

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ**

**УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ  
«БРЕСТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

**КАФЕДРА СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ**

# **Методические указания и журнал испытаний**

к проведению лабораторных работ по дисциплине  
«Металловедение и сварка»  
для студентов дневной формы обучения по специальности  
1-70 02 01 «Промышленное и гражданское строительство»

2-ое издание, дополненное и переработанное



Брест 2023

УДК 624.014 (07)

Журнал предназначен для проведения лабораторных занятий по курсу «Металловедение и сварка» для студентов дневной формы обучения по специальности 1-70 02 01 «Промышленное и гражданское строительство». Тематика лабораторных работ соответствует учебной программе дисциплины «Металловедение и сварка».

Составители: Шурин А. Б., к. т. н., доцент, зав. кафедрой строительных конструкций;  
Маркечко Е. В., старший преподаватель кафедры строительных конструкций;  
Мухин А.В., к т. н., доцент, профессор кафедры строительных конструкций

Рецензент: В. А. Лебедь, заместитель директор РУП «Институт БелНИИС» – Научно-технический центр, к. т. н.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

|                                                                                                   |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Лабораторная работа № 1 .....                                                                     | 4  |
| 1.1 Стали .....                                                                                   | 4  |
| 1.2 Чугуны.....                                                                                   | 7  |
| 1.3 Алюминиевые сплавы .....                                                                      | 7  |
| 1.4 Исследование структуры металлов .....                                                         | 8  |
| Выводы по работе .....                                                                            | 9  |
| Лабораторная работа № 2.....                                                                      | 10 |
| 2.1 Теоретическая часть .....                                                                     | 10 |
| 2.2 Определение объемной доли фаз .....                                                           | 10 |
| Выводы по работе .....                                                                            | 12 |
| Лабораторная работа № 3.....                                                                      | 13 |
| 3.1 Теоретическая часть .....                                                                     | 13 |
| 3.2 Устройство и принцип работы твердомера ТЭМП-2 .....                                           | 15 |
| 3.3 Определение возможности структурных превращений в зоне термического влияния сварного шва..... | 18 |
| Выводы по работе .....                                                                            | 18 |
| Лабораторная работа № 4.....                                                                      | 19 |
| 4.1 Теоретическая часть .....                                                                     | 19 |
| 4.2 Порядок выполнения работы.....                                                                | 22 |
| Выводы по работе .....                                                                            | 25 |
| Лабораторная работа № 5.....                                                                      | 26 |
| 5.1 Основные сведения о сварочных деформациях и перемещениях.....                                 | 26 |
| 5.2 Методы уменьшения деформаций и перемещений от сварки.....                                     | 27 |
| 5.3 Определение общих деформаций в сварном тавровом элементе.....                                 | 28 |
| Выводы по работе .....                                                                            | 30 |
| Список использованных источников .....                                                            | 31 |

# Лабораторная работа № 1

## Металлы и сплавы, их классификация и структура

Цель работы: изучить классификацию металлов и сплавов, структуры металлов и сварных швов.

### Теоретическая часть (заполнить пробелы)

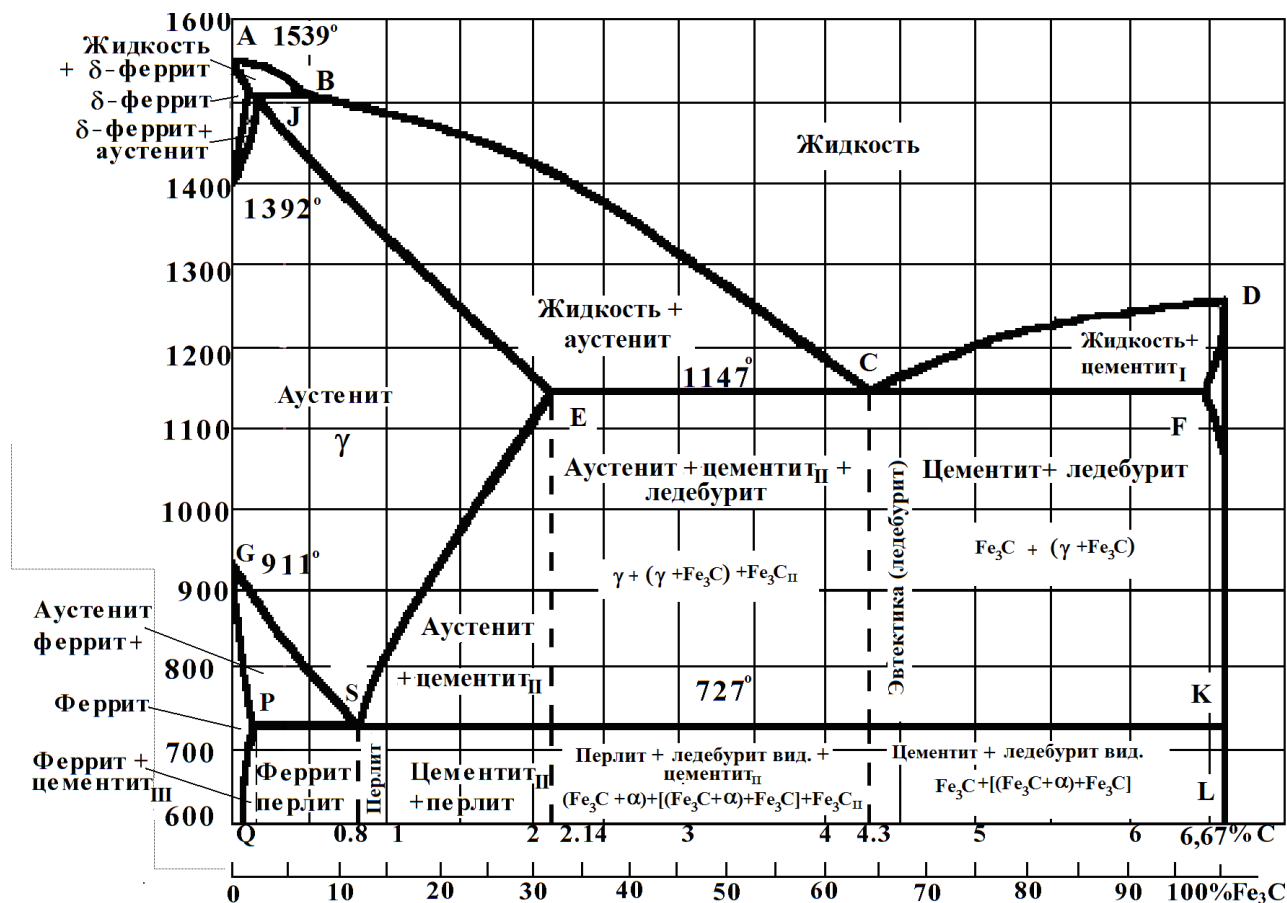


Рисунок 1.1 – Диаграмма состояния железо-углерод Fe – C (железо-цементит Fe – Fe<sub>3</sub>C)

### 1.1 Стали

В зависимости от содержания углерода железоуглеродистые сплавы делят на техническое железо, стали и чугуны.

Сталь (EN 10020:2000 [1]) – материал (сплав железа с углеродом), в котором массовая доля железа больше, чем массовая доля какого-либо другого элемента, а массовая доля углерода составляет \_\_\_\_\_% и в состав которого входят \_\_\_\_\_.

Сталь для сварных строительных конструкций содержит эквивалентное содержание углерода до \_\_\_\_\_%.

Стали подразделяются:

а) по химическому составу: \_\_\_\_\_

б) по способу производства: \_\_\_\_\_

в) по назначению: \_\_\_\_\_

г) по качеству: \_\_\_\_\_

д) по виду выплавки или степени раскисления: \_\_\_\_\_

### 1.1.1 Углеродистые стали

Свойства углеродистых сталей определяются \_\_\_\_\_

На свойства стали существенно влияет степень раскисления. При одинаковом содержании углерода кипящие, полуспокойные и спокойные стали имеют близкие величины прочностных свойств и различаются значениями характеристик пластичности. Содержание кремния в спокойной стали составляет 0,15...0,35, в полуспокойной 0,05...0,15, в кипящей до 0,05 %. Для раскисления кипящей стали не применяют \_\_\_\_\_, ее раскисляют: \_\_\_\_\_.

