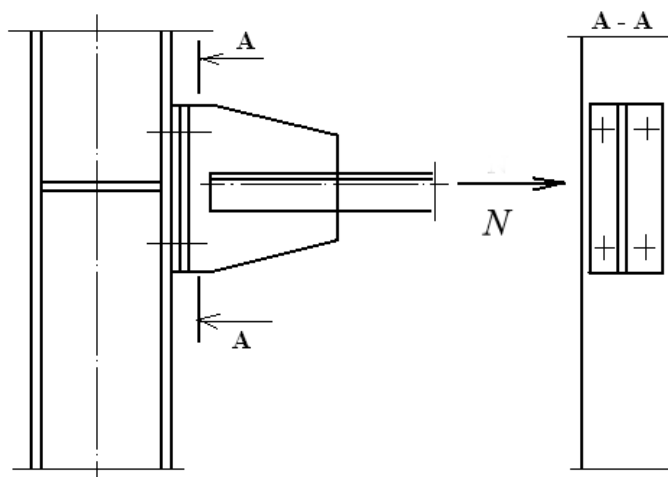


Рисунок 3.2 – К примеру 3.2

Число болтов, необходимое для прикрепления пояса,

$$n = \frac{N}{\gamma_c \cdot N_{\min}},$$

где $N_{\min} = N_b = R_b \cdot A_{bn} = 21,0 \cdot 1,75 = 36,75$ кН/см² – для болтов класса 5.6.

Тогда

$$n = \frac{100}{1,0 \cdot 36,75} = 2,72 \text{ болта.}$$

Принимаем $n = 4$ болта диаметром $d = 18$ мм (для симметричной конструкции).

Задачи для самостоятельного решения

Задача 3.1. Рассчитать соединение двух листов с помощью накладок сечением 600×16 мм из стали С255 МПа. На стык действует растягивающее усилие $N = 1000$ кН. Стык спроектировать симметричным двумя накладками толщиной $t = 10$ мм каждая. Коэффициент работы конструкции $\gamma_c = 1,0$. Стык запроектировать на болтах класса точности А, класса прочности 5.8.

Задача 3.2. Рассчитать соединение двух листов по условию задачи 3.1. Стык запроектировать на высокопрочных болтах.

4 Конструирование и расчет укрупнительного 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 не требуется высококвалифицированной рабочей силы. Однако болтовые соединения более металлоемкие и трудоемкие в изготовлении.

При выполнении укрупнительного 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.

4.1 Пример расчета укрупнительного 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 С245. Расчетный момент в балке $M_{\max} = 3427$ кН·м. Пролет балки равен 12 м. Стык проектируем на расстоянии 1/2 от опоры.

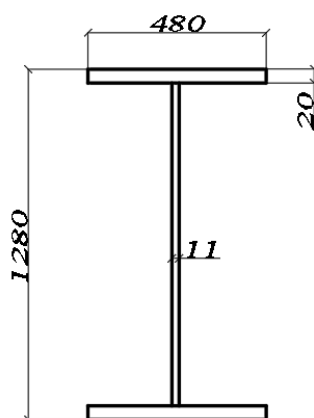


Рисунок 4.1 – Исходное сечение балки

Максимальный расчетный момент в балке $M_{\max} = 3427$ кН·м. Распределим этот момент между стенкой и поясами балки. Момент инерции всего двутавра $I_x = 936822$ см⁴; момент инерции стенки $I_{cm} = 174774$ см⁴, тогда доля момента M_{\max} , приходящаяся на стенку

$$M_{cm} = M_{\max} \cdot \frac{I_{cm}}{I_x}. \quad (4.1)$$

$$M_{cm} = 342700 \cdot \frac{174774}{936822} = 63940 \text{ кН}\cdot\text{см}.$$

Доля момента, приходящаяся на пояса, $M_n = 342700 - 63940 = 278760$ кН·см.

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

Расчет стыка полки главной балки

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

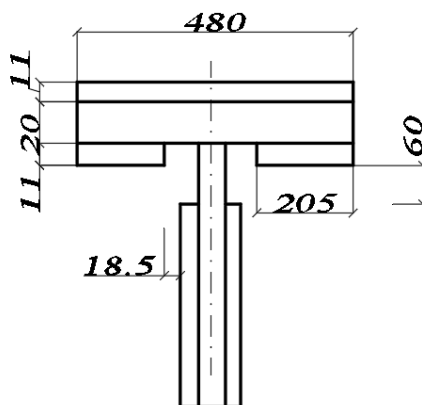


Рисунок 4.2 – К определению размеров накладок

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

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

Раскладываем момент, приходящийся на пояса, на пару сил:

$$N_n = 278760 / 126 = 2212 \text{ кН},$$

где 126 см – расстояние между осями поясов.

Для определения необходимого количества болтов принимаем: способ обработки соединяемых поверхностей – газопламенный; способ регулирования натяжения болтов – по моменту закручивания, $\gamma_h = 1,124$, [4, таблица 36*].

Расчетное усилие, воспринимаемое одной поверхностью трения одного болта,

$$Q_{bh} = \frac{R_{bh} \cdot \gamma_b \cdot A_{bh} \cdot \mu \cdot k}{\gamma_h} = \frac{77 \cdot 1 \cdot 3,52 \cdot 0,42}{1,12} = 101,6 \text{ кН.}$$

Необходимое число болтов в стыке

$$n \geq \frac{N}{\gamma_c \cdot Q_{bh} \cdot \kappa} = \frac{2212}{1,0 \cdot 101,6 \cdot 2} = 10,88,$$

где κ – количество поверхностей трения, в данном примере $\kappa = 2$;

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 [4, таблица 39] (рисунок 4.3).

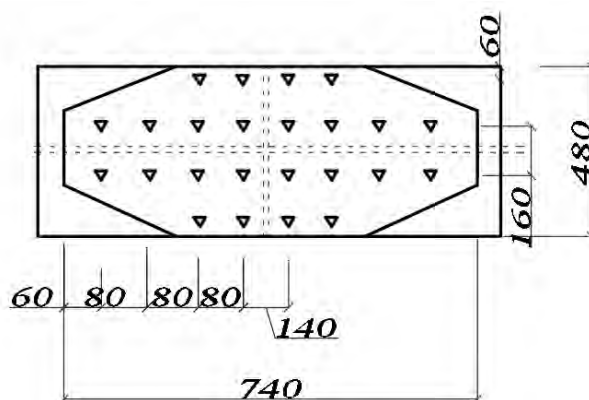


Рисунок 4.3 – Расположение болтов на стыке полки

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

Расчет стыка стенки главной балки

Стыковые накладки на стенке принимаем равными толщине стенки балки – 11 мм, расстояние между накладками полки и стенки – 24 мм (рисунок 4.4). 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, $M_{cm} = 63940$ кН·см. Этот момент уравнивается суммой внутренних пар усилий, действующих на болты, расположенные на стыковой накладке стенки, $N_i \cdot a_i$:

$$M_{cm} = \sum N_i \cdot a_i = mN_1 \cdot a_1 + N_2 \cdot a_2 + \dots,$$

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

N – усилия, воспринимаемые парами болтов;

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

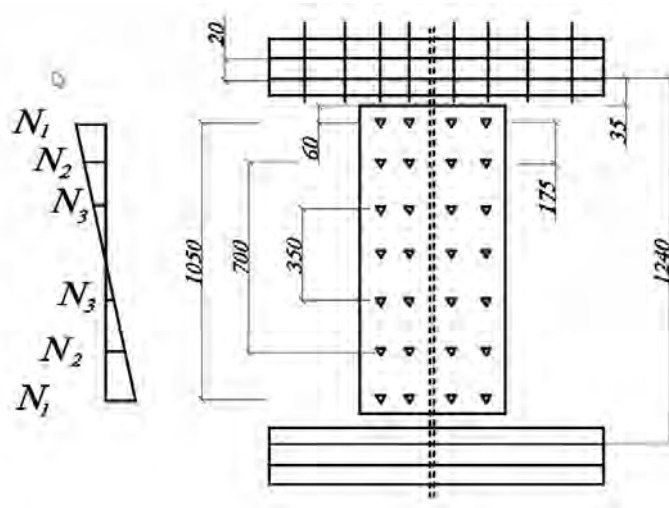


Рисунок 4.4 – Стык стенки главной балки

Примем для стыка стенки те же болты, те же способы обработки поверхностей и способ регулирования натяжения болтов, что и для стыка поясов.

Для определения необходимого количества поясов вычисляем коэффициент α .

$$\alpha = \frac{M_{cm}}{m \cdot k \cdot y_{\max} \cdot Q_{bh} \cdot \gamma_b} = \frac{639,4}{2 \cdot 2 \cdot 1,05 \cdot 101,6} = 1,49,$$

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

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 $\alpha = 1,49$ принимаем семь рядов болтов вдоль накладке стенки, при нечетном количестве горизонтальных рядов болтов центральный ряд попадает на нейтральную ось балки.

Расстояние между центрами болтов

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

Примем семь болтов и шесть расстояний между ними (см. рисунок 4.4). Компонуем стык, размещая болты с одинаковым шагом по накладке, и проверяем прочность наиболее нагруженного болта:

$$N_{b,\max} = \frac{M_{cm} \cdot \alpha_{\max}}{m \cdot k \cdot \sum a_i^2} = \frac{639,4 \cdot 1,05}{2 \cdot 2 \cdot 1,05^2 + 0,7^2 + 0,35^2} = 97,87 \text{ кН} < Q_{bh} = 101,6 \text{ кН.}$$

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.

Список литературы

1 Металлические конструкции. Общий курс: учебник для вузов / Е. И. Беленя [и др.]; под общ. ред. Е. И. Беленя. – 6-е изд., перераб. и доп. – Москва: Стройиздат, 1985. – 560 с.

2 **Мандриков, А. П.** Примеры расчета металлических конструкций: учебное пособие для техникумов / А. П. Мандриков. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва: Стройиздат, 1991. – 431 с.

3 Металлические конструкции: в 3 т. Т. 1. Элементы стальных конструкций: учебное пособие для строительных вузов / В. В. Горев [и др.]; под ред. В. В. Горева. – Москва: Высшая школа, 1997. – 527 с.

4 **СНиП II-23-81.** Стальные конструкции. Нормы проектирования. – Москва: Стройиздат, 1991. – 96 с.

5 **Парлашкевич, В. С.** Проектирование и расчет металлических конструкций рабочих площадок: учебное пособие / В. С. Парлашкевич, А. А. Василькин, О. Е. Булатов. – 3-е изд., перераб. и доп. – Москва: НИУ МГСУ, 2016. – 167 с.

6 **Нехаев, Г. А.** Металлические конструкции в примерах и задачах: учебное пособие / Г. А. Нехаев, З. А. Захарова. – Москва: АСВ, 2010. – 128 с.

