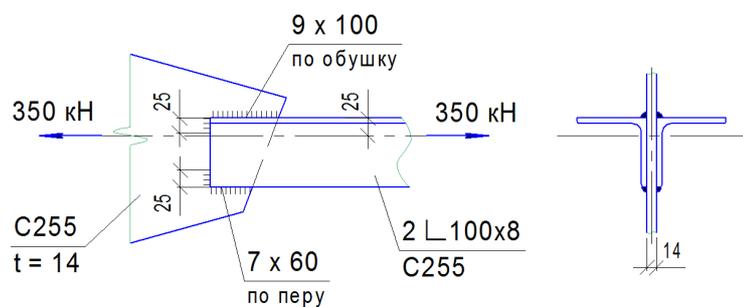


В.В. Пронин

Практические занятия по курсу металлических конструкций

Задания и примеры выполнения

Учебное пособие



Нижний Новгород
2025

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет»

Кафедра металлических конструкций

В.В. Пронин

**Практические занятия
по курсу металлических конструкций**

Задания и примеры выполнения

Утверждено редакционно-издательским советом университета
в качестве учебного пособия

4-е издание, переработанное и дополненное

Нижний Новгород
ННГАСУ
2025

ББК 38.54
П 78
УДК 624.014(075.8)

Печатается в авторской редакции

Рецензенты:

Жегалов Д.В. – старший научный сотрудник научно-исследовательского института механики ФГАОУ ВО «Национального исследовательского Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского»
Пестряков В.П. – директор НПФ «Металлимпресс»

Пронин, В.В. Практические занятия по курсу металлических конструкций. Задания и примеры выполнения : учебное пособие. 4-е изд., переработанное и дополненное / В.В. Пронин ; Министерство образования и науки Российской Федерации, Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет. – Нижний Новгород : ННГАСУ, 2025. – 73 с. – ISBN 978-5-528-00603-1. – Текст : непосредственный.

Пособие выпущено для практического усвоения основ курса металлических конструкций. Приведены содержания упражнений, задания к ним и примеры их выполнения в соответствии с действующими нормативными документами и справочной литературой.

В конце каждого упражнения даны контрольные вопросы по соответствующей теме.

Предназначено для студентов специальности 08.05.01 «Строительство уникальных зданий и сооружений» и направления 08.03.01 «Строительство», профиль «Промышленное и гражданское строительство» на практических занятиях по учебной дисциплине «Металлические конструкции».

ББК 38.54

ISBN 978-5-528-00603-1

© В.В. Пронин, 2025
© ННГАСУ, 2025

Содержание

Предисловие	4
1. Выбор стали и материалов для сварки. Упражнения 1.1; 1.2	4
2. Расчет и конструирование сварных соединений. Упражнения 2.1; 2.2	16
3. Расчет и конструирование болтовых соединений. Упражнения 3.1; 3.2	23
4. Расчет прокатной балки. Упражнение 4	31
5. Расчет и конструирование сварной балки. Упражнение 5	37
6. Расчет центрально сжатых колонн и стоек. Упражнение 6	46
7. Расчет и конструирование элементов ферм из парных уголков. Упражнения 7.1; 7,2	50
Список использованных источников	56
Приложения	58
П.1. Коэффициенты надежности по ответственности	59
П.2. Табл. В.1 СП 16.13330.2017. Нормируемые показатели ударной вязкости проката и труб	59
П.3. Табл. В.2 СП 16.13330.2017. Требования по химическому составу	60
П.4. Табл. В.3 СП 16.13330.2017. Нормативные и расчетные сопротивления \backslash при растяжении, сжатии и изгибе листового, широкополосного универсального, сортового проката и труб	61
П.5. Табл. В.4 СП 16.13330.2017. Нормативные и расчетные сопротивления \backslash при растяжении, сжатии и изгибе фасонного проката в виде двутавров с параллельными гранями полок	62
П.6. Табл. В.5 СП 16.13330.2017. Нормативные и расчетные сопротивления \backslash при растяжении, сжатии и изгибе фасонного проката	63
П.7. Механические свойства листового проката	64
П.8 Механические свойства фасонного проката	66
П.9. Механические свойства стали для двутавров с параллельными гранями полок	67
П.10. Химический состав листового и фасонного проката	68
П.11. Химический состав двутавров с параллельными гранями полок	69
П.12. Риски прокатных уголков	70
П.13. Сокращенный сортамент равнополочных уголков	71
П.14. Сокращенный сортамент прокатных двутавров	72

Предисловие

Первое издание указаний для проведения практических занятий по курсу металлических конструкций было издано автором более сорока лет назад – в 1984 году [1].

В четвертом издании учтены изменения №№ 3, 4 и 5 в СП 16.13330.2017 [1], изменение № 1 в ГОСТ Р 57837-2017 [4], а также новая редакция ГОСТ 27772 [3]. В приложениях добавлена сокращённая выписка из сортамента прокатных двутавров (ГОСТ Р 57837-2017 9 с изм. № 1). В работе №1, вызывающей наибольшее количество вопросов, приведен алгоритм действий для получения требуемого результата.

Настоящее пособие дает указания студентам, обучающимся по специальности 08.05.01 «Строительство уникальных зданий и сооружений» и по направлению 08.03.01 «Строительство», самостоятельно выполняющих практические занятия по курсу «Металлические конструкции». Пособие может использоваться и студентами других специальностей, если изучение основ проектирования металлических конструкций входит в учебные планы.

Выполнение практических занятий позволяет студентам глубже понять суть изучаемого курса: практика – критерий истины. Для выполнения упражнений требуется использовать действующую нормативную литературу, ГОСТы и стандарты.

Упражнения выполняются в аудитории или дома (при дистанционных занятиях) и оформляются в виде отдельных отчетов, сдаваемых на проверку.

Для контроля качества усвоенного материала в конце каждого упражнения приведены контрольные вопросы, ответы на которые можно найти в учебниках, своде правил СП 16.123330.2017, лекциях, а также и в настоящем пособии.

Практическое занятие № 1.

Выбор стали и материалов для сварки.

Упражнения 1.1; 1,2.

Выбор стали для изготовления конструкций и материалов для электродуговой сварки является основным и обязательным этапом проектирования строительных конструкций. От правильности выполнения этого этапа зависят надежность, долговечность и экономичность сооружения.

Упражнение 1.1.

Выбор стали для изготовления конструкций.

Согласно трем цифрам шифра задания (табл. 1.1) для двух видов конструкций требуется выбрать наиболее дешевые стали по ГОСТ 27772-2021 и определить для них основные прочностные характеристики. Результаты процедуры выбора оформить в табличной форме (табл. 1.2).

После введения в действие СП 16.13330. 2017 [1], а именно с 28.08.2017 г., процедура выбора стали претерпела большие изменения. До этого времени в нормативных документах (СНиП II-23-81*, СП 16.13330. 2011) имелись готовые таблицы, по кото-

рым и производился выбор стали. В этих таблицах приводился перечень сталей и указания по их применению в определенных условиях.

В действующем СП 16.13330. 2017 [1] такой таблицы нет, в п. 5.2 предлагается при назначении стали учитывать группу конструкций, расчетную температуру эксплуатации конструкции, требования по ударной вязкости и химическому составу согласно приложению В.

Действующее указание не связывает выбор стали с определенным списком сталей, а позволяет работать с разными ГОСТами и стандартами, в том числе и зарубежными.

Группа конструкций учитывает ответственность здания, категорию конструкции по назначению, по характеру воздействий и другие факторы. В приложении В [1] приведены четыре группы конструкций, для каждой из которых указаны основные особенности работы и перечень самих конструкций. Важными при назначении группы конструкции являются примечания.

Расчетная температура эксплуатации конструкции для конкретного места строительства определяется температурой наружного воздуха наиболее холодных суток обеспеченностью 0,98 согласно табл. 3.1 СП 131.13330. 2018 «Строительная климатология» (для Нижнего Новгорода расчетная температура составляет -38°C). Для выполнения упражнения 1.1 расчетная температура задана.

Ударная вязкость определяет склонность стали к хрупкому (без больших деформаций) разрушению и измеряется работой, затраченной на разрушение стандартного образца под действием удара маятникового копра. Эта работа, отнесенная к площади поперечного сечения образца, имеет размерность Дж/см². Для ужесточения условий испытания и повышения концентрации напряжений в образцах делают надрез. В зависимости от формы надреза (V-образный, U-образный) различают ударную вязкость KCV, KCU. Верхний индекс означает температуру испытаний, например KCV⁻³⁰.

Нормируемые показатели ударной вязкости проката и труб указаны в табл. В.1 [1]. Эта таблица приведена в приложении П.2.

Химический состав стали определяет ее механические свойства. Требования по химическому составу листового и фасонного проката приведены в табл. В.2 [1]. Эта таблица приведена в приложении П.3.

Нормативные и расчетные сопротивления стали определяются по таблицам В.3 [1] (лист и трубы), В.4 [1] (двутавры с параллельными гранями полок), В.5 [1] (фасонный прокат) с учетом толщины проката, указанной в задании. В таблицах В.3 и В.5 расчетные сопротивления R_u и R_y принимаются с учетом γ_m , назначаемого согласно табл. 3 [1]. Таблицы В.3, В.4 и В.5 приведены в приложениях П.4, П.5 и П.6.

Следует обратить внимание на разные списки сталей в таблицах В.3, В.4 и В.5.

Самый большой выбор сталей представляет табл. В.3 (лист), в которой наиболее прочной сталью является сталь С690, для которой $R_{yn} = 690 \text{ Н/мм}^2$.

В табл. В.4 (двутавры с параллельными гранями полок) наиболее прочной сталью является сталь С440Б, для которой $R_{yn} = 440 \text{ Н/мм}^2$ при толщине проката до 20 мм включительно.

В табл. В.5 (фасон) наиболее прочной сталью является сталь С440, для которой $R_{yn} = 440 \text{ Н/мм}^2$ при толщине проката до 10 мм включительно.

Во всех этих таблицах стали располагаются по мере нарастания прочности и стоимости.

В заключение приведем алгоритм действий для выбора наиболее дешевой стали для заданных условий по новой методике.

1. По расчетной температуре эксплуатации и группе конструкций определяется интервал минимальных значений предела текучести стали R_{yn} и требуемая величина ударной вязкости (табл. В.1 [1]).

2. Для сталей с выбранным интервалом предела текучести R_{yn} по табл. В.2 [1] определяются предельные содержания углерода C , фосфора P , серы S и углеродного эквивалента C_{Σ} .

3. В соответствии с типом проката (лист, прокатный двутавр, фасон) и его толщиной по таблицам В.3, В.4 и В.5 [1] по R_{yn} выбирается сталь, расположенная как можно выше по списку.

4. По ГОСТам на соответствующий тип проката (см. приложения П.7, П.8, П.9 настоящей работы) для заданной температуры определяется фактическая величина ударной вязкости, которая должна быть не менее нормируемой величины.

5. Аналогично (см. приложения П.10, П.11) определяется фактическое содержание углерода C , фосфора P , серы S и величина углеродного эквивалента C_{Σ} , которые должны быть не более нормируемых величин.

6. В случае невыполнения условий пунктов. 4 и 5 назначается более качественная сталь.

7. Результаты работы оформляются в виде таблицы.

Задание к упражнениям 1.1 и 1.2

Табл. 1.1

1-я цифра шифра	Вид конструкции. Вид проката	2-я цифра шифра	Расчетная температура, °С	3-я цифра шифра	Толщина проката, мм
1	Подкрановая балка (лист)	1	- 40	1	до 30 мм
	Элемент настила перекрытия (фасон)				до 12 мм
2	Балка рабочей площадки (лист)	2	- 50	2	до 20 мм
	Прогон покрытия (фасон)				до 10 мм
3	Элемент фермы покрытия (фасон)	3	- 60	3	до 16 мм
	Фасонка фермы покрытия (лист)				до 14 мм
4	Элемент оттяжки мачты (фасон)	4	- 45	4	до 20 мм
	Элемент ненагруженный связи (фасон)				до 10 мм
5	Балка перекрытия (прокатный двутавр)	5	- 55	5	до 20 мм
	Фасонка фермы перекрытия (лист)				до 14 мм
6	Элемент пролетного строения транспортно-галереи (прокатный двутавр)	6	- 65	6	до 20 мм
	Конструкция ограждения (фасон)				до 10 мм
7	Опорная плита (лист)	7	- 35	7	до 40 мм
	Элемент ствола антенного сооружения (фасон)				до 20 мм
8	Фасонка фермы покрытия (лист)	8	- 45	8	до 12 мм
	Элемент стенового фахверка (фасон)				до 10 мм
9	Подкрановая балка гидротехнического сооружения (лист)	9	- 45	9	до 30 мм
	Элемент лестницы (лист)				до 10 мм
0	Ригель рамы (фасон)	0	- 50	0	до 20 мм
	Колонна рамы (лист)				до 20 мм

Пример выполнения упражнения 1.1

Шифр 241: выбрать наиболее дешевые стали по ГОСТ 27772-2021 для изготовления балок рабочей площадки (лист, $t \leq 30$ мм) и прогонов покрытия (фасон, $t \leq 12$ мм), эксплуатируемых при расчетной температуре $t^o \geq -45^\circ\text{C}$.

Упражнение оформляется в виде таблицы (табл. 1.2).

Балка рабочей площадки в соответствии с приложением В [1] относится к первой группе конструкций. Указанный в задании вид проката (лист) говорит о том, что конструкция сварная.

По табл. В.1 [1] (или по приложению П.2) определяем нормируемый показатель ударной вязкости KCV.

При расчетной температуре $t^o \geq -45^\circ\text{C}$ для конструкций группы 1 возможно применение сталей с пределом текучести $R_{yn} < 290$ Н/мм² с контролируемой ударной вязкостью $KCV^0 = 34$ Дж/см².

Согласно примечанию к табл. В.1 при температуре испытания $t^o = -20^\circ\text{C}$ фактическая величина ударной вязкости должна быть не менее 34 Дж/см², поэтому в числитель графы 5 табл. 1.2 заносим $KCV^{-20} = 34$ Дж/см² (критичным является испытание при более низкой температуре).

По табл. В.2 [1] (или по приложению П.3) определяем требования по химическому составу стали: минимальное содержание углерода (С), фосфора (Р), серы (S), а также минимальное значение углеродного эквивалента (С_Э).

Для сталей с нормативным сопротивлением (пределом текучести) $R_{yn} < 290$ Н/мм² получим: $C \leq 0,22\%$; $P \leq 0,040\%$; $S \leq 0,025\%$; С_Э - не нормируется. Эти данные также заносим в табл. 1.2 (числители граф 6, 7, 8).

Далее обращаемся к ГОСТ 27772-2021 [3], табл. 4 (или приложение П.4).

Первой подходящей по пределу текучести (нормативному сопротивлению) и толщине проката является сталь С255, для которой $KCV^{-20} = 34$ Дж/см² ($t^o = -20^\circ\text{C}$). Эту цифру заносим в табл. 1.2 (знаменатель графы 5).

Фактический химический состав стали С255 определим также по ГОСТ 27772-2021 [3], табл. 1 (или приложение П.7): $C \leq 0,17\%$; $S \leq 0,025\%$; $P \leq 0,035\%$; С_Э - не нормируется. Эти данные заносим в табл. 1.2 (знаменатели граф 6, 7, 8).

Более дешевая сталь С245 также возможна к применению при условии контроля фактической величины ударной вязкости при $t^o = -20^\circ\text{C}$. Фактический химический состав стали: $C \leq 0,22\%$; $S \leq 0,025\%$; $P \leq 0,040\%$; С_Э - не нормируется.

Однако заметим, что согласно табл. В.3 такая сталь производится толщиной $t \leq 20$ мм, что меньше толщины по заданию $t = 30$ мм.

Сравнивая нормируемые и фактические показатели, **можно сделать вывод о том, что сталь С255, являясь самой дешевой из возможных к применению, удовлетворяет всем требованиям задания.**

Прочностные показатели принятой стали R_{yn} , R_{un} , R_y , R_u определяем по табл. В.3 [1] и заносим в табл. 1.2. Расчетное сопротивление стали на срез на основании принятой для расчета стальных конструкций теории прочности $R_s = 0,58 R_y$.

Прогон покрытия в соответствии с приложением В [1] относится к третьей группе конструкций. Указанный в задании вид проката (фасон) говорит о том, что конструкция горячекатаная, без сварных соединений, поэтому группу конструкций можно принять на единицу ниже.

Вышеизложенное позволяет прогон покрытия отнести к четвертой группе.

При расчетной температуре $t^0 \geq -45^\circ\text{C}$ для конструкций группы 4 возможно применение сталей с пределом текучести $R_{yn} < 290 \text{ Н/мм}^2$ с контролируемой ударной вязкостью $KCV^0 = 34 \text{ Дж/см}^2$, однако согласно примечанию 3 к табл. В.1 [1] испытание при такой температуре производится для сталей, используемых для сооружений с ограниченным сроком службы и пребыванием в них людей.

Согласно примечанию к табл. В.1 при температуре испытания $t^0 = -20^\circ\text{C}$ фактическая величина ударной вязкости должна быть не менее 34 Дж/см^2 , поэтому в числитель графы 5 табл. 1.2 заносим $KCV^{-20} = 34 \text{ Дж/см}^2$.

По табл. В.2 [1] (или по приложению П.3) определяем требования по химическому составу стали: минимальное содержание углерода (С), фосфора (Р), серы (S), а также минимальное значение углеродного эквивалента (C_{Σ}).

Для сталей с нормативным сопротивлением (пределом текучести) $R_{yn} < 290 \text{ Н/мм}^2$ получим: $C \leq 0,22\%$; $P \leq 0,040\%$; $S \leq 0,025\%$; C_{Σ} - не нормируется. Эти данные также заносим в табл. 1.2 (числители граф 6, 7, 8).

Далее обращаемся к ГОСТ 27772-2021 [3], табл. 5 (или приложение П.4).

Первой подходящей по пределу текучести (нормативному сопротивлению) и толщине проката является сталь С245, для которой KCV^{-20} не нормируется, но должен быть по результатам испытания не меньше 34 Дж/см^2 . Эту цифру заносим в табл. 1.2 (знаменатель графы 5).

Фактический химический состав стали С245 определим также по ГОСТ 27772-2021 [3], табл. 1 (или приложение П.7): $C \leq 0,22\%$; $S \leq 0,025\%$; $P \leq 0,040\%$; C_{Σ} – не нормируется. Эти данные заносим в табл. 1.2 (знаменатели граф 5, 7, 8).

Сравнивая нормируемые и фактические показатели, **можно сделать вывод о том, что сталь С245, являясь самой дешевой из возможных к применению, удовлетворяет всем требованиям.**

Прочностные показатели принятой стали R_{yn} , R_{un} , R_y , R_u определяем по табл. В.5 [1] и заносим в таб. 1.2. Расчетное сопротивление стали на срез на основании принятой для расчета стальных конструкций теории прочности $R_s = 0,58 R_y$.

Для анализа влияния **расчетной температуры** выполним выбор стали для тех же конструктивных элементов при более низкой температуре, на пример при $t^0 = -65^\circ\text{C}$ (студентам этого делать не надо).

Балка рабочей площадки, группа 1, конструкция сварная.

По табл. В.1 [1] (или по приложению П.2) определяем нормируемый показатель ударной вязкости KCV.

При расчетной температуре $t^0 < -55^\circ\text{C}$ для конструкций группы 1 требуются стали с пределом текучести $290 \leq R_{yn} < 390 \text{ Н/мм}^2$ с контролируемой ударной вязкостью $KCV^{-40} = 34 \text{ Дж/см}^2$. Эту цифру заносим в табл. 1.2.

По табл. В.2 [1] (или по приложению П.3) определяем требования по химическому составу стали, а также минимальное значение углеродного эквивалента (C_{Σ}).

Для сталей с нормативным сопротивлением (пределом текучести) $290 \leq R_{yn} < 390 \text{ Н/мм}^2$ получим: $C \leq 0,17\%$ (см. примечание 2 к табл. В.2); $P \leq 0,025\%$; $S \leq 0,025$; $C_{\Sigma} = 0,46\%$. Эти данные заносим в табл. 1.2.

Далее обращаемся к ГОСТ 27772-2021 [3], табл. 4 (или приложение П.4).

Первой подходящей по пределу текучести (нормативному сопротивлению) и толщине проката является сталь С355, для которой $KCV^{-40} = 34 \text{ Дж/см}^2$. Эту цифру заносим в табл. 1.2.

Фактический химический состав стали С355 определим также по ГОСТ 27772-2021 [3], табл. 1 (или приложение П.7): $C \leq 0,15\%$; $S \leq 0,025\%$; $P \leq 0,025\%$; $C_{\Sigma} = 0,45\%$. Эти данные заносим в табл. 1.2.

Сравнивая нормируемые и фактические показатели, можно сделать вывод о том, что сталь С355, являясь самой дешевой из возможных к применению, удовлетворяет всем требованиям.

Прочностные показатели принятой стали определяем по табл. В.3 [1] и заносим в табл. 1.2.

Прогон покрытия, группа конструкций 4 (см. выше), сварные соединения отсутствуют.

По табл. В.1 [1] (или по приложению П.2) определяем нормируемый показатель ударной вязкости KCV.

При расчетной температуре $t^0 < -55^{\circ}\text{C}$ для конструкций группы 4 требуются стали с пределом текучести $290 \leq R_{yn} < 390 \text{ Н/мм}^2$ с контролируемой ударной вязкостью $KCV^{-20} = 34 \text{ Дж/см}^2$. Эту цифру заносим в табл. 1.2.

По табл. В.2 [1] (или по приложению П.3) определяем требования по химическому составу стали, а также минимальное значение углеродного эквивалента (C_{Σ}).

Для сталей с нормативным сопротивлением (пределом текучести) $290 \leq R_{yn} < 390 \text{ Н/мм}^2$ получим: $C \leq 0,17\%$ (см. примечание 2 к табл. В.2); $P \leq 0,025\%$; $S \leq 0,025$; $C_{\Sigma} = 0,46\%$. Эти данные заносим в табл. 1.2.

Далее обращаемся к ГОСТ 27772-2021 [3], табл. 5 (или приложение П.10).

Первой подходящей по пределу текучести (нормативному сопротивлению) и толщине проката является сталь С355, для которой $KCV^{-40} = 34 \text{ Дж/см}^2$.

Фактический химический состав стали С355 определим также по ГОСТ 27772-2021 [3], табл. 1 (или приложение П.7): $C \leq 0,17\%$; $S \leq 0,025\%$; $P \leq 0,025\%$; $C_{\Sigma} = 0,45\%$.

Сравнивая нормируемые и фактические показатели, можно сделать вывод о том, что сталь С355, являясь самой дешевой из возможных к применению, удовлетворяет всем требованиям.

Прочностные показатели принятой стали определяем по табл. В.5 [1] и заносим в табл. 1.2.

Общий вывод: более низкая расчетная температура вызывает необходимость применения более качественных и дорогих сталей.

Упражнение 1.2. Выбор материалов для сварки.

Для сталей, выбранных в упражнении 1.1, выбрать наиболее дешевые материалы для производства сварочных работ с помощью ручной, механизированной и автоматической электродуговой сварки плавящимся электродом, а также определить прочностные характеристики сварных швов. Результаты процедуры выбора оформить в табличной форме (табл. 1.3).

Ручная сварка выполняется с помощью отдельных электродов, представляющих из себя металлические стержни, покрытые флюсом в виде обмазки.

Механизированная (полуавтоматическая) сварка выполняется сварочной проволокой, выполняющей роль электрода. Сварочная проволока подается в зону сварки с помощью электропривода с катушки через специальный наконечник. Роль флюса играет инертный газ (углекислый газ, аргон), который защищает сварочную ванну от азота воздуха.

Автоматическая (автоматизированная) сварка под слоем флюса выполняется самоходным устройством (сварочным трактором) также сварочной проволокой, но с добавлением в зону сварки флюса в виде порошка.

Сварочные материалы назначаются в зависимости от нормативного сопротивления (предела текучести) свариваемой стали R_{yn} , группы конструкций и расчетной температуры по табл. Г.1 [1]. Сварочные материалы в списке располагаются по мере нарастания их стоимости.

Вид сварного соединения определяется взаимным расположением свариваемых элементов.

Стыковые соединения выполняются стыковыми сварными швами, расчетное сопротивление которых обозначается R_{wy} . Величина R_{wy} напрямую зависит от расчетного сопротивления свариваемой стали и определяется по табл. 4 [1]. При условии обеспечения контроля качества шва неразрушающими методами $R_{wy} = R_y$ (сжатие, растяжение и изгиб); без обеспечения контроля качества шва $R_{wy} = 0,85 \cdot R_y$ (растяжение, изгиб).

Расчетное сопротивление стыкового сварного шва на срез $R_{ws} = 0,58 R_y$ (табл. 4[1]).

Нахлесточные, угловые и тавровые соединения выполняются угловыми сварными швами. Для этих швов учитываются два вида расчетных сопротивлений:

- расчетное сопротивление по металлу шва R_{wf} ;
- расчетное сопротивление по металлу границы сплавления R_{wz} .

R_{wf} определяется по табл. Г.2 [1] в зависимости от сварочных материалов.

$R_{wz} = 0,45 R_{un}$ (табл. 4 [1]).

Для расчетных угловых швов, соединяющих элементы из стали с пределом текучести $R_y \leq 290 \text{ Н/мм}^2$, в соответствии с п. 14.1.8 [1] сварочные материалы должны удовлетворять следующим условиям:

- механизированная сварка: $R_{wf} > R_{wz}$;
- ручная сварка: $1,1 R_{wz} \leq R_{wf} \leq R_{wz} \beta_z / \beta_f$;

- автоматизированная сварка: $R_{wz} < R_{wf} < R_{wz} \beta_z / \beta_f$,

где β_f и β_z - коэффициенты глубины проплавления шва, зависящие от технологии сварки и катета шва и определяемые по табл. 39 [1].

Пример выполнения упражнения 1.2

Балка рабочей площадки, сталь С255, $R_y = 230 \text{ Н/мм}^2$, $R_{un} = 370 \text{ Н/мм}^2$.

По табл. Г.1 назначаем сварочные материалы.

Автоматическая сварка под флюсом:

- сварочная проволока Св-08А;
- флюс АН-348-А.

Механизированная сварка в среде углекислого газа:

- сварочная проволока Св-08Г2С.

Ручная сварка:

- электроды Э42.

Прочностные показатели сварного шва:

$R_{wy} = R_y = 230 \text{ Н/мм}^2$ (сжатие); $R_{wy} = 0,85 R_y = 195 \text{ Н/мм}^2$ (растяжение);

$R_{ws} = 0,58 R_y = 133 \text{ Н/мм}^2$;

$R_{wf} = 180 \text{ Н/мм}^2$ (Св-08А, Э42); $R_{wf} = 215 \text{ Н/мм}^2$ (Св-08Г2С);

$R_{wz} = 0,45 R_{un} = 166 \text{ Н/мм}^2$.

Считая сварные расчетными, выполним проверку правильности назначения сварочных материалов:

- механизированная сварка: $R_{wf} = 215 \text{ Н/мм}^2 > R_{wz} = 166 \text{ Н/мм}^2$ – проверка проходит;

- ручная сварка: $\beta_f = 0,7$; $\beta_z = 1,0$;

$1,1 R_{wz} = 1,1 \cdot 166 = 182,6 \text{ Н/мм}^2 > R_{wf} = 180 \text{ Н/мм}^2 < R_{wz} \beta_z / \beta_f = 166 \cdot 1,0 / 0,7 = 237,1 \text{ Н/мм}^2$ - проверка не проходит;

переходим с электродов Э42 на электроды Э46, $R_{wf} = 200 \text{ Н/мм}^2$;

$1,1 R_{wz} = 1,1 \cdot 166 = 182,6 \text{ Н/мм}^2 > R_{wf} = 200 \text{ Н/мм}^2 < R_{wz} \beta_z / \beta_f = 166 \cdot 1,0 / 0,7 = 237,1 \text{ Н/мм}^2$ - проверка проходит;

- автоматизированная сварка (положение шва – нижнее, катет шва 3-8 мм, диаметр сварочной проволоки $d = 1,4-2 \text{ мм}$): $\beta_f = 0,9$; $\beta_z = 1,05$;

$R_{wz} = 166 \text{ Н/мм}^2 < R_{wf} = 180 \text{ Н/мм}^2 < R_{wz} \beta_z / \beta_f = 166 \cdot 1,05 / 0,9 = 193,6 \text{ Н/мм}^2$
- проверка проходит.

Заносим сварочные материалы и прочностные показатели сварного шва в табл. 1.3 (из двух значений R_{wf} в запас выберем меньшую величину).

Прогон покрытия, сталь С245, $R_y = 240 \text{ Н/мм}^2$, $R_{un} = 370 \text{ Н/мм}^2$.

По табл. Г.1 назначаем сварочные материалы.

Автоматическая сварка под флюсом:

- сварочная проволока Св-08А;
- флюс АН-348-А.

Механизированная сварка в среде углекислого газа:

- сварочная проволока Св-08Г2С.

Ручная сварка:

- электроды Э42.

Прочностные показатели сварного шва:

$$R_{wy} = R_y = 240 \text{ Н/мм}^2 \text{ (сжатие)}; R_{wy} = 0,85 R_y = 204 \text{ Н/мм}^2 \text{ (растяжение)};$$

$$R_{ws} = 0,58 R_y = 139 \text{ Н/мм}^2;$$

$$R_{wf} = 180 \text{ Н/мм}^2 \text{ (Св-08А, Э42)}; R_{wf} = 215 \text{ Н/мм}^2 \text{ (Св-08Г2С)};$$

$$R_{wz} = 0,45 R_{un} = 166 \text{ Н/мм}^2.$$

Считая сварные расчетными, выполним проверку правильности назначения сварочных материалов:

- механизированная сварка: $R_{wf} = 215 \text{ Н/мм}^2 > R_{wz} = 166 \text{ Н/мм}^2$ – проверка проходит;

- ручная сварка: $\beta_f = 0,7; \beta_z = 1,0;$

$$1,1 R_{wz} = 1,1 \cdot 166 = 182,6 \text{ Н/мм}^2 > R_{wf} = 180 \text{ Н/мм}^2 < R_{wz} \beta_z / \beta_f = 166 \cdot 1,0 / 0,7 = 237,1 \text{ Н/мм}^2 \text{ - проверка не проходит};$$

переходим с электродов Э42 на электроды Э46, $R_{wf} = 200 \text{ Н/мм}^2$;

$$1,1 R_{wz} = 1,1 \cdot 166 = 182,6 \text{ Н/мм}^2 > R_{wf} = 200 \text{ Н/мм}^2 < R_{wz} \beta_z / \beta_f = 166 \cdot 1,0 / 0,7 = 237,1 \text{ Н/мм}^2 \text{ - проверка проходит};$$

- автоматизированная сварка (положение шва – нижнее, катет шва 3-8 мм, диаметр сварочной проволоки $d = 1,4-2 \text{ мм}$): $\beta_f = 0,9; \beta_z = 1,05;$

$$R_{wz} = 166 \text{ Н/мм}^2 < R_{wf} = 180 \text{ Н/мм}^2 < R_{wz} \beta_z / \beta_f = 166 \cdot 1,05 / 0,9 = 193,6 \text{ Н/мм}^2 \text{ - проверка проходит.}$$

Заносим сварочные материалы и прочностные показатели сварного шва в табл. 1.3 (из двух значений R_{wf} в запас выберем меньшую величину).

Выбор стали для изготовления конструкций

Табл. 1.2

Вид конструкции. Вид проката	Группа конструкций	Расчетная температура, °С	Толщина проката, мм	Показатель ударной вязкости KCV, Дж/см ² , норм./ факт.	Химический состав предельное / фактическое содержание, %					Принятая сталь	Прочностные показатели, Н/мм ²				
					C	P	S	P + S	C _э		R _{un}	R _u	R _{yn}	R _y	R _s *)
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Балка рабочей площадки (лист)	1	- 45	≤ 30	$\frac{34^{-20}}{34^{-20}}$	$\frac{0,22}{0,17}$	$\frac{0,040}{0,035}$	$\frac{0,025}{0,025}$	-	не норм.	C255	370	360	235	230	133*)
Прогон покрытия (фасон)	4		≤ 12	$\frac{34^0}{34^0}$	$\frac{0,22}{0,22}$	$\frac{0,040}{0,040}$	$\frac{0,025}{0,025}$	-	не норм.	C245	370	360	245	240	139*)
Балка рабочей площадки (лист)	1	- 65	≤ 30	$\frac{34^{-40}}{34^{-40}}$	$\frac{0,17}{0,15}$	$\frac{0,025}{0,025}$	$\frac{0,025}{0,025}$	-	$\frac{0,46}{0,45}$	C355	490	480	345	340	197*)
Прогон покрытия (фасон)	4		≤ 12	$\frac{34^{-20}}{34^{-20}}$	$\frac{0,14}{0,14}$	$\frac{0,025}{0,025}$	$\frac{0,025}{0,025}$	-	$\frac{0,46}{0,45}$	C355	490	480	355	350	203*)

*) $R_s = 0,58 R_y$

Выбор сварочных материалов для изготовления конструкций

Табл. 1.3

Вид конструкции	Группа конструкций	Расчетная температура, °С	Сталь	R _{уп} , Н/мм ²	R _{ин} , Н/мм ²	Сварочные материалы			Прочностные показатели, Н/мм ²			
						Проволока (автоматическая сварка под флюсом) / Флюс	Проволока (механизированная сварка в углекислом газе)	Электрод (ручная сварка)	R _{wy} , сжатие / растяж.	R _{ws}	R _{wf}	R _{wz}
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Балка рабочей площадки	1	- 45	C255	235	370	<u>Св-08А</u> АН-348-А	Св-08Г2С	Э46 ^{х)}	$\frac{230}{195}$	133	180	166
Прогон покрытия	4		C245	245	370	<u>Св-08А</u> АН-348-А	Св-08Г2С	Э46 ^{х)}	$\frac{240}{204}$	139	180	166

^{х)} для расчетных швов

Контрольные вопросы
к практическому занятию № 1

1. Какие факторы влияют на выбор строительной стали.
2. В зависимости от чего конструкции различают по группам.
3. Как определить расчетную температуру эксплуатации конструкции.
4. Влияет ли температурный режим эксплуатации сооружения (отапливаемое, неотапливаемое) на выбор стали.
5. Влияние отсутствия расчетных сварных соединений на выбор сталей.
6. Можно ли принимать более качественные стали, чем минимально необходимые.
7. Что означает цифра в обозначении стали С255.
8. Что означает последняя цифра в обозначении стали С355-1.
9. Что такое $R_{лт}$ и $R_{уп}$ и как они определяются.
10. Что такое R_u и R_y , как они определяются и как связаны с $R_{лт}$ и $R_{уп}$.
11. Что такое R_s и как оно определяется.
12. Как и почему влияет толщина проката на его прочностные характеристики.
13. Какие факторы влияют на выбор материалов для электродуговой сварки.
14. Что означает буква «А» в типе электродов Э42А.
15. Как обозначаются и определяются расчетные характеристики наплавленного металла стыковых и угловых швов.

Практическое занятие № 2.
Расчет и конструирование сварных соединений.
Упражнения 2.1; 2.2.

Электродуговая сварка в настоящее время является основным способом соединения деталей при изготовлении стальных конструкций.

Цель данного занятия – получить практические навыки конструирования и расчета стыковых и угловых сварных швов.

Упражнение 2.1.
Расчет стыкового шва.

Согласно трем цифрам шифра задания (табл. 2.1) проверить прочность стыкового шва, соединяющего два стальных листа на совместное действие в плоскости листов изгибающего момента M и поперечной силы Q . Сварочные работы производятся без физического контроля качества швов. Конструкция сварного стыка показана на рис. 2.1.

Задание к упражнению 2.1

Табл. 2.1

1-я цифра шифра	Сталь	M , кНм	Группа констр.	2-я цифра шифра	Q , кН	Расч. темпер., °С	3-я цифра шифра	Сечение листов $t \times h$, мм	Вид сварки
1	C550	200	1	1	400	- 38	1	8 x 1000	ручн.
2	C245	300	2	2	500	- 48	2	8 x 1100	механ.
3	C355-К	400	3	3	600	- 50	3	8 x 1200	ручн.
4	C255	500	4	4	700	- 52	4	8 x 1300	механ.
5	C440	600	1	5	800	- 56	5	8 x 1400	ручн.
6	C355	250	2	6	450	- 30	6	10 x 1000	механ.
7	C345К	350	3	7	550	- 44	7	10 x 1100	ручн.
8	C355П	450	4	8	650	- 54	8	10 x 1200	механ.
9	C590	550	1	9	750	- 60	9	10 x 1300	ручн.
0	C390	650	2	0	850	- 65	0	10 x 1400	механ.

Пример выполнения упражнения 2.1

Проверить прочность стыкового шва согласно заданию (табл. 2.1, шифр 760).

Расчетные усилия: $M = 350$ кНм; $Q = 450$ кН.

Конструкция группы 3, расчетная температура $t^0 \geq - 30^0\text{C}$.

Сечение свариваемых листов $t \times h = 10 \times 1400$ мм, сталь С345.
Сварка механизированная.

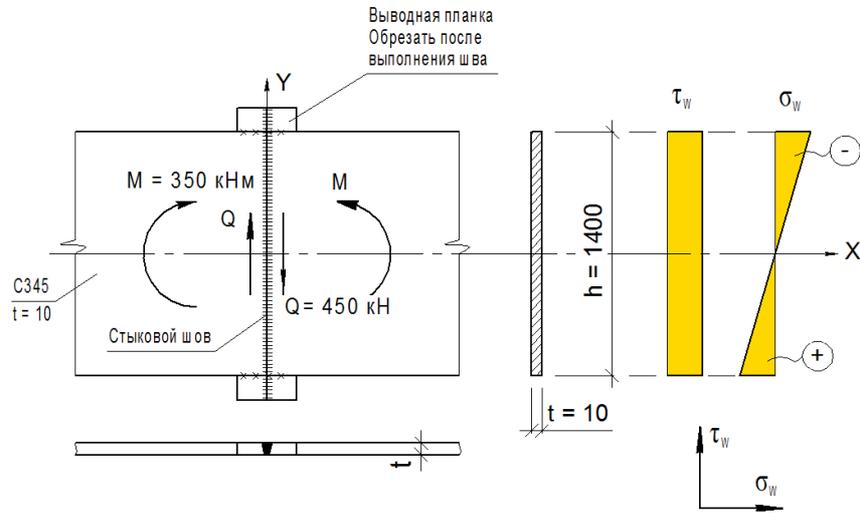


Рис. 2.1. К расчету стыкового шва.

По табл. Г.1 [1] для сварки стали С345 ($R_y = 340 \text{ кН/мм}^2 = 34 \text{ кН/см}^2$, табл. В.3 [1]) механизированной сваркой в среде углекислого газа принимается сварочная проволока Св-08Г2С.

Расчетные характеристики металла стыкового сварного шва:

$R_{wy} = R_y = 34 \text{ кН/см}^2$ – при гарантии полного провара и физических методов контроля качества шва, а также при сжатии;

$R_{wy} = 0,85 R_y = 0,85 \cdot 34 = 28,9 \text{ кН/см}^2$ – без физических методов контроля качества шва, а также при растяжении.

Проверка прочности стыкового шва производится по приведенным напряжениям согласно IY (энергетической) теории прочности по тем же правилам, что и основного металла, но с заменой R_y на R_{wy} .

Геометрические характеристики сварного шва:

- расчетная длина шва $l_w = h - 2t$ (шов без подкладок); $l_w = h$ (шов с подкладками);

$$l_w = h - 2t = 140 - 2 \cdot 1 = 138 \text{ см};$$

- площадь сечения шва $A_w = t \cdot l_w = 1 \cdot 138 = 138 \text{ см}^2$;

- момент сопротивления шва относительно оси X $W_{wx} = t l_w^2 / 6 = 1 \cdot 138^2 / 6 = 3174 \text{ см}^3$.

Напряжения от поперечной силы τ_w распределяются по длине шва равномерно:

$$\tau_w = Q / A_w = 450 / 138 = 3,26 \text{ кН/см}^2.$$

Напряжения от момента σ_w распределяются по высоте сечения по линейному закону, принимая максимальные значения в крайних волокнах:

$$\sigma_w = M / W_{wx} = 350 \cdot 100 / 3174 = \pm 11,03 \text{ кН/см}^2.$$

Проверка прочности наиболее напряженных волокон сечения шва по приведенным напряжениям:

$$\sigma_{red} = \sqrt{\sigma_w^2 + 3\tau_w^2} = \sqrt{11,03^2 + 3 \cdot 3,26^2} = 12,39 \text{ кН/см}^2 < 1,15R_{wy}, \gamma_c = 1,15 \cdot 28,9 \cdot 1 = 33,24 \text{ кН/см}^2$$

Прочность сварного шва обеспечена.

Если прочность сварного шва не обеспечена, то следует:

- перейти на шов с подкладками, что увеличит расчетную длину шва l_w ;
- применить физический метод контроля качества шва, что увеличит R_{wy} ;
- увеличить ширину h или толщину t свариваемых листов, что приведет к увеличению геометрических характеристик сварного шва.

Упражнение 2.2.

Конструирование и расчет соединения угловыми швами.

Согласно трем цифрам шифра задания (табл. 2.2) рассчитать и сконструировать сварное соединение парных равнобоких уголков с фасонкой (листом), нагруженное центрально приложенной силой. По результатам расчета выполнить чертеж узла (пример показан на рис. 2.2).

Результатом расчета соединения являются минимально необходимые длины сварных швов заданной высоты по обушку и по перу уголка.

Для угловых швов, размеры которых установлены расчетом, при сварке сталей с $R_{yn} \leq 290 \text{ Н/мм}^2$ следует применять сварочные материалы, удовлетворяющие условиям (п. 14.1.8):

$$\begin{aligned} R_{wf} > R_{wz} & \text{ - при механизированной сварке;} \\ 1,1 R_{wz} < R_{wf} \leq R_{wz} \beta_z / \beta_f & \text{ - при ручной сварке;} \\ R_{wz} < R_{wf} < R_{wz} \beta_z / \beta_f & \text{ - при автоматизированной сварке,} \end{aligned}$$

где β_f и β_z - коэффициенты глубины проплавления при расчете по металлу шва и металлу границы сплавления соответственно, определяются по табл. 39 [1] в зависимости от вида сварки, положения шва в пространстве и высоты катета шва.

Размеры сварных угловых швов должны удовлетворять требованиям п. 14.1.7 [1].

Главной характеристикой углового шва является высота его катета k_f .

Для компактности соединения длины швов должны быть как можно короче, что достигается увеличением k_f . Однако значение $k_{f,max}$ ограничено величиной $1,2 t_{min}$, где t_{min} - минимальная толщина свариваемых элементов. Превышение $k_{f,max}$ может привести к пережогу более тонкой детали.

Нерасчетные и малонагруженные соединения для предотвращения коробления деталей при сварке выполняются швами минимальной высоты $k_{f,min}$. Значения $k_{f,min}$ принимаются по табл. 38 [1] в зависимости от типа соединения и толщины более толстого из свариваемых элементов t_{max} . Снижение k_f по сравнению с $k_{f,min}$ приведет к непрочности соединения.

Дополнительно существует ограничение высоты катета шва по перу уголка $k_{f,II}$. Шов не может быть выше толщины полки уголка t , а с учетом радиуса закругления кромки - еще меньше: $k_{f,II} \leq 0,9 t$. В связи с этим катеты швов по обушку и по перу могут различаться.

Назначенные высоты швов должны быть кратны 1 мм.

Накладываются ограничения и на длину углового сварного шва.

Минимальная длина шва ограничивается величиной $4 k_f$ или 40 мм (что больше). При меньшей длине это не шов, а прихватка (временное нерасчетное соединение).

Максимальная длина флангового углового шва равна $85 \beta k_f$, за исключением случаев, когда усилие действует на всем протяжении шва (на пример, поясные швы сварных двутавров).

После назначения сварочных материалов, катетов швов по обушку и по перу, а также определения расчетных сопротивлений R_{wf} и R_{wz} можно определить расчетную длину швов по обушку и по перу.

Уголок – несимметричный профиль, у которого центр тяжести смещен к обушке; поэтому на шов по обушку будет действовать усилие больше, а на шов по перу – меньше. Доли полного усилия составят $(b - z_o) / b$ (на обушок) и z_o / b (на перо), где z_o – расстояние от обушка до центра тяжести уголка (см. сортамент уголков по ГОСТ 8509-93). Для инженерных расчетов эти величины округлены до 0,7 и 0,3 соответственно.

Длина шва по обушку для каждого из двух уголков при расчетах по металлу шва и по металлу границы сплавления

$$l_{wf(z),Ob} = \frac{0,7N\gamma_n}{2\beta_{f(z)}k_{f,Ob}R_{f(z)}\gamma_c} + 1 \text{ см}.$$

Длина шва по перу для каждого из двух уголков при расчетах по металлу шва и по металлу границы сплавления

$$l_{wf(z),П} = \frac{0,3N\gamma_n}{2\beta_{f(z)}k_{f,П}R_{f(z)}\gamma_c} + 1 \text{ см}.$$

Т.к. вид конструкции не указан, то коэффициент условий работы $\gamma_c = 1$.

Добавление 1 см компенсирует дефекты шва в начале и в конце сварки.

Вычисление по каждой формуле производится дважды, в расчет берется большая величина.

Окончательно длины швов округляются в большую сторону кратно 10 мм.

Задание к упражнению 2.2

Табл. 2.2

1-я цифра шифра	Уголки	Сталь	Расчетная температур., °С	2-я цифра шифра	N , кН	Группа конструкций	Класс сооружения	3-я цифра шифра	Толщина фанонки, t_f , мм	Вид сварки
1	75 x 6	C345K	- 38	1	400	1	КС-1	1	6	ручн.
2	75 x 8	C245	- 48	2	450	2	КС-2	2	8	механ.
3	80 x 6	C345K	- 60	3	220	3	КС-3	3	8	ручн.
4	80 x 8	C255	- 45	4	270	4	КС-1	4	10	механ.
5	90 x 6	C390	- 54	5	300	1	КС-2	5	8	ручн.
6	90 x 8	C355	- 65	6	350	2	КС-3	6	10	механ.
7	100 x 8	C255	- 35	7	420	3	КС-1	7	10	ручн.
8	100 x 10	C245	- 46	8	470	4	КС-2	8	12	механ.
9	125 x 10	C355-1	- 45	9	280	1	КС-3	9	14	ручн.
0	125 x 12	C255	- 52	0	310	2	КС-1	0	14	механ.

Пример выполнения упражнения 2.2

Рассчитать и сконструировать сварное соединение двух уголков $b \times t = 100 \times 8$ с фанонкой толщиной $t_f = 14$ мм при следующих данных (табл. 2.2, шифр 760):

сталь C255; расчетная температура $t^o \geq -35^\circ\text{C}$; $N = 350$ кН; группа конструкций – 2; класс сооружения КС-3 ($\gamma_n = 1,1$); вид сварки – механизированная; диаметр сварочной проволоки $d = 2$ мм.

Свариваемый материал – сталь C255 (фанонка – листовой прокат, уголки – фанонный прокат).

Фанонка: $R_{yn} = 245 \text{ Н/мм}^2 = 24,5 \text{ кН/см}^2$, $R_{un} = 370 \text{ Н/мм}^2 = 37 \text{ кН/см}^2$ ($t = 10\text{-}20$ мм, табл. В.3 [1]).

Уголки: $R_{yn} = 255 \text{ Н/мм}^2 = 25,5 \text{ кН/см}^2$, $R_{un} = 380 \text{ Н/мм}^2 = 38 \text{ кН/см}^2$ ($t = 4\text{-}10$ мм, табл. В.5 [1]).

В случае разных значений R_{yn} и R_{un} в расчет принимается меньшая величина.

Сварочный материал – сварочная проволока Св-08Г2С (табл. Г.1 [1]).

$R_{wf} = 215 \text{ Н/мм}^2 = 21,5 \text{ кН/см}^2$ (табл. Г.2 [1]);

$R_{wz} = 0,45 \cdot R_{un} = 0,45 \cdot 37 = 16,65 \text{ кН/см}^2$ (табл. 4 [1]).

$R_{wf} = 21,5 \text{ кН/см}^2 > R_{wz} = 16,65 \text{ кН/см}^2$ (п. 14.1.8 [1], сварка механизированная).

Назначим катеты швов:

- по обушку $k_{f,об} \leq 1,2 t_{min} = 1,2 \cdot 8 = 9,6$ мм; принимаем $k_{f,об} = 9$ мм = 0,9 см;

- по перу $k_{f,II} \leq 0,9 t = 0,9 \cdot 8 = 7,2$ мм; принимаем $k_{f,II} = 7$ мм.

Назначенные катеты швов больше $k_{f,min} = 6$ мм (табл. 38 [1], тип соединения - нахлесточное, $T = t_{\phi} = 14$ мм).

Коэффициенты глубины проплавления для шва высотой 9 мм:

$\beta_f = 0,8$; $\beta_z = 1,0$; (табл. 39 [1], положение шва горизонтальное).

Коэффициенты глубины проплавления для шва высотой 7 мм:

$\beta_f = 0,9$; $\beta_z = 1,05$; (табл. 39 [1], положение шва горизонтальное).

Длины швов по обушке:

- при расчете по металлу шва

$$l_{wf,Ob} = \frac{0,7N\gamma_n}{2\beta_f k_{f,Ob} R_{wf} \gamma_c} + 1 \text{ см} = \frac{0,7 \cdot 350 \cdot 1,1}{2 \cdot 0,8 \cdot 0,9 \cdot 21,5 \cdot 1} + 1 = 8,7 + 1 = 9,7 \approx 10 \text{ см};$$

- при расчете по металлу границы сплавления

$$l_{wf,Ob} = \frac{0,7N\gamma_n}{2\beta_z k_{f,Ob} R_{wz} \gamma_c} + 1 \text{ см} = \frac{0,7 \cdot 350 \cdot 1,1}{2 \cdot 1 \cdot 0,9 \cdot 16,65 \cdot 1} + 1 = 9 + 1 = 10 \text{ см};$$

принимаем шов по обушке $k_{f,Ob} \times l_{w,Ob} = \underline{9 \times 100 \text{ мм}}$.

Длины швов по перу:

- при расчете по металлу шва

$$l_{wf,II} = \frac{0,3N\gamma_n}{2\beta_f k_{f,II} R_{wf} \gamma_c} + 1 \text{ см} = \frac{0,3 \cdot 350 \cdot 1,1}{2 \cdot 0,9 \cdot 0,7 \cdot 21,5 \cdot 1} + 1 = 4,3 + 1 = 5,3 \approx 6 \text{ см};$$

- при расчете по металлу границы сплавления

$$l_{wf,II} = \frac{0,3N\gamma_n}{2\beta_z k_{f,II} R_{wz} \gamma_c} + 1 \text{ см} = \frac{0,3 \cdot 350 \cdot 1,1}{2 \cdot 1,05 \cdot 0,7 \cdot 16,65 \cdot 1} + 1 = 4,8 + 1 = 5,8 \approx 6 \text{ см};$$

принимаем шов по перу $k_{f,II} \times l_{w,II} = \underline{7 \times 60 \text{ мм}}$.

Полученные длины швов больше $l_{w,min} = 40$ мм и меньше $l_{w,max} = 85 \beta_f k_f = 85 \cdot 0,8 \cdot 0,9 = 61,2$ см (по обушке) или $85 \cdot 0,9 \cdot 0,7 = 53,6$ см (по перу).

По полученным данным выполним чертёж узла (рис. 2.2). На этом рисунке размер $z_o = 27,5$ мм округлен до 25 мм (все размеры должны быть кратны 5 мм). Швы длиной 25 мм на торцах уголков выполняются конструктивно, для лучшего включения в работу расчетных швов.

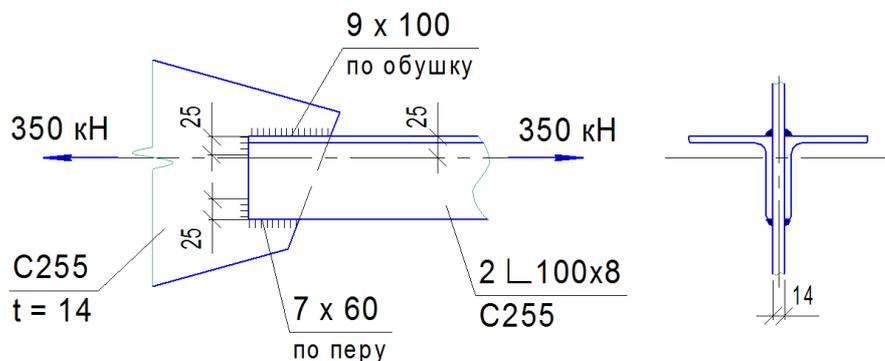


Рис. 2.2. К расчету угловых швов.

Контрольные вопросы к практическому занятию № 2

1. Как определить расчетные сопротивления R_{wy} и R_{ws} для стыковых швов.
2. Как принимают расчетные толщину и длину стыкового шва.
3. Когда требуется разделка кромок соединяемых стыковым швом деталей.
4. Как при проверке прочности стыкового шва учитывается совместное действие изгибающего момента и поперечной силы.
5. Как определяют расчетные сопротивления R_{wf} и R_{wz} .
6. Каков механизм разрушения углового шва, почему при его расчете используют два расчетных сопротивления.
7. Что такое лобовой и фланговый угловой шов, есть ли разница в их расчетах.
8. Как принимается высота катета углового шва. Ограничения сверху ($k_{f,max}$) и снизу ($k_{f,min}$).
9. Как принимается расчётная длина углового шва. Какая длина шва указывается на чертеже.
10. Ограничение на максимальную длину флангового углового шва.
11. Ограничение на минимальную длину углового шва. Какая длина шва указывается на чертеже.
12. Что указывается на чертеже для расчетных угловых швов.
13. Какие специальные конструктивные меры принимаются для сварных соединений, воспринимающих динамические и вибрационные нагрузки.

Практическое занятие № 3.

Расчет и конструирование болтовых соединений.

Упражнения 3.1; 3,2.

Болтовые соединения чаще всего применяются в монтажных соединениях, выполняемых на строительной площадке.

В строительстве для расчетных соединений применяют обычные болты классов точности А и В (повышенной и нормальной точности соответственно). Соединения на таких болтах разрушаются от среза болтов или от смятия болтами соединяемых элементов.

Диаметр отверстий d для болтов класса точности А больше диаметра самих болтов d_b на $0,25 \div 0,3$ мм, отверстия сверлятся.

Для болтов класса прочности В эта разница составляет $1 \div 3$ мм, отверстия продавливаются.

Наиболее часто применяемые в строительстве диаметры болтов $d_b = 16; 18; 20; 22; 24; 27; 30$ мм.

Прочность болтов определяется их классом прочности. В соответствии с [1] применяются болты пяти классов прочности: 5.6; 5.8; 8.8; 10.9; 12.9.

Первая цифра класса прочности, умноженная на 10, означает минимальное временное сопротивление материала болта в кН/см^2 .

Произведение первой цифры на вторую – предел текучести материала болта в кН/см^2 .

Вторая цифра, умноженная на 10 – отношение предела текучести к временному сопротивлению материала болта в процентах.

Соединения на обычных болтах податливы, т.к. для включения в работу должны проработаться зазоры между болтами и стенками отверстий.

Болты изготавливают по ГОСТ Р ИСО 4014-2013, гайки – по ГОСТ ISO 4032-2014.

Современным видом болтовых соединений являются соединения на высокопрочных болтах, которые теперь называются болтами с контролируемым натяжением. Неиспользуемая способность соединения в этом случае обеспечивается силами трения между соединяемыми элементами, поэтому такие соединения называют фрикционными. Сдвиги в соединении не допускаются, поэтому появляется название «сдвигоустойчивые соединения».

Высокопрочные болты имеют класс точности В, разница между диаметрами болтов и отверстий составляет $1 \div 6$ мм.

Материалом для всех высокопрочных болтов служат легированные термообработанные стали, позволяющие обеспечивать достаточное натяжение соединения.

Высокопрочные болты и гайки изготавливают по ГОСТ Р 52643-2006, ГОСТ Р 52644-2006, ГОСТ Р 52645-2006. Кроме того, с 2015 г. действует ГОСТ 32484.3-2013 «Болтокомплекты высокопрочные для предварительного натяжения конструкционные. Система HR – комплекты шестигранных болтов и гаек».

Болты всех видов в прокатных профилях размещаются по рискам, учитывающих геометрию профиля и размеры инструментов для выполнения соединения. Риски для прокатных уголков приведены в приложении П.9, для других профилей – см. ГОСТ 24839-2012. Здесь же указаны максимально возможные диаметры отверстия d_{max} .

Результатом расчета болтового соединения является определение минимального количества болтов, а также назначение размеров для размещения болтов.

Тип обычных болтов по классу прочности выбирается по табл. Г.3 [1] в зависимости от расчетной температуры, ориентации нагрузки относительно оси болта (срез, растяжение), а также от того, рассчитывается или не рассчитывается соединение на усталость.

Для определения количества болтов необходимо определить несущую способность одного болта.

Расчетное усилие, воспринимаемое одним обычным болтом:

при его срезе $N_{bs} = R_{bs} A_b n_s \gamma_b \gamma_c$;

при смятии соединяемых деталей $N_{bp} = R_{bp} d_b \Sigma t \gamma_b \gamma_c$,

где R_{bs} – расчетное сопротивление одноболтового соединения на срез, определяется по табл. Г.5 [1] в зависимости от класса прочности болтов;

R_{bp} – расчетное сопротивление смятию элементов, соединяемых болтами; определяется по табл. Г.6 [1] в зависимости от временного сопротивления стали соединяемых элементов R_{un} ;

A_b – площадь сечения болта брутто (табл. Г.9 [1]);

d_b – наружный диаметр болта;

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

n_s – число расчетных срезов одного болта;

γ_b – коэффициент условий работы болтового соединения, определяемый по табл. 41 [1] и принимаемый не более 1,0;

для многоболтового соединения при расчете на срез и смятие при болтах:

класса точности А $\gamma_b = 1$;

класса точности В $\gamma_b = 0,9$;

для одноболтового и многоболтового соединения при расчёте на смятие при уменьшенных расстояниях $a = 1,5d$ и $s = 2d$ в элементах конструкции из стали с $R_{yn} < 540 \text{ Н/мм}^2$ $\gamma_b = 0,8$ (здесь a – расстояние вдоль усилия от края элемента до центра ближайшего отверстия; d – диаметр отверстия; s – расстояние вдоль усилия между центрами отверстий);

указанные выше коэффициенты условия работы болтового соединения следует учитывать одновременно; при промежуточных значениях a и s коэффициент γ_b следует определять линейной интерполяцией.

γ_c – коэффициент условий работы конструкции, см. табл. 1 [1]; если данных нет, то $\gamma_c = 1$.

При действии на болтовое соединение силы N , проходящей через центр тяжести соединения, число болтов n определится по формуле

$$n \geq \frac{N \gamma_n}{N_{b,\min}}, \text{ где } N_{b,\min} \text{ – меньшее из значений } N_{bs} \text{ и } N_{bp}.$$

Расчетное усилие, воспринимаемое одним высокопрочным болтом:

$$Q_{bh} = R_{bt} A_{bn} \mu k / \gamma_h,$$

где $R_{bt} = 0,7 R_{bun}$ (для болтов класса прочности 10.9 и 12.9; для других классов прочности – см. табл. 5 [1]) – расчетное сопротивление растяжению болта;

R_{bun} – временное сопротивление материала болта, определяется по табл. Г.5 [1] в зависимости от класса прочности болта;

A_{bn} – площадь сечения болта по резьбе (нетто), принимается по табл. Г.9 [1];

μ – коэффициент трения, принимается по табл. 42 [1] в зависимости от способа обработки соединяемых поверхностей;

k – число плоскостей трения соединяемых поверхностей;

γ_h – коэффициент, принимаемый по табл. 42 [1] в зависимости от способа обработки соединяемых поверхностей, характера нагрузки и разницы между диаметрами болта и отверстия.

При действии на болтовое соединение силы N , проходящей через центр тяжести соединения и вызывающей сдвиг соединяемых элементов, число болтов n определится по формуле

$$n \geq \frac{N \gamma_n}{Q_{bh} \gamma_b \gamma_c},$$

где γ_b – коэффициент условий работы фрикционного соединения, зависящий от требуемого числа болтов n и принимаемый равным:

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

в первом приближении можно принимать $\gamma_b = 0,9$, а затем при необходимости после определения n уточнить;

γ_c – коэффициент условий работы конструкции, см. табл. 1 [1]; если данных нет, то $\gamma_c = 1$.

Полученное количество обычных и высокопрочных болтов округляется в большую сторону до целого числа, а если расположение болтов двухрядное в два ряда, то до целого четного числа.

Несущая способность фрикционного соединения может быть обеспечена при условии должного натяжения болтов. Усилие натяжения B_o определится по формуле

$$B_o = R_{bt} A_{bn}.$$

Контроль натяжения осуществляется с помощью момента закручивания $M_{кр}$:

$$M_{кр} = n K B_o d_b,$$

где $n = 1,06$ – при натяжении болта;

K – среднее значение коэффициента закручивания по сертификату; при отсутствии сертификата принимается равным 0,18;

d_b – диаметр болта.

Для компактности болтового соединения расстояния между болтами вдоль усилия должны быть минимальными. Указания по назначению этих расстояний приведены в табл. 40 [1], из которой следует, что при изменении предела текучести стали относительно значения $R_{yt} = 540 \text{ Н/мм}^2$ минимальное расстояние между центрами отверстий для болтов равно 2,5 d или 3 d, а минимальное расстояние от центра отверстия для болта до края элемента равно 2 d или 2,5 d (для высокопрочных болтов – 1,3 d).

При размещении болтов в шахматном порядке минимальное расстояние вдоль усилия между центрами отверстий составляет $u + 1,5d$, где u – расстояние поперек усилия между рядами отверстий.

Для фрикционных соединений с одной плоскостью трения минимальное расстояние между болтами следует принимать $3d$ для сталей с $R_{yn} > 375 \text{ Н/мм}^2$.

В соединяемых элементах из стали с $R_{yn} < 540 \text{ Н/мм}^2$ допускается уменьшение расстояния от центра болта до края элемента и минимального расстояния между центрами болтов в случае расчета с учетом соответствующих коэффициентов условий работы соединений согласно требований п. 14.2.9 [1].

Все эти расстояния округляются в большую сторону кратно 5 мм.

Задание к упражнению 3.1

Табл.

3.1

1-я цифра шифра	Уголки	Сталь	Расчетная температур., °С	2-я цифра шифра	N , кН	Класс сооружения	3-я цифра шифра	Толщина фасонки, t_{ϕ} , мм	Класс прочности болтов
1	75 x 8	C345K	- 38	1	300	КС-1	1	6	5.6
2	80 x 8	C245	- 48	2	320	КС-2	2	8	5.8
3	90 x 8	C345K	- 60	3	340	КС-3	3	8	8.8
4	100 x 8	C255	- 45	4	360	КС-1	4	10	5.6
5	100 x 10	C390	- 54	5	380	КС-2	5	8	5.8
6	125 x 8	C355	- 65	6	310	КС-3	6	10	8.8
7	125 x 10	C255	- 35	7	330	КС-1	7	10	5.6
8	140 x 10	C245	- 46	8	350	КС-2	8	12	5.8
9	140 x 12	C355-1	- 45	9	370	КС-3	9	14	8.8
0	160 x 10	C255	- 52	0	390	КС-1	0	14	5.6

Пример выполнения упражнения 3.1

Рассчитать и сконструировать соединение двух уголков $b \times t = 125 \times 10$ с фасонкой толщиной $t_{\phi} = 14$ мм на болтах класса точности В и класса прочности 5.6 при следующих данных (шифр 760):

- статическое усилие $N = 310$ кН;
- материал уголков и фасонки – сталь C255;
- расчетная температура $t^0 \geq - 35^{\circ}\text{C}$;
- класс сооружения КС-3.

Прочность фасонки считается заведомо обеспеченной.

Фасонка (лист): сталь С255, $R_y = 240 \text{ Н/мм}^2$; $R_u = 360 \text{ Н/мм}^2$; $R_{un} = 370 \text{ Н/мм}^2$ – табл. В.3 [1];

уголки (фасон): сталь С255, $R_y = 250 \text{ Н/мм}^2$; $R_u = 370 \text{ Н/мм}^2$; $R_{un} = 380 \text{ Н/мм}^2$ – табл. В.5 [1].

Болты класса прочности 5.6: $R_{bs} = 210 \text{ Н/мм}^2$ – табл. Г.5 [1];

$$R_{bp} = 1,35R_u = 1,35 \cdot 360 = 485 \text{ Н/мм}^2 \text{ – табл. 4 [1] или табл. Г.6 [1].}$$

По таблице рисунок (приложение П.9) принимаем шахматный порядок расположения болтов. Максимальный диаметр отверстий $d_{max} = 28 \text{ мм}$. Принимаем диаметр болтов $d_b = 24 \text{ мм}$, при этом диаметр отверстий составляет $d = 27 \text{ мм}$ (на 3 мм больше).

Минимальные расстояния между болтами вдоль усилия $a = e_2 + 1,5 d = 35 + 1,5 \cdot 27 = 75,5 \text{ мм}$, принимаем $a = 80 \text{ мм}$. Минимальное расстояние до края элемента $a_l = 2 d = 2 \cdot 27 = 54 \text{ мм}$, принимаем $a_l = 55 \text{ мм}$.

Расчетное усилие, воспринимаемое одним болтом:

при его срезе

$$N_{bs} = R_{bs} A_b n_s \gamma_b \gamma_c = 21 \cdot 4,52 \cdot 2 \cdot 0,9 \cdot 1 = 170,8 \text{ кН};$$

при смятии соединяемых деталей

$$N_{bp} = R_{bp} d_b \Sigma t \gamma_b \gamma_c = 48,5 \cdot 2,4 \cdot 1,4 \cdot 0,9 \cdot 1 = 146,7 \text{ кН}.$$

Требуемое количество болтов в соединении при $N_{b,min} = N_{bp} = 146,7 \text{ кН}$

$$n \geq \frac{N \gamma_n}{N_{b,min}} = \frac{310 \cdot 1,1}{146,7} = 2,3 \text{ шт.}$$

Принимаем 3 болта диаметром 24 мм по ГОСТ Р ИСО 4014-2013, класс точности В, класс прочности 5.6 .

Проверим прочность уголков по ослабленному отверстиями сечению.

Площадь сечения уголков нетто $A_n = 2 (A - d t) = 2 (24,33 - 2,7 \cdot 1) = 43,26 \text{ см}^2$ (здесь A – площадь сечения уголка, см. ГОСТ 8509-93).

Проверка несущей способности уголков по пригодности к эксплуатации

$$\frac{N \gamma_n}{A_n R_y \gamma_c} = \frac{310 \cdot 1,1}{43,26 \cdot 24 \cdot 1} = 0,33 < 1.$$

Прочность уголков по ослабленному сечению обеспечена.

Выполним чертеж болтового соединения (рис. 3.1).

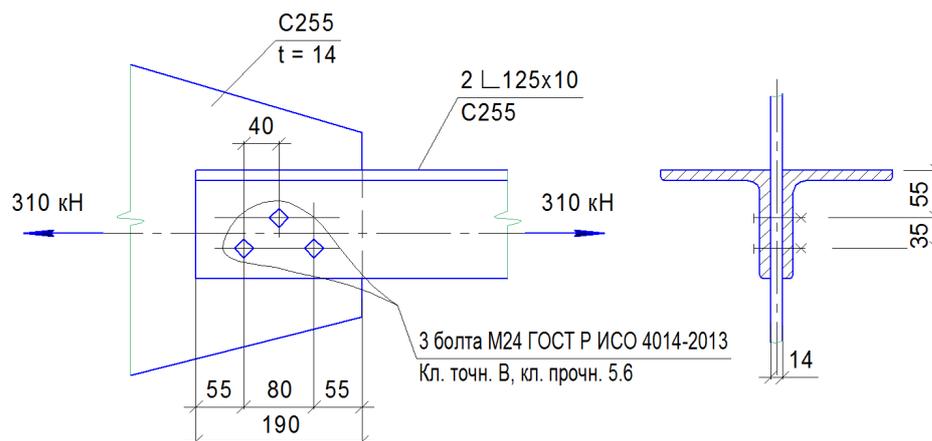


Рис. 3.1. К расчету болтового соединения.

Задание к упражнению 3.2

Табл. 3.2

1-я цифра шифра	Уголки	Сталь	Класс прочности болтов	2-я цифра шифра	N , кН	Класс сооружения	3-я цифра шифра	Толщина фанонки, t_{ϕ} , мм	Способ обработки поверхностей
1	90 x 8	C345K	12.9	1	640	КС-1	1	6	Дробеметн.
2	100 x 10	C245	10.9	2	610	КС-2	2	8	Газопламен.
3	110 x 8	C345K	12.9	3	580	КС-3	3	8	Стальными щетками
4	125 x 8	C255	10.9	4	550	КС-1	4	10	Без обработки
5	125 x 12	C390	12.9	5	520	КС-2	5	8	Дробеметн.
6	140 x 12	C355	10.9	6	550	КС-3	6	10	Газопламен.
7	140 x 10	C255	12.9	7	460	КС-1	7	10	Стальными щетками
8	160 x 14	C245	10.9	8	430	КС-2	8	12	Без обработки
9	180 x 11	C355-1	12.9	9	400	КС-3	9	14	Дробеметн.
0	200 x 14	C255	10.9	0	480	КС-1	0	14	Газопламен.

Пример выполнения упражнения 3.2

Рассчитать и сконструировать соединение двух уголков $b \times t = 140 \times 10$ с фанонкой толщиной $t_{\phi} = 14$ мм на болтах с контролируемым натяжением класса прочности 12.9 при следующих данных (шифр 760):

- расчетное усилие $N = 550$ кН;
- материал уголков и фанонки – сталь C255;
- класс сооружения КС-3;

- способ обработки соединяемых поверхностей – газопламенный без консервации;
- способ регулирования натяжения болтов – по моменту закручивания.

Соединение работает на статическую нагрузку.

Прочность фасонки считается заведомо обеспеченной, поэтому определяем прочностные показатели только для уголков (фасон) по табл. В.5 [1].

Сталь С255: $R_y = 240 \text{ Н/мм}^2$; $R_u = 370 \text{ Н/мм}^2$; $R_{un} = 380 \text{ Н/мм}^2$.

По таблице рисков (приложение П.9) принимаем двухрядный порядок расположения болтов. Максимальный диаметр отверстий $d_{max} = 21 \text{ мм}$. Принимаем диаметр болтов $d_b = 20 \text{ мм}$, при этом диаметр отверстий составляет $d = 21 \text{ мм}$ (на 1 мм больше).

Минимальные расстояния между болтами вдоль усилия $a = 2,5 d = 2,5 \cdot 21 = 52,5 \text{ мм}$, принимаем $a = 55 \text{ мм}$. Минимальное расстояние до края элемента $a_l = 1,3 d = 1,3 \cdot 21 = 27,3 \text{ мм}$, принимаем $a_l = 30 \text{ мм}$.

$\gamma_h = 1,12$ (табл. 42 [1]).

Болты класса прочности 12.9, $d_b = 20 \text{ мм}$, $A_{bn} = 2,45 \text{ см}^2$ (табл. Г.9 [1]); $R_{bun} = 1220 \text{ Н/мм}^2$ (табл. Г.5 [1]), $R_{bt} = 0,7 R_{bun} = 0,7 \cdot 1220 = 854 \text{ Н/мм}^2$.

Расчетное усилие, воспринимаемое одним высокопрочным болтом:

$$Q_{bh} = R_{bt} A_{bn} \mu k / \gamma_h = 85,4 \cdot 2,45 \cdot 0,42 \cdot 2 / 1,12 = 156,9 \text{ кН.}$$

Требуемое минимальное количество болтов

$$n \geq \frac{N \gamma_n}{Q_{bh} \gamma_b \gamma_c} = \frac{550 \cdot 1,1}{156,9 \cdot 0,9 \cdot 1} = 4,3 \text{ шт.}$$

Принимаем 6 болтов (четное количество) с контролируемым натяжением диаметром 20 мм класса прочности 12.9 по ГОСТ Р 52644-2006.

Коэффициент условий работы болтового соединения γ_b не корректируем, т.к. его значение соответствует первоначально принятому количеству болтов.

Проверим прочность уголков по ослабленному отверстиями сечению.

Площадь сечения уголков нетто $A_n = 2 (A - 2d t) = 2 (27,33 - 2 \cdot 2,1 \cdot 1) = 46,26 \text{ см}^2$ (здесь A – площадь сечения уголка, см. ГОСТ 8509-93).

$A_n = 46,26 \text{ см}^2 = 0,846 A < 0,85 A$, поэтому согласно пункту 14.3.11 [1] при статической нагрузке проверка выполняется по условной площади $A_{ef} = 1,18 A_n = 1,18 \cdot 46,26 = 54,59 \text{ см}^2$.

Проверка несущей способности уголков по пригодности к эксплуатации

$$\frac{N \gamma_n}{A_{ef} R_y \gamma_c} = \frac{490 \cdot 1,1}{54,59 \cdot 24 \cdot 1} = 0,41 < 1.$$

Прочность уголков по ослабленному сечению обеспечена.

Усилие натяжения болтов

$$B_o = R_{bt} A_{bn} = 85,4 \cdot 2,45 = 209 \text{ кН.}$$

Контролируемый момент закручивания

$$M_{кр} = n K B_o d_b = 1,06 \cdot 0,18 \cdot 209 \cdot 2 = 79,8 \text{ кНсм} = 0,798 \text{ кНм.}$$

Выполним чертеж болтового соединения (рис. 3.2).

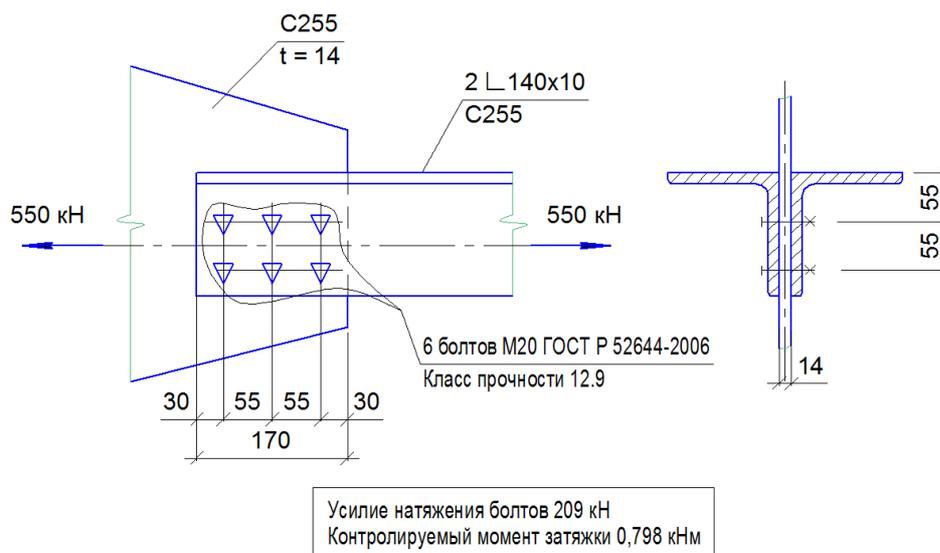


Рис. 3.2. К расчету соединения на болтах с контролируемым натяжением.

Контрольные вопросы к практическому занятию № 3

1. Классы точности болтов, применяемых в строительстве; чем они отличаются.
2. Классы прочности болтов; как обозначаются, что значат цифры в обозначении.
3. От чего зависит выбор класса прочности болтов.
4. Как может происходить разрушения соединения на обычных болтах.
5. Можно ли крепить элементы одним болтом.
6. Требование к длине части болта без резьбы в соединении, работающем на сдвиг.
7. На какое усилие рассчитывают болты, работающие одновременно на момент и поперечную силу.
8. Как передается усилие в соединениях на болтах с контролируемым натяжением.
9. Влияние способов обработки поверхностей соединяемых элементов на несущую способность соединений на болтах с контролируемым натяжением.
10. Способы контролирования натяжения болтов.
11. Как проверяется прочность элементов по ослабленному сечению в соединениях на болтах с контролируемым натяжением.
12. Конструктивные требования к размещению болтов в деталях из листового и фасонного проката.
13. Как определяются расчетные сопротивления для расчета болтового соединения.
14. Когда можно считать болты в соединении равнонагруженными.

Практическое занятие № 4.

Расчет прокатной балки.

Балки из горячекатаных прокатных профилей (двутавры, швеллера) применяют в перекрытиях и покрытиях сооружений в пределах номенклатуры выпускаемой металлургическими заводами продукции.

В последнее время эта номенклатура возросла; отменены ранее применявшиеся ГОСТ 8239-83, ГОСТ 26020-83, СТО АСЧМ 20-93. Вместо них с 1 мая 2018 г. вступил в силу ГОСТ Р 57837-2017 «Двутавры стальные горячекатаные с параллельными гранями полок», предлагающий перечень профилей, значительно превосходящий предложения отмененных ГОСТов.

С 1 августа 1920 г. вступило в силу изменение № 1 к этому ГОСТу.

В ГОСТ Р 57837-2017 приняты следующие типы двутавров:

- балочные типов Б (нормальные) и Ш (широкополочные);
- колонные типа К;
- свайные типа С;
- дополнительных серий типа ДБ (дополнительные балочные) и ДК (дополнительные колонные).

Двутавры изготавливаются из сталей С245Б, С255Б, С345Б, С355Б, С390Б, С440Б. Прочностные показатели приведены в табл. В.4 [1].

Прокатные балки, являясь более металлоемкими по сравнению с составными, выигрывают в стоимости и надежности. Применяются двутавры типов Б, ДБ и Ш.

Балки работают в основном на изгиб от поперечной нагрузки и рассчитываются в соответствии с разделом 8 [1].

На данном занятии рассматриваются балки 1-го класса (п. 4.2.7 [1]), изгибаемые в плоскости наибольшей жесткости, расчет которых производится в упругой области.

Предметом занятия является методика подбора сечения балок, а также проверки выполнения предельных состояний 1 (прочность и общая устойчивость) и 2 (необходимая жесткость). Местная устойчивость элементов сечения не проверяется, т. к. она обеспечена соотношениями размеров профилей.

Задание к практическому занятию № 4

Табл. 4.1

1-я цифра шифра	Нормат. нагрузка F_n , кН	Класс сооружения	2-я цифра шифра	Пролет L , м	Кэфф. надежн. по нагр. γ_f	3-я цифра шифра	Сталь	Предельный прогиб f_u / L (условно)
1	50	КС-1	1	4	1,1	1	С255Б	1/200
2	75	КС-2	2	4,2	1,2	2	С255Б-1	1/220
3	100	КС-3	3	4,5	1,3	3	С345Б	1/250
4	125	КС-1	4	5	1,4	4	С355Б	1/270
5	150	КС-2	5	5,5	1,1	5	С355Б-1	1/300
6	175	КС-3	6	6	1,2	6	С255Б	1/320
7	200	КС-1	7	6,5	1,3	7	С440Б	1/350
8	225	КС-2	8	7	1,4	8	С255Б	1/210
9	250	КС-3	9	7,5	1,2	9	С345Б	1/240
0	275	КС-1	0	8	1,3	0	С440Б	1/260

Пример выполнения практического занятия № 4

Подобрать сечение однопролетной шарнирно опертой прокатной балки 1-го класса, нагруженной сосредоточенной силой в середине пролета (рис. 4.1). Нагрузка приложена к верхнему поясу, балка закреплена от потери устойчивости из плоскости (в горизонтальном направлении) на опорах и в середине пролета.

Исходные данные (шифр 760):

- нормативная нагрузка $F_n = 200$ кН;
- класс сооружения КС-1 ($\gamma_n = 0,8$ – приложение П.1);
- пролет балки $L = 6$ м;
- коэффициент надежности по нагрузке $\gamma_f = 1,2$;
- сталь С440Б ($R_y = 430$ Н/мм² = 43 кН/см², $t \leq 20$ мм - табл. В.4 [1]);
- предельный прогиб $f_u / L = 1/260$;
- коэффициент условий работы $\gamma_c = 1$ (табл. 1 [1]).

Расчетные усилия в балке:

$$M_{\max} = \frac{F_n \gamma_f \gamma_n L}{4} = \frac{200 \cdot 1,2 \cdot 0,8 \cdot 6}{4} = 288 \text{ кНм};$$

$$Q_{\max} = \frac{F_n \gamma_f \gamma_n}{2} = \frac{200 \cdot 1,2 \cdot 0,8}{2} = 96 \text{ кН}.$$

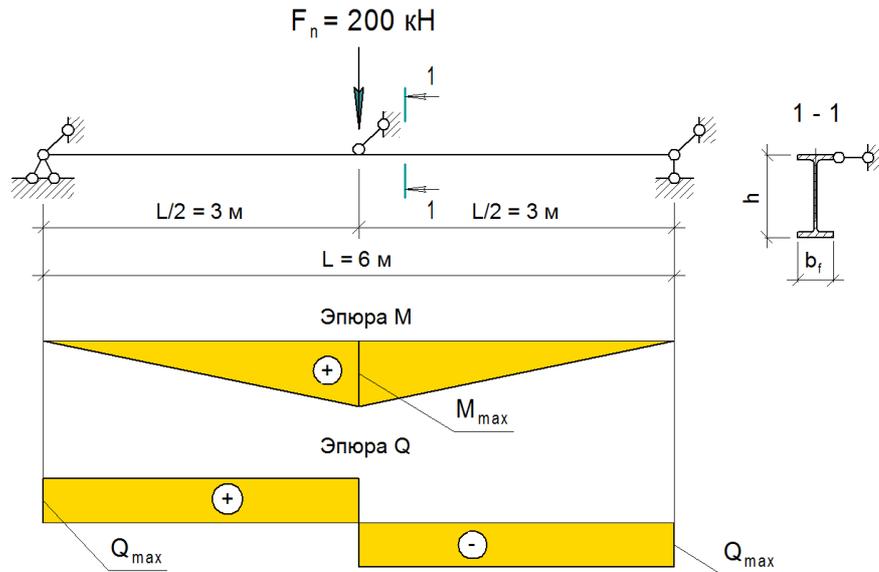


Рис. 4.1. К расчету прокатной балки.

Требуемый момент сопротивления сечения балки для восприятия M_{max} :

$$W_{x,mp} = \frac{M_{max}}{R_y \gamma_c} = \frac{288 \cdot 100}{43 \cdot 1} = 670 \text{ см}^3.$$

Требуемый момент инерции сечения балки для обеспечения заданной жесткости:

$$I_{x,mp} = \frac{F_n L^2 \gamma_n (L / f_u)}{48 E} = \frac{200 \cdot 600^2 \cdot 0,8 \cdot 260}{48 \cdot 20600} = 15146 \text{ см}^4,$$

где $L / f_u = 260$ – величина, обратная предельному прогибу;

$E = 20600 \text{ кН/см}^2$ – модуль упругости стали.

По ГОСТ Р 57837-2017 принимаем двутавр № 35Б3 ($I_x = 16797 \text{ см}^4$; $W_x = 946 \text{ см}^3$; $S_x = 533,5 \text{ см}^3$; $h = 355 \text{ мм} = 35,5 \text{ см}$; $t_w = s = 8,5 \text{ мм} = 0,85 \text{ см}$; $b_f = b = 176 \text{ мм} = 17,6 \text{ см}$; $t_f = t = 13,5 \text{ мм} = 1,35 \text{ см}$; $g = 60,5 \text{ кг/м}$).

Отметим, что определяющим критерием для выбора двутавра в данном случае стала не прочность (первое предельное состояние), а жесткость (второе предельное состояние).

Принятый двутавр имеет геометрические характеристики I_x и W_x , превышающие требуемые величины, поэтому проверка прочности по нормальным напряжениям и проверка жесткости могут не делаться. Однако для оценки эффективности выбранного сечения выполним эти проверки.

Проверка прочности по нормальным напряжениям:

$$\frac{M_{max}}{W_x R_y \gamma_c} = \frac{288 \cdot 100}{946 \cdot 43 \cdot 1} = 0,71 < 1.$$

Проверка прочности опорного сечения на срез:

$$\frac{Q_{\max} S_x}{I_x t_w R_s \gamma_c} = \frac{96 \cdot 533,5}{16797 \cdot 0,85 \cdot 24,9 \cdot 1} = 0,14 < 1,$$

$$\text{где } R_s = 0,58 R_y = 0,58 \cdot 43 = 24,9 \text{ кН/см}^2.$$

Проверка жесткости:

$$f = \frac{F_n L^3 \gamma_n}{48 E I_x} = \frac{200 \cdot 600^3 \cdot 0,8}{48 \cdot 20600 \cdot 16797} = 2,08 \text{ см} < \frac{f_u}{L} \cdot L = \frac{1}{260} \cdot 600 = 2,31 \text{ см}.$$

Общую устойчивость балок 1-го класса согласно п. 8.4.4 [1] следует считать обеспеченной, если условная гибкость сжатого пояса $\bar{\lambda}_b$ не превышает предельное значение $\bar{\lambda}_{ub}$, определяемого по формулам табл. 11 [1].

$$\bar{\lambda}_b = \frac{l_{ef}}{b} \sqrt{\frac{R_{yf}}{E}} = \frac{300}{17,6} \sqrt{\frac{43}{20600}} = 0,78,$$

где $l_{ef} = L / 2 = 300$ см - свободная длина;

$b = b_f = 17,6$ см - ширина сжатого пояса;

$$\bar{\lambda}_{ub} = 0,35 + 0,0032 \frac{b}{t} + \left(0,76 - 0,02 \frac{b}{t} \right) \frac{b}{h_f} = 0,35 + 0,0032 \cdot 15 + (0,76 - 0,02 \cdot 15) \frac{17,6}{34,15} = 0,64,$$

где $t = t_f = 1,35$ см - толщина сжатого пояса;

$h_f = h - t_f = 35,5 - 1,35 = 34,15$ см - расстояние между осями поясов.

Примечание. При $\frac{b}{t} < 15$ следует принимать $\frac{b}{t} = 15$.

Имеем $\frac{b}{t} = \frac{17,6}{1,35} = 13,04 < 15$, принимаем $\frac{b}{t} = 15$.

Согласно примечанию 3 табл. 11 [1] значение $\bar{\lambda}_{ub}$ следует повышать умножением на коэффициент $k = \sqrt{\frac{R_{yf}}{\sigma}} = \sqrt{\frac{43}{30,4}} = 1,19$,

где $R_{yf} = R_y = 43$ кН/см² - расчетное сопротивление сжатого пояса;

$$\sigma = \frac{M_{\max}}{W_x \gamma_c} = \frac{288 \cdot 100}{946 \cdot 1} = 30,4 \text{ кН/см}^2 \text{ - нормальное напряжение в сжатом поясе.}$$

Получим $\bar{\lambda}_{ub} = 0,64 \cdot 1,19 = 0,76$.

Проверка общей устойчивости: $\bar{\lambda}_b = 0,78 > \bar{\lambda}_{ub} = 0,76$.

Общая устойчивость балки не обеспечена.

Т.к. фактическая и предельная величины условной гибкости сжатого пояса близки, то можно точнее проверить общую устойчивость балки в соответствии с разделом 8.4 [1] по формуле (69):

$$\frac{M_{\max}}{\varphi_b W_{cx} R_y \gamma_c} \leq 1.$$

В рассматриваемом случае увеличим количество связей балки в пролете до 2-х штук. Это приведет к сокращению свободной длины l_{ef} до величины $L/3 = 6/3 = 2 \text{ м} = 200 \text{ см}$ и уменьшению $\bar{\lambda}_b$:

$$\bar{\lambda}_b = \frac{200}{17,6} \sqrt{\frac{43}{20600}} = 0,52.$$

Проверка общей устойчивости: $\bar{\lambda}_b = 0,52 < \bar{\lambda}_{ub} = 0,76$.

Общая устойчивость балки обеспечена.

Введем измененное количество связей в рисунок (рис. 4.2).

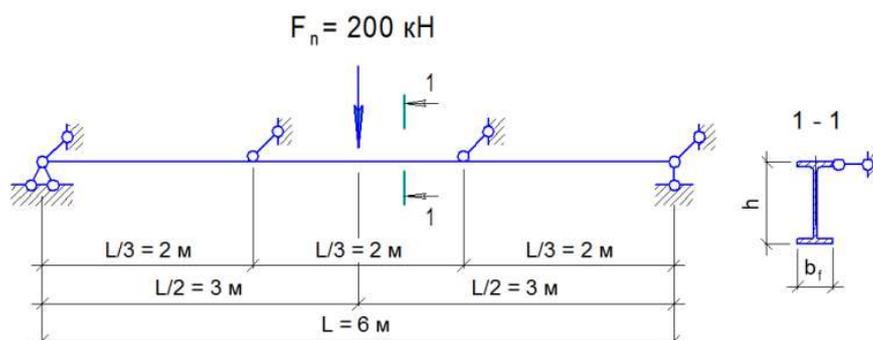


Рис. 4.2. К расчету прокатной балки.

Сведем все проверки принятого сечения балки в таблицу (табл. 4.2).

Табл. 4.2

Критерий проверки сечения балки	Коэффициент использования сечения
Прочность:	
- по нормальным напряжениям	0,71
- по касательным напряжениям	0,14
Жесткость	$f/f_u = 2,08 / 2,31 = \mathbf{0,90}$
Общая устойчивость	$\bar{\lambda}_b / \bar{\lambda}_{ub} = 0,52 / 0,76 = 0,68$

Вывод: максимальное значение коэффициента использования показывает, что для назначения сечения балки определяющим является второе предельное состояние (жесткость).

Контрольные вопросы к практическому занятию № 4

1. Какие усилия возникают в балке от внешних нагрузок.
2. Характер распределения по высоте сечения балки нормальных и касательных напряжений.
3. Какие факторы определяют исчерпание несущей способности балок 1-го класса.
4. Как и когда учитывается упруго-пластическая работа стали при определении несущей способности балок.
5. В чем выражается общая потеря устойчивости балок.
6. В каких случаях можно считать балку закрепленной от потери общей устойчивости.
7. Как проверяется общая устойчивость балок.
8. Способы повышения общей устойчивости балок.
9. Характер распределения по длине балки нормальных и касательных напряжений.
10. Как учитывается наличие местной (локальной) нагрузки на балку.
11. Как учитывается совместное действие нормальных, касательных и местных (локальных) напряжений.
12. Влияние прокатного сечения балки на назначение группы конструкции.
13. От какой нагрузки определяется прогиб балки.

Практическое занятие № 5. Расчет и конструирование сварной балки.

Сварные балки применяют в тех случаях, когда не хватает несущей способности прокатных сечений. Наибольшее применение получили балки двутаврового симметричного сечения (рис. 5.1), состоящие из стенки (вертикального листа) и двух поясов или полок (горизонтальных листов). Реже применяются балки несимметричного сечения, когда один из поясов больше другого.

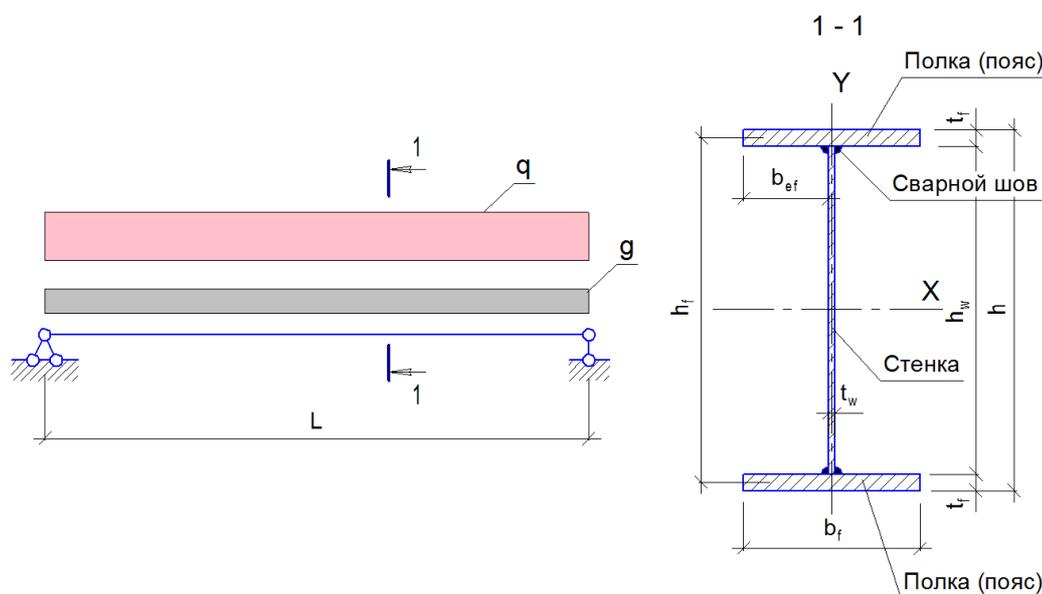


Рис. 5.1. Расчетная схема и сечение сварной симметричной балки.

Основным современным способом соединения поясов со стенкой является дуговая электросварка. Ранее применялись заклепки, что требовало дополнительных элементов в виде ламельных уголков и операции по сверлению отверстий. В настоящее время заклепки не применяются, а их заменой являются высокопрочные болты. Соединения с помощью заклепок и высокопрочных болтов надежнее сварных, особенно при воздействии динамических нагрузок и при низких температурах, но их трудоемкость и металлоёмкость по сравнению со сварными соединениями выше.

Особенностью расчета и конструирования сварных балок состоит в том, что все размеры их элементов назначаются автором. При этом следует учитывать значительное количество ограничений, обеспечивающих надежную работу балок при минимальном расходе стали.

Главным размером балки является её высота h .

Различают минимальную высоту h_{min} и оптимальную высоту h_{opt} .

h_{min} - это минимальная высота балки, при которой обеспечивается условие её жесткости.

h_{opt} - это такая высота балки, при которой её вес будет минимальным.

Для однопролетной шарнирно опертой балки, нагруженной равномерно распределенной нагрузкой, минимальная высота определится по формуле

$$h_{\min} = \frac{10}{48} \frac{L^2 R_y \gamma_c}{E f_u} \frac{M_n}{M} \gamma_n,$$

где f_u – предельный прогиб балки, определяемый в соответствии с разделами Д.Д.1 и Д.Д.2 приложения Д [2];

M_n и M – максимальные значения моментов от нормативной и расчетной нагрузок соответственно.

Оптимальная высота балки определится по формуле

$$h_{opt} = k \sqrt{\frac{W_{mp}}{t_w}},$$

где $W_{mp} = \frac{M}{R_y \gamma_c}$ – требуемый момент сопротивления сечения балки;

k – коэффициент, принимаемый равным 1,15÷1,20 для сварных балок;

t_w – толщина стенки балки, назначаемая в зависимости от высоты балки, которая еще не определена, по табл. 5.1; предварительно высоту балки h можно назначить в пределах 1/13 ÷ 1/10 от её пролета. Значение t_w должно соответствовать толщинам в ГОСТ 19903-2015.

Табл. 5.1

h , м	0,6	1,0	1,5	2,0	3,0	4,0	5,0
t_w , мм	6	8 - 10	10 - 12	12 - 14	16 - 18	20 - 22	22 - 24
λ_w	100	100 - 125	125 - 150	145 - 165	165 - 185	185 - 200	210 - 230

Примечание. $\lambda_w = \frac{h_w}{t_w}$ – гибкость стенки.

Требуемый момент инерции сечения балки, загруженной равномерно распределенной нагрузкой, для обеспечения заданной жесткости:

$$I_{x,mp} = \frac{5}{384} \cdot \frac{q_n L^3 \gamma_n}{E} \cdot \frac{L}{f_u},$$

где $\frac{L}{f_u}$ – величина, обратная предельному относительному прогибу балки.

После определения h_{min} и h_{opt} возможны два случая.

Случай 1: $h_{min} < h_{opt}$; высота балки принимается равной оптимальной, но, учитывая небольшое изменение веса балки в окрестностях h_{opt} , можно уменьшить высоту до величины $h = (0,9 \div 0,95) h_{opt}$.

Случай 2: $h_{min} \geq h_{opt}$; высота балки принимается равной минимальной $h = h_{min}$.

В первом приближении можно считать высоту балки h равной высоте стенки h_w , поэтому назначаемую величину необходимо увязать с шириной листовой стали, из которой будет изготавливаться стенка балки. Примем ширину листа h_w кратной двум величинам кратности размеров на чертежах, т.е. кратно 10 мм. При этом контролируется гибкость стенки в соответствии с табл. 5.1.

Толщина стенки t_w принимается в соответствии с толщинами стали по ГОСТ 19903-2015, но с использованием сокращенного ряда толщин, наиболее часто применяемых в реальных конструкциях. Приведем этот ряд толщин:

$t = 6; 7; 8; 9; 10; 11; 12; 14; 16; 18; 22; 25; 28; 30; 32; 36; 40$ мм.

Дополнительно проверим назначенное сечение стенки на срез

$$t_w \geq t_{w,\min} = k \frac{Q_{\max}}{h_w R_s \gamma_c},$$

где $k = 1,2$ (на срез работает все сечение); $k = 1,5$ (на срез работает только стенка);
 $R_s = 0,58R_y$ – расчетное сопротивление стали на срез.

После назначения размеров стенки перейдем к поясам.

Минимальная площадь сечения одного пояса определится по формуле

$$A_f = \frac{W_{mp}}{h} - \frac{t_w h}{6},$$

где $h = h_w + 2t_f$; $t_f = 20 \div 30$ мм (предварительно задаемся).

$A_f = t_f b_f$, поэтому, задав одну из величин, получим другую. При назначении размеров пояса следует учитывать ряд ограничений:

- $b_f = (1/5 \div 1/3) h$; при $b_f < 1/5 h$ балка неустойчива из плоскости; при $b_f > 1/3 h$ увеличивается неравномерность распределения напряжений по ширине поясов;

- $t_f \leq 3t_w$ - условие свариваемости поясов со стенкой, это технологическое требование;

- $\frac{b_{ef}}{t_f} \leq 0,5 \sqrt{E / R_y}$, где $b_{ef} = (b_f - t_w) / 2$ – условие местной устойчивости сжатого пояса (без ламелей);

- $t_f \leq 40$ мм – при большей толщине снижается расчетное сопротивление стали.

Если высота балки принята по h_{\min} , то возможно получение очень малой величины A_f . В этом случае размеры пояса должны быть минимальными. С учетом вышеуказанных ограничений получим:

$$b_{f,\min} = h / 5; t_{f,\min} = \frac{b_{ef}}{0,5 \sqrt{\frac{E}{R_y}}} \geq t_w.$$

Назначенные размеры элементов следует зафиксировать.

Предварительно принимаем: стенка - $t_w \times h_w$; пояса 2 - $t_f \times b_f$.

Предварительно принятое сечение следует проверить на прочность и жесткость.

Определим необходимые геометрические характеристики сечения.

Момент инерции сечения балки относительно центральной оси X

$$I_x = I_{xw} + 2I_{xf} = \frac{t_w h_w^3}{12} + 2b_f t_f \left(\frac{h_w + t_f}{2} \right)^2 \geq I_{x,mp}.$$

Момент сопротивления относительно центральной оси X

$$W_x = \frac{2I_x}{h} \geq W_{mp}.$$

Статический момент верхней сдвигаемой части сечения относительно оси X

$$S_x = b_f t_f \left(\frac{h_\omega + t_f}{2} \right) + \frac{t_\omega h_\omega^2}{8}.$$

Полученные результаты позволяют судить о действительной несущей способности и экономичности принятого сечения.

Если высота балки принята по h_{opt} , то обращаем внимание на W_x , величина которого должна быть равна или больше W_{mp} не более, чем на 5%:

$$\frac{W_x - W_{mp}}{W_{mp}} \cdot 100 \leq 5\%.$$

В противном случае требуется уменьшить сечение балки; лучше всего это сделать, уменьшив сечение поясов.

Если высота балки принята по h_{min} , то возможна большая (> 5%) разница между W_x и W_{mp} , и внимание следует обратить на I_x , величина которого должна быть равна или больше $I_{x,mp}$ не более, чем на 5%:

$$\frac{I_x - I_{x,mp}}{I_{x,mp}} \cdot 100 \leq 5\%.$$

В противном случае также требуется уменьшить сечение балки, уменьшив сечение поясов или даже уменьшив высоту балки.

Принятое сечение имеет момент сопротивления W_x , превышающий требуемую величину, поэтому проверка прочности по нормальным напряжениям не делается.

Проверка прочности опорного сечения на срез:

$$\frac{Q_{\max} S_x}{I_x t_w R_s \gamma_c} < 1, \text{ где } R_s = 0,58R_y.$$

В случае невыполнения данной проверки требуется увеличить толщину стенки t_w и перекомпоновать сечение.

Проверка жесткости балки

$$f = \frac{5}{384} \cdot \frac{q_n L^4 \gamma_n}{EI_x} \leq f_u, \text{ где } f_u - \text{предельное значение прогиба.}$$

В любом случае критерием правильности подбора сечения будет невязка в 5% по прочности, т.е. по W_x , или по жесткости, т.е. по I_x .

Балка считается закрепленной из плоскости, поэтому её общая устойчивость не проверяется.

Не рассматривается также вопрос местной устойчивости стенки, т.к. гибкость стенки принята в соответствии с табл. 5.1.

Задание к практическому занятию № 5

Табл. 5.1

1-я цифра шифра	Пролет L, м	Сталь	2-я цифра шифра	Предельн. относит. прогиб	Постоян. нагр-ка., g_n (кН/м)	3-я цифра шифра	Времен. нагр-ка, q_n (кН/м)	Класс сооружения
1	9	C245	1	1/200	10	1	80	КС-1
2	10	C255	2	1/250	12	2	90	КС-2
3	11	C355	3	1/300	14	3	100	КС-3
4	12	C355П	4	1/350	16	4	110	КС-1
5	13	C390	5	1/220	18	5	120	КС-2
6	14	C440	6	1/270	11	6	85	КС-3
7	15	C550	7	1/320	13	7	95	КС-1
8	16	C590	8	1/200	15	8	105	КС-2
9	17	C690	9	1/240	17	9	125	КС-3
0	18	C390-1	0	1/280	14	0	115	КС-1

Пример выполнения практического занятия № 5

Подобрать сечение однопролетной шарнирно опертой сварной балки 1-го класса, нагруженной равномерно распределенной нагрузкой (рис. 5.1).

К 1-му классу относятся элементы конструкций, в которых напряжения по всей площади сечения не превышают R_y (п. 4.2.7 [1]).

Нагрузка приложена к верхнему поясу, балка закреплена от потери устойчивости из плоскости (в горизонтальном направлении) по всему пролету.

Исходные данные (шифр 760):

- пролет балки $L = 15$ м;
- сталь С550;
- предельный относительный прогиб $f_u / L = 1/270$;
- постоянная нормативная линейная нагрузка $g_n = 11$ кН/м;
- временная нормативная линейная нагрузка $q_n = 115$ кН/м;
- класс сооружения КС-1 ($\gamma_n = 0,8$ – приложение П.1);
- коэффициент надежности по постоянной нагрузке $\gamma_{fg} = 1,05$;
- коэффициент надежности по временной нагрузке $\gamma_{fq} = 1,2$;
- коэффициент условий работы $\gamma_c = 1$ (табл. 1 [1]).

Сталь С550 по ГОСТ 19903-2015, $t = 8 \div 50$ мм, табл. В.3 [1]:

$$R_y = 525 \text{ Н/мм}^2 = 52,5 \text{ кН/см}^2; R_s = 0,58 R_y = 0,58 \cdot 52,5 = 30,4 \text{ кН/см}^2.$$

Суммарную линейную нагрузку на балку определим в табличной форме (табл. 5.2).

Табл. 5.2

Вид нагрузки	Нормативная нагрузка (кН/м)	γ_f	Расчетная нагрузка (кН/м)
1. Постоянная	11	1,05	11,6
2. Временная	115	1,2	138
Итого :	126		149,6

Расчетные усилия в балке:

$$M_{\max} = \frac{qL^2\gamma_n}{8} = \frac{149,6 \cdot 15^2 \cdot 0,8}{8} = 3366 \text{ кНм}; \quad M_{n,\max} = \frac{q_n L^2 \gamma_n}{8} = \frac{126 \cdot 15^2 \cdot 0,8}{8} = 2835 \text{ кНм};$$

$$Q_{\max} = \frac{qL\gamma_n}{2} = \frac{149,6 \cdot 15 \cdot 0,8}{2} = 898 \text{ кН}.$$

Требуемый момент сопротивления сечения балки для восприятия M_{\max} :

$$W_{x,mp} = \frac{M_{\max}}{R_y \gamma_c} = \frac{3366 \cdot 100}{52,5 \cdot 1} = 6412 \text{ см}^3.$$

Требуемый момент инерции сечения балки, загруженной равномерно распределенной нагрузкой, для обеспечения заданной жесткости:

$$I_{x,mp} = \frac{5}{384} \cdot \frac{q_n L^3 \gamma_n}{E} \cdot \frac{L}{f_u} = \frac{5}{384} \cdot \frac{126 \cdot 10^{-2} \cdot (15 \cdot 100)^3 \cdot 0,8}{20600} \cdot 270 = 580590 \text{ см}^4.$$

Минимальная высота балки

$$h_{\min} = \frac{10}{48} \cdot \frac{L^2 R_y \gamma_c}{E f_u} \cdot \frac{M_n}{M} \gamma_n = \frac{10}{48} \cdot \frac{(15 \cdot 100)^2 \cdot 53,5 \cdot 1}{20600 \cdot 5,6} \cdot \frac{2835}{3366} \cdot 0,8 = 146 \text{ см},$$

$$\text{где } f_u = 1500 \text{ см} / 270 = 5,6 \text{ см}.$$

Оптимальная высота балки

$$h_{opt} = k \sqrt{\frac{W_{mp}}{t_w}} = 1,20 \sqrt{\frac{6412}{1}} = 96 \text{ см},$$

$$\text{где } t_w = 10 \text{ мм} = 1 \text{ см при } h = L / 10 = 1,5 \text{ м по табл. 5.1}.$$

Большая разница между минимальной и оптимальной высотами ожидаема, т.к. пролет балки L значителен, а для изготовления балки выбрана высокопрочная сталь. Если бы применялась, например, сталь С255 ($R_y = 24 \text{ кН/см}^2$), то h_{\min} снизилась бы до 65 см.

Предварительно принимаем стенку сечением $t_w \times h_w = 10 \times 1460 \text{ мм}$.

Проверим стенку на срез

$$t_w = 1 > t_{w,\min} = k \frac{Q_{\max}}{h_w R_y \gamma_c} = 1,5 \frac{898}{146 \cdot 30,4 \cdot 1} = 0,30 \text{ см}.$$

Минимальная площадь сечения одного пояса определится по формуле

$$A_f = \frac{W_{mp}}{h} - \frac{t_w h}{6} = \frac{6412}{150} - \frac{1 \cdot 150}{6} = 18 \text{ см}^2,$$

где $h = h_w + 2t_f = 146 + 2 \cdot 2 = 150 \text{ см}$.

При такой малой площади пояса должен иметь минимальные размеры.

$$b_{f,min} = h / 5 = 150 / 5 = 30 \text{ см}; \quad t_{f,min} = \frac{b_{ef}}{0,5 \sqrt{\frac{E}{R_y}}} = \frac{14,5}{0,5 \sqrt{\frac{20600}{53,5}}} = 1,48 \text{ см} > t_w = 1 \text{ см},$$

здесь $b_{ef} = (b_f - t_w) / 2 = (30 - 1) / 2 = 14,5 \text{ см}$.

Предварительно принимаем пояса сечением $t_f \times b_f = 16 \times 300 \text{ мм}$.

Определим необходимые геометрические характеристики предварительно принятого сечения.

Момент инерции сечения балки относительно центральной оси X

$$I_x = I_{x\omega} + 2I_{xf} = \frac{t_w h_w^3}{12} + 2b_f t_f \left(\frac{h_w + t_f}{2} \right)^2 = \frac{1 \cdot 146^3}{12} + 2 \cdot 30 \cdot 1,6 \left(\frac{146 + 1,6}{2} \right)^2 =$$

$$= 259345 + 522858 = 782203 \text{ см}^4 > I_{x,mp} = 725738 \text{ см}^4.$$

Момент сопротивления относительно центральной оси X

$$W_x = \frac{2I_x}{h} = \frac{2 \cdot 782203}{149,2} = 10485 \text{ см}^3 > W_{mp} = 6412 \text{ см}^3.$$

Статический момент половины сечения относительно оси X

$$S_x = b_f t_f \left(\frac{h_w + t_f}{2} \right) + \frac{t_w h_w^2}{8} = 30 \cdot 1,6 \left(\frac{146 + 1,6}{2} \right) + \frac{1 \cdot 146^2}{8} = 3542 + 2664 = 6206 \text{ см}^3.$$

Проверка прочности опорного сечения на срез:

$$\frac{Q_{max} S_x}{I_x t_w R_s \gamma_c} = \frac{898 \cdot 6206}{782203 \cdot 1 \cdot 30 \cdot 4 \cdot 1} = 0,23 < 1.$$

Момент сопротивления W_x значительно больше W_{mp} , поэтому проверка прочности по нормальным напряжениям не делается.

Проверка жесткости балки

$$f = \frac{5}{384} \cdot \frac{q_n L^4 \gamma_n}{EI_x} = \frac{5}{384} \cdot \frac{126 \cdot 10^{-2} \cdot (15 \cdot 100)^4 \cdot 0,8}{20600 \cdot 782203} = 4,12 \text{ см} < f_u = 5,6 \text{ см}.$$

Запас по жесткости составляет

$$\Delta f = \frac{f_u - f}{f_u} \cdot 100 = \frac{5,6 - 4,12}{5,6} \cdot 100 = 26\% > 5\%.$$

Есть возможность уменьшить сечение. Т.к. пояса уже имеют минимальные размеры, то изменять будем сечение стенки, уменьшив её высоту до 130 см.

Момент инерции сечения балки относительно центральной оси X

$$I_x = \frac{1 \cdot 130^3}{12} + 2 \cdot 30 \cdot 1,6 \left(\frac{130 + 1,6}{2} \right)^2 = 183083 + 415645 = 598728 \text{ см}^4 > I_{x,mp} = 580590 \text{ см}^4.$$

$$f = \frac{5}{384} \cdot \frac{126 \cdot 10^{-2} \cdot (15 \cdot 100)^4 \cdot 0,8}{20600 \cdot 598728} = 5,39 \text{ см} < f_u = 5,6 \text{ см}.$$

Запас по жесткости составляет

$$\Delta f = \frac{f_u - f}{f_u} \cdot 100 = \frac{5,6 - 5,39}{5,6} \cdot 100 = 3,8\% < 5\%.$$

После изменения высоты стенки пересчитаем момент сопротивления относительно центральной оси X и статический момент

$$W_x = \frac{2I_x}{h} = \frac{2 \cdot 598728}{133,2} = 8990 \text{ см}^3 > W_{mp} = 6412 \text{ см}^3.$$

$$S_x = b_f t_f \left(\frac{h_w + t_f}{2} \right) + \frac{t_w h_w^2}{8} = 30 \cdot 1,6 \left(\frac{130 + 1,6}{2} \right) + \frac{1 \cdot 130^2}{8} = 3158 + 2112 = 5270 \text{ см}^3.$$

Проверка прочности опорного сечения после изменения высоты стенки на срез:

$$\frac{Q_{\max} S_x}{I_x t_w R_s \gamma_c} = \frac{898 \cdot 5270}{598728 \cdot 1 \cdot 30 \cdot 4 \cdot 1} = 0,26 < 1.$$

Сведем все проверки принятого сечения балки в таблицу (табл. 5.3).

Табл. 5.3

Критерий проверки сечения балки	Коэффициент использования сечения
Прочность:	
- по нормальным напряжениям	$W_{x,mp} / W_x = 6412 / 8990 = 0,71$
- по касательным напряжениям	0,26
Жесткость	$f / f_u = 5,39 / 5,6 = \mathbf{0,96}$

Вывод: максимальное значение коэффициента использования показывает, что для назначения сечения балки определяющим является второе предельное состояние (жесткость).

Окончательно принимаем сечение элементов балки:

- стенка $t_w \times h_w = 10 \times 1300$ мм;
- пояса $t_f \times b_f = 16 \times 300$ мм.

Сечение балки показано на рис. 5.2.

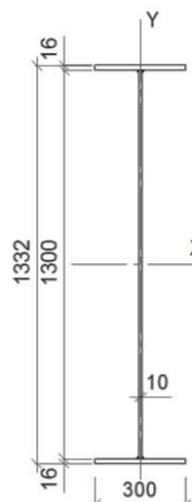


Рис. 5.2. Сечение сварной балки.

Контрольные вопросы
к практическому занятию № 5

1. Из каких элементов состоит сечение сварной балки.
2. Когда рационально применять сварные балки.
3. Какой размер в сварной балке является основным.
4. Что такое оптимальная высота балки.
5. Что такое минимальная высота балки.
6. Что такое строительная высота балки.
7. Как влияет отношение h_w/t_w на экономичность сечения балки.
8. Какими соображениями ограничивается величина h_w/t_w .
9. Ограничения на размеры поясных листов.
10. Какие проверки делаются для принятого сечения балки.
11. Каково соотношение между площадями стенки и поясов в балке оптимальной высоты.

Практическое занятие № 6. Расчет центрально сжатых колонн и стоек.

Центрально сжатыми могут быть как отдельные конструкции, так и их элементы. Стальные конструкции ввиду высоких прочностных показателей материала по сравнению с конструкциями из других традиционных материалов (железобетон, дерево) имеют небольшие поперечные размеры и значительную гибкость.

Это обстоятельство приводит к тому, что исчерпание несущей способности происходит в результате потери устойчивости при уровне фактических напряжений, далеких от расчетного сопротивления. В этом состоит принципиальное отличие таких конструкций от центрально растянутых.

Очевидно, что для сечения идеального центрально сжатого элемента должно выполняться условие, при котором радиус инерции должен быть максимальным при минимуме площади сечения и неизменным при повороте главных осей. Такое сечение имеет круглая тонкостенная труба. Квадратная тонкостенная труба также является рациональным вариантом.

Недостатком таких типов закрытого сечения является сложность устройства узлов сопряжения с балочными конструкциями, поэтому чаще применяются открытые сечения в виде прокатных (тип К) или сварных двутавров.

Двутавровое сечение даже при одинаковой высоте h и ширине b не является равноустойчивым: $i_x = 0,43 h$; $i_y = 0,24 b$. Для равенства i_x и i_y требуется, чтобы $b \approx 2h$, а это не конструктивно.

Таким образом, при равных расчетных длинах стержня «слабой» осью двутавра всегда является ось Y , относительно которой и ведутся все расчеты.

Критическая сила потери устойчивости для стержней одинакового сечения и длины зависит от способа закрепления по концам, определяющим коэффициент расчетной длины μ . Значения μ для элементов постоянного сечения приведены в табл. 30 [1].

Расчетная длина элемента $l_{ef} = \mu \cdot l$, где l – фактическая длина элемента.

Устойчивость центрально сжатого элемента сплошного сечения проверяется по формуле (7) [1]:

$$\frac{N \gamma_n}{\varphi A R_y \gamma_c} \leq 1,$$

где φ – коэффициент устойчивости (коэффициент продольного изгиба) при центральном сжатии, определяемый по табл. Д.1 [1] в зависимости от условной гибкости $\bar{\lambda} = \lambda \sqrt{R_y / E}$ и типа сечения «а», «b» или «с»;

гибкость $\lambda = l_{ef} / i$; тип сечения определяется по табл. 7 [1].

Наряду с проверкой устойчивости контролируется максимальная гибкость стержня λ_{max} , которая не должна быть больше предельной величины λ_u . Значения λ_u для сжатых элементов приведены в табл. 32 [1].

Для колонн $\lambda_u = 180 - 60\alpha$, где $\alpha = N \gamma_n / (\varphi A R_y \gamma_c) \geq 0,5$.

Требуемая площадь сечения из формулы (7) [1]:

$$A_{mp} = \frac{N \gamma_n}{\varphi' R_y \gamma_c},$$

где φ' – коэффициент устойчивости в зависимости от предварительно задаваемой гибкости λ ; для колонн в среднем рекомендуется $\lambda = 80 \div 100$.

По найденной требуемой площади из сортамента соответствующего профиля принимают ближайшее сечение, которое затем проверяется на устойчивость по фактическим параметрам.

Критерием экономичности подбора прокатного сечения является то, что меньшее по весу сечение принять нельзя (при условии не превышения предельной гибкости).

Задание к практическому занятию № 6

Табл. 6.1

1-я цифра шифра	N, кН	Класс сооружения	2-я цифра шифра	Длина колонны l, м	3-я цифра шифра	Сталь	Закрепления колонны по концам	
							верх	низ
1	1200	КС-1	1	4	1	С255Б	шарнирн.	шарнирн.
2	1300	КС-2	2	4,5	2	С255Б-1	шарнирн	жесткое
3	1400	КС-3	3	5	3	С345Б	жесткое	жесткое
4	1500	КС-1	4	5,5	4	С355Б	шарнирн	жесткое
5	1600	КС-2	5	6	5	С355Б-1	шарнирн.	шарнирн.
6	1700	КС-3	6	6,5	6	С255Б	шарнирн	жесткое
7	1800	КС-1	7	7	7	С440Б	жесткое	жесткое
8	1900	КС-2	8	7,5	8	С255Б	шарнирн	жесткое
9	2000	КС-3	9	8	9	С345Б	шарнирн.	шарнирн.
0	2100	КС-1	0	8,5	0	С440Б	шарнирн	жесткое

Пример выполнения практического занятия № 6

Подобрать сечение стержня центрально сжатой колонны из прокатного двутавра (тип К) по ГОСТ Р 57837-2017 при следующих данных (шифр 760):

- расчетное усилие $N = 1800$ кН;
- геометрическая длина колонны $l = 6,5$ м;
- крепления концов колонны по X и по Y: низ – жесткое; верх – шарнирное;
- материал – сталь С440Б ($R_y = 420$ Н/мм², $t = 20-30$ мм, табл. В.4 [1]);
- коэффициент условий работы $\gamma_c = 1$;
- класс сооружения КС-1 ($\gamma_n = 0,8$).

Коэффициент расчетной длины $\mu = 0,7$ (табл. 30 [1]).

Расчетные длины колонны: $l_{ef,x} = l_{ef,y} = \mu l = 0,7 \cdot 6,5 = 4,55$ м = 455 см.

При равных расчетных длинах расчет производим относительно оси Y.

Задаемся гибкостью колонны $\lambda_y = 90$; тогда $\bar{\lambda}_y = \lambda \sqrt{R_y / E} = 90 \sqrt{42 / 20600} = 4,06$

Коэффициент устойчивости $\varphi' = 0,443$ (табл. Д.1 [1], тип сечения «b»).

Радиус инерции при гибкости $\lambda_y = 90$: $i_y = l_{ef} / \lambda_y = 455 / 90 = 5,06$ см.

Требуемая площадь сечения:

$$A_{mp} = \frac{N\gamma_n}{\phi'R_y\gamma_c} = \frac{1800 \cdot 0,8}{0,443 \cdot 42 \cdot 1} = 77 \text{ см}^2.$$

По ГОСТ Р 57837-2017 принимаем двутавр № 20К4: $A = 88,27 \text{ см}^2$; $i_y = 5,109 \text{ см}$; $t_f = 17 \text{ мм}$ ($R_y = 430 \text{ Н/мм}^2$); $g = 69,3 \text{ кг/м}$.

Проверка принятого сечения:

$$\lambda_y = l_{ef,y} / i_y = 455 / 5,109 = 89; \quad \bar{\lambda}_y = \lambda_y \sqrt{R_y / E} = 89 \sqrt{43 / 20600} = 4,07.$$

Коэффициент устойчивости $\phi = 0,442$ (табл. Д.1 [1], тип сечения «b»).

$$\frac{N\gamma_n}{\phi A R_y \gamma_c} = \frac{1800 \cdot 0,8}{0,442 \cdot 88,27 \cdot 43 \cdot 1} = 0,86 < 1.$$

Запас по устойчивости составляет $14\% > 5\%$, поэтому уменьшим сечение, приняв двутавр № 20К3: $A = 73,57 \text{ см}^2$; $i_y = 5,078 \text{ см}$; $t_f = 14 \text{ мм}$ ($R_y = 430 \text{ Н/мм}^2$); $g = 57,8 \text{ кг/м}$.

Проверка сечения:

$$\lambda_y = l_{ef,y} / i_y = 455 / 5,078 = 90; \quad \bar{\lambda}_y = \lambda_y \sqrt{R_y / E} = 90 \sqrt{43 / 20600} = 4,11.$$

Коэффициент устойчивости $\phi = 0,436$ (табл. Д.1 [1], тип сечения «b»).

$$\frac{N\gamma_n}{\phi A R_y \gamma_c} = \frac{1800 \cdot 0,8}{0,436 \cdot 73,57 \cdot 43 \cdot 1} = 1,04 > 1.$$

Двутавр № 20К3 не проходит по устойчивости.

Проверим двутавр № 25К1, имеющий более тонкие стенку и пояса, но больший радиус инерции i_y : $A = 79,72 \text{ см}^2$; $i_y = 6,226 \text{ см}$; $t_f = 12 \text{ мм}$ ($R_y = 430 \text{ Н/мм}^2$); $g = 62,6 \text{ кг/м}$.

Проверка сечения:

$$\lambda_y = l_{ef,y} / i_y = 455 / 6,226 = 73; \quad \bar{\lambda}_y = \lambda_y \sqrt{R_y / E} = 73 \sqrt{43 / 20600} = 3,34.$$

Коэффициент устойчивости $\phi = 0,574$ (табл. Д.1 [1], тип сечения «b»).

$$\frac{N\gamma_n}{\phi A R_y \gamma_c} = \frac{1800 \cdot 0,8}{0,574 \cdot 79,72 \cdot 43 \cdot 1} = 0,73 < 1.$$

Сведем результаты расчетов в таблицу (табл. 6.2).

Табл. 6.2

Двутавр	$A, \text{ см}^2$	$g, \text{ кг/м}$	$i_y, \text{ см}$	λ_y	$\bar{\lambda}_y$	ϕ	Коэффициент использования сечения α
№ 20К4	88,27	69,3	5,109	89	4,07	0,442	0,86
№ 20К3	73,57	57,8	5,078	90	4,11	0,436	1,04
№ 25К1	79,72	62,6	6,226	73	3,34	0,574	0,73

Из анализа таблицы видно, что даже при коэффициенте использования сечения $\alpha = 0,73$ (запас 27%), сечение из двутавра № 25 К1 легче, чем из двутавра № 20К4 (запас 14%).

Окончательно принимаем двутавр № 25К1.

Проверка гибкости: $\lambda_{max} = \lambda_y = 73 < \lambda_u = 180 - 60\alpha = 180 - 60 \cdot 0,73 = 136$.

Расчетная схема колонны и её поперечное сечение показано на рис. 6.1.

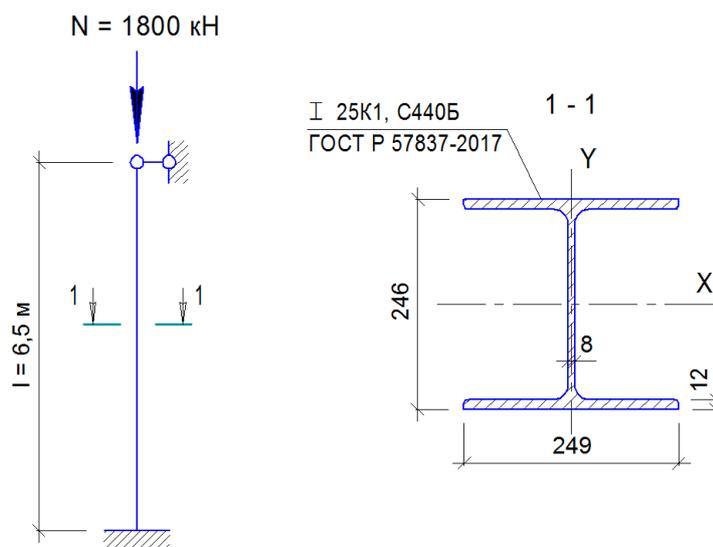


Рис. 6.1. К расчету центрально сжатой колонны.

Контрольные вопросы к практическому занятию № 6

1. Что происходит с центрально сжатым элементом в предельном состоянии.
2. Что такое расчетная длина элемента и от чего она зависит.
3. Каким образом можно уменьшить расчетную длину.
4. Как определяется и от чего зависит коэффициент устойчивости φ при центральном сжатии элемента.
5. Как определяется гибкость и условная гибкость элемента.
6. Можно ли понизить группу конструкции, если стержень выполнен из прокатного двутавра.

Практическое занятие № 7.

Расчет и конструирование элементов ферм из парных уголков.

Упражнения 7.1; 7.2.

Элементы ферм при узловой нагрузке работают на центральное растяжение и центральное сжатие.

Если нагрузка приложена между узлами, а также при расцентровке узлов к продольным силам добавляются изгибающие моменты.

Сечения элементов из парных уголков в виде тавра – самые распространенные; в этом случае надежно и просто решаются узлы сопряжения на фасонках, а методика расчета проста и проверена практикой. Однако с точки зрения экономичности это не самое лучшее решение; кроме того, полость между уголками плохо контролируется и подвержена коррозии.

Современные фермы изготавливаются с применением замкнутых профилей в виде круглых или прямоугольных профилей, с узлами без фасонок.

Однако во всех случаях последовательность подбора сечений примерно одинакова и при большом количестве элементов оформляется в виде таблицы.

Все элементы фермы условно можно разделить на следующие виды (рис. 7.1):

- сжатые пояса, опорные раскосы и опорные стойки;
- растянутые пояса;
- сжатые элементы решетки (стойки и раскосы);
- растянутые элементы решетки (стойки и раскосы).

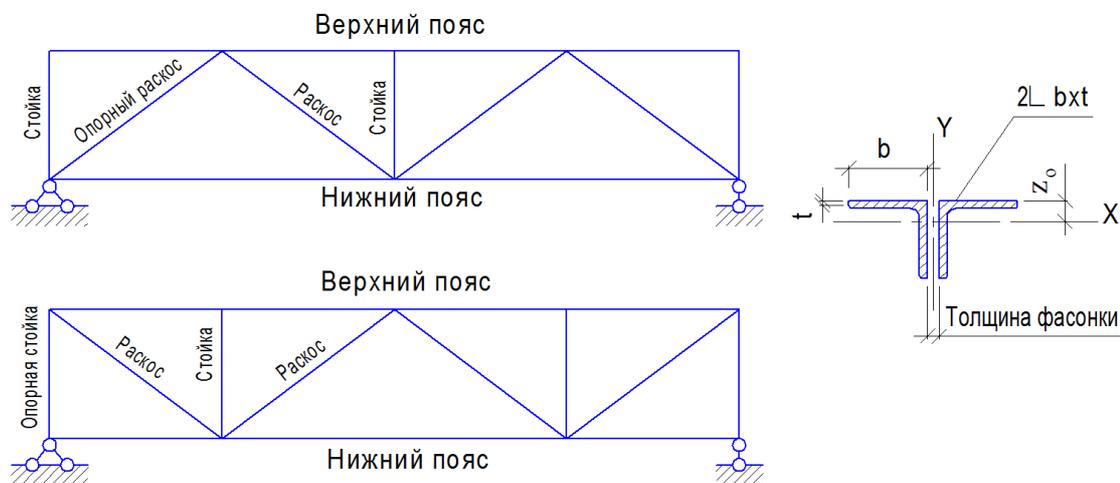


Рис. 7.1. Виды элементов ферм. Сечение из парных уголков.

От вида элемента зависит коэффициент условий работы γ_c (табл. 1 [1]).

Для рассматриваемого случая (сечения элементов из парных уголков):

- для всех растянутых элементов, проверяемых на прочность по неослабленному сечению, $\gamma_c = 0,9$;
- для сжатых элементов решетки (кроме опорных) составного таврового сечения из двух уголков при расчетах на устойчивость с гибкостью $\lambda_{max} > 60$ $\gamma_c = 0,8$; при $\lambda_{max} \leq 60$ $\gamma_c = 1$;
- для всех остальных элементов $\gamma_c = 1$.

Прочность элементов из стали с $R_{yn} \leq 440$ Н/мм² при центральном растяжении или сжатии проверяется по формуле (5) [1]:

$$\frac{N\gamma_n}{A_n R_y \gamma_c} \leq 1.$$

Из этой формулы можно получить минимально необходимое значение площади сечения элемента A_{mp} для выполнения этого условия:

$$A_{mp} = \frac{N\gamma_n}{R_y \gamma_c}.$$

По сортаменту уголков по ГОСТ 8509-93 принимаем номер уголка, для которого $A \geq A_{mp} / 2$.

Элемент принятого сечения из двух уголков проверяется по гибкости:

$$\lambda_{max} \leq \lambda_u,$$

где λ_u – предельное значение гибкости растянутых элементов, определяемое по табл. 33 [1]; при статической нагрузке для всех растянутых элементов ферм $\lambda_u = 400$.

Устойчивость элементов сплошного сечения при центральном сжатии проверяется по формуле (7) [1]:

$$\frac{N\gamma_n}{\varphi A R_y \gamma_c} \leq 1,$$

где φ – коэффициент устойчивости (коэффициент продольного изгиба) при центральном сжатии, определяемый по табл. Д.1 [1] в зависимости от условной гибкости $\bar{\lambda} = \lambda \sqrt{R_y / E}$ и типа сечения «С»;

гибкость $\lambda = l_{ef} / i$; тип сечения определяется по табл. 7 [1].

Наряду с проверкой устойчивости контролируется также максимальная гибкость стержня λ_{max} , которая не должна быть больше предельной величины λ_u . Значения λ_u для сжатых элементов приведены в табл. 32 [1].

Для поясов, опорных раскосов и стоек $\lambda_u = 180 - 60\alpha$.

Для сжатых элементов решетки $\lambda_u = 210 - 60\alpha$.

Здесь $\alpha = N\gamma_n / (\varphi A R_y \gamma_c) \geq 0,5$; эту величину можно назвать коэффициентом использования сечения.

Требуемая площадь сечения из формулы (7) [1]:

$$A_{mp} = \frac{N\gamma_n}{\varphi' R_y \gamma_c},$$

где φ' – коэффициент устойчивости в зависимости от предварительно задаваемой гибкости λ ; для поясов и опорных раскосов и стоек в среднем рекомендуется $\lambda = 80 \div 100$; для элементов решетки $\lambda = 100 \div 120$.

Заметим, что полученная требуемая площадь сечения – прикидочная величина, используемая только один раз для назначения первого варианта сечения.

Разделив требуемую площадь пополам, из сортамента уголков принимают ближайшее сечение. Элемент из двух уголков проверяется на устойчивость по фактическим параметрам с одновременным контролем предельной гибкости.

Истинное значение коэффициента устойчивости φ зависит от максимальной условной гибкости, определяемой в зависимости от расчетной длины элемента. Расчетная длина сжатых элементов плоских ферм определяется по табл. 24 [1].

В рассматриваемом случае для поясов, опорных раскосов и опорных стоек $l_{ef,x} = l_{ef,y} = l$ (в случае раскрепления узлов из плоскости фермы).

Для сжатых элементов решетки: $l_{ef,x} = 0,8 l$; $l_{ef,y} = l$.

Критерием экономичности подбора прокатного сечения является то, что меньшее сечение принять нельзя (при условии не превышения предельной гибкости).

Задание к практическому занятию № 7

Табл. 7.1

1-я цифра шифра	N , кН	Толщина фасонки t_{ϕ} , мм	2-я цифра шифра	Длина элемента l , см	Класс сооружения	3-я цифра шифра	Сталь	Вид элемента
1	200	8	1	200	КС-1	1	С245	Оп. раскос
2	300	10	2	225	КС-2	2	С255	Раскос
3	400	10	3	250	КС-3	3	С245	Стойка
4	500	12	4	275	КС-1	4	С355	Оп. стойка
5	600	12	5	300	КС-2	5	С355-1	Пояс
6	700	14	6	325	КС-3	6	С390	Оп. раскос
7	800	14	7	350	КС-1	7	С245	Раскос
8	900	14	8	210	КС-2	8	С255	Стойка
9	1000	14	9	260	КС-3	9	С245	Оп. стойка
0	1100	14	0	280	КС-1	0	С355	Пояс

Пример выполнения упражнения 7.1

Подбор сечения центрально растянутого элемента

Подобрать и проверить сечение стержня центрально растянутого пояса фермы из двух прокатных уголков по ГОСТ 8509-93 при следующих данных (шифр 760):

- расчетное растягивающее усилие $N = 800$ кН;
- материал: сталь С355 ($R_y = 350$ Н/мм², $t = 5-16$ мм, табл. В.5 [1]);
- толщина фасонки $t_{\phi} = 14$ мм;

- длина элемента $l = 325$ см; $\mu_x = \mu_y = 1$;
- класс сооружения КС-3 ($\gamma_n = 1,1$);
- вид элемента – пояс ($\gamma_c = 0,9$); нагрузка статическая.

Требуемая площадь сечения одного уголка:

$$A_{mp} = \frac{N\gamma_n}{2R_y\gamma_c} = \frac{800 \cdot 1,1}{2 \cdot 35 \cdot 0,9} = 14 \text{ см}^2.$$

Ближайшим большим уголком по сокращенному сортаменту (приложение П.10) является уголок 100x8 с площадью сечения $15,6 \text{ см}^2 > A_{mp} = 14 \text{ см}^2$.

Геометрические характеристики сечения из двух уголков 100x8:

$$A = 2 \cdot 15,6 = 31,2 \text{ см}^2; \quad i_x = 3,07 \text{ см}; \quad i_y = 4,62 \text{ см} \quad (t_\phi = 14 \text{ мм}).$$

Расчетные длины: $l_{ef,x} = l_{ef,y} = l = 325$ см.

$$\text{Гибкости: } \lambda_x = l_{ef,x} / i_x = 325 / 3,07 = 106; \quad \lambda_y = l_{ef,y} / i_y = 325 / 4,62 = 70.$$

Принятая площадь сечения элемента больше требуемой, поэтому проверка прочности не делается. Коэффициент использования сечения

$$\alpha = \frac{N\gamma_n}{AR_y\gamma_c} = \frac{800 \cdot 1,1}{31,2 \cdot 35 \cdot 0,9} = 0,90.$$

Проверка гибкости: $\lambda_{max} = \lambda_x = 106 < \lambda_u = 400$.

Принятое сечение из двух уголков 100x8 удовлетворяет нормативным требованиям.

Пример выполнения упражнения 7.2

Подбор сечения центрально сжатого элемента

Подобрать и проверить сечение стержня центрально сжатого пояса фермы из двух прокатных уголков по ГОСТ 8509-93 при следующих данных (шифр 760):

- расчетное сжимающее усилие $N = 800$ кН;
- материал: сталь С355 ($R_y = 350$ Н/мм², $t = 5-16$ мм, табл. В.5 [1]);
- толщина фасонки $t_\phi = 14$ мм;
- длина элемента $l = 325$ см;
- класс сооружения КС-3 ($\gamma_n = 1,1$);
- вид элемента – пояс ($\gamma_c = 1$).

Расчетные длины: $l_{ef,x} = l_{ef,y} = l = 325$ см.

$$\text{Задаемся гибкостью элемента } \lambda = 90; \quad \bar{\lambda} = \lambda \sqrt{R_y / E} = 90 \sqrt{35 / 20600} = 3,71.$$

Коэффициент устойчивости $\varphi' = 0,444$ (табл. Д.1 [1], тип сечения «с»).

$$\text{Радиус инерции при гибкости } \lambda = 90: \quad i = l_{ef} / \lambda = 325 / 90 = 3,61 \text{ см.}$$

Требуемая площадь сечения одного уголка:

$$A_{mp} = \frac{N\gamma_n}{2\varphi'R_y\gamma_c} = \frac{800 \cdot 1,1}{2 \cdot 0,444 \cdot 35 \cdot 1} = 28,3 \text{ см}^2.$$

Ближайшим уголком по сокращенному сортаменту (приложение П.10) является уголок 125x12 с площадью сечения $28,89 \text{ см}^2 > A_{mp} = 28,3 \text{ см}^2$.

Геометрические характеристики сечения из двух уголков 125x12:

$A = 2 \cdot 28,89 = 57,78 \text{ см}^2$; $i_x = 3,82 \text{ см}$; $i_y = 5,70 \text{ см}$ ($t_\phi = 14 \text{ мм}$).

Гибкости: $\lambda_x = l_{ef,x} / i_x = 325 / 3,82 = 85$; $\lambda_y = l_{ef,y} / i_y = 325 / 5,70 = 57$.

$\bar{\lambda}_{\max} = \lambda_x \sqrt{R_y / E} = 85 \sqrt{35 / 20600} = 3,50$.

Коэффициент устойчивости $\varphi = 0,476$ (табл. Д.1 [1], тип сечения «с»).

Проверка устойчивости:

$$\frac{N \gamma_n}{\varphi A R_y \gamma_c} = \frac{800 \cdot 1,1}{0,476 \cdot 57,78 \cdot 35 \cdot 1} = 0,91.$$

Проверка гибкости: $\lambda_{\max} = \lambda_x = 85 < \lambda_u = 180 - 60\alpha = 180 - 60 \cdot 0,91 = 125$.

Т.к. запас по устойчивости составляет $9\% > 5\%$, пробуем проверить меньшее сечение - два уголка 125x10:

$A = 2 \cdot 24,33 = 48,66 \text{ см}^2$; $i_x = 3,85 \text{ см}$; $i_y = 5,65 \text{ см}$ ($t_\phi = 14 \text{ мм}$).

Гибкости: $\lambda_x = l_{ef,x} / i_x = 325 / 3,85 = 84$; $\lambda_y = l_{ef,y} / i_y = 325 / 5,65 = 57$.

$\bar{\lambda}_{\max} = \lambda_x \sqrt{R_y / E} = 84 \sqrt{35 / 20600} = 3,46$.

Коэффициент устойчивости $\varphi = 0,483$ (табл. Д.1 [1], тип сечения «с»).

Проверка устойчивости:

$$\frac{N \gamma_n}{\varphi A R_y \gamma_c} = \frac{800 \cdot 1,1}{0,483 \cdot 48,66 \cdot 35 \cdot 1} = 1,07 > 1.$$

Устойчивость не обеспечена, поэтому возвращаемся к двум уголкам 125x12.

Принятое сечение из двух уголков 125x12 удовлетворяет нормативным требованиям.

В случае невыполнения нормативных требований следует корректировать сечение, доказав, что меньшее сечение взять нельзя.

Сведем результаты выполнения упражнений 7.1 и 7.2 в таблицу № 7.2.

Табл. 7.2

Элемент	Сечение	Площадь, см ²	Расчетное усилие N, кН	Геометрическая длина l, см	Расчетные длины, см		Радиусы инерции, см		Гибкости			φ	γ_c	Коэффициент использования
					$l_{ef,x}$	$l_{ef,y}$	i_x	i_y	λ_{\max}	$\bar{\lambda}_{\max}$	λ_u			
Пояс	2 уг. 100x8	31,2	800	325	325	325	3,07	4,62	106	-	400	-	0,9	0,90
	2 уг. 125x12	57,78	- 800	325	325	325	3,82	5,70	85	3,50	125	0,476	1	0,91

Контрольные вопросы
к практическому занятию № 7

1. Из каких прокатных профилей конструируют элементы легких ферм.
2. Условия исчерпания несущей способности элемента при центральном растяжении и центральном сжатии.
3. Требования к предельной гибкости элементов ферм.
4. Как определяется абсолютная и условная гибкость элементов.
5. Можно ли элементы ферм выполнять из одиночных уголков.
6. В чем состоит разница в предельных состояниях центрально сжатого и центрально растянутого элементов.
7. Как определяются расчетные длины элементов ферм.
8. Как назначаются коэффициенты условий работы элементов ферм.
9. Как обеспечивается совместная работа двух уголков в элементе фермы.

Список использованных источников

1. СП 16.13330.2017. Стальные конструкции: издание официальное: утвержден и введен в действие Приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 24 февраля 2017 № 126/пр: актуализированная редакция СНиП II-23-81*: дата введения 28 августа 2017. – Москва, 2017. – 145 с. : ил. – Текст: непосредственный. С изменениями №№ 1, 2, 3, 4 и 5.

2. ГОСТ 27751-2014. Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения: межгосударственный стандарт Российской Федерации: утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 11 декабря 2014 года № 1974-ст: дата введения 2015-07-01, - Москва: Стандартинформ, 2015. – Текст: непосредственный.

3. ГОСТ 27772-2021. Прокат для строительных стальных конструкций. Общие технические условия: межгосударственный стандарт Российской Федерации: утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 30 ноября 2021 года № 1658-ст: дата введения 2022-08-01.

4. ГОСТ Р 57837-2017. Двутавры стальные горячекатаные с параллельными гранями полок. Технические условия: национальный стандарт Российской Федерации: утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 24 октября 2017 года № 1515-ст: дата введения 2018-05-01: [редакция от 15 мая 2020 года]. – URL: <http://www.consultant.ru> (дата обращения: 21.11.2020). – Режим доступа: КонсультантПлюс. Законодательство. ВерсияПроф. – Текст: электронный.

5. ГОСТ 8509-93. Уголки стальные горячекатаные равнополочные. Сортамент: межгосударственный стандарт Российской Федерации: утвержден и введен в действие Постановлением Комитета Российской Федерации по стандартизации, метрологии и сертификации от 20 февраля 1996 года № 85: дата введения 1997-01-01. - URL: <http://www.consultant.ru> (дата обращения: 21.11.2020). – Режим доступа: КонсультантПлюс. Законодательство. ВерсияПроф. – Текст: электронный.

6. ГОСТ 19903-2015. Прокат листовой горячекатаный. Сортамент: межгосударственный стандарт Российской Федерации: утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 07 апреля 2016 года № 246-ст: дата введения 2016-09-01. - URL: <http://www.consultant.ru> (дата обращения: 21.11.2020). – Режим доступа: КонсультантПлюс. Законодательство. ВерсияПроф. – Текст: электронный.

7. ГОСТ 24839-2012. Конструкции стальные строительные. Расположение отверстий в прокатных профилях. Размеры: межгосударственный стандарт Российской Федерации: утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 29 ноября 2012 года № 1674-ст: дата введения 2013-07-01. - URL: <http://www.consultant.ru> (дата обращения: 21.11.2020). – Режим доступа: КонсультантПлюс. Законодательство. ВерсияПроф. – Текст: электронный.

8. Металлические конструкции. В 3 томах. Том 1. Элементы стальных конструкций: учебник для строит. вузов / В.В. Горев, Б.Ю. Уваров, В.В. Филиппов, Г.И. Белый [и др.]; под ред. В.В. Горева. – М.: Высшая школа, 1997. – 527 с.: ил. – Текст: непосредственный.

9. Пронин В.В. Методические указания к практическим занятиям по курсу металлических конструкций. Задания и примеры выполнения [Текст]: учебное пособие для вузов / В.В. Пронин; Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет. – 3-е изд. – Нижний Новгород: ННГАСУ, 2021. – 65 с. ISBN 978-5-528-00464-8. - Текст: непосредственный.

10. Колесов А.И. Задания и примеры выполнения упражнений к практическим занятиям по курсу металлических конструкций: учебное пособие для вузов / А.И. Колесов, Б.С. Поликарпов, М. А. Агеева; Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет. – 2-е изд. – Нижний Новгород: ННГАСУ, 2009. – 75 с. ISBN 978-5-87941-619-0. - Текст: непосредственный.

11. Пронин В.В. Методические указания к практическим занятиям по курсу «Металлические конструкции» для студентов специальности 1203 «Гидротехническое строительство речных сооружений и гидроэлектростанций» / Горьковский инженерно-строительный институт им. В.П. Чкалова. - Горький: ГИСИ, 1984, 44 с. - Текст: непосредственный.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение П.1.

Коэффициенты надежности по ответственности γ_n по ГОСТ 27751-2014.

Класс сооружения	Уровень ответственности	Минимальное значение γ_n
КС - 3	Повышенный	1,1
КС - 2	Нормальный	1,0
КС - 1	Пониженный	0,8

Приложение П.2.

Табл. В.1 СП 16.13330-2017 (с учетом изм. № 4 и 5).

Нормируемые показатели ударной вязкости проката и труб¹⁾

Расчетная температура, °С	Группа конструкций	Нормативное сопротивление (предел текучести) стали, Н/мм ²									
		$R_{yn} < 290$		$290 \leq R_{yn} < 390$		$390 \leq R_{yn} < 440$		$440 \leq R_{yn} < 540$		$R_{yn} \geq 540$	
		Показатели ударной вязкости KCV, Дж/см ² 5) 6)									
при температуре испытаний на ударный изгиб, °С											
		+ 20	0	- 20	- 20	- 40	- 40	- 60	- 40	- 60	- 60
$t \geq - 45$	1, 2, 3	-	34	+	34	+	34	+	66/34 ⁴⁾	40	66
	4	+ ²⁾	34 ³⁾	+	+	+	+	+	+	+	-
$- 45 > t \geq - 55$	1	-	-	-	-	34	34	+	66/34 ⁴⁾	+	66
	2, 3	-	34	34	34	+	34	+	66/34 ⁴⁾	+	66
	4	-	34	+	34 ³⁾	+	+	+	+	+	-
$t < - 55$	1, 2, 3	-	-	-	-	34	-	34	-	66/34 ⁴⁾	66
	4	-	-	-	34	+	+	+	+	+	-

Знак « - » означает, что применение стали с такими гарантиями не допускается;

знак « + » - допускается использовать фактические результаты механических свойств в поставленной партии проката при нормативных значениях KCV^{-20} , KCV^{-40} , $KCV^{-60} \geq 34$ Дж/см² и для сталей с $R_{yn} \geq 440$ Н/мм² при KCV^{-40} , $KCV^{-60} \geq 66/34$ Дж/см².

¹⁾ Нормы устанавливаются на основании испытаний на ударный изгиб образцов с острым V-образным надрезом проката с толщиной не менее 5 мм и труб с толщиной стенки не менее 5 мм. В случае толщины элемента менее 5 мм проведение испытаний не требуется.

²⁾ Применяются стали С235 без гарантий по ударной вязкости.

³⁾ Для сооружений с ограниченным сроком службы и пребыванием в них людей.

⁴⁾ Числитель – нормативные значения для листовой стали толщиной более 40 мм и труб с толщиной стенки более 40 мм; знаменатель – для фасонного проката, а также для листовой стали толщиной до 40 мм включительно труб с толщиной стенки до 40 мм включительно.

⁵⁾ В листовом прокате испытываются поперечные образцы, в широкополосном универсальном, фасонном, сортовом прокате, в трубах и профилях – продольные.

⁶⁾ В электросварных трубах нормы распространяются на ударную вязкость основного металла, металла шва и границы сплавления.

Приложение П.3.

Табл. В.2 СП 16.13330-2017 (с учетом изм. № 4 и 5).

Требования по химическому составу

Нормативное сопротивление стали (предел текучести) Н/мм ²	Содержание элементов ^{х)} , % (не более)			C _э , % (не более)
	С (углерод)	Р (фосфор)	S (сера)	
R _{yn} < 290	0,22	0,040	0,025	-
290 ≤ R _{yn} < 390	0,14	0,025	0,025	0,45
390 ≤ R _{yn} < 540	0,12	0,017 ^{xx)}	0,010 ^{xx)}	0,46
540 ≤ R _{yn} < 590	0,13	0,015	0,010	0,47
R _{yn} < 590	0,15	0,015	0,004	0,60

^{х)} Предельные отклонения по химическому составу в готовом прокате принимаются по действующему стандарту.

^{xx)} S + P ≤ 0,020 %.

Примечания.

1. Углеродный эквивалент C_э, %, следует определять по формуле

$$C_{э} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Si}{24} + \frac{Cr}{5} + \frac{Ni}{40} + \frac{Cu}{13} + \frac{V + Nb}{14} + \frac{Mo}{4} + \frac{P}{2},$$

где C, Mn, Si, Cr, Ni, Cu, V, Nb, Mo, P - массовые доли элементов, %.

2. Для сталей с нормативным сопротивлением 290 ≤ R_{yn} < 390 Н/мм² повышение содержания углерода до 0,17%.

3. Для двутавров с параллельными гранями полок принимают содержание углерода для сталей С345 и С355-1 – до 0,17%; для стали С390 – до 0,14%.

4. Гарантия свариваемости проката из стали с R_{yn} < 290 Н/мм² обеспечивается химическим составом, проката из стали с R_{yn} ≥ 290 Н/мм² – дополнительно углеродным эквивалентом.

Приложение П.4.

Табл. В.3 СП 16.13330-2017 (с учетом изм. № 5).

Нормативные и расчетные сопротивления при растяжении, сжатии и изгибе листового, широкополосного универсального, сортового проката и труб

Сталь	Толщина проката, мм	Нормат. сопротивление ^{х)} проката и труб, Н/мм ²		Расч. сопротивление ^{хх)} проката и труб, Н/мм ²	
		R_{yn}	R_{un}	R_y	R_u
C235	От 2 до 4 вкл.	235	360	230	350
C245	От 2 до 20 вкл.	245	370	240	360
C255	От 2 до 3,9 вкл.	255	370	250	370
	4 – 10	245	380	240	370
	Св. 10 до 20 вкл.	245	370	240	360
	Св. 20 до 40 вкл.	235	370	230	360
C345K	От 2 до 10 вкл.	355	470	350	460
C355	От 2 до 16 вкл.	355	490	350	480
	Св. 16 до 40 вкл.	345	490	340	480
	Св. 40 до 60 вкл.	335	490	330	480
	Св. 60 до 80 вкл.	325	490	320	480
	Св. 80 до 100 вкл.	315	470	310	460
	Св. 100 до 160 вкл.	295	470	285	460
	Св. 160 до 200 вкл.	285	470	280	460
	Св. 200 до 260 вкл.	270	450	265	440
	Св. 260 до 300 вкл.	260	450	255	440
Св. 300 до 360 вкл.	245	440	240	430	
C355-1; C355-K	От 2 до 16 вкл.	355	490	350	480
	Св. 16 до 40 вкл.	345	490	340	480
	Св. 40 до 50 вкл.	335	490	330	480
C355П	От 2 до 16 вкл.	355	490	350	480
	Св. 16 до 40 вкл.	345	490	340	480
C390; C390-1	От 5 до 16 вкл.	390	520	380	505
	Св. 16 до 40 вкл.	390	520	380	505
	Св. 40 до 60 вкл.	385	520	375	505
	Св. 60 до 80 вкл.	375	510	365	500
	Св. 80 до 100 вкл.	365	510	355	500
Св. 100 до 160 вкл.	360	510	350	500	
C390П	От 2 до 40 вкл.	390	520	380	505
C440	От 5 до 16 вкл.	440	540	430	525
	Св. 16 до 40 вкл.	440	540	430	525
	Св. 40 до 60 вкл.	430	540	430	525
	Св. 60 до 80 вкл.	425	530	415	520
	Св. 80 до 100 вкл.	415	530	405	520
Св. 100 до 160 вкл.	405	530	395	520	
C550	От 8 до 50 вкл.	540	640	525	625
C590	От 8 до 50 вкл.	590	685	575	670
C690	От 8 до 50 вкл.	690	785	-	-

^{х)} За нормативное сопротивление приняты значения предела текучести и временного сопротивления, приводимые в ГОСТ 27772.

^{хх)} Значения расчетных сопротивлений получены делением нормативных сопротивлений на коэффициенты надежности по материалу, определенные в соответствии с табл. 3, с округлением до 5 Н/мм². В таблице приведены значения расчетных сопротивлений проката по ГОСТ 27772.

Приложение П.5.

Табл. В.4 СП 16.13330-2017.

Нормативные и расчетные сопротивления при растяжении, сжатии и изгибе фасонного проката в виде двутавров с параллельными гранями полок

Сталь	Толщина проката, мм	Нормат. сопротивление проката и труб, Н/мм ²		Расч. сопротивление проката и труб, Н/мм ²	
		R_{yn}	R_{un}	R_y	R_u
С255Б; С255Б-1	≤ 10	255	380	250	370
	Св. 10 до 20 вкл.	245	370	240	360
	Св. 20 до 40 вкл.	235	370	230	360
	Св. 40 до 60 вкл.	235	370	230	360
	Св. 60 до 80 вкл.	225	370	220	360
	Св. 80 до 100 вкл. > 100	215 200	370 360	210 195	360 350
С345Б	≤ 10	345	480	335	470
	Св. 10 до 20 вкл.	325	470	315	460
	Св. 20 до 40 вкл.	305	460	300	450
	Св. 40 до 60 вкл.	285	450	280	440
С345Б-1	≤ 10	345	490	335	480
	Св. 10 до 20 вкл.	325	470	315	460
	Св. 20 до 40 вкл.	305	460	300	450
	Св. 40 до 60 вкл.	285	450	280	440
С355Б	≤ 20	355	470	345	460
	Св. 20 до 40 вкл.	345	470	335	460
	Св. 40 до 60 вкл.	340	470	325	460
	Св. 60 до 80 вкл.	325	460	315	450
	Св. 80 до 100 вкл. > 100	315 295	460 460	305 290	450 450
С355Б-1	≤ 20	355	470	345	460
	Св. 20 до 40 вкл.	345	470	335	480
	Св. 40 до 60 вкл.	335	470	325	460
С390Б	≤ 30	390	520	380	505
	Св. 30 до 60 вкл.	370	490	360	480
	Св. 60 до 80 вкл.	360	480	350	470
	Св. 80 до 100 вкл.	350	480	340	470
	> 100	330	470	320	460
С440Б	≤ 20	440	600	430	585
	Св. 20 до 30 вкл.	430	560	420	545
	Св. 30 до 80 вкл.	420	520	410	505
	Св. 80 до 100 вкл.	400	520	390	505
	> 100	380	500	370	490

Примечание. Цифра 1 в первой графе означает вариант химического состава.

Приложение П.6.

Табл. В.5 СП 16.13330-2017 (с учетом изм. № 3).

Нормативные и расчетные сопротивления при растяжении, сжатии и изгибе фасонного проката

Сталь	Толщина проката ^{х)} , мм	Нормат. сопротивление ^{xx)} проката и труб, Н/мм ²		Расч. сопротивление ^{xxx)} проката и труб, Н/мм ²	
		R_{yn}	R_{un}	R_y	R_u
С245	От 4 до 20 вкл.	245	370	240	360
	Св. 20 до 40 вкл.	235	370	230	360
С255	От 4 до 10 вкл.	255	380	250	370
	Св. 10 до 20 вкл.	245	370	240	360
	Св. 20 до 40 вкл.	235	370	230	360
С345	От 4 до 10 вкл.	345	480	340	470
	Св. 10 до 20 вкл.	325	470	320	460
	Св. 20 до 40 вкл.	305	460	300	450
С345К	От 4 до 10 вкл.	345	480	340	470
С355	От 5 до 16 вкл.	355	490	350	480
	Св. 16 до 40 вкл.	345	480	340	470
	Св. 40 до 60 вкл.	340	470	330	460
С355-1	От 5 до 16 вкл.	355	490	350	480
	Св. 16 до 40 вкл.	345	480	340	470
	Св. 40 до 60 вкл.	340	470	330	460
С390	От 5 до 10 вкл.	390	520	380	505
	Св. 10 до 20 вкл.	380	500	370	480
	Св. 20 до 40 вкл.	370	490	360	480
	Св. 40 до 60 вкл.	365	485	350	475
С440	От 5 до 10 вкл.	440	600	430	585
	Св. 10 до 20 вкл.	440	580	430	565
	Св. 20 до 40 вкл.	430	550	420	535
	Св. 40 до 60 вкл.	420	520	410	505

^{х)} За толщину проката следует принимать толщину полки.

^{xx)} За нормативное сопротивление приняты гарантированные значения предела текучести и временного сопротивления, приводимые в национальных стандартах или технических условиях. В тех случаях, когда эти значения в национальных стандартах или технических условиях приведены только в одной системе единиц – кгс/мм², нормативные сопротивления, Н/мм², вычислены умножением соответствующих значений на 9,81 с округлением до 5 Н/мм².

^{xxx)} Значения расчетных сопротивлений получены делением нормативных сопротивлений на коэффициенты надежности по материалу, определенные в соответствии с табл. 3, с округлением до 5 Н/мм². В настоящей таблице приведены значения расчетных сопротивлений проката (за исключением двутавров с параллельными гранями полок) по ГОСТ 27772.

Примечание к таблицам в приложениях П.4, П.5 и П.6. В графе «Толщина проката» приведены сокращения слов: Св. – свыше; вкл. – включительно.

Приложение П.7.

Механические свойства листового проката (выписка из табл. 4 ГОСТ 27772-2021)

Класс прочности	Толщина, мм	Предел текуч., Н/мм ² , не менее	Врем. сопротивл., Н/мм ²	Относит. удлинение, %, не менее		Ударная вязкость KCV, Дж/см ² , не менее при температуре испытания, °С			
				$\delta_5^{x)}$	$\delta_{80}^{x)}$	0	- 20	- 40	- 60
С235	2 - 2,9	235	≥ 360	- ¹⁾	28	-	-	-	-
	3 - 4	235	≥ 360	26	- ¹⁾	-	-	-	-
С245	2 - 2,9	245	≥ 370	- ¹⁾	26	-	-	-	-
	3 - 4	245	≥ 370	26	- ¹⁾	-	-	-	-
	Св. 4 до 10 вкл.	235	≥ 370	25	- ¹⁾	34	-	-	-
	Св. 10 до 40 вкл.	235	≥ 370	25	- ¹⁾	34	-	-	-
С255	2 - 2,9	255	≥ 380	- ¹⁾	25	-	-	-	-
	4 - 10	245	≥ 380	25	- ¹⁾	34	34	-	-
	Св. 10 до 20	245	≥ 370	25	- ¹⁾	34	34	-	-
	Св. 20 до 40	235	≥ 370	25	- ¹⁾	34	34	-	-
С345	2 - 3,9	345	≥ 490	- ¹⁾	21	-	-	-	-
	4 - 10	345	≥ 490	21	- ¹⁾	-	34	34	-
	Св. 10 до 20 вкл.	325	≥ 470	21	- ¹⁾	-	34	34	-
	Св. 20 до 40 вкл.	305	≥ 460	21	- ¹⁾	-	34	34	-
	Св. 40 до 60 вкл.	285	≥ 450	21	- ¹⁾	-	34	34	-
	Св. 60 до 80 вкл.	275	≥ 440	21	- ¹⁾	-	34	34	-
	Св. 80 до 160 вкл.	265	≥ 430	21	- ¹⁾	-	34	34	-
С345-К	4 - 10	345	≥ 470	20	- ¹⁾	-	-	-	-
С355	4 - 16	355	≥ 470	21	- ¹⁾	-	34	34	-
	Св. 16 до 40 вкл.	345	≥ 470	21	- ¹⁾	-	34	34	-
	Св. 40 до 60 вкл.	335	≥ 470	21	- ¹⁾	-	34	34	-
	Св. 60 до 80 вкл.	325	≥ 460	21	- ¹⁾	-	34	34	-
	Св. 80 до 100 вкл.	315	≥ 460	21	- ¹⁾	-	34	34	-
	Св. 100 до 160 вкл.	295	≥ 460	21	- ¹⁾	-	34	34	-
С355-1	8 - 16	355	≥ 470	21	- ¹⁾	-	34	34	-
	Св. 16 до 40 вкл.	345	≥ 470	21	- ¹⁾	-	34	34	-
	Св. 40 до 50 вкл.	335	≥ 470	21	- ¹⁾	-	34	34	-
С355К	8 - 16	355	≥ 470	21	- ¹⁾	-	34	34	-
	Св. 16 до 40 вкл.	345	≥ 470	21	- ¹⁾	-	34	34	-
	Св. 40 до 50 вкл.	335	≥ 470	21	- ¹⁾	-	34	34	-
С355П	8 - 16	355	≥ 470	21	- ¹⁾	-	34	34	-
	Св. 16 до 40 вкл.	345	≥ 470	21	- ¹⁾	-	34	34	-
С390-1	8 - 50	390	520-680	20	- ¹⁾	-	-	34	34
С390	8 - 40	390	520-680	20	- ¹⁾	-	-	34	34
	Св. 40 до 60 вкл.	385	520-680	20	- ¹⁾	-	-	34	34
	Св. 60 до 80 вкл.	375	510-670	20	- ¹⁾	-	-	34	34
	Св. 80 до 100 вкл.	365	510-670	20	- ¹⁾	-	-	34	34
	Св. 100 до 160 вкл.	360	510-670	20	- ¹⁾	-	-	34	34
С440	8 - 40	440	540-700	20	- ¹⁾	-	-	34	34
	Св. 40 до 60 вкл.	430	540-700	20	- ¹⁾	-	-	66	66
	Св. 60 до 80 вкл.	420	540-700	20	- ¹⁾	-	-	66	66
	Св. 80 до 100 вкл.	410	530-690	20	- ¹⁾	-	-	66	66

	Св. 100 до 120 вкл.	400	530-690	20	- ¹⁾	-	-	66	66
C550	8 - 50	540	640-800	17	- ¹⁾	-	-	66	66
C590	8 - 50	590	685-845	15	- ¹⁾	-	-	66	66

¹⁾ Значение относительного удлинения не нормируют и не контролируют.

^{x)} δ_5 и δ_{80} относительные удлинения, определяемые на базе 5 и 80 мм соответственно.

Примечания.

1. Знак «-» означает, что показатель не нормируют, но определяют с указанием фактических результатов, в случае, если это испытание предусмотрено заказываемой категорией (см. табл. 3 данного ГОСТа).

2. Допускается снижение величины ударной вязкости ударной вязкости после механического старения не более чем на 30% на одном образце из одной партии при условии, что среднее арифметическое значение результатов испытаний должно быть не ниже указанных норм.

3. При отсутствии на диаграмме растяжения физического предела текучести допускается определять условный предел текучести $\sigma_{0,2}$. Фактические значения условного предела текучести $\sigma_{0,2}$ должны соответствовать нормам для предела текучести от σ_T .

Приложение П.8.

Механические свойства сортового и фасонного проката (выписка из табл. 5 ГОСТ 27772-2021)

Класс прочности	Толщина, мм	Предел текуч., Н/мм ²	Врем. сопротивл., Н/мм ²	Относ. удлинен., %	Ударная вязкость KCV, Дж/см ² , при температуре испытания, °С		
					0	- 20	- 40
С245	4 - 10	245	370	25	34	-	-
	Св. 10 до 20 вкл.	245	370	24	34	-	-
	Св. 20 до 40 вкл.	235	370	24	34	-	-
С255	4 - 10	255	380	25	34	34	-
	Св. 10 до 20 вкл.	245	370	25	34	34	-
	Св. 20 до 40 вкл.	235	370	24	34	34	-
	Св. 40 до 60 вкл.	225	370	23	34	34	-
С345	4 - 10	345	480	21	34	34	34
	Св. 10 до 20 вкл.	325	470	21	34	34	34
	Св. 20 до 40 вкл.	305	460	21	34	34	34
	Св. 40 до 60 вкл.	285	450	20	-	34	34
С345-К	4 - 10	345	470	20	-	-	-
С355	4 - 10	355	470	21	-	34	34
	Св. 10 до 20 вкл.	355	470	21	-	34	34
	Св. 20 до 40 вкл.	345	470	21	-	34	34
	Св. 40 до 60 вкл.	335	470	21	-	34	34
С355-1	8 - 20	355	480	21	-	34	-
	Св. 20 до 40 вкл.	345	480	21	-	34	-
С390; С390-1	4 - 8	390	520	20	-	34	34
	Св. 8 до 10 вкл.	390	520	20	-	34	34
	Св. 10 до 20 вкл.	380	500	20	-	34	34
	Св. 20 до 40 вкл.	370	490	20	-	34	34
	Св. 40 до 60 вкл.	360	510	19	-	-	34
С490	4 - 10	440	590	19	-	-	34
	Св. 10 до 20 вкл.	435	580	18	-	-	34
	Св. 20 до 40 вкл.	430	570	18	-	-	34
	Св. 40 до 60 вкл.	420	560	18	-	-	34

Примечания.

Знак «-» означает, что показатель не нормируют, но определяют с указанием фактических результатов, в случае, если это испытание предусмотрено заказываемой категорией (см. табл. 3 данного ГОСТа).

Приложение П.9.

Механические свойства стали для двутавров с параллельными гранями полок
 (выписка из табл. 7 ГОСТ Р 57837-2017 с изм. № 1).

Класс прочности	Толщина, мм	Предел текуч., Н/мм ²	Врем. сопротивл., Н/мм ²	Относ. удли., %	Ударная вязкость KCV, Дж/см ² , не менее при температуре, °С			
					0	- 20	- 40	- 60
С245Б	≤ 10	245	380	26	34	29	-	-
	Св. 10 до 20	245	370	25	34	29	-	-
	Св. 20 до 40	235	370	24	-	-	-	-
	Св. 40 до 100	225	370	23	-	-	-	-
	> 100	205	360	22	-	-	-	-
С255Б	≤ 10	255	380	25	34	34	-	-
	Св. 10 до 20	245	370	25	34	34	-	-
	Св. 20 до 40	235	370	24	34	34	-	-
	Св. 40 до 100	225	370	23	34	34	-	-
	> 100	205	360	22	34	34	-	-
С345Б С345Б-1	≤ 10	345	480	21	-	34	34	-
	Св. 10 до 20	325	470	21	-	34	34	-
	Св. 20 до 40	305	460	21	-	34	34	-
	Св. 40 до 100	285	450	20	-	34	34	-
	> 100	275	440	19	-	34	34	-
С355Б	≤ 20	355	480	22	-	34	34	-
	Св. 20 до 40	345	470	22	-	34	34	-
	Св. 40 до 60	335	470	21	-	34	34	-
	Св. 60 до 80	325	460	20	-	34	34	-
	Св. 80 до 100	315	460	19	-	34	34	-
	> 100	295	450	18	-	34	34	-
С390Б	≤ 20	390	530	20	-	-	34	34
	Св. 20 до 40	375	520	20	-	-	34	34
	Св. 40 до 60	360	510	19	-	-	34	34
	Св. 60 до 80	345	500	19	-	-	34	34
	Св. 80 до 100	330	490	18	-	-	34	34
	> 100	315	480	18	-	-	34	34
С440Б	≤ 20	440	590	19	-	-	34	34
	Св. 20 до 40	425	580	18	-	-	34	34
	Св. 40 до 60	410	570	17	-	-	34	34
	Св. 60 до 80	395	560	17	-	-	34	34
	Св. 80 до 100	380	550	17	-	-	34	34
	> 100	365	540	17	-	-	34	34

Примечания.

1. Знак «-» означает, что характеристику не нормируют и не контролируют.
2. Нормы ударной вязкости для класса прочности С255Б при температуре испытания минус 20°С и классов прочности С390Б и С440Б при температуре испытания минус 60°С факультативны в течение трех лет с момента введения в действие настоящего стандарта.

Приложение П.10.

Химический состав и величина углеродного эквивалента по плавочному анализу ковшовой пробы

(выписка из табл. 1 ГОСТ 27772-2021).

Класс прочности	Массовая доля элементов, %														С _{экв} , ≤
	C, ≤	Mn	Si	S, ≤	P	Cr	Ni	Cu	Mo	V	Nb	Al	Ti	Zr	
C235	0,22	≤ 0,6	≤ 0,05	0,04	≤ 0,04	≤ 0,3	≤ 0,3	≤ 0,3	-	-	-	-	-	-	-
C245	0,22	≤ 1	0,06 – 0,16	0,025	≤ 0,04	≤ 0,3	≤ 0,3	≤ 0,3	-	-	-	-	-	-	-
C255	0,17	≤ 1	0,15 – 0,3	0,025	≤ 0,035	≤ 0,3	≤ 0,3	≤ 0,3	-	-	-	≤ 0,05	≤ 0,03	-	-
C345	0,15	1,3 – 1,7	≤ 0,8	0,025	≤ 0,03	≤ 0,3	≤ 0,3	≤ 0,3	-	-	-	≤ 0,06	≤ 0,035	-	0,45
C345K	0,12	≤ 0,6	0,17 – 0,37	0,025	0,02 – 0,12	0,5 – 0,8	0,3 – 0,6	0,3 – 0,5	-	-	-	0,08 – 0,15	≤ 0,035	-	0,45
C355	0,15	1,0 – 1,8	≤ 0,8	0,025	≤ 0,025	≤ 0,3	≤ 0,3	≤ 0,3	-	-	-	≤ 0,06	≤ 0,035	-	0,45
C355-1	0,15	0,6 – 0,9	0,4 – 0,7	0,015	≤ 0,017	0,6 – 0,9	0,3 – 0,6	0,2 – 0,4	-	-	-	0,02 – 0,06	≤ 0,035	-	0,46
C355K	0,15	0,8 – 1,1	0,4 – 0,6	0,015	≤ 0,02	0,5 – 0,7	0,5 – 0,7	0,4 – 0,7	-	-	-	0,02 – 0,06	≤ 0,035	≤ 0,01	0,45
C355П	0,10	0,6 – 0,9	0,15 – 0,35	0,015	≤ 0,02	≤ 0,8	≤ 0,3	≤ 0,3	0,08 – 0,2	≤ 0,09	0,02 – 0,09	0,02 – 0,06	≤ 0,035	-	0,45
C390	0,12	1,3 – 1,7	≤ 0,65	0,01	≤ 0,017	≤ 0,3	≤ 0,3	≤ 0,3	-	≤ 0,12	≤ 0,09	≤ 0,06	≤ 0,035	-	0,46
C390-1	0,12	0,6 – 0,9	0,8 – 1,1	0,01	≤ 0,017	0,6 – 0,9	0,5 – 0,8	0,4 – 0,6	-	-	-	0,02 – 0,06	≤ 0,035	-	0,46
C440	0,12	1,3 – 1,7	≤ 0,55	0,01	≤ 0,017	≤ 0,3	≤ 0,3	≤ 0,3	-	≤ 0,09	≤ 0,09	≤ 0,06	≤ 0,035	-	0,46
C550	0,10	1,3 – 1,95	≤ 0,55	0,007	≤ 0,015	≤ 0,3	≤ 0,3	≤ 0,3	≤ 0,35	≤ 0,1	≤ 0,1	≤ 0,06	≤ 0,035	-	0,47
C590	0,10	1,3 – 1,95	≤ 0,55	0,004	≤ 0,015	≤ 0,3	≤ 0,3	≤ 0,3	≤ 0,35	≤ 0,1	≤ 0,1	≤ 0,06	≤ 0,035	-	0,51

89

Примечания

1. В стали, предназначенной для изготовления продукции классов прочности C355-1 и C390-1, допускается массовая доля ванадия V не более 0,08% и (или) ниобия Nb не более 0,06%.

2. В стали, предназначенной для изготовления продукции классов прочности C345, C355, C390, C440 допускается массовая доля ниобия Nb не более 0,09%, ванадия V – не более 0,13%, при этом суммарная массовая доля (Ti + V + Nb) не должна превышать 0,15%.

3. Знак « - » означает, что массовую долю химических элементов, кроме указанных в примечаниях, не нормируют и не контролируют.

Приложение П.11.

Химический состав и величина углеродного эквивалента двугавров с параллельными полками по анализу ковшевой пробы
(выписка из табл. 5 ГОСТ Р 57837-2017 с изм. № 1).

Класс прочности	Массовая доля элементов, %									C _{экв} , ≤
	C, ≤	Mn	Si	S, ≤	P, ≤	V	Al	Ti	N, ≤	
C245Б	0,22	≤ 1,00	0,05 – 0,15	0,025	0,025	-	0,02 – 0,05	≤ 0,030	0,012	-
C255Б	0,22	≤ 1,00	0,15 – 0,30	0,025	0,035	-	0,02 – 0,05	≤ 0,030	0,012	-
C345Б	0,15	1,3 – 1,7	≤ 0,8	0,025	0,030	-	0,015 – 0,06	≤ 0,035	0,012	0,45
C355Б	0,14	1,0 – 1,8	0,15 – 0,80	0,025	0,025	-	0,02 – 0,06	≤ 0,035	0,012	0,45
C390Б	0,16	1,3 – 1,7	0,15 – 0,50	0,010	0,020	0,12	0,02 – 0,06	≤ 0,035	0,020	0,46
C440Б	0,17	1,3 – 1,7	0,15 – 0,50	0,010	0,015	0,14	0,02 – 0,06	≤ 0,035	0,020	0,46

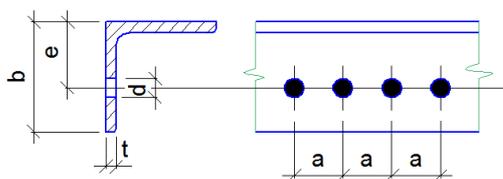
Примечания

1. В стали допускается массовая доля остаточных элементов никеля (Ni), хрома (Cr), меди (Cu) не более 0,3% каждого.
3. Знак « - » означает, что массовую долю элемента и величину углеродного эквивалента не нормируют и не контролируют.

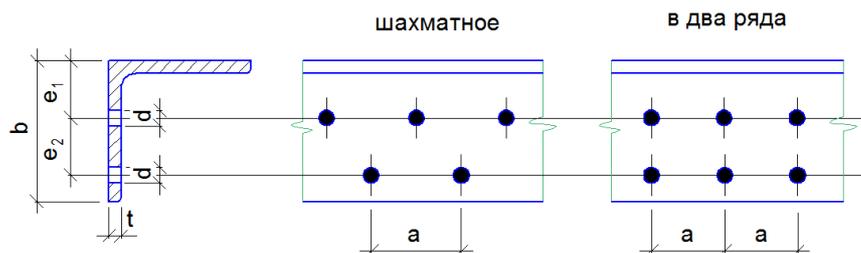
Приложение П.12.

Риски прокатных уголков (выписка из ГОСТ 24839-2012)

Однорядное расположение отверстий



Двухрядное расположение отверстий



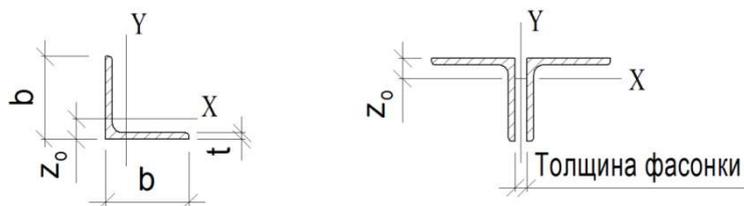
Однорядное расположение отверстий					Двухрядное расположение отверстий						
b, мм	t, мм	e, мм	d _{max} , мм		b, мм	Порядок располож. отверстий	t, мм	e ₁ , мм	e ₂ , мм	d _{max} , мм	
			для болтов кл. пр. 5.6 – 8.8	для высокопр. болтов						для болтов кл. пр. 5.6 – 8.8	для высокопр. болтов
45	3-5	25	13	-	125	Шахматн.	7-12	55	35	28	25
50	3-8	30	15	-			14;16			25	-
56	4-6	30	17	-	140	Рядовой	8-10	55	55	21	21
	8		15				-				
63	4-8	35	19	-			Шахматн.	8-12	60	45	28
	10		17		-						
70	4,5-8	40	23	-	160	Рядовой	9-20	65	65	25	23
75	5-9	45	25	-		Шахматн.	9-20	65	60	28	25
					Рядовой	0-12	65	75	28	28	
80	5-8	45	25	-	180	Шахматн.	0-12	65	70	31	31
	10;12		23		-						
90	5,5-7	50	28	31	220	Рядовой, шахматн.	14;16	80	90	31	31
	8;9			28*)	250	Рядовой, шахматн.	2-30	90	100	31	31
	10		25	-							
100	6,5-12	60	31	31	*) максимальный диаметр болта $d_b = 24$ мм						
	14;16		28								
110	6,5-12	60	31	31							
125	7-16	75	31	31							

Примечание. Размеры, определяющие расположение отверстий для высокопрочных болтов, установлены с учетом габарита головки гаечного ключа не более 75 мм.

Приложение П.13.

Сокращенный сортамент равнополочных уголков (выписка из ГОСТ 8509-93).

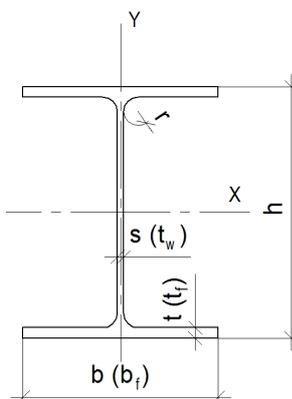
Радиусы инерции двух уголков при разных толщинах фасонки.



Уголок	Размеры, мм		Площадь сечения, см ²	Масса, кг/м	Радиус инерции i_x , см	Z_0 , см	Радиус инерции двух уголков i_y (см) при толщине фасонки (мм)			
	b	t					8	10	12	14
50x4	50	4	3,89	3,05	1,54	1,38	2,35	2,43	2,51	2,59
50x5		5	4,80	3,77	1,53	1,42	2,38	2,45	2,53	2,61
63x5	63	5	6,13	4,81	1,94	1,74	2,88	2,96	3,04	3,11
63x6		6	7,28	5,72	1,93	1,78	2,90	2,98	3,06	3,14
70x5	70	5	6,86	5,38	2,16	1,90	3,15	3,23	3,30	3,38
70x6		6	8,15	6,39	2,15	1,94	3,18	3,25	2,33	3,41
75x6	75	6	8,78	6,89	2,30	2,06	3,37	3,44	3,52	3,60
75x8		8	11,50	9,02	2,28	2,15	3,42	3,49	3,57	3,65
80x6	80	6	9,38	7,36	2,46	2,19	3,57	3,65	3,72	3,79
80x8		8	12,30	9,65	2,44	2,27	3,62	3,69	3,77	3,84
90x6	90	6	10,61	8,33	2,78	2,43	3,97	4,04	4,11	4,19
90x7		7	12,28	9,64	2,77	2,47	3,99	4,06	4,14	4,21
90x8		8	13,93	10,93	2,76	2,51	4,01	4,08	4,16	4,24
100x7	100	7	13,75	10,79	3,08	2,71	4,38	4,45	4,52	4,59
100x8		8	15,60	12,25	3,07	2,75	4,40	4,47	4,54	4,62
100x10		10	19,24	15,10	3,05	2,83	4,44	4,52	4,59	4,67
110x8	110	8	17,20	13,50	3,39	3,00	4,80	4,88	4,95	5,02
125x8	125	8	19,69	15,46	3,87	3,36	5,39	5,46	5,53	5,60
125x9		9	22,00	17,30	3,86	3,40	5,42	5,49	5,56	5,63
125x10		10	24,33	19,10	3,85	3,45	5,44	5,51	5,58	5,65
125x12		12	28,89	22,68	3,82	3,53	5,48	5,55	5,62	5,70
140x9	140	9	24,72	19,41	4,34	3,78	6,02	6,09	6,16	6,23
140x10		10	27,33	21,45	4,33	3,82	6,05	6,12	6,19	6,26
140x12		12	32,49	25,50	4,31	3,90	6,08	6,15	6,23	6,30
160x10	160	10	31,43	24,67	4,96	4,30	6,84	6,91	6,98	7,05
160x12		12	37,39	28,35	4,94	4,39	6,88	6,95	7,02	7,09
160x14		14	43,57	33,97	4,92	4,47	6,89	6,96	7,03	7,10
180x11	180	11	38,80	30,47	5,60	4,85	7,67	7,74	7,81	7,88
180x12		12	42,19	33,12	5,59	4,89	7,69	7,76	7,83	7,90
200x12	200	12	47,10	36,97	6,22	5,37	8,48	8,55	8,62	8,69
200x14		14	54,60	42,80	6,20	5,46	8,52	8,59	8,66	8,73

Приложение П.14.

Сокращенный сортамент двутавров стальных горячекатаных с параллельными гранями полок типа Б и К (выписка из ГОСТ Р 57837-2017 с изм. № 1)



№ проф.	Номинальные размеры, мм				Площ. сеч. A , см ²	Масса 1 п.м g , кг	Справочные величины для осей профиля						
	h	b	s	t			Ось X				Ось Y		
							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
Тип Б – Балочные нормальные двутавры													
10Б1	100	55	4,1	5,7	10,32	8,1	171	34,2	19,7	4,07	15,92	5,79	1,24
12Б1	117,6	64	3,8	5,1	11,03	8,7	257	43,8	24,94	4,83	22,39	7	1,42
12Б2	120	64	4,4	6,3	13,21	10,4	318	53	30,36	4,90	27,67	8,65	1,45
14Б1	137,4	73	3,8	5,6	13,39	10,5	435	63,3	35,8	5,70	36,42	9,98	1,65
14Б2	140	73	4,7	6,9	16,43	12,9	541	77,3	44,17	5,74	44,92	12,31	1,65
16Б1	157	82	4	5,9	16,18	12,7	689	87,8	49,55	6,53	54,43	13,27	1,83
16Б2	160	82	5	7,4	20,09	15,8	869	108,7	61,93	6,58	68,31	16,66	1,84
18Б1	177	91	4,3	6,5	19,58	15,4	1063	120,1	67,66	7,37	81,89	18	2,04
18Б2	180	91	5,3	8	23,95	18,8	1317	146,3	83,21	7,42	100,85	22,16	2,05
20Б1	200	100	5,5	8	27,16	21,3	1844	184,4	104,73	8,24	133,91	26,78	2,22
20Б2	203	101	6,5	9,5	32,19	25,3	2218	218,6	124,99	8,30	163,93	32,46	2,26
20Б3	208	102	8	12	40,24	31,6	2853	274,3	158,48	8,42	213,50	41,86	2,30
25Б1	248	124	5	8	32,68	25,7	3537	285,30	159,68	10,40	254,85	41,11	2,79
25Б2	250	125	6	9	37,66	29,6	4052	324,10	182,93	10,37	293,85	47,02	2,79
25Б3	255	126	7,5	11,5	47,62	37,4	5238	410,80	233,88	10,49	384,79	61,08	2,84
30Б1	298	149	5,5	8	40,8	32	6318	424	237,53	12,44	442	59,33	3,29
30Б2	300	150	6,5	9	46,78	36,7	7209	480,6	271,06	12,41	507,63	67,67	3,29
30Б3	305	151	8	11,5	58,74	46,1	9255	606	344,37	12,55	661,88	87,67	3,36
35Б1	346	174	6	9	52,68	41,4	11094	641,3	358,09	14,51	791,54	90,98	3,88
35Б2	350	175	7	11	63,14	49,6	13559	774,8	433,96	14,62	984,34	112,5	3,95
35Б3	355	176	8,5	13,5	77,08	60,5	16797	946,3	533,54	14,76	1229,4	139,7	3,99
40Б1	396	199	7	11	72,16	56,6	20019	1011,1	563,93	16,66	1447,1	145,44	4,48
40Б2	400	200	8	13	84,12	66	23704	1185,2	663,13	16,79	1736,4	173,64	4,54
40Б3	406	201	9,5	16	102,05	80,1	29352	1445,9	813,38	16,96	2169,9	215,91	4,61
45Б1	446	199	8	12	84,3	66,2	28697	1286,9	725,06	18,45	1580	158,8	4,33
45Б2	450	200	9	14	96,76	76	33451	1486,7	839,53	18,59	1871,7	187,16	4,40
45Б3	456	201	10,5	17	115,43	90,6	40710	1785,5	1012,6	18,78	2307,6	229,61	4,47
50Б1	492	199	8,8	12	92,38	72,5	36842	1497,6	853,45	19,97	1582	158,99	4,14

50Б2	496	199	9	14	101,27	79,5	41869	1688,3	957,23	20,33	1844,9	185,42	4,27
50Б3	500	200	10	16	114,23	89,7	47846	1913,8	1087,6	20,47	2140,8	214,08	4,33
55Б1	543	220	9,5	13,5	113,36	89	55677	2050,7	1164,9	22,16	2405,5	218,69	4,61
55Б2	547	220	10	15,5	124,74	97,9	62784	2295,6	1301,5	22,43	2761,3	251,03	4,70
55Б3	553	221	12	18,5	148,63	116,7	75321	2724,1	1554,5	22,51	3342,9	302,53	4,74
60Б1	596	199	10	15	120,45	94,6	68716	2305,9	1325,4	23,88	1979,7	198,96	4,05
60Б2	600	200	11	17	134,41	105,5	77632	2587,7	1489,4	24,03	2278,2	227,82	4,12
60Б3	604	201	12,5	19	151,28	118,8	87472	2896,4	1675,4	24,05	2586,6	257,38	4,14
70Б1	691	260	12	15,5	164,74	129,3	125922	3644,6	2094,8	27,65	4557,4	350,57	5,26
70Б2	697	260	12,5	18,5	183,64	144,1 6	145904	4186,6	2392,7	28,19	5437,7	418,28	5,41
70Б3	702	261	14,5	21	210,26	165,1	167085	4760,3	2736,1	28,19	6248,5	478,81	5,45
Тип К – Колонные двутавры													
15К1	147	149	6	8,5	34,17	26,8	1367	186	103,63	6,32	469,21	62,98	3,71
15К2	150	150	7	10	40,14	31,5	1641	218,8	123,04	6,40	563,28	75,10	3,75
15К3	155	151	8,5	12,5	49,84	39,1	2118	273,2	155,69	6,52	718,46	95,16	3,80
20К1	196	199	6,5	10	52,69	41,4	3846	392,5	216,41	8,54	1314,4	132,11	4,99
20К2	200	200	8	12	63,53	49,9	4716	471,6	262,75	8,62	1601,5	160,15	5,02
20К3	204	201	9	14	73,57	57,8	5602	549,3	308,35	8,73	1896,8	188,73	5,08
25К1	246	249	8	12	79,72	62,6	9171	745,6	410,68	10,73	3090,1	248,2	6,23
25К2	250	250	9	14	92,18	72,4	10833	866,6	480,25	10,84	3648,8	291,9	6,29
25К3	253	251	10	15,5	102,21	80,2	12154	960,8	535,41	10,90	4088,8	325,8	6,32
30К1	298	299	9	14	110,8	87	18849	1265	694,64	13,04	6241,2	417,5	7,50
30К2	300	300	10	15	119,78	94	20410	1360,7	750,59	13,05	6754,8	450,3	7,51
30К3	300	305	15	15	134,78	105,8	21535	1435,7	806,84	12,64	7104,8	465,9	7,26
35К1	342	348	10	15	139,03	109,1	31248	1827,4	1001,17	14,99	10542	605,9	8,71
35К2	350	350	12	19	173,87	136,5	40295	2064,2	1272,51	15,22	13586	776,3	8,84
35К3	355	351	13,5	21,5	196,48	154,2	46231	2302,6	1448,66	15,34	15507	883,6	8,84
40К1	394	398	11	18	186,81	146,7	56145	2850	1559,22	17,34	18923	950,9	10,06
40К2	400	400	13	21	218,69	171,7	66621	3331,1	1836,23	17,45	22413	1120,6	10,12
40К3	406	403	16	24	254,87	200,1	78039	3844,3	2139,84	17,50	26200	1300,3	10,14

Пронин Владислав Валерьевич

Практические занятия
по курсу металлических конструкций

Задания и примеры выполнения

Учебное пособие

Подписано в печать

формат 60x90 1/8. Бумага газетная. Печать трафаретная.

Уч. изд. л. 8,9. Усл. печ. л. 9,1. Тираж 65 экз. Заказ №

Федеральное государственное образовательное учреждение высшего образования
«Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет»
603000, Нижний Новгород, ул. Ильинская, 65.

Полиграфический центр ННГАСУ, 603000, Нижний Новгород, ул. Ильинская, 65
<http://www.nngasu.ru>, rector@nngasu.ru