Кипящая сталь имеет резко выраженную химическую неоднородность (ликвацию) в слитке. Ее основным преимуществом является высокий \_\_\_\_\_ выход годного металла. Из-за повышенной концентрации кислорода кипящие стали имеют сравнительно высокий порог хладноломкости и их не рекомендуют применять для конструкций, эксплуатирующийся при отрицательных температурах и вибрационных и динамических нагрузках.

Кипящая сталь (кп) в процессе разлива \_\_\_\_\_, что служит признаком процесса раскисления. Спокойная сталь (сп) при разливе \_\_\_\_\_, так как в нее введены \_\_\_\_\_.

Она однородна по химическому составу. Спокойная сталь раскисляется \_\_\_\_\_ . Выход годных слитков спокойной стали около \_\_\_\_\_ %, но металл значительно более плотен и имеет более однородный химический состав.

Полуспокойная сталь (пс) занимает промежуточное положение между спокойной и кипящей. У полуспокойной стали выход годного продукта составляет \_\_\_\_\_%. Она содержит такое количество раскислителей, при котором газов выделяется меньше, чем при затвердевании кипящей стали, и поэтому имеет меньшую химическую неоднородность. Степень раскисления стали отражается в ее маркировке, например \_\_\_\_\_.

До 2005 года заводы-изготовители Российской Федерации, Казахстана и Республики Беларусь осуществляли поставки стали обыкновенного качества по ГОСТ 380-2005 [2] с гарантируемыми показателями по трем группам: группа А гарантирует: \_\_\_\_\_ и по нормируемым показателям делится на три категории, которые обозначаются цифрой в конце марки. Первая категория, а также буква А в написании группы не указываются. Пример маркировки: Ст3кп2, Ст4пс3 и т. д. Группа Б гарантирует \_\_\_\_\_ и имеет две категории. Группа В гарантирует \_\_\_\_\_ и имеет шесть категорий.

### 1.1.2 Качественные углеродистые стали

Качественные углеродистые стали выпускают по ГОСТ 1050-2013 [3]. Отличаются от сталей по ГОСТ 380-2005 [2] значительно меньшими отклонениями по процентному содержанию химических элементов. В марках этих сталей указывается слово «Сталь» и цифры от 05, 08, 10, 20 и т. д. до 85 (через 5): например, Сталь 20. Большинство качественных сталей как правило раскисляются. Цифры в марке качественных углеродистых и легированных сталей означают: \_\_\_\_\_.

Низкоуглеродистые стали 0.8 кп, 0.5 кп используются для листовой штамповки, а стали 10, 15, ...20, 25 – для изготовления сварных конструкций. Среднеуглеродистые стали 30, 35, 40, 45 и 50 применяются для изготовления (с нормализацией и поверхностной закалкой) деталей, подверженных большим нагрузкам, так, например, стали 45, 50 – для коленчатых валов и других ответственных деталей автотракторных двигателей.

Высокоуглеродистые качественные стали 55, 60, 65 и 70 используются для изготовления деталей (пружины, рессоры, зубчатые колеса и т. д.) с последующей их термической обработкой.

### 1.1.3 Легированные стали

Для их получения при плавке или разливке вводятся специальные (легирующие) элементы, изменяющие её свойства (таблица 1.1), также в них могут иметься более одного процента Si или Mn. Легирующие элементы включаются в обозначения марок сталей.

Число в начале марки конструкционной стали указывает содержание углерода в сотых долях процента, а цифры после соответствующих букв – среднее содержание этого химического элемента в %. Если после буквенного обозначения нет цифры, то доля данного элемента в стали составляет до 1 %.

Таблица 1.1 – Влияние химических элементов на свойства сталей

| Характеристики                                                                                            | Влияние химических элементов |    |    |    |    |    |   |   |    |   |   |  |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|----|----|----|----|----|---|---|----|---|---|--|
|                                                                                                           | C                            | Cr | Ni | Mn | Mg | Si | W | V | Cu | S | P |  |
| Прочность на разрыв, $f_u$                                                                                |                              |    |    |    |    |    |   |   |    |   |   |  |
| Предел текучести, $f_y$                                                                                   |                              |    |    |    |    |    |   |   |    |   |   |  |
| Относительное удлинение, $\delta$                                                                         |                              |    |    |    |    |    |   |   |    |   |   |  |
| Твердость                                                                                                 |                              |    |    |    |    |    |   |   |    |   |   |  |
| Ударная вязкость, $\alpha_n$                                                                              |                              |    |    |    |    |    |   |   |    |   |   |  |
| Усталостная прочность                                                                                     |                              |    |    |    |    |    |   |   |    |   |   |  |
| Свариваемость                                                                                             |                              |    |    |    |    |    |   |   |    |   |   |  |
| Коррозионная стойкость                                                                                    |                              |    |    |    |    |    |   |   |    |   |   |  |
| заполнить таблицу по степени влияния: «+» повышает; «++» значительно повышает; «-» снижает; «0» не влияет |                              |    |    |    |    |    |   |   |    |   |   |  |

### 1.1.4 Строительные стали

Горячекатаный прокат (листовой, швеллеры, двутавры, сталь угловую) из углеродистых и низколегированных сталей, предназначенный для изготовления сварных строительных конструкций, вне зависимости от его химического состава (марки стали), а принимая во внимание только механические свойства (предел текучести  $f_y$ ), подразделяют на условные классы строительных сталей.

Таблица 1.2 – Соответствие классам сталей по ГОСТ 27772-2021 [20] и марок

| Наименование стали                                                                              | Марки по действующим стандартам |                       | Наименование стали | Марки по действующим стандартам |                       |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|-----------------------|--------------------|---------------------------------|-----------------------|
|                                                                                                 | Марка стали                     | Обозначение стандарта |                    | Марка стали                     | Обозначение стандарта |
| C235                                                                                            | Ст3кп2                          | ГОСТ 380<br>ГОСТ 535  | C345К              | 10ХНДП                          | ГОСТ 19281            |
| C245                                                                                            | Ст3пс5,<br>Ст3сп5               | ГОСТ 380<br>ГОСТ535   | C390               | 14Г2АФ                          | ГОСТ 19281            |
| C255                                                                                            | Ст3Гпс,<br>Ст3Гсп               | ГОСТ 380              | C440               | 16Г2АФ                          | ГОСТ 19281            |
| C345                                                                                            | 12Г2С<br>09Г2С                  | –<br>ГОСТ 19281       | C590               | 12Г2СМФ                         | –                     |
| * – буквенные обозначения в классах: С – сталь строительная;<br>К – вариант химического состава |                                 |                       |                    |                                 |                       |

Расшифруйте следующие обозначения сталей, выпускаемых по европейским стандартам:

---

---

---

## 1.2 Чугуны

Чугун – это сплав железа с углеродом и другими элементами, где углерода от \_\_\_ до \_\_\_%. Чугуны, в которых весь углерод либо его значительная часть находятся в свободном состоянии в виде графита, называются \_\_\_\_\_.

По структуре серые чугуны отличаются от стали только тем, что в них имеются \_\_\_\_\_, предопределяющие специфические свойства чугунов.

Графит в чугунах может быть в четырех основных формах:

- в виде лепестков, пластинок: \_\_\_\_\_
- в виде червеобразных прожилок: \_\_\_\_\_
- в виде округлых включений: \_\_\_\_\_
- в виде равноосных компактных, но не округлых форм: \_\_\_\_\_

Чугуны, в которых весь углерод находится в связанном состоянии, называют \_\_\_\_\_. Эти чугуны, в зависимости от содержания углерода и структуры, классифицируют на \_\_\_\_\_ (массовая доля углерода в них может быть в интервале \_\_\_\_\_%), \_\_\_\_\_ (массовая доля углерода равна \_\_\_\_\_%) и \_\_\_\_\_ (массовая доля углерода \_\_\_\_\_%).

Они практически не поддаются обработке резанием и используются для последующей переплавки в сталь или ковкий чугун.

## 1.3 Алюминиевые сплавы

Сплавы алюминиевые – сплавы на основе алюминия с добавлением меди, магния, цинка, кремния, лития, кадмия, марганца и других химических элементов. Достоинства алюминиевых сплавов: \_\_\_\_\_.

Недостатки: \_\_\_\_\_.

По способу производства полуфабрикатов алюминиевые сплавы подразделяют на \_\_\_\_\_ и \_\_\_\_\_. В строительстве в основном применяют деформируемые сплавы, полуфабрикаты из которых получают способом деформации в горячем и холодном состоянии:

- прессованием (профили, прутки, трубы, панели);
- прокаткой (листы, ленты);
- волочением (тонкостенные трубы);
- ковкой и штамповкой (фасонные детали).

Литейные сплавы вследствие их низкой пластичности применяются чрезвычайно редко. Широкое применение в качестве конструкционных материалов имеют сплавы на основе алюминия. Полуфабрикаты из них для строительства делят на листовые (толщиной 0,3...4 мм) и профильные, которые выполняют любой формы в пределах соответствующих ГОСТов и ТУ прокаткой, экструзией. Основными легирующими элементами в алюминиевых сплавах являются: \_\_\_\_\_.

По составу легирующих компонентов алюминиевые сплавы подразделяют на группы:

**1-я группа.** Технически чистым алюминием называют алюминий, общее содержание примесей в котором не превышает \_\_\_\_%. По коррозионной стойкости и высокой пластичности технически чистый алюминий близок к химически чистому. Установлены следующие марки технически чистого алюминия: АД0, АД1 и АД с содержанием примесей соответственно до 0,5, 0,7 и 1,2 %.

**2-я группа.** Сплавы системы Al-Mn. Характерным представителем этой группы является сплав АМц, содержащий 1-1,6 % марганца. Этот сплав обладает высокой

коррозионной стойкостью, хорошо сваривается, легко полируется, однако прочность его невелика.

**3-я группа.** Сплавы системы Al-Mg, называемые \_\_\_\_\_, обозначаются буквами AMg с добавлением цифры, указывающей примерное содержание магния в процентах (AMg2, AMg3 и т. д.). Эти сплавы содержат также небольшое количество марганца (0,2...0,8 %). Сплавы этой группы обладают высокой стойкостью против коррозии, хорошо свариваются. С увеличением содержания магния прочностные показатели повышаются; однако при содержании магния более 3,5 % пластичность и коррозионная стойкость сплавов заметно снижаются. Для улучшения свойств в качестве добавок используют титан (0,02...0,1 %), бериллий (0,002...0,005 %) и хром (0,05...0,35 %).

**4-я группа.** Сплавы системы Al-Mg-Si, легированные кремнием (0,3...1,2 %) и магнием (0,4...1,4 %), называются \_\_\_\_\_. Обозначаются они буквами АД с добавлением порядкового номера (АД31, АД33, АД35 и т. д.). Сплавы этой группы пластичны, хорошо свариваются, обладают высокой стойкостью против коррозии, хорошо полируются и легко анодируются. К этой же группе относится сплав, дополнительно содержащий до 0,5 % меди. Этот сплав, широко применявшийся ранее в авиастроении и названный поэтому авиалем, обозначается буквами АВ.

**5-я группа.** Сплавы системы Al-Cu-Mg называются \_\_\_\_\_. Они обозначаются буквой Д с добавлением порядкового номера (Д1, Д6, Д16, Д18 и т. д.). Наличие в сплавах этой группы меди в количестве 3,8—4,9 %, способствующей увеличению твердости и прочности его после термической обработки, отрицательно сказывается на его пластичности и коррозионной стойкости. Дуралюмин был первым из сплавов, обладающих высокой прочностью.

**6-я группа.** Сплавы системы Al-Mg-Zn стали применяться сравнительно недавно (с начала 50-х гг.). Отличительной особенностью сплавов, содержащих 3—7 % цинка и около 2 % магния, является их способность к самоупрочнению после прессования полуфабрикатов в горячем виде. Небольшими добавлениями циркония, меди и хрома можно получать более высокопрочные из всех известных алюминиевых сплавов. Поэтому в обозначении сплавов этой группы перед порядковым номером ставится буква В (В94, В95 и т. д.).

#### 1.4 Исследование структуры металлов

К числу методов, используемых для исследования структуры металлов и сплавов, относятся:

**макроскопический анализ** (макроанализ) заключается в определении строения металла невооруженным глазом или через лупу при небольших увеличениях (до 30 раз). Макроструктуру можно изучать непосредственно на поверхности металла, в изломе заготовки, а также после предварительной подготовки исследуемой поверхности, заключающейся в ее шлифовании и травлении специальными реактивами. Поверхность образца (темплета), подготовленная для исследования макроструктуры, называется \_\_\_\_\_;

**микроскопический анализ** (микроанализ) применяют для изучения микроструктуры металлов. Микроструктурой называют внутреннее строение металла, наблюдаемое с помощью микроскопа: оптического (оптическая микроскопия для оценки размеров зёрен) или электронного (электронная микроскопия для оценки плотности дислокаций).

Для микроанализа металлов и сплавов применяются оптические микроскопы.

В структуре железоуглеродистых сплавов (рисунок 1.1) можно выделить следующие компоненты: \_\_\_\_\_.

**Феррит (Ф)** характеризуется низкой прочностью ( $\sigma_b = 250$  МПа,  $\sigma_{0,2} = 120$  МПа) и твердостью (80...100 НВ), высокой пластичностью ( $\delta = 50$  %,  $\psi = 80$  %).

**Цементит (Ц)** – химическое соединение железа с углеродом (карбид железа Fe<sub>3</sub>C), содержит 6,67 % С. Цементит характеризуется высокой твердостью (>800НВ) и очень низкой пластичностью.



**Перлит (П)** – двухфазная (эвтектоидная) механическая смесь феррита и цементита. Перлит может быть пластинчатым (состоящим из чередующихся пластинок цементита и феррита) и зернистым, что определяет механические свойства перлита. При комнатной температуре зернистый перлит имеет прочность  $\sigma_B = 800$  МПа, пластичность  $\delta = 15$  %, твердость 160...200 НВ.

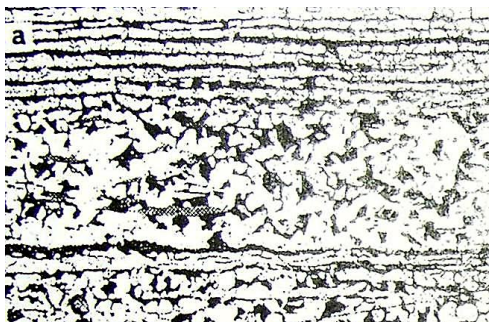


Рисунок 1.2 – Структура кипящей стали с ликвационной полосой ( $\alpha \times 100$ )

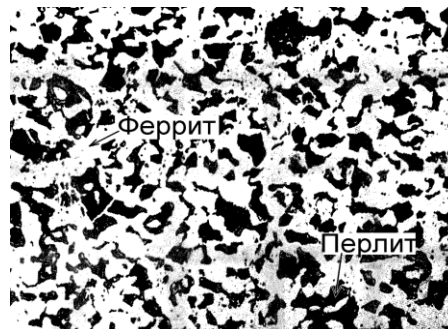


Рисунок 1.3 – Структура стали (0,3 %С) ( $\times 200$ )



Рисунок 1.4 – Серый чугун на ферритно-перлитной основе



Рисунок 1.5 – Доэвтектоидный (ледебурит, перлит, вторичный цементит) белый чугун

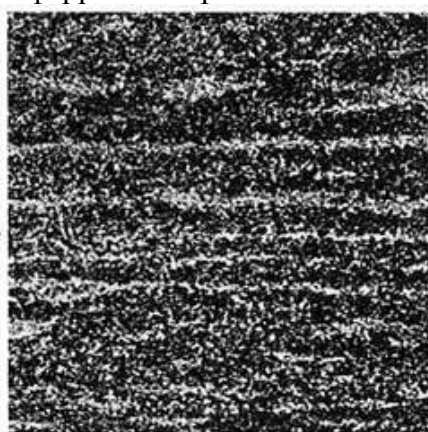


Рисунок 1.6 – Микроструктура стали в поперечном сечении дамасского клинка

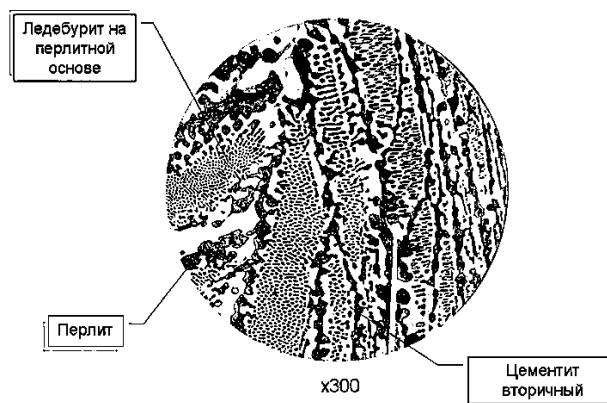


Рисунок 1.7 – Микроструктура эвтектоидного белого чугуна (4,25С)

**Выводы по работе:**

## Лабораторная работа № 2

### Изучение структуры сталей

**Цель работы:** ознакомиться с методиками исследования структуры сталей. Определить величину объёмной доли зерен второй фазы. Исходя из полученных результатов, оценить концентрацию углерода в стали.

**Оборудование и материалы:** фотографии микрошлифов сталей, линейка металлическая ГОСТ 427-75 [6], ГОСТ 8233-56 [7] Сталь. Эталоны микроструктур.

#### 2.1 Теоретическая часть

**Перлит** – продукт эвтектоидного распада аустенита при медленном охлаждении железо-углеродистых (Fe-C) сплавов ниже 723 °С.

**Аустенит** ( $\gamma$ -железо) переходит в  $\alpha$ -железо, в котором около 0,02 % углерода, а избыточный углерод выделяется в форме цементита или карбидов.

Таким образом, перлит представляет собой эвтектоидную смесь двух фаз – феррита и цементита. Перлит – англ. pearlite (от франц. perle- жемчуг); название связано с перламутровым блеском (перлит напоминает перламутр).

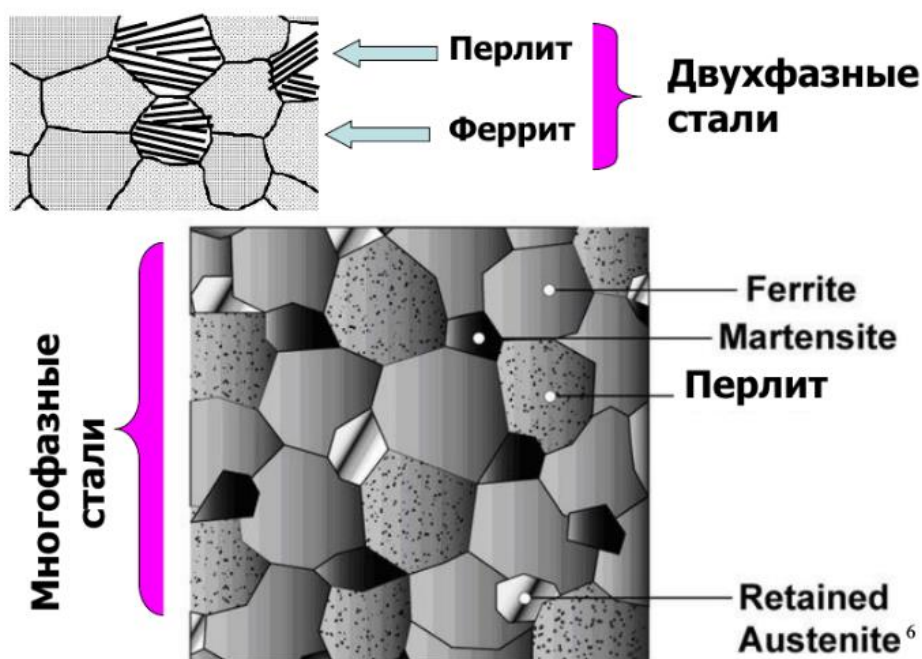


Рисунок 2.1 – Структура промышленных сталей

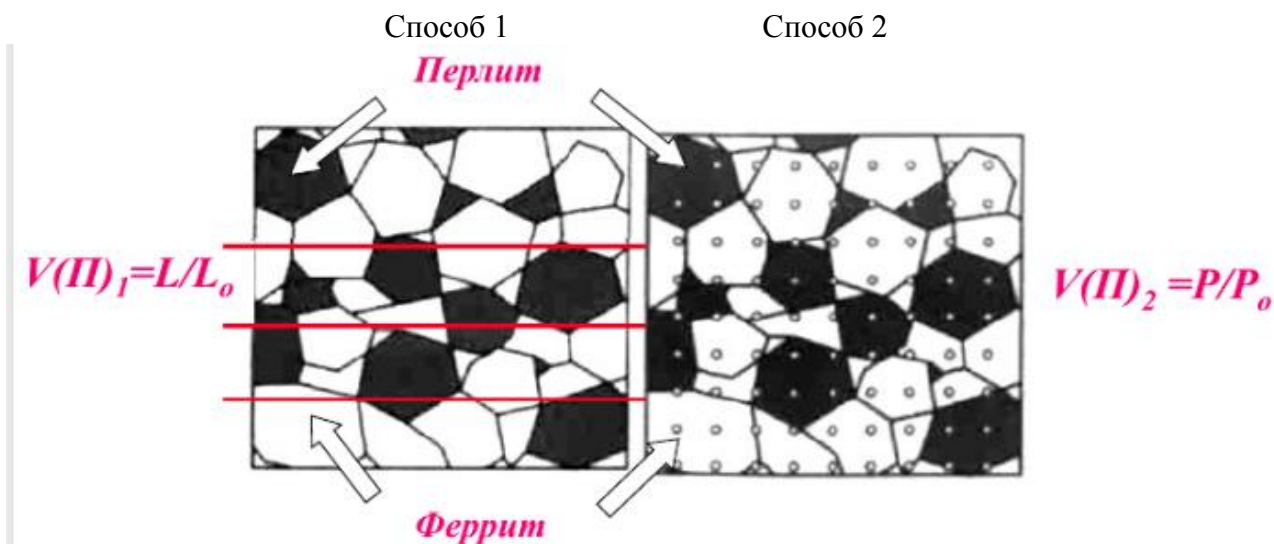
#### 2.2 Определение объёмной доли фаз

Не случайно на выбранном участке шлифа объёмная доля каждой фазы может быть оценена:

- 1) по доле ее площади  $A / A_0$ ;
- 2) по отношению длины линии, приходящейся на искомую фазу, к полной длине линии  $L / L_0$  на выбранном участке шлифа;
- 3) по отношению числа точек на зёрнах искомой фазы выбранного участка к полному количеству точек  $P/P_0$  на данном участке.

Таким образом, для случайной выборки мы имеем  $V(\Pi) = A/A_0 = L/L_0 = P/P_0 = V/V_0$ .

1. Определение двумя способами объёмной доли  $V(\Pi)$  зерен перлита в стали.



Расстояние между секущими и точками – 10 мм  
 Рисунок 2.2 – Способы определения искомой фазы

Рисунок 2.3 – Индивидуальное задание соответственно схеме с указанием способа определения объёмной доли включений

Таблица 1 – Таблица полученных результатов (s – среднее значение)

| Способ 1   |          | Способ 2   |          |
|------------|----------|------------|----------|
| $V(\Pi)_1$ | $\sigma$ | $V(\Pi)_2$ | $\sigma$ |
|            |          |            |          |
|            |          |            |          |
|            |          |            |          |
|            |          |            |          |
| $S =$      |          |            |          |

2. Оценка содержания углерода в исследуемой стали.

По микроструктуре доэвтектоидной стали (феррит+перлит) можно ориентировочно определить содержание в ней углерода. В перлите содержится 0,8 % углерода, а в феррите его практически нет (с точностью до 0,002 %).

Содержание углерода в стали пропорционально площади шлифа, занимаемой перлитом. Если оценить долю перлита в структуре доэвтектоидной стали, то можно рассчитать содержание в стали углерода:  $C$  (вес в %) =  $0,8V(II)$ .

3. Рассчитать вклад в предел текучести перлитной составляющей исследуемой стали.

Для эвтектоидной стали с перлитной структурой установлено, что предел текучести определяется размером ферритного промежутка в перлите или расстоянием между цементитными пластинами  $L$ . Эта закономерность выражается уравнением, аналогичным уравнению Холла-Петча:

$$\sigma_T = \sigma_i + k_y \cdot L^{-1/2}. \quad (2.1)$$

Исследователи В. Н. Гриднев, В. Г. Гаврилюк и Ю. Я. Мешков пришли к выводу, что прочность стали определяется не кратчайшим расстоянием между пластинами цементита в перлите, а величиной «эффективной линии скольжения» в феррите  $L_c$ .

$$L_c = 4,75 \cdot L. \quad (2.2)$$

Следовательно, вклад в предел текучести перлитной составляющей стали необходимо оценивать по соотношению  $\sigma_T = \sigma_i + k_y \cdot (4,75 \cdot L)^{-1/2}$ .

Это уравнение позволяет оценить прочность при полностью перлитной структуре. В рассматриваемых феррито-перлитных сталях содержание перлита меньше 100 %. Поэтому, казалось бы, величину перлитной составляющей в прочность таких сталей можно оценить, умножив второй член уравнения (2.3) на долю перлита  $V(II)$ . А именно:

$$\sigma_{II} = k_y \cdot (4,75 \cdot L)^{-1/2} \cdot V(II). \quad (2.4)$$

Феррито-перлитная структура представляет собой смесь двух фаз, в которой перлитные зерна в несколько раз прочнее зерен феррита.

Следовательно, перлитные зерна должны рассматриваться как жесткие включения в более мягкой матрице. При достижении предела текучести феррито-перлитной стали процесс пластической деформации начинается в феррите, а перлит при таком напряжении практически не претерпевает деформации. Поэтому расчет упрочнения стали по формуле (2.4) не дает реальных значений  $\sigma_{II}$ . Во многих работах вклад перлитной составляющей в предел текучести стали с ферритной основой учитывается путем умножения эмпирического коэффициента на процент перлита в стали. Следовательно, расчет упрочнения за счет зерен перлита следует вести по формуле (5):

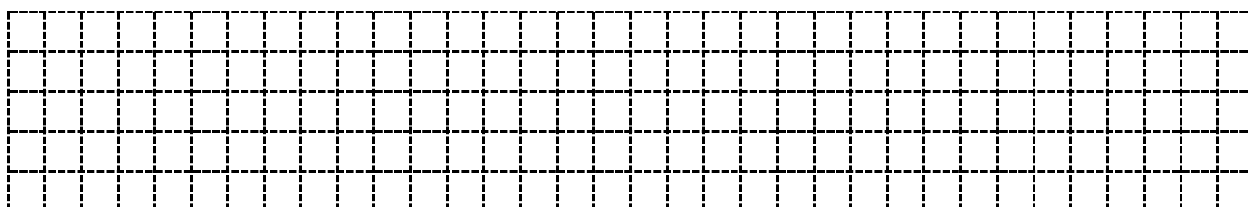
$$\sigma_{II} = k_y \cdot (4,75 \cdot L)^{-1/2} \cdot 0,24 \cdot V(II), \quad (2.5)$$

где  $L$  – меж пластинчатое расстояние в зернах перлита;

$$k_y = 2 \text{ кгс/мм}^{3/2};$$

$V(II)$  – объёмная доля зёрен перлита.

Используя соотношение (2.5) и результаты, полученные при анализе структуры стали в пунктах 2 и 3, провести оценки вклада перлитных зерен в предел текучести феррито-перлитной стали.



**Выводы по работе:**

## Лабораторная работа № 3

### Определение физико-механических характеристик стальных элементов проката по твёрдости и возможности структурных превращений в зоне термического влияния сварного шва

**Цель работы:** Изучить методику определения стали по ФМХ по твёрдости, рассчитать возможность появления структурных превращений в сварных соединениях.

**Оборудование и материалы:** образцы элементов стального проката, сварных соединения элементов стальных конструкций, твердомер ТЭМП-2.

#### 3.1 Теоретическая часть

Одной из наиболее распространенных характеристик, определяющих качество металлов и сплавов, возможность их применения в различных конструкциях и при различных условиях работы, является твердость. Испытания на твердость производятся чаще, чем определение других механических характеристик металлов: прочности, относительного удлинения и др.

**Твёрдостью материала** называют способность оказывать сопротивление механическому проникновению в его поверхностный слой другого твёрдого тела. Твёрдость определяется как величина нагрузки, необходимой для начала разрушения материала. Различают относительную и абсолютную твёрдость. Относительная – твёрдость одного материала относительно другого. Является важнейшим диагностическим свойством. Абсолютная, она же инструментальная, измеряется методами вдавливания.

Твёрдость зависит:

- от межатомных расстояний;
- координационного числа – чем выше число, тем выше твёрдость;
- валентности;
- природы химической связи;
- от направления (например, минерал дистен – его твёрдость вдоль кристалла 4, а поперёк – 7);
- хрупкости и ковкости;
- гибкости – минерал легко гнётся, изгиб не выпрямляется (например, тальк);
- упругости – минерал сгибается, но выпрямляется (например, слюды);
- вязкости – минерал трудно сломать (например, жадеит);
- спайности.

Наиболее твёрдыми из существующих на сегодняшний день материалов являются две аллотропные модификации углерода – лонсдейлит, на 58 % превосходящий по твёрдости алмаз и фуллерит (примерно в 2 раза твёрже алмаза). Однако практическое применение этих веществ пока малораспространено. Самым твёрдым из распространённых веществ является алмаз.

Для измерения твёрдости существует несколько шкал (методов измерения).

**Метод Бринелля** [8] – твёрдость определяется по диаметру отпечатка, оставляемому металлическим шариком, вдавливаемым в поверхность. Твёрдость вычисляется как отношение усилия, приложенного к шарiku, к площади отпечатка (причём площадь отпечатка берётся как площадь части сферы, а не как площадь круга); размерность единиц твердости по Бринеллю кгс/мм<sup>2</sup>. Твёрдость, определённая по этому методу, обозначается НВ, где Н = hardness (твёрдость, англ.), В – Бринелль.

Зная твердость по Бринеллю (НВ), можно определить предел прочности на растяжение (временное сопротивление):

$$\sigma_B = k \cdot HB,$$

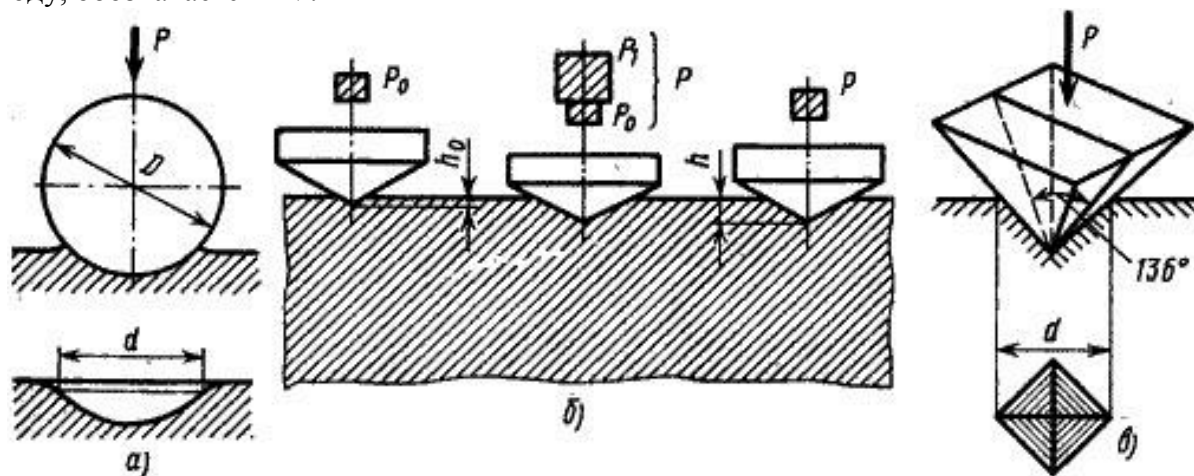
где  $k$  – коэффициент, зависящий от материала;

$$k = 0,34 \text{ – сталь НВ } 120 \dots 175;$$

$k = 0,35$  – сталь HB 175 ... 450;  
 $k = 0,55$  – медь, латунь и бронза отожженные;  
 $k = 0,33 \dots 0,36$  – алюминий и его сплавы.

**Метод Роквелла** [9] – твёрдость определяется по относительной глубине вдавливания металлического или алмазного конуса в поверхность тестируемого материала. Твёрдость, определённая по этому методу, является безразмерной и обозначается HR, HRB, HRC и HRA; твёрдость вычисляется по формуле  $HR = 100 - kd$ , где  $d$  – глубина вдавливания наконечника после снятия основной нагрузки, а  $k$  – коэффициент. Таким образом, максимальная твёрдость по Роквеллу соответствует HR 100.

**Метод Виккерса** [10] – твёрдость определяется по площади отпечатка, оставляемого четырёхгранной алмазной пирамидкой, вдавливаемой в поверхность. Твёрдость вычисляется как отношение усилия, приложенного к пирамидке, к площади отпечатка (причём площадь отпечатка берётся как площадь части поверхности пирамиды, а не как площадь ромба); размерность единиц твёрдости по Виккерсу кгс/мм<sup>2</sup>. Твёрдость, определённая по этому методу, обозначается HV.



а) по Бринеллю; б) по Роквеллу; в) по Виккерсу

Рисунок 3.1 – Методы определения твёрдости материала

### Методы Шора

**Твёрдость по Шору (Метод вдавливания)** – твёрдость определяется по глубине проникновения в материал специальной закаленной стальной иглы (индентора) под действием калиброванной пружины. В данном методе измерения прибор именуется дюрометром. Обычно метод Шора используется для определения твердости низкомолекулярных материалов (полимеров). Метод Шора, описанный стандартом ASTM D2240, оговаривает 12 шкал измерения. Чаще всего используются варианты А (для мягких материалов) или D (для более твердых). Твёрдость, определённая по этому методу, обозначается буквой используемой шкалы, записываемой после числа с явным указанием метода. В качестве примера: резина в покрышке колеса легкового автомобиля имеет твердость примерно 70 А, школьный ластик – примерно 50 А.

**Твёрдость по Шору (Метод отскока)** [11] – метод определения твёрдости очень твёрдых материалов, преимущественно металлов, по высоте, на которую после удара отскакивает специальный боёк (основная часть склероскопа — измерительного прибора для данного метода), падающий с определённой высоты. Твердость по этому методу Шора оценивается в условных единицах, пропорциональных высоте отскакивания бойка. Обозначается HSx, где H – Hardness, S – Shore и x – латинская буква, обозначающая тип использованной при измерении шкалы.

**Метод Аскер** («Аскер» – это название японской компании, производящей измерители твердости – дюрометры) – твёрдость определяется по глубине введения стальной полусферы под действием пружины. Используется для мягких резин. По принципу измерения

соответствует методу Шора, но отличается формой поверхности щупа. Аскер С использует полусферу диаметром 2.54 мм.

**Метод Кузнецова – Герберта – Ребиндера** – твёрдость определяется временем затухания колебаний маятника, опорой которого является исследуемый металл.

**Метод Польди (двойного отпечатка шарика)** – твердость оценивается в сравнении с твердостью эталона, испытание производится путем ударного вдавливания стального шарика одновременно в образец и эталон.

**Шкала Мооса** – определяется по тому, какой из десяти стандартных минералов царапает тестируемый материал и какой материал из десяти стандартных минералов царапается тестируемым материалом.

Для инструментального определения твёрдости методом вдавливания используются твердомеры.

### 3.2 Устройство и принцип работы твердомера ТЭМП-2

1. Твердомер представляет собой портативный электронный программируемый прибор диагностического действия, состоящий из электронного блока, вмонтированного в корпус (1), и датчика (2), соединённых экранированным кабелем (3), а также двух элементов питания типа АА, вставляемых в батарейный отсек корпуса электронного блока.

2. Принцип измерения твёрдости прибором-динамический, основанный на определении соотношения скоростей падения и отскока ударника (4) датчика, которое преобразуется электронным блоком в условные единицы НЛ. Единицы НЛ по соответствующему алгоритму пересчитываются микроконтроллером прибора в числа твердости НВ, НРС, НV или HSD. Данные для пересчета создаются при программировании прибора и хранятся в его энергонезависимой памяти. Шкалы твердости программируются в прибор измерениями по соответствующим образцовым мерам твёрдости, либо по образцам с известной твердостью.

3. Датчик (2) состоит из направляющей трубки (5), механизма ввода (6) (включающего цанговый узел (7), шток (8), основную пружину (9) и спусковую кнопку (10)), ударника (4) (состоящего из твёрдосплавного шаровидного индентора (11), постоянного магнита (12), корпуса (13) и пробки (14)), индуктивной катушки (15) и опорного кольца (16).

4. Взвод датчика осуществляется перед каждым измерением твёрдости толкателем (17) до ощутимого защелкивания (фиксации) пробки ударника в цанговом узле. При этом происходит сжатие ударником основной пружины. При нажатии на спусковую кнопку шток прижимает цанговый узел и пружина «выстреливает» ударник. Перемещаясь внутри направляющей трубки, ударник ударяется индентором о поверхность измеряемого изделия (18) и отскакивает от него. При этом постоянный магнит наводит в катушке индуктивность ЭДС, которая пропорциональна соответствующим скоростям падения и отскока ударника. Сигнал, полученный в катушке при падении и отскоке ударника, передаётся по электронному кабелю (3) в электронный блок.

5. Электронный блок твердомера встроен в пластмассовый или металлический корпус (1). На лицевой стороне корпуса прибора расположены жидкокристаллический индикатор – ЖКИ (в дальнейшем индикатор) (19), светодиод – индикатор соединения с ПК (в некоторых моделях ТЭМП-2 отсутствует) и клавиатура (20), имеющая следующие пять кнопок:

**«Вкл/Меню» – включение** (при включенном приборе кнопка позволяет войти в меню прибора, а после входа в «Меню» выполняет функции клавиши «Enter»).

**«Угол» – выбор положения датчика** (после входа в «меню» выполняет функции: выбора функций меню и уменьшения чисел).

**«Шкала» – выбор шкалы твёрдости** (после входа в «Меню» выполняет функции: выбора пунктов меню и увеличения чисел).

**«X» – усреднение результатов измерения** (после входа в «Меню» выполняет функции клавиши «Esc»).

## «Пам» – запоминание данных.

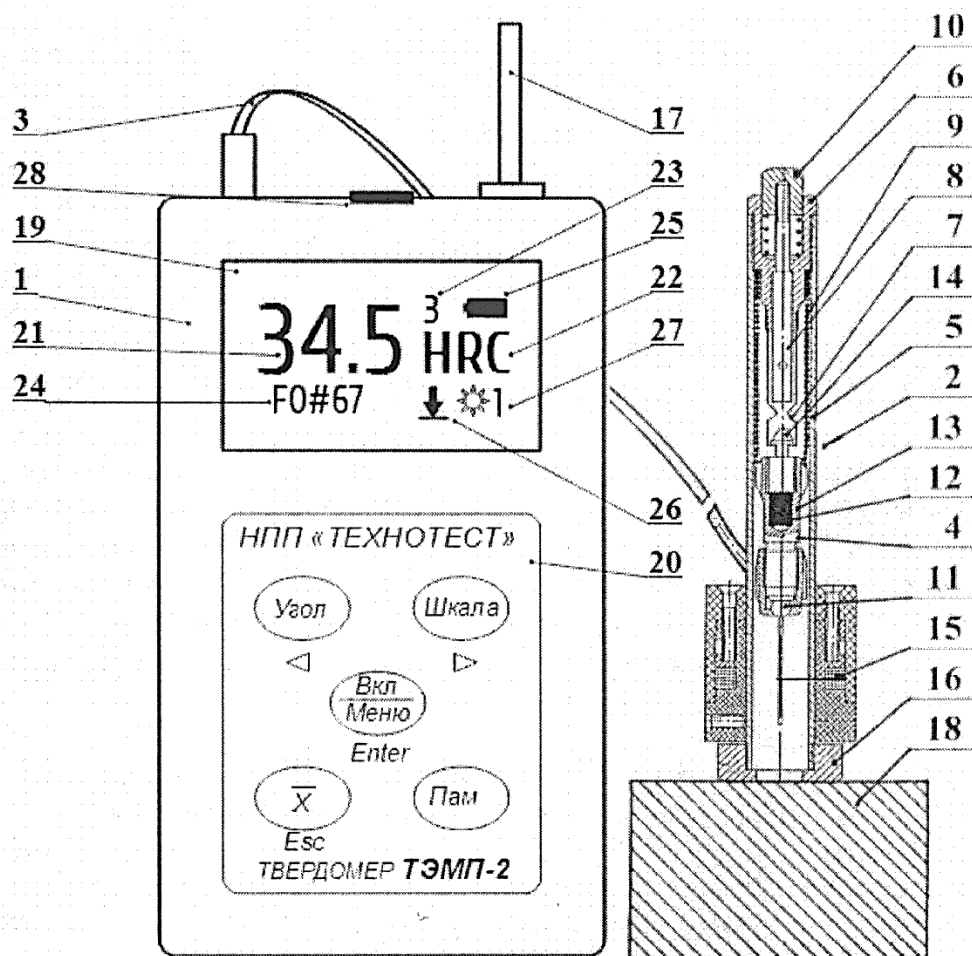


Рисунок 3.2 – общий вид твердомера ТЭМП-2

6. На верхней (торцевой) стороне корпуса электронного блока размещён толкатель (17), аудиоразъём для соединения с датчиком, разъем mini-USB (28) для соединения с блоком питания 5В или ПК.

7. На задней части корпуса электронного блока расположен шильд (на нём указано предприятие-изготовитель, тип твердомера, параметры питания и заводской номер прибора), а также крышка батарейного отсека. Батареи типа АА устанавливаются согласно полярности, указанной в батарейном отсеке.

8. На индикаторе прибора (19) при включении кнопкой **«Вкл/Меню»**, отображается результат последнего перед включением измерения по соответствующей шкале, а также другая дополнительная информация в соответствии с рисунком 3.2: (21) результат измерения (НВ, HRC, HV<sub>S</sub>, HSD, R<sub>m</sub>); (22) наименование шкалы; (23) символ **«X»** усреднение данных или количество результатов измерений, хранящаяся в буфере усреднения; (24) номер файла памяти и номер последнего сохраненного значения; (25) уровень заряда батареи; (26) положение датчика относительно поверхности измерения измеряемого изделия; (27) символ включения подсветки индикатора прибора и время длительности подсветки (в секундах).

### **Порядок работы**

1. Перед проведением измерений твёрдости необходимо выполнить следующие операции:

1.1 Включить прибор кнопкой **«Вкл/Меню»** – на экране прибора сначала отобразится заставка (тип прибора, время его микропрограммы, а также общее количество измерений, проведенных за всё время его эксплуатации), а затем индикация в соответствии с рисунком 3.2.



1.2 Кнопкой **«Шкала»** выбрать требуемую шкалу твёрдости (HB, HRC, HV, Rm или любую другую).

1.3 Кнопкой **«Угол»** выбрать угол установки датчика на измеряемую поверхность изделия (сверху вниз, сбоку горизонтальной, снизу-вверх).

1.4 При необходимости выбрать время подсветки экрана.

1.5 Выбрать файл памяти, в котором будут сохраняться результаты измерений. При необходимости можно стереть ранее запомненные данные из выбранного файла.

1.6 Нажать на кнопку **«X» дважды** для стирания предыдущих результатов в буфере усреднения. Цифра в правом верхнем углу экрана рядом с символом батареи показывает количество значений, хранящихся в буфере усреднения. Если буфер пуст, на этом месте отображается 0 или X.

1.7 Толкателем загрузить «Ударник» с торцевой части датчика до защелкивания и вынуть толкатели из датчика.

1.8 Датчик установить перпендикулярно к испытываемой поверхности, плотно прижав его одной рукой, а другой – нажать на спусковую кнопку. После соударения ударника с контролируемой поверхностью на экране прибора появятся результаты измерения в числах выбранной шкалы. Отображаемое количество значений в буфере усреднения увеличивается на единицу. Буфер усреднения вмещает 100 значений. При заполнении буфера новые значения записываются на место ранее заполненных, начиная с 1-го. При этом рядом с номером и снова значение отображается буква «П» (переполнение).

1.9 Последующие измерения в количестве не менее 3-х, провести в соответствии с пунктами 1.7–1.8.

2.0 Для определения среднего значения результатов измерений нажать кнопку «X», после чего на экране прибора появится результат усреднения и символ «X», а также дополнительная информация. После этого все исходные данные из буфера усреднения автоматически стираются.

2.1 При подключении прибора к компьютеру с помощью поставляемого кабеля (через разъем mini-USB), результаты измерения из памяти могут быть выведены на компьютер и сохранены в виде файла с последующей распечаткой на принтере.

2.2 Выключение твердомера. Прибор также выключается автоматически - через 60 секунд при отсутствии активных действий оператора. В режиме программирования, а также при питании прибора от внешнего блока питания или от порта USB самоотключение не происходит. Ресурс батареи не расходуется, если прибор подключён к внешнему источнику питания (ПК прибор будет работать даже при отсутствии батареи).

2.3 Для получения корректных результатов измерения твёрдости минимальное расстояние между точками измерений (отпечатками) должно быть не менее 3 мм, повторное измерение в одной и той же точке не допускается.

Таблица 3.1 – Формулы для определения физико-механических характеристик стали дюрOMETрическим методом

| Сталь                                                   | Ограничение по твёрдости | Параметры | Единицы измерения | Уравнение                                |
|---------------------------------------------------------|--------------------------|-----------|-------------------|------------------------------------------|
| Стали углеродистые и легированные кремне-марганцовистые | $HB \geq 140$            | $f_y$     | МПа               | $3,4 HB-175$                             |
|                                                         | $HB < 140$               | $f_y$     | МПа               | $2,15HB$                                 |
|                                                         |                          | $f_u$     | МПа               | $8,8 \cdot 10^{-4} HB^2 + 2,66 HB + 103$ |
|                                                         |                          | $e_u$     | %                 | $3,04 \cdot 10^{-4} / (2 f_u + f_y)$     |
|                                                         |                          | $Y$       | %                 | $1,9 \cdot 10^5 / (f_u + f_y + 2000)$    |

### 3.3 Определение возможности структурных превращений в зоне термического влияния сварного шва

Показателем, указывающим на охрупчивание стали из-за структурных превращений, является твердость зоны термического влияния. Для обычных углеродистых и низколегированных сталей твердость зоны термического влияния должна быть не выше HV 350. Возможную максимальную величину твердости определяют по формуле

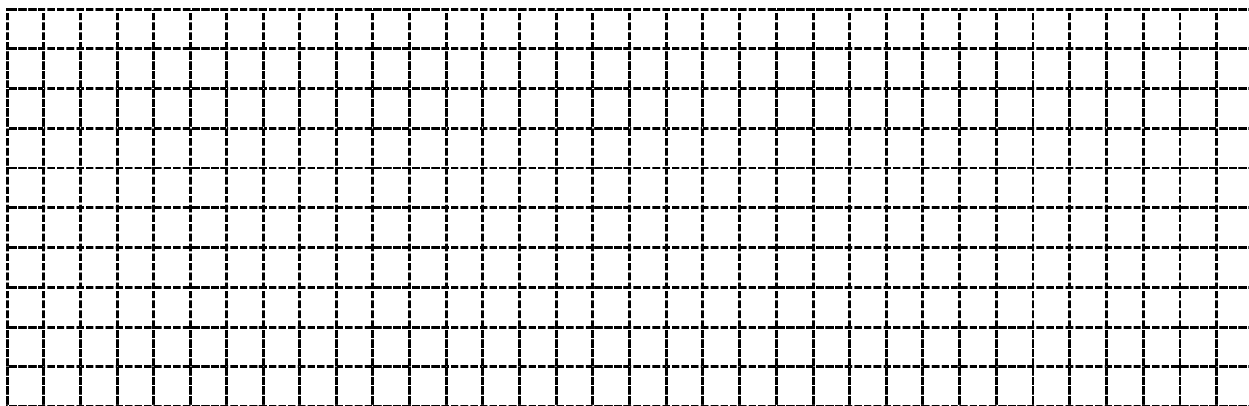
$$HV_{\max} = 90 + 1050C + 47Si + 75Mn + 30Ni + 31Cr,$$

где C, Si, Mn, Ni, Cr – массовые доли элементов в процентах.

Если предварительная оценка свариваемости указывает на склонность стали к образованию холодных трещин, чаще всего применяют предварительный подогрев свариваемого изделия. Температуру предварительного подогрева T, °C рассчитывают по формуле

$$T = 350 \cdot \sqrt{C_{об} - 0,25},$$

где  $C_{об}$  – общий эквивалент углерода, определяемый по формуле  $C_{об} = C_{эке} \cdot (1 + 0,005 \cdot S)$ , здесь S – массовая доля серы, %.



**Выводы по работе:**

## Лабораторная работа № 4

### Оценка уровня качества сварных соединений

**Цель работы:** *Ознакомить студентов с оценкой уровней качества сварных соединений с угловыми швами по ГОСТ 23118-2019 [12], ТКП 45-5.04-121-2009 [13], СТБ 1133-98 [14], СТБ EN 1090-2-2013 [15] и выполнить оценку уровня качества сварного соединения.*

**Оборудование и материалы:** *сварные соединения с угловыми швами, линейка металлическая ГОСТ 427-75 [6], штангенциркуль ШЦ11 ГОСТ 166 [16].*

#### 4.1 Теоретическая часть

#### **Критерии приемки по СТБ EN 1090-2-2013 [15] ВОЗВЕДЕНИЕ СТАЛЬНЫХ И АЛЮМИНИЕВЫХ КОНСТРУКЦИЙ**

##### **Технические требования к стальным конструкциям**

Существует 4 класса возведения конструкций, к которым привязаны требования к размерам и профилю сварных швов. Сварные элементы конструкций должны удовлетворять требованиям, установленным в разделах 10 и 11 СТБ EN 1090-2-2013 [15].

**Класс возведения ЕХС1** – уровень качества D.

**Класс возведения ЕХС2** – уровень качества С, но при наличии дефектов 5011, 5012 (подрез), 506 (наплыв), 601 (случайная дуга) и 2025 (концевая раковина кратера шва) по EN ISO 5817 – уровень качества D.

**Класс возведения ЕХС3** – уровень качества В.

**Класс возведения ЕХС4** – уровень качества В+, который представляет собой уровень качества В с учетом дополнительных требований, приведенных в таблице 17 СТБ EN 1090-2-2013 [15].

Некоторые дефекты сварных швов, кодированные по ГОСТ Р ИСО 5817-2021 [17] и ГОСТ Р ИСО 6520-1-2012 [18], перечислены ниже.

Дефект 505 (некачественная поверхность шва) и 401 (недостаточное сплавление на микроскопическом уровне) не учитываются при оценке.

##### **Дополнительные требования к уровню качества В+**

Наименование и обозначение дефекта, предельно допустимые размеры дефекта:

а) подрез (5011, 5012): не допускается;

б) внутренние поры (2011–2014):

– стыковые швы  $d \leq 0,1s$ , но не более 2 мм;

– угловые швы  $d \leq 0,1a$ , но не более 2 мм;

в) включения твердых частиц (300):

– стыковые швы  $h \leq 0,1s$ , но не более 1 мм  $l \leq s$ , но не более 10 мм;

– угловые швы  $h \leq 0,1a$ , но не более 1 мм  $l \leq a$ , но не более 10 мм;

г) линейное смещение (507):  $h < 0,05t$ , но не более 2 мм;

д) вогнутость корня шва (515): не допускается.

Дополнительные требования для мостовых настилов:

а), б) пористость и газовые поры (2011, 2012 и 2014).

Допускаются только малые единичные поры. Максимальное количество дефекта «Скопление пор (2013)» – 2 %. Продолговатая полость, свищ – (2015 и 2016). Некачественная подгонка, угловые швы – (617). Поперечные швы контролируют по всей длине, допускается небольшой локальный зазор  $h \leq 0,3 \text{ мм} + 0,1a$ , но не более 1 мм СТБ EN 1090-2-2013 [15].

Предельно допустимые размеры дефекта: непрерывный подрез (5011):

– для стыковых швов допускается только локально  $h \leq 0,5 \text{ мм}$ ;

– для угловых швов не допускается при расположении шва поперек усилия, подрез следует удалить шлифованием.

Многочисленные разрывы в поперечном сечении не допускаются.

Твердые включения (300) не допускаются.

Примерный перечень отдельных дефектов по ГОСТ Р ИСО 6520-1-2012 [18] в изделии:

- 2025 – открытая раковина в кратере;
- 301 – шлаковое включение;
- 503 – превышение выпуклости углового шва;
- 5213 – недостаточная толщина углового шва;
- 512 – чрезмерная асимметрия углового шва.

**Оценка уровня качества сварных соединений по ГОСТ 23118-2019 [12], ТКП 45-5.04-121-2009 [13], СТБ 1133-98 [14].** При оценке категории и уровня качества следует руководствоваться материалами проектной документации: чертежами металлоконструкций стадии КМ или КМД, материалами расчётно-пояснительных записок, в которых они должны быть указаны. По действующим нормативным документам, за исключением EN, в зависимости от вида швов, конструкций в которых они использованы, конструктивного оформления, условий эксплуатации и групп конструкций, уровня напряжений в швах, швы сварных соединений разделяются на I, II, III категории, которые определяют высокий, средний и низкий уровни качества. Характеристики категорий и уровней качества приведены в таблице 4.1 или приложении Б ГОСТ 23118-2019 [12].

**Расчёт и проектирование сварных швов по СП 5.04.01-2021 [19].** Расчет сварных стыковых соединений при действии расчетного осевого усилия  $N_{Ed}$ , проходящего через центр тяжести соединения, следует выполнять по формуле

$$N_{Ed} / (t_w f_{wy} \gamma_c) \leq 1, \quad (4.1)$$

где  $t$  – наименьшая из толщин соединяемых элементов;

$l_w$  – расчетная длина сварного шва, равная полной его длине, уменьшенной на  $2t$ , или полной его длине, если концы шва выведены за пределы стыка.

Расчет сварного соединения с угловыми швами при действии расчетного осевого усилия  $N_{Ed}$ , проходящего через центр тяжести соединения, следует выполнять на срез (условный) по одному из двух сечений (рисунок 1.1) по формулам:

$$\text{при } \frac{\beta_f f_{wf}}{\beta_z f_{wz}} \leq 1 \text{ по металлу шва } \frac{N_{Ed}}{\beta_f k_f l_w f_{wf} \gamma_c} \leq 1; \quad (4.2)$$

$$\text{при } \frac{\beta_f f_{wf}}{\beta_z f_{wz}} > 1 \text{ по металлу границы сплавления } \frac{N_{Ed}}{\beta_f k_f l_w f_{wz} \gamma_c} \leq 1, \quad (4.3)$$

где  $l_w$  – расчетная длина швов в сварном соединении, равная суммарной длине всех его участков за вычетом по 1 см на каждом непрерывном участке шва;

$\beta_f$  и  $\beta_z$  – коэффициенты, принимаемые по таблице 39 СП 5.04.01-2021 [19].

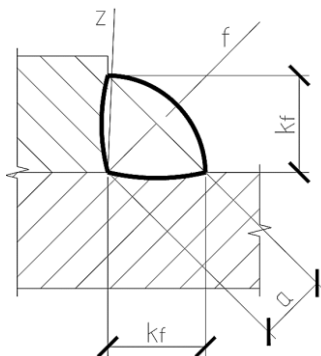


Рисунок 4.1 – Сечения углового шва по металлу шва ( $f$ ) и границе сплавления ( $z$ )

**Расчёт и проектирование сварных швов по ТКП EN 1993-1-8 [24].** Расчетное сопротивление углового сварного шва можно считать достаточным, если в каждой точке по

его длине равнодействующая всех сил, передаваемых сварным швом единичной длины, удовлетворяет следующему условию:

$$F_{w,Ed} \leq F_{w,Rd}, \quad (4.4)$$

где  $F_{w,Ed}$  – расчетное значение внешних усилий, действующих на единицу длины сварного шва;

$F_{w,Rd}$  – расчетное значение сопротивления на единицу длины сварного шва (формула 4.5).

Независимо от ориентации продольного сечения сварного шва относительно направления приложения силы, расчетное сопротивление сварного шва единичной длины  $F_{w,Rd}$  следует определять по формуле

$$F_{w,Rd} = f_{vw,d} \cdot a, \quad (4.5)$$

где  $f_{vw,d}$  – расчетное сопротивление сдвигу сварного шва рассчитывается по формуле 4.6;

$a$  – эффективная толщина сварного шва, таблица 3.5 [25].

Расчетное сопротивление сдвигу сварного шва  $f_{vw,d}$  следует определять по формуле

$$f_{vw,d} = \frac{f_u / \sqrt{3}}{\beta_w \cdot \gamma_{M2}}, \quad (4.6)$$

где  $f_u$  – номинальное значение предела прочности основного металла;

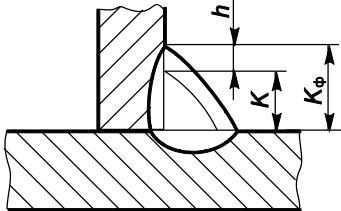
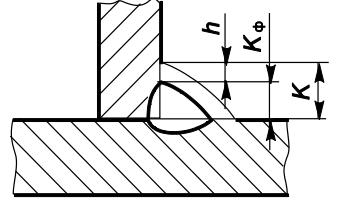
$\beta_w$  – поправочный коэффициент для угловых сварных швов, таблица 3.6 [25].

Таблица 4.1 – Оценка категории и уровня качества сварных швов по ГОСТ 23118-2019 [12], ТКП 45-5.04-121-2009 [13], СТБ 1133-98 [14]

| Категории и уровни качества швов сварных соединений | Типