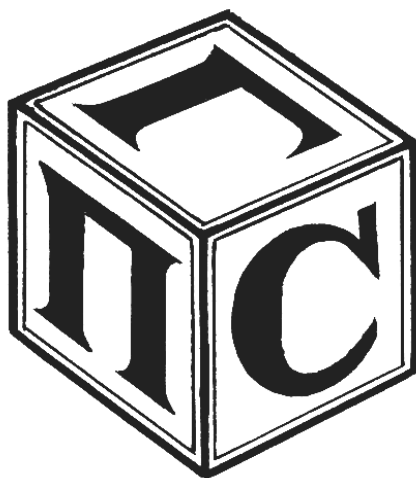


МЕЖГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Промышленное и гражданское строительство»

МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ КОНСТРУКЦИИ

*Методические рекомендации к лабораторным работам
для студентов специальности
7-07-0732-01 «Строительство зданий и сооружений»
очной и заочной форм обучения*



Могилев 2026

УДК 674.012.45
ББК 38.5
М54

Рекомендовано к изданию
учебно-методическим отделом
Белорусско-Российского университета

Одобрено кафедрой «Промышленное и гражданское строительство»
«23» декабря 2025 г., протокол № 6

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

Рецензент ст. преподаватель Н. В. Курочкин

В методических рекомендациях приведен порядок выполнения лабораторных работ по дисциплине «Металлические конструкции» для студентов специальности 7-07-0732-01 «Строительство зданий и сооружений» очной и заочной форм обучения.

Учебное издание

МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ КОНСТРУКЦИИ

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

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

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

© Белорусско-Российский
университет, 2026

Содержание

Введение.....	4
1 Лабораторная работа № 1. Определение твердости металлов и сплавов.....	5
2 Лабораторная работа № 2. Исследование работы стали под нагрузкой.....	10
3 Лабораторная работа № 3. Исследование работы сварных соединений.....	15
4 Лабораторная работа № 4. Исследование работы болтовых соединений.....	23
Список литературы.....	28

Введение

Целью преподавания дисциплины «Металлические конструкции» является освоение студентами основных знаний о свойствах и применении в строительстве металлических конструкций.

По дисциплине «Металлические конструкции» студенты специальности 7-07-0732-01 «Строительство зданий и сооружений» выполняют цикл лабораторных работ в объеме, предусмотренном учебным планом и программой.

Цель лабораторных работ – на основе экспериментальных исследований провести изучение свойств металлических конструкций, работы стали под нагрузкой и определение напряженно-деформированного состояния элементов металлических конструкций, рассмотреть основные виды соединения металлических конструкций. В процессе подготовки и проведения лабораторных работ студенты знакомятся с постановкой задач исследования и методами экспериментального решения этих задач.

Личное участие каждого студента в экспериментальной и теоретической частях исследований является обязательным.

Материалы лабораторных работ представляются в виде индивидуальных отчетов, которые подлежат защите.

К работе с испытательными машинами и приборами в лаборатории студенты допускаются после инструктажа по технике безопасности.

Методические рекомендации используются студентами при подготовке к выполнению соответствующих лабораторных работ и их защите.

В процессе выполнения лабораторных работ студенты научатся пользоваться действующими строительными нормами и правилами, руководствами, справочными и литературными материалами.

1 Лабораторная работа № 1. Определение твердости металлов и сплавов

Цель работы: ознакомление с основными методами измерения твердости; приобретение практических навыков в работе с приборами для измерения твердости.

Определение твердости

Твердость – свойство материала оказывать сопротивление пластической деформации при контактном воздействии в поверхностном слое.

Этот вид механических испытаний не связан с разрушением металла и, кроме того, в большинстве случаев не требует приготовления специальных образцов.

Измерение твердости вследствие быстроты и простоты осуществления, а также возможности без разрушения изделия судить о его свойствах получило широкое применение для контроля качества металла в металлических изделиях и деталях. Существует целый ряд методов измерения твердости: статические, динамические, специальные.

Наибольшее применение в промышленности нашли статические методы по Бринеллю, Роквеллу и Виккерсу.

Определение твердости по Бринеллю

Сущность метода заключается во вдавливании стального шарика диаметром D в образец под действием нагрузки F и измерении диаметра отпечатка d после снятия испытательной нагрузки (рисунок 1.1).

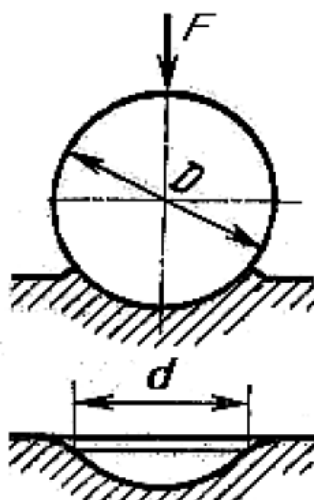


Рисунок 1.1 – Схема определения твердости по Бринеллю

Применяются шарики диаметром 1,0; 2,0; 2,5; 5,0; 10,0 мм. Нагрузка изменяется в пределах 49,03...29420 Н.

Твердость определяют по формуле как отношение приложенной нагрузки к поверхности сферического отпечатка:

$$HB = \frac{0,102 \cdot 2 \cdot F}{\pi \cdot D \cdot \left(D - \sqrt{D^2 - d^2} \right)}, \quad (1.1)$$

где F – прилагаемая нагрузка, Н;

D – диаметр шарика, мм;

d – диаметр отпечатка, мм.

Для железа, стали, чугуна и других прочных сплавов рекомендуются следующие условия испытаний:

– $D = 1,0$ мм, $F = 294,2$ Н;

– $D = 2$ мм, $F = 1177$ Н;

– $D = 2,5$ мм, $F = 1839$ Н;

– $D = 5,0$ мм, $F = 7355$ Н;

– $D = 10,0$ мм, $F = 29420$ Н.

Минимальная толщина испытуемого образца – 0,09 мм. При этом испытания проводятся шариком диаметром 1,0 мм при нагрузке 49,03 Н. Наиболее часто определение твердости осуществляется шариком диаметром 10,0 мм при нагрузке 29420 Н и продолжительности выдержки под нагрузкой 10 с. В этом случае твердость обозначается цифрами, характеризующими ее величину, и буквами *HB*, например: 170 *HB*. При других условиях испытаний после букв *HB* указываются условия испытания в следующем порядке D , F и время выдержки под нагрузкой, например: 190 *HB* 5/7350/20.

Между временным сопротивлением и числом твердости *HB* существует следующая зависимость: для стали $\sigma_B = 0,34HB$, для медных сплавов $\sigma_B = 0,45HB$ и для алюминиевых сплавов $\sigma_B = 0,35HB$.

Метод Бринелля не рекомендуется применять для стали с твердостью более 450 *HB*, а для цветных металлов – более 200 *HB*. При использовании вместо стального твердосплавного шарика предельное значение твердости не должно превышать 650. В этом случае в обозначение твердости вводится дополнительно буква *W*, например: 570 *HBW*.

Определение твердости по Роквеллу

Сущность метода заключается во вдавливании наконечника с алмазным конусом с углом у вершины 120° (шкалы *A* и *C*) или со стальным шариком диаметром 1,5875 мм (шкала *B*) в испытуемый образец (изделие) под действием последовательно прилагаемых предварительной F_0 и основной F_1 нагрузок и измерений остаточного увеличения e глубины внедрения наконечника после снятия основной и сохранения предварительной нагрузки в единицах измерения 0,002 мм. При испытании с использованием шкалы *A* нагрузка составляет 588 Н, шкалы *B* – 980 Н, шкалы *C* – 1470 Н. Схема определения твердости по

Роквеллу приведена на рисунке 1.2.

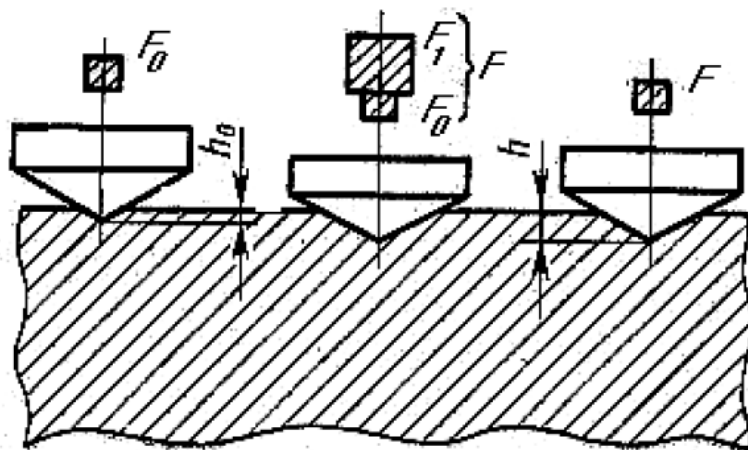


Рисунок 1.2 – Схема определения твердости по Роквеллу

Под нагрузкой F_0 индикатор прибора вдавлируется в образец на глубину h_0 . Затем на испытуемый образец подается полная нагрузка $F = F_0 + F_1$ и глубина погружения наконечника возрастает. После снятия основной нагрузки F_1 прибор показывает число твердости по Роквеллу HR . Чем меньше глубина вдавливания h , тем выше твердость испытуемого материала. Единица твердости по Роквеллу – безразмерная величина, соответствующая осевому перемещению индикатора на 0,002 мм.

Числа твердости определяются по формулам.

$$HRC(HRA) = 100 - e; \quad (1.2)$$

$$HRB = 180 - e. \quad (1.3)$$

Пределы измерения твердости по шкале A – 70...85, шкале B – 25...100, шкале C – 22...63. Условная запись твердости для шкалы A – HRA , шкалы B – HRB , шкалы C – HRC . Например, 60 HRC (твердость 60 по шкале C). Шкала A используется для измерения твердости очень твердых, но хрупких материалов и тонких поверхностных слоев (0,5...1,0 мм). По шкале B определяют твердость сравнительно мягких материалов ($< 400 HB$). Шкала C используется для испытания материалов, имеющих высокую твердость ($> 450 HB$).

Определение твердости по Виккерсу

Метод заключается во вдавливании алмазного наконечника, имеющего форму правильной четырехгранной пирамиды (угол при вершине 136°), в образец (изделие) под действием нагрузки F и измерении диагонали отпечатка d , оставшегося после снятия нагрузки (рисунок 1.3).

Нагрузка может изменяться в пределах 9,8...980 Н. Твердость по Виккерсу определяется по формуле

$$HV = 0,189 \cdot \frac{F}{d^2}. \quad (1.4)$$

Метод используют для определения твердости деталей малой толщины и тонких поверхностных слоев, имеющих высокую твердость. Чем тоньше материал, тем меньше должна быть нагрузка.

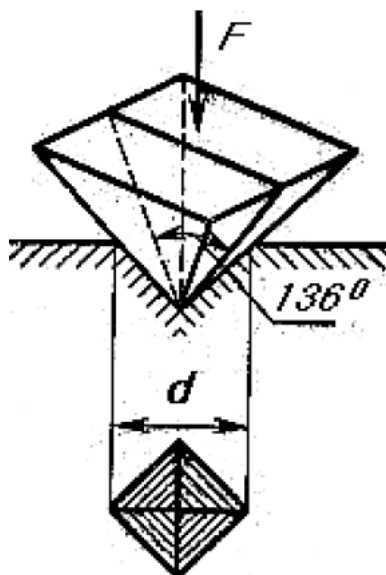


Рисунок 1.3 – Схема определения твердости по Виккерсу

В случае испытания при нагрузке 294 Н и времени выдержки 10...15 с условное обозначение твердости по Виккерсу *HV* (например, 430 *HV*). При других условиях испытаний после букв указывается нагрузка и продолжительность выдержки под нагрузкой. Например, 250 *HV* 10/40.

Методы *HB* и *HRB* применяются для мягких материалов, *HRC* – для твердых, а методы *HRA* и *HV* для тонких слоев (листов).

Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников

Описанные методы определения твердости характеризуют среднюю твердость сплава. Для того чтобы определить твердость отдельных структурных составляющих сплава, надо резко локализовать деформацию, вдавливать алмазную пирамидку в определенное место, найденное на шлифе при увеличении в 100–400 раз под очень небольшой нагрузкой (0,049...4,905 Н), с последующим измерением под микроскопом диагонали отпечатка. Полученная характеристика *H* называется микротвердостью. Она определяется для тонких покрытий, отдельных структурных составляющих сплавов, а также для очень тонких изделий (фольга), минералов, стекол, пластмасс, керамики и т. д.

Метод заключается во вдавливании в испытуемый материал алмазных наконечников различного типа, получении отпечатка и измерении его параметров (по диагонали или по глубине).

Значение микротвердости находится делением приложенной к алмазному

наконечнику нормальной нагрузки на условную площадь боковой поверхности полученного отпечатка.

В зависимости от твердости и толщины испытуемого материала применяют различные нагрузки и типы наконечников. Подсчет значения микротвердости ведется по соответствующим формулам.

Если в качестве наконечника применяют четырехгранную пирамиду, то микротвердость подсчитывается по формулам в соответствии с методом Виккерса, обозначение твердости H_{\square} (при измерении диагоналей) или H_n (при измерении глубины).

Применяют также следующие наконечники:

- трехгранная пирамида с основанием в виде равностороннего треугольника (H_{∇});
- четырехгранная пирамида с ромбическим основанием (H_{\diamond});
- бицилиндрический наконечник (цилиндр с двумя вдавливаемыми выступами).

Обозначение твердости, например: $H_{\nabla 0,490} = 2000$ – число микротвердости 2000 Н/мм², полученное при испытании трехгранной пирамидой при нагрузке 0,490 Н.

Порядок проведения работы

1 Изучить вышеописанные методы определения твердости, законспектировав основные положения.

2 Освоить методику измерения твердости на имеющихся в лаборатории приборах.

3 Провести контрольные замеры твердости лабораторных образцов.

Отчет должен быть аккуратно оформлен, содержать название работы, ее цель, вывод о проделанной работе.

Контрольные вопросы

- 1 Что такое твердость?
- 2 Какие способы определения твердости вы знаете?
- 3 Что такое микротвердость?
- 4 Какой метод определения твердости наиболее подходящий для тонких элементов?
- 5 Какой метод наиболее универсальный?

2 Лабораторная работа № 2. Исследование работы стали под нагрузкой

Цель работы: изучение диаграммы растяжения малоуглеродистой стали; проведение экспериментальных исследований на лабораторном образце.

Работа стали под нагрузкой

Если подвергнуть образец растяжению, последовательно увеличивая нагрузку N , и производить при этом замеры получающихся удлинений Δl , то можно построить опытную диаграмму растяжения, откладывая удлинение в функции нагрузки. Для удобства сравнения эту диаграмму выражают в напряжениях и относительных удлинениях:

$$\sigma = \frac{N}{S}; \quad \varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \cdot 100 \% , \quad (2.1)$$

где σ – нормальное напряжение, кг/см^2 ;

S – первоначальная площадь сечения образца;

ε – относительное удлинение в процентах;

l_0 – первоначальная длина образца.

Величина относительного удлинения зависит от длины и поперечного сечения образца. Установлены два типа образцов – длинный и короткий.

Опытная диаграмма растяжения углеродистой стали показана на рисунке 2.1.

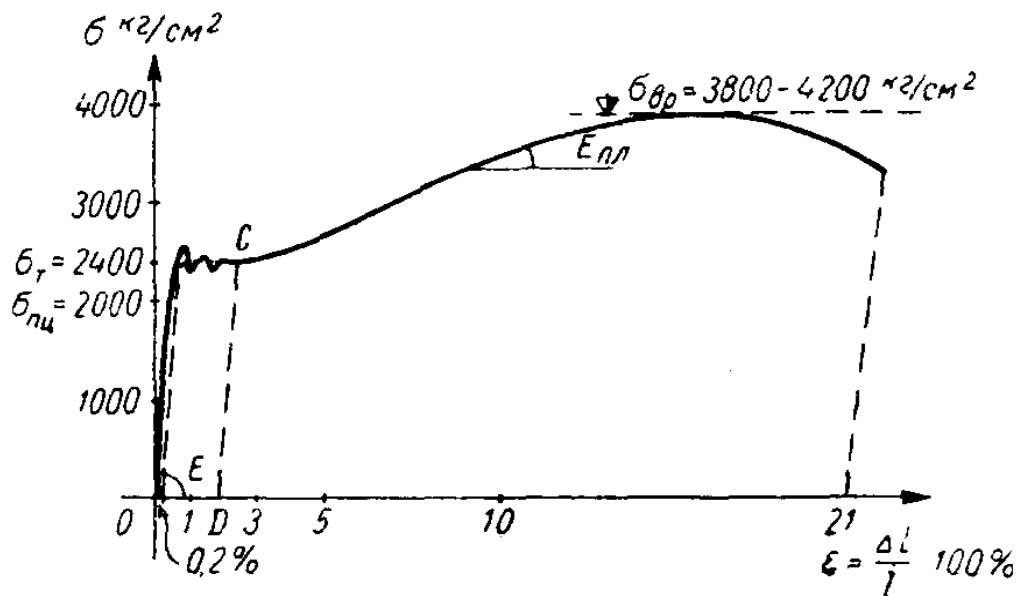


Рисунок 2.1 – Диаграмма растяжения малоуглеродистой стали

Вначале зависимость между напряжениями и относительными удлинениями определяется законом прямой линии, т. е. они пропорциональны между со-

бой. Это выражается линейным уравнением (зависимость Гука)

$$\sigma = E \cdot \varepsilon_0, \quad (2.2)$$

где E – постоянный коэффициент пропорциональности, называемый модулем упругости при растяжении или модулем продольной упругости. Для стали $E = 2100000 \text{ кг/см}^2$.

То наибольшее напряжение в материале, при котором начинается отклонение от прямолинейной зависимости, называется пределом пропорциональности. Несколько выше этой точки лежит предел упругости, соответствующий наибольшей деформации, которая полностью исчезает после разгрузки.

У малоуглеродистых сталей, при нагружении выше предела пропорциональности, кривая диаграммы растяжения отходит от прямой и, плавно поднимаясь, делает скачок, образуя при больших скоростях нагружения характерный «зуб», после чего с незначительными колебаниями идет параллельно горизонтальной оси. Образец удлиняется без приращения нагрузки, материал течет. Напряжение, при котором происходит течение материала, называется пределом текучести σ_T .

Горизонтальный участок диаграммы, называемый площадкой текучести, у малоуглеродистых сталей находится в пределах относительных удлинений от $\varepsilon = 0,2 \%$ до $\varepsilon = 2,5 \%$. Наличие у материала площадки текучести является положительным фактором в работе стальных конструкций.

В других сталях, не малоуглеродистых, переход в пластическую стадию происходит постепенно. У них предел упругости и предел текучести, таким образом, принципиально не отличаются друг от друга. За предел текучести этих сталей условно принимается то напряжение, при котором остаточная деформация достигает $0,2 \%$.

При снятии нагрузки с образца, получившего пластическую деформацию, диаграмма разгрузки идет по прямой $C-D$ параллельно упругой прямой нагрузки.

Когда относительное удлинение достигает определенной величины ($\varepsilon \approx 2,5 \%$), материал прекращает течь и становится опять способным к сопротивлению. При этом зависимость между напряжениями и деформациями подчиняется криволинейному закону, с быстрым нарастанием деформаций. В образце образуется шейка и, наконец, происходит полное разрушение его.

Предельная сопротивляемость материала, которая характеризует его прочность, определяется наибольшим условным напряжением в процессе разрушения (отнесенным к первоначальной площади сечения образца). Это напряжение называется временным сопротивлением σ_u (пределом прочности).

Полное остаточное удлинение, замеренное после разрушения, является мерой пластичности стали.

Поскольку модуль пластических деформаций $E_{пл}$ мал, то в теоретических исследованиях, при рассмотрении упругопластической работы стали, его часто приравнивают нулю, принимая для всех видов стали идеализированную диаграмму растяжения идеального упругопластического материала – диаграмму

Прандтля (рисунок 2.2).

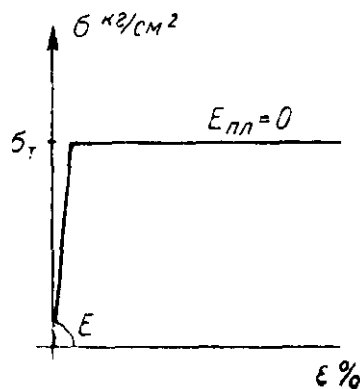


Рисунок 2.2 – Диаграмма Прандтля

Таким образом, важнейшими показателями механических свойств, характеризующими работу стали, являются: предел текучести, временное сопротивление и относительное удлинение. Эти показатели, так же как и химический состав, указываются в сертификатах, которые сопровождают каждую партию поставляемого металла.

Перечень используемого оборудования

1 Разрывная машина МР-500.

Внешний вид машины и рабочая схема представлены на рисунках 2.3 и 2.4.

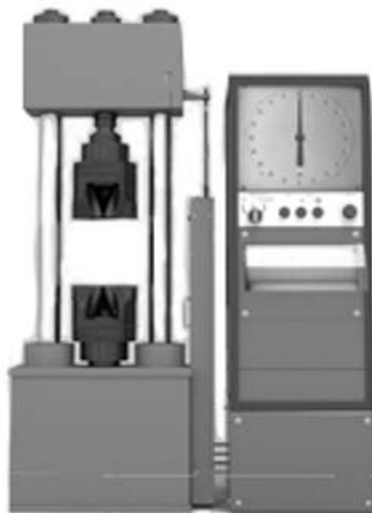
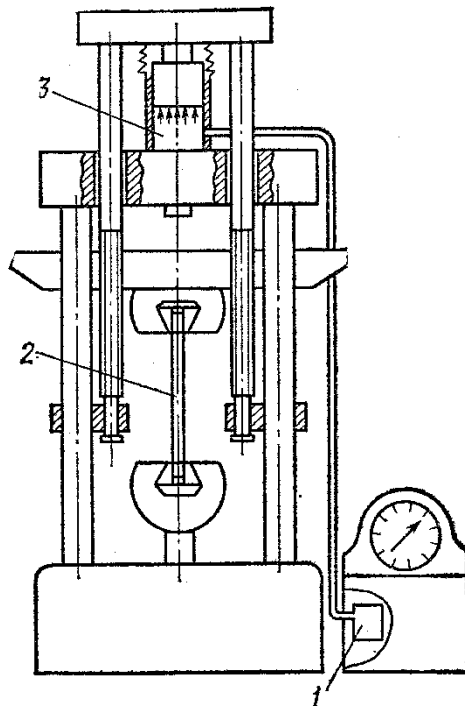


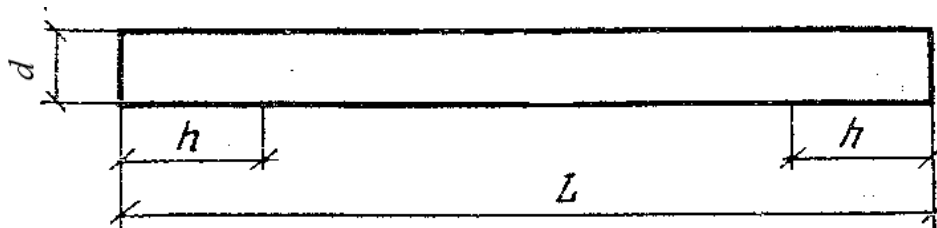
Рисунок 2.3 – Внешний вид разрывной машины МР-500

2 Образец для испытания (стальной стержень) в соответствии с рисунком 2.5.



1 – гидропривод; 2 – образец; 3 – гидроцилиндр

Рисунок 2.4 – Рабочая схема разрывной машины МР-500



d – диаметр стержня; h – глубина зажима в разрывной машине;
 L – полная длина образца

Рисунок 2.5 – Стальной образец для испытаний

Порядок проведения работы

- 1 Закрепить в разрывной машине лабораторный образец (стальной стержень).
 - 2 Включить машину и последовательно производить нагружение, измеряя длину образца и снимая показания динамометра. Результаты оформить в табличном виде.
 - 3 Эксперимент вести до разрушения.
 - 4 По результатам эксперимента построить диаграмму разрушения стали.
- Отчет должен быть аккуратно оформлен, содержать название работы, ее цель, вывод о проделанной работе. Результаты испытания вести в табличной форме, в соответствии с таблицами 2.1 и 2.2.

Таблица 2.1 – Геометрические характеристики испытываемых образцов

Номер испытываемого образца	Глубина заделки h , мм	Начальный размер		Размер стержня после испытания	
		Длина стержня L , мм	Диаметр образца d , мм	Длина стержня L_1 , мм	Диаметр образца d_1 , мм
1					
2					
...					

Таблица 2.2 – Результаты испытания стержня на растяжение

Номер испытываемого образца	Величина нагрузки, кН	Величина удлинения стержня, мм	Примечание
1	1		
	2		
	3		
	...		
	...		
	...		
	...		Разрушение образца
...			

Контрольные вопросы

- 1 Что такое зависимость Гука?
- 2 Как рассчитывают напряжения в растянутом образце?
- 3 Что такое относительное удлинение?
- 4 Какие характерные участки есть на графике разрушения малоуглеродистой стали?
- 5 Что такое диаграмма Прандтля?
- 6 Назовите наиболее важнейшие показатели, характеризующие работу стали.

3 Лабораторная работа № 3. Исследование работы сварных соединений

Цель работы: ознакомление с конструкцией и с особенностями работы сварных соединений.

Сварка. Определение углеродного эквивалента

Сварные соединения являются наиболее распространённым видом соединения металлических конструкций. Около 90 % соединений стальных конструкций выполняют сварными. В конструкциях их алюминиевых сплавов сварка получила меньшее распространение из-за сложности технологического процесса в связи с большой теплопроводностью алюминия (в 5 раз больше, чем у стали), а также разупрочнением основного металла термически упрочнённых сплавов. Поэтому сварку элементов алюминиевых конструкций производят с предварительным подогревом изделий или двумя электродами, чтобы компенсировать повышенную теплопроводность алюминия, и, кроме этого, сварные соединения применяют в основном в конструкциях из термически неупрочняемых сплавов марок АД1М (технический алюминий с содержанием примесей не более 0,4 %), АМцМ (алюминиевомарганцевые сплавы, содержащие 1 %...1,6 % марганца), АМг2М и АМг2Н2 (алюминиево-магниевые сплавы, содержащие 2 % магния).

К достоинствам сварных соединений следует отнести меньший вес (экономия металла составляет 15 %...20 % по сравнению с болтовыми и заклёпочными соединениями), снижение трудоёмкости изготовления (на 30 %...50 % благодаря уменьшению числа операций металлообработки и их упрощению), отсутствие ослаблений в стыках, герметичность и прочность соединений. Вместе с тем процесс сварки сопровождается структурными и химическими изменениями металла в зоне сварного соединения, а также возникновением остаточных напряжений и деформаций, что может привести к образованию трещин и в дальнейшем к разрушению конструкции при действии на неё внешних нагрузок. Это требует при выполнении сварных соединений правильного выбора марки стали, марки сварочных материалов (электродов, сварочной проволоки, флюсов, шлаков), формы сварного соединения и соответствующей технологии изготовления, в том числе регулирования скорости остывания шва.

Свариваемость строительных сталей оценивается по углеродному эквиваленту:

$$C_s = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Si}{24} + \frac{Cr}{5} + \frac{Ni}{40} + \frac{Cu}{13} + \frac{V + Nb}{14} + \frac{Mo}{4} + \frac{P}{2}, \quad (3.1)$$

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

Согласно ГОСТ 4543–2016, наименование марок конструкционных легированных сталей состоит из цифр и буквенного обозначения химических элементов. Цифры перед буквенным обозначением указывают среднюю массовую

долю углерода С в сотых долях процента. Химические элементы обозначены следующими буквами: В – вольфрам W, Г – марганец Mn, М – молибден Mo, Н – никель Ni, Р – бор В, С – кремний Si, Ф – ванадий V, Х – хром Cr, Ю – алюминий Al.

Цифры, стоящие после букв, указывают примерную массовую долю легирующего элемента в целых единицах. Отсутствие цифры означает, что в стали содержится до 1,5 % этого легирующего элемента. Допускается значение C_s не более 0,45 % при характеристическом значении предела текучести стали f_{yk} до $390 \frac{\text{Н}}{\text{мм}^2}$; при f_{yk} до $490 \frac{\text{Н}}{\text{мм}^2}$ – 0,46 %. При $C_s < 0,2$ % – свариваемость хорошая; при $0,2 \% \leq C_s < 0,35$ % – свариваемость удовлетворительная; при $0,35 \% \leq C_s < 0,45$ % – свариваемость ограниченная.

Способы производства сварных соединений для строительных конструкций

В современном строительстве для стальных конструкций применяется главным образом электродуговая сварка (ручная, механизированная и автоматическая), газозэлектрическая и электрошлаковая (бездуговая). Для конструкций из алюминиевых сплавов в основном применяют газозэлектрическую сварку в защитной среде инертного газа аргона.

Электродуговая сварка основана на явлении возникновения электрической дуги между металлическим стержнем (электродом) и свариваемыми стальными деталями при их объединении в замкнутую электрическую цепь. Электрическая дуга, будучи концентрированным источником тепла, создаёт температуру более 1500 °С, при которой происходит расплавление основного металла и металла электрода. Их последующая совместная кристаллизация при остывании образует сварной шов. Для получения высококачественного шва, обладающего высокой прочностью, необходимыми пластическими свойствами и повышенной ударной вязкостью, сварка производится в защитной среде. При ручной сварке такая среда является газослаковой и образуется в зоне шва от сгорания специальной обмазки, заранее нанесённой на электрод под давлением слоем 0,5...3 мм. Компоненты современных электродных покрытий предохраняют расплавленный металл от вредного воздействия кислорода и азота воздуха (последние делают шов хрупким), выполняют легирующие функции (улучшают химический состав наплавленного металла), стабилизируют горение дуги и скорость остывания шва. К шлакообразующим составляющим относятся титановый концентрат, марганцевые руды, полевой шпат, мрамор, каолин, кварцевый песок, доломит. Калий, натрий и кальций, вводимые в виде соединений (поташ, калиевая селитра, мел. окись натрия), стабилизируют горение дуги. Газообразующие составляющие включают древесную и пищевую муку, крахмал, декстрин, целлюлозу, хлопчатобумажную пряжу. В качестве легирующих добавок используют ванадий, вольфрам, марганец, молибден, никель, хром. Покрытия электродов готовят из мелкоизмельченных и тщательно перемешанных компонентов, связанных натриевым или калиевым жидким стеклом. Из-за разнообразия вы-

сококачественных покрытий классифицируются электроды не по составу покрытия, а по результатам механических испытаний образцов наплавленного металла и сварного стыкового соединения. Тип электрода (от Э38 до Э150) характеризует минимальное значение временного сопротивления металла шва в килограмм-силе на квадратный миллиметр. Добавление к названию электрода буквы А (Э42А, Э46А, Э50А) означает, что данные электроды дают металл, обладающий повышенной пластичностью и ударной вязкостью вследствие ограниченного содержания фосфора и серы. При проектировании расчётных сварных соединений применяют типы электродов с прочностью металла, превышающей прочность свариваемой стали. Это делается в том числе и для снижения массы наплавленного металла. Все электроды для ручной сварки выполняют из низкоуглеродистой проволоки марок Св-08 и Св-08А. Начальные буквы в маркировке свидетельствуют, что проволока сварочная, цифры указывают среднее содержание углерода в сотых долях процента, буква А в конце обозначения марки имеет тот же смысл, что и при маркировке электродов. Для изготовления электродов используется сварочная проволока диаметром до 12 мм включительно. При ручной сварке сила тока в электрической цепи составляет 200...500 А.

Уровень качества сварки характеризуется глубиной провара шва, т. е. проникновением наплавленного металла в основной, которая обычно составляет 1,5...2 мм. Наиболее качественные швы даёт автоматическая сварка, осуществляемая специальными сварочными агрегатами. В этом случае механизированы подача к месту сварки голой сварочной проволоки (без обмазки) и перемещение электрической дуги (сварочной головки) по линии сварки. Холоднотянутая сварочная проволока изготавливается из низкоуглеродистой (Св-08, Св-08А, Св-08ГЛ, Св-10ГА, Св-10Г2), легированной (Св-08ГС, Св-08ХМ) и высоколегированной (Св-08ХН2ГМЮ, Св10ХГ2СМА) сталей. Буквы Н, Г, М, Ю, Х, Ф и цифры после них характеризуют легирующие элементы и их процентное содержание. Диаметр сварочной проволоки составляет 0,3...5 мм. Автоматическая сварка осуществляется под защитным слоем флюса – гранулированного сыпучего вещества. Под действием электрической дуги (сила тока в цепи в этом случае составляет 600...1200 А) флюс плавится, легирует расплавленный металл содержащимися в нём примесями и образует жидкотягучую плёнку шлака, предохраняющую шов от контакта с атмосферным воздухом и легко удаляемую после остывания. В состав флюсов входят оксиды кремния, магния, марганца, кальция, алюминия, железа, циркония, титана и т. д. Их получают плавлением указанных компонентов в специальных электрических печах и грануляцией расплава, в результате которой образуются мелкие зёрна размером от 0,25 до 4 мм. Под слоем флюса шов остывает медленно, отличается высокой плотностью, прочностью и глубиной проплавления свариваемых деталей. Вместе с тем данный вид сварки применяют лишь в заводских условиях, в основном для сварки протяженных поясных швов в составных конструкциях.

При механизированной сварке (прежнее название – полуавтоматической) сварочная проволока автоматически подается с помощью гибкого шланга к сварочному аппарату, а его перемещение вдоль шва производится вручную.

Флюс подаётся из воронки, совмещённой с ручкой-держателем аппарата, на которой находятся кнопки управления. Такая полуавтоматическая сварка, как и автоматическая, выполняется только при нижнем положении сварного шва.

При использовании порошковой проволоки, представляющей собой свёрнутую в трубку диаметром 2...3 мм стальную ленту, внутри которой запрессован флюс, полуавтоматическую сварку производят при любом положении шва. Флюс в данном случае представляет собой мелкогранулированную смесь (порошок) шлако- и газообразующих компонентов, которые обеспечивают защиту расплавленного металла от кислорода и азота воздуха, его необходимое раскисление и легирование.

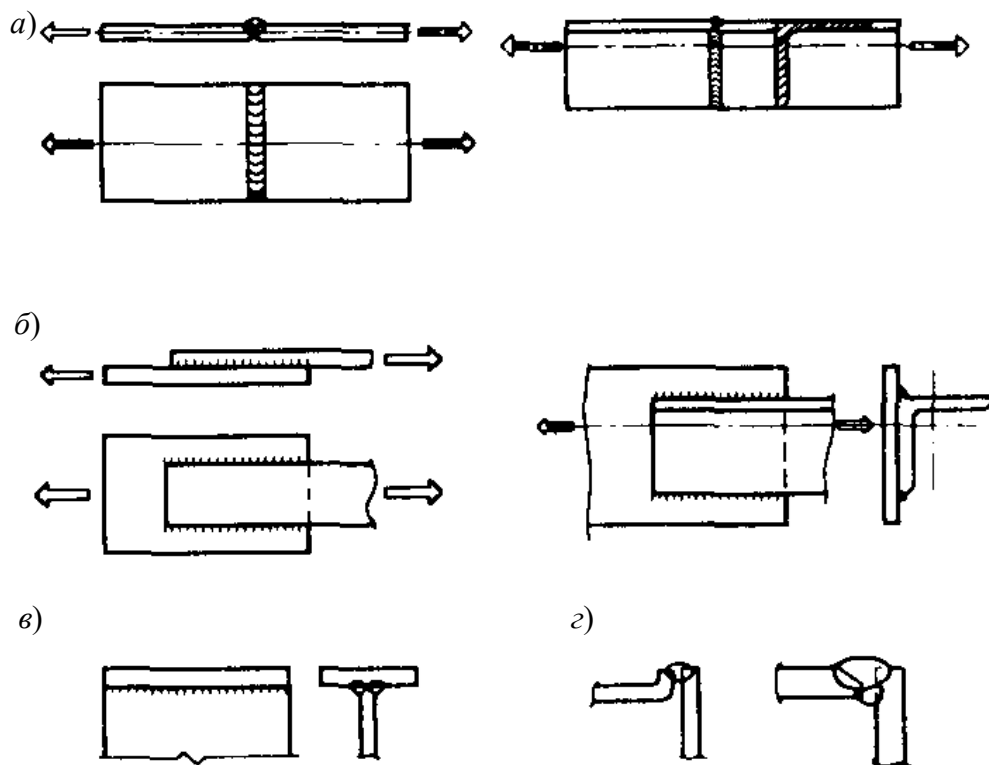
Газоэлектрическая сварка является вариантом электродуговой сварки, выполняемой в среде защитного газа. При сварке малоуглеродистых и низколегированных сталей применяют углекислый газ, подводимый в специальной горелке параллельно с автоматизированной подачей голой сварочной проволоки марок Св-08Г2С, Св-08Г2СЦ, Св-10ХГ2СМА и Св-08ХГ2СДЮ с повышенным содержанием кремния и магния. Последние являются раскислителями и компенсируют окисляющее действие углекислого газа на сталь при высокой температуре. Однако именно благодаря высокой температуре газа, нагретого дугой, металл остывает медленно и шов получается плотным с большой глубиной провара. При сварке высоколегированных нержавеющей и жаропрочных сталей, а также элементов из алюминиевых сплавов применяют инертный газ аргон, предохраняющий расплавленный металл от окисления. Здесь при сварке используются вольфрамовые электроды, обладающие высокой прочностью и коррозионной стойкостью. Газоэлектрическая сварка выполняется в автоматическом или полуавтоматическом режиме. В последнем случае она позволяет производить сварку в любом пространственном положении.

Электродшлаковая сварка используется для стыкования вертикальных листов большой толщины (16...500 мм). В зазор стыка между кромками свариваемых листов, составляющего 20...40 мм, устанавливают голую сварочную проволоку и засыпают флюс. Стык с двух сторон закрывают медными накладками, способными перемещаться вверх по мере формирования шва. При помощи тока большой силы (до 3000 А) возникает электрическая дуга между сварочной проволокой и основным металлом такой мощности, что флюс плавится, гасит дугу и сам становится проводником электричества от сварочной проволоки к изделию. В процессе сварки медные накладки-ползуны охлаждают водой с целью регулирования скорости остывания шва. Его качество в этом случае получается очень высоким.

Классификация сварных швов

Сварные соединения классифицируют в зависимости от взаимного расположения свариваемых элементов: стыковое (при сварке листов), нахлёсточное без накладок (в решётчатых конструкциях) и с накладками (при стыковании элементов из разнопрофильного металла), тавровое и угловое (в сварных конструкциях балок и колонн). Иногда с помощью накладок усиливают стыковое

соединение, переходя тем самым к соединению комбинированного типа (рисунок 3.1).



a – стыковое; *б* – нахлесточное; *в* – тавровое; *г* – угловое

Рисунок 3.1 – Типы сварных соединений

Стыковые соединения наиболее рациональны по расходу присадочного металла и удобны для контроля качества сварного шва. Для обеспечения равномерного сквозного проплавления выбирают рациональную форму подготовки кромок. Разделку кромок применяют в том случае, когда односторонняя или двусторонняя сварка не позволяет обеспечить полный провар. Форма подготовки кромок зависит от толщины свариваемого металла и способа сварки.

Угловые соединения просты в сборке, обеспечивают возможность подгонки размеров за счет регулирования величины нахлестки, не требуют подготовки кромок. Недостатками угловых соединений являются изменение направления силового потока и возможность образования щели между элементами. Неравномерное распределение силового потока вызывает концентрацию напряжений, и поэтому такие соединения не рекомендуется применять в конструкциях, воспринимающих переменные или динамические нагрузки, а также эксплуатируемые при низких температурах; проникновение влаги в щель между соединяемыми элементами может привести к щелевой коррозии и разрушению сварных швов за счет распирающего воздействия продуктов коррозии.

Угловые соединения применяют при изготовлении сварных стержней (двутавров, швеллеров) и других конструктивных элементов. Для качественного выполнения сварного шва также предусматривают различные формы подго-

товки кромок (рисунок 3.2).

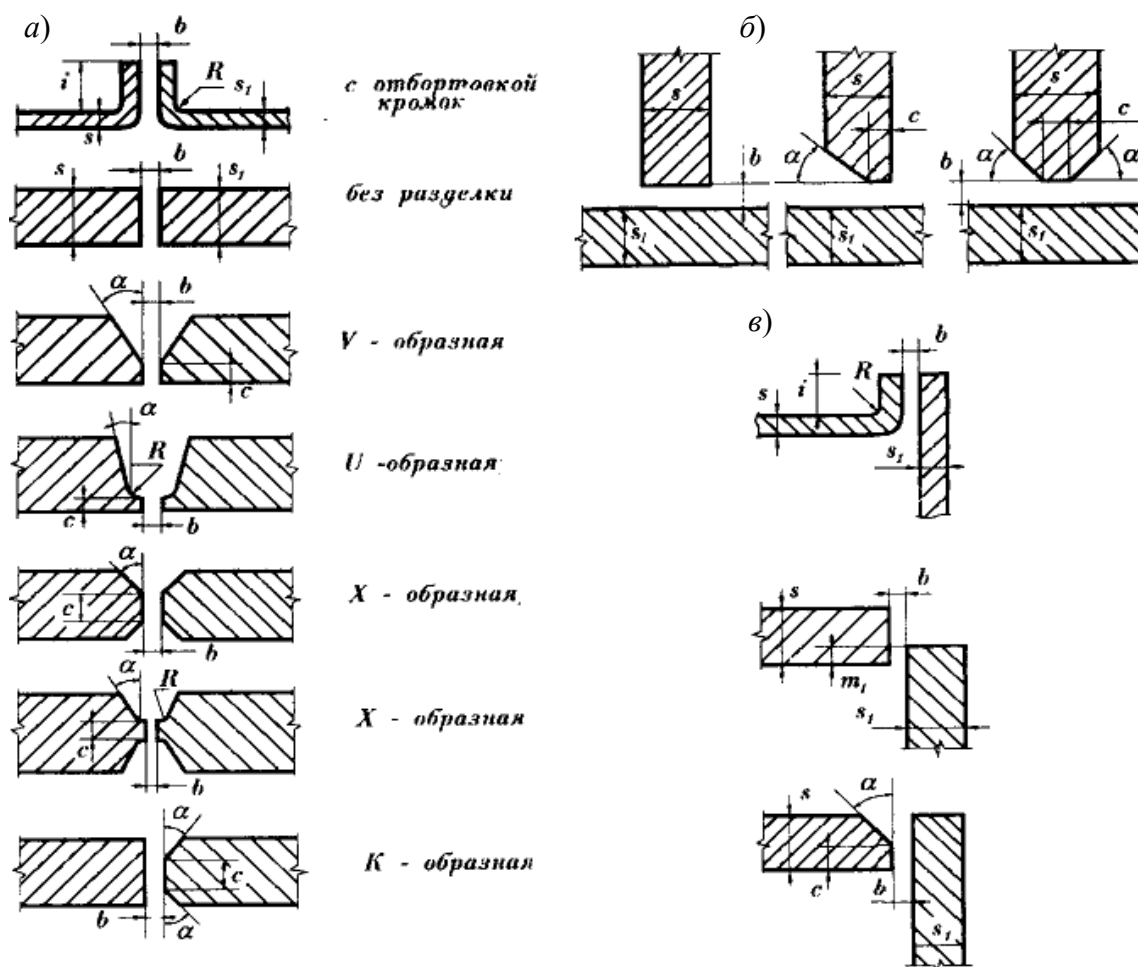


Рисунок 3.2 – Форма подготовки кромок свариваемых элементов

Сварные швы классифицируют по конструктивному признаку (*стыковые* и *угловые*), по назначению (*рабочие*, подлежащие расчёту на прочность, и *связующие*, назначаемые конструктивно), по месту выполнения (заводские и монтажные), по протяжённости (*непрерывные* и *прерывистые*; последние приводят к концентрации напряжений по концам шва и к пониженной коррозионной стойкости в промежутках между швами, а потому применяются только в качестве связующих и для элементов с напряжениями менее $0,4R$), по количеству слоев, наложенных при сварке (*однослойные* и *многослойные*), по положению в пространстве во время их выполнения (*нижние*, *вертикальные*, *потолочные*, *горизонтальные*), по внешней форме (*нормальные*, *с плоской поверхностью*, *выпуклые*, *вогнутые*). Выпуклые (усиленные) швы характерны для ручной сварки. Вогнутые угловые швы применяют в целях повышения сопротивления сварных соединений усталости (вогнутость стыковых швов является браком). Вогнутость и плоская поверхность швов достигается регулировкой режима сварки или специальной механической обработкой.

Угловые швы, расположенные параллельно действующему осевому усилию, называют фланговыми, а перпендикулярно – лобовыми. Для фланговых

швов часто характерна большая протяжённость, что приводит к неравномерности распределения напряжений по их длине (рисунок 3.3).

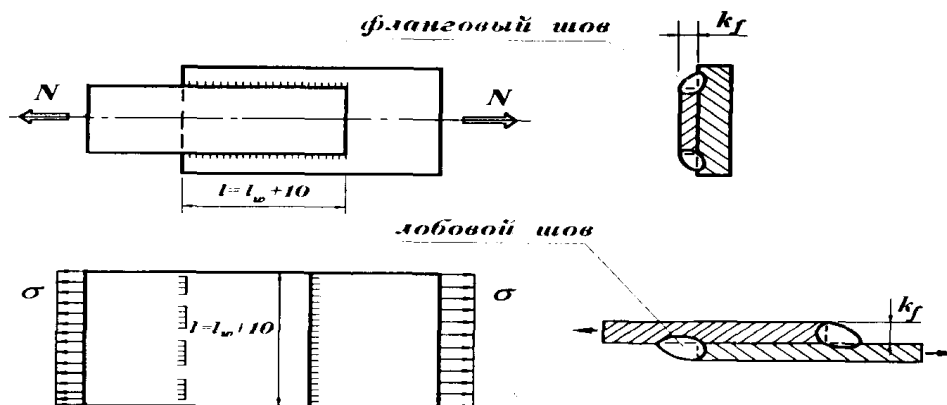


Рисунок 3.3 – Соединения с угловыми швами

Требования, предъявляемые к сварным швам

Требования:

1) катет углового шва k_f не должен превышать $1,2t$ (t – наименьшая из толщин свариваемых элементов); катет шва, наложенного на закругленную кромку фасонного проката толщиной t , не должен превышать $0,9t$;

2) катет углового шва k_f должен удовлетворять требованиям расчета и должен быть не менее указанного в [1, таблица 39]; при обеспечении глубины провара в тавровом двустороннем, а также в нахлесточном и угловом соединениях, при обеспечении мероприятий, гарантирующих отсутствие дефектов, в том числе технологических трещин, катет шва (от 5 мм и более) принимается менее указанного в [1, таблица 39], но не менее 4 мм;

3) расчетная длина углового шва должна быть не менее $4k_f$ и не менее 40 мм;

4) расчетная длина флангового шва должна быть не более $85\beta_f k_f$, за исключением швов, в которых усилие действует на всем протяжении шва (коэффициент β_f принимают по [1, таблица 40];

5) размер нахлестки должен быть не менее пятикратной толщины наиболее тонкого из свариваемых элементов;

6) соотношение размеров катетов угловых швов принимают 1:1; при разной толщине свариваемых элементов принимают швы с неравными катетами; при этом катеты, примыкающие к более тонкому или более толстому элементу, должны удовлетворять требованиям, перечисленным в п. 1 или 2 соответственно;

7) угловые швы выполняют с плавным переходом к основному металлу;

8) угловые сварные швы разрешается применять для соединения деталей, свариваемые поверхности которых расположены под углом от 60° до 120° ;

9) разрешается угол менее 60° , однако в этом случае угловой сварной шов рассматривают как стыковой с неполным проваром;

10) угловые сварные швы, расположенные на концах соединяемых элементов (в торце или сбоку), заводят за угол непрерывно и полноразмерно на рас-

стояние, равное по крайней мере двукратному катету шва, если доступность и конфигурация узла позволяют это выполнить.

При проектировании сварных соединений следует исключать возможность хрупкого разрушения конструкций:

- по возможности избегать расположения сварных швов в зонах действия растягивающих напряжений, превышающих $0,4f_{yd}$;
- избегать пересечений сварных швов;
- в стыках элементов, перекрываемых накладками, фланговые швы не доводить до оси стыка не менее чем на 25 мм с каждой стороны.

При проектировании тавровых и угловых сварных соединений элементов стальных конструкций с растягивающими напряжениями в направлении толщины проката с целью исключения возможности слоистого разрушения металла под сварным швом, как правило, следует:

- применять стали с гарантированными механическими свойствами в направлении толщины проката, т. е. прошедшие испытания на растяжение в направлении толщины проката;
- применять сварочные материалы с пониженной прочностью и повышенной пластичностью: использовать технологические приёмы сварки (последовательность наложения швов и т. д.), направленные на снижение остаточных сварочных напряжений; не применять порошковую проволоку;
- отказаться от применения одностороннего углового шва и перейти к двустороннему;
- заменять угловые соединения тавровыми, а в последних обеспечивать отношение ширины свеса к толщине элементов не менее 1;
- применять разделки кромок стыковых швов, обеспечивающие снижение объёма наплавленного металла.

Порядок проведения работы

1 Изучить вышеописанные виды сварных швов и соединений, зарисовав в отчет по лабораторной работе их схематично.

2 После выполнения сварных швов на лабораторной установке произвести замеры геометрических параметров швов.

Отчет должен быть аккуратно оформлен, содержать название работы, ее цель, вывод о проделанной работе.

Контрольные вопросы

- 1 Достоинства и недостатки сварных соединений.
- 2 Как проводят оценку свариваемости стали?
- 3 Способы производства сварных соединений.
- 4 Классификация сварных швов в зависимости от взаимного расположения.
- 5 Какие соединения называют стыковыми?
- 6 Какие соединения называют угловыми?
- 7 Для чего используют подготовку кромок соединяемых деталей?

8 Классификация швов по положению в пространстве, количеству слоев, внешней формы.

9 Какие конструктивные требования предъявляют к стыковым сварным швам?

10 Какие конструктивные требования предъявляют к угловым сварным швам?

4 Лабораторная работа № 4. Исследование работы болтовых соединений

Цель работы: изучение конструкции болтового соединения.

Болтовые соединения. Классификация

Болтовые соединения широко применяют при монтаже конструкций. Это объясняется простотой выполнения соединения и отсутствием сложного оборудования.

В соединениях стальных конструкций применяют обычные болты, высокопрочные болты, и болты анкерные (фундаментные). Болты обычные и высокопрочные используют для соединения элементов стальных конструкций друг с другом, а болты анкерные – для присоединения конструкций к фундаменту. Для болтовых соединений элементов стальных конструкций применяют болты, приведенные в соответствии с [1, приложение Г].

Болты класса точности *A* применяют для соединений, в которых отверстия просверлены на проектный диаметр в собранных элементах, или по кондукторам в отдельных элементах и деталях, или просверлены или продавлены на меньший диаметр в отдельных деталях с последующей рассверловкой до проектного диаметра в собранных элементах.

Болты класса точности *B* в многоболтовых соединениях применяют для конструкций из стали с пределом текучести до 375 Н/мм².

В соединениях, где болты работают преимущественно на растяжение, применяют болты класса точности *B* или высокопрочные.

В расчетных соединениях с болтами классов точности *A* и *B* (за исключением крепления вспомогательных конструкций) предусматривают меры против самоотвинчивания гаек (постановка пружинных шайб, вторых гаек, частичное предварительное натяжение и др.). На скошенных поверхностях соединяемых деталей и элементов (внутренние грани полок двутавров и швеллеров) под головки болтов или гайки устанавливают косые шайбы.

По прочности болты подразделяют на классы прочности. Класс прочности болта обозначают двумя цифрами, разделенными точкой, например 4.6, 5.8, 6.6. В обозначении класса прочности болта закодированы механические свойства материала болта:

– первая цифра, умноженная на 10, обозначает минимальное временное

сопротивление материала болта, кН/см²;

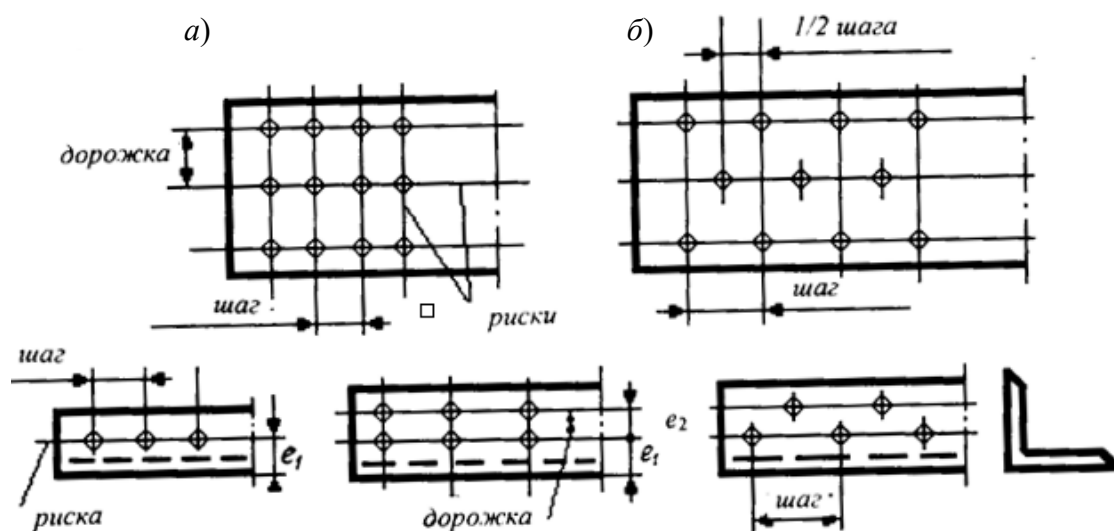
- произведение чисел – предел текучести материала болта, кН/см²;
- вторая цифра, умноженная на 10, обозначает соотношение σ_y/σ_u , %.

Класс прочности указывают на головке болта выпуклыми цифрами. В зависимости от условий эксплуатации требования к классу прочности болтов дифференцированы.

Конструирование болтовых соединений

При конструировании болтовых соединений следует стремиться к передаче усилия с одного элемента на другой кратчайшим путем при одновременном обеспечении удобства выполнения соединения.

Для удобства производства работ центры болтов располагают в соединении по прямым линиям – **рискам**, параллельным действующему на соединение усилию. Расстояние между двумя соседними рисками называют **дорожкой**, а расстояние между соседними по риске болтами – **шагом** (рисунок 4.1). Размещение болтов по рискам может быть рядовым (см. рисунок 4.1, а) или шахматным (см. рисунок 4.1, б).



а – рядовое размещение болтов; б – шахматное размещение болтов

Рисунок 4.1 – Схемы размещения болтов

Болты размещают на расстоянии, как указано в таблице 4.1, при этом в стыках и в узлах – на минимальном расстоянии, а соединительные конструктивные болты – на максимальном расстоянии. Диаметр отверстия для болтов в элементах из проката приведен в примечании таблицы 4.1.

В стыках и узлах прикрепления элементов для уменьшения расхода металла на накладки необходимо принимать минимальный шаг болтов. В слабо нагруженных соединениях (связующих или конструктивных) расстояние между болтами необходимо назначать максимальным для уменьшения их количества.

Таблица 4.1 – Расстояния при размещении болтов

Характеристика расстояния и предела текучести соединяемых элементов	Расстояние при размещении болтов
1 Расстояние между центрами отверстий для болтов в любом направлении: минимальное: при $f_{yk} \leq 375 \text{ Н/мм}^2$ при $f_{yk} > 375 \text{ Н/мм}^2$ максимальное в крайних рядах при отсутствии окаймляющих уголков при растяжении и сжатии максимальное в средних рядах, а также в крайних рядах при наличии окаймляющих уголков: при растяжении при сжатии	 $2,5d$ $3d$ $8d$ или $12t$ $16d$ или $24t$ $12d$ или $18t$
2 Расстояние от центра отверстия для болта до края элемента: минимальное вдоль усилия: при $f_{yk} \leq 375 \text{ Н/мм}^2$ при $f_{yk} > 375 \text{ Н/мм}^2$ минимальное поперек усилия: при обрезных кромках при прокатных кромках максимальное минимальное во фрикционном соединении при любой кромке и любом направлении усилия	 $2d$ $2,5d$ $1,5d$ $1,2d$ $4d$ или $8t$ $1,3d$
3 Расстояние минимальное между центрами отверстий вдоль усилия для болтов, размещаемых в шахматном порядке	$u + 1,5d$
<p><i>Примечание</i> – Обозначения, принятые в таблице: d – диаметр отверстия для болта; t – толщина наиболее тонкого наружного элемента; u – расстояние поперек усилия между рядами отверстий. Диаметр отверстий: для болтов класса точности A принимают $d = d_b$; для болтов класса точности B в конструкциях опор ВЛ, ОРУ и контактных сетей $d = d_b + 1 \text{ мм}$; в остальных случаях $d = d_b + (1; 2 \text{ или } 3 \text{ мм})$, где d_b – диаметр болта. В одноболтовых соединениях элементов решетки (раскосов и распорок), кроме постоянно работающих на растяжение, при толщине элементов до 6 мм из стали с пределом текучести до 375 Н/мм² расстояние от края элемента до центра отверстия вдоль усилия принимают $1,35d$ (без допуска при изготовлении элементов в сторону уменьшения, о чем указывают в проекте). При размещении болтов в шахматном порядке на расстоянии не менее указанного в поз. 3 площадь сечения элемента A_n определяют с учетом ослабления его отверстиями, расположенными в одном сечении поперек усилия (не по зигзагу)</p>	

В фасонном прокате (уголки, двутавры, швеллеры) положение рисков и максимальные диаметры отверстий приведены в специальных нормах исходя из прочности профиля и возможности постановки болтов в соединениях. Нормы опубликованы в справочной литературе.

При конструировании болтовых соединений следует стремиться к применению болтов одного диаметра в пределах каждого конструктивного элемента и к наименьшему числу диаметров болтов в сооружении.

Стыки и прикреплёния листового металла могут выполняться внахлестку и в стык с применением односторонних или двусторонних накладок (рисунок 4.2).

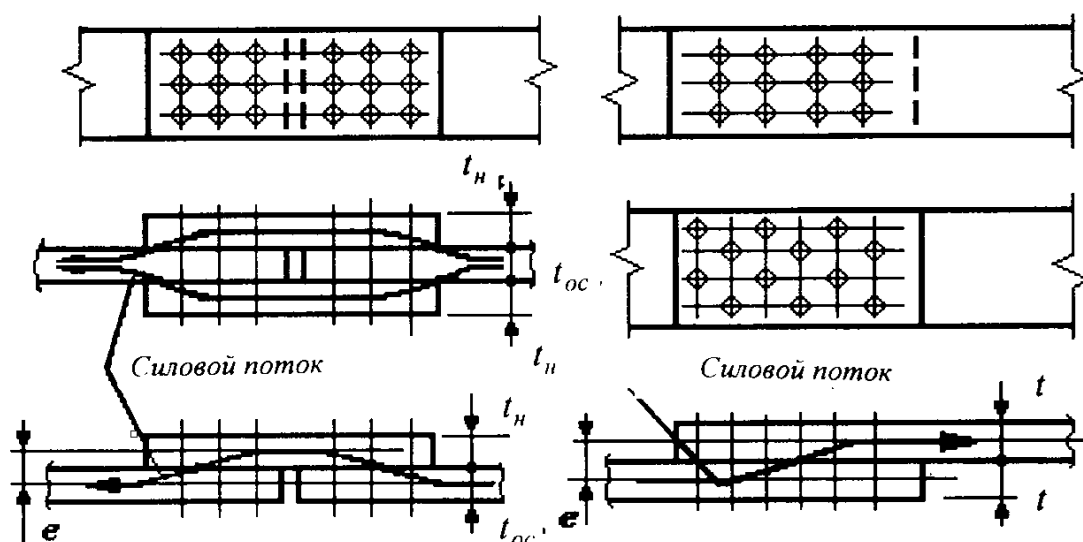
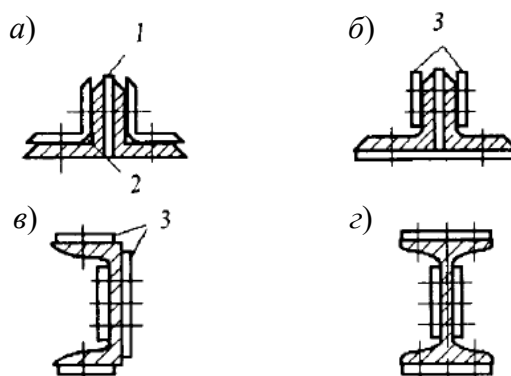


Рисунок 4.2 – Стыки листового проката

Предпочтение следует отдавать соединениям с двусторонними накладками, обеспечивающим симметричный силовой поток при передаче усилия с одного элемента на другой. Применение стыков с односторонней накладкой, а также соединений внахлестку вызывает отклонение силового потока в одну сторону от оси действия усилия, что приводит к изгибу листов под нагрузкой. Поэтому в таких соединениях количество болтов увеличивают на 10 % против расчета.

Стыки фасонного проката (рисунок 4.3) выполняют при помощи накладок.



1 – прокладка; 2 – фаска; 3 – стыковые накладки

Рисунок 4.3 – Стыки фасонных профилей проката

Угловые соединения, как правило, стыкуются угловыми накладками тех же профилей (см. рисунок 4.3, а). При этом для плотного прилегания полков уголков стыкового уголка фрезеруется (снимается фаска). Неравнобокие, а также большие равнобокие уголки можно стыковать листовыми накладками, если на каждой накладке можно поставить болты по двум рискам (см. рисунок 4.3, б). Швеллеры и двутавры стыкуются при помощи листовых накладок (см. рисунок 4.3, в, г).

Для нормальной работы соединения на высокопрочных болтах действительная сила трения должна строго соответствовать расчетной, что достигается определенной технологией контролируемого натяжения болтов.

После сборки соединения и установки сборочных пробок все свободные отверстия заполняют высокопрочными болтами. Затем пакет собранного соединения предварительно стягивают для закрытия зазоров между деталями. Так как в процессе постепенного уплотнения пакета натяжение ранее поставленных болтов неизбежно будет ослабевать, то гайки на всех болтах подтягивают многократно, пока они не перестанут вращаться с помощью ключа с рукоятью длиной 400...500 мм или легкого гайковерта марки ИП-3103 либо другого с крутящим моментом 0,2 кН·м. В результате таких операций в болтах возникает осевое усилие 20...30 кН. Окончательное натяжение высокопрочных болтов производят гайковертом марки ИП-306, развивающим крутящий момент 150 кгм, поворотом гайки на угол 180° , отсчитывая угол поворота от исходного, зафиксированного положения гайки, вне зависимости от толщины пакета (до 140 мм) и при числе деталей в нем не более пяти. Для удобства отсчета угла поворота с помощью кернера за один удар наносят метки на торец выступающей части болта и гайку, фиксируя тем самым их взаимное расположение.

При отсутствии гайковерта можно воспользоваться ключом с длинной рукоятью.

После этих операций постепенно заменяют сборочные пробки высокопрочными болтами, натяжение которых ведут также двумя гайковертами: сначала малым марки ИП-3103, а затем тяжелым марки ИП-3106.

Порядок проведения работы

1 Изучить вышеописанные виды болтов и болтовых соединений, зарисовав в отчет по лабораторной работе их схематично.

2 Произвести замеры геометрических параметров болтовых соединений на стенде кафедры.

Отчет должен быть аккуратно оформлен, содержать название работы, ее цель, вывод о проделанной работе.

Контрольные вопросы

- 1 Классы точности болтов.
- 2 Как обозначается прочность болтов?
- 3 Какие классы точности устанавливаются без расчета?
- 4 Как размещают болты на деталях?
- 5 Какие нормы расстановки болтов в соединениях?
- 6 Какие условия необходимо соблюдать для нормальной работы соединений на высокопрочных болтах?
- 7 Как проводится сборка соединений с использованием высокопрочных болтов?

Список литературы

1 Стальные конструкции (с поправкой) : СП 5.04.01–2021. – Введ. 01.10.2021 (с отменой СНиП II-23-81*). – Мн. : Минстройархитектуры, 2021. – 153 с.

2 **Горев, В. В.** Металлические конструкции : учеб. пособие : в 3 т. Т. 1 : Элементы стальных конструкций / В. В. Горев, Б. Ю. Уваров, В. В. Филиппов ; под ред. В. В. Горева. – М. : Высш. шк., 2004. – 551 с.

3 **Кудишин, Ю. И.** Металлические конструкции : учебник / Ю. И. Кудишин, Е. И. Беленя, В. С. Игнатьева ; под ред. Ю. И. Кудишина. – 13-е изд., испр. – М. : Академия, 2011. – 688 с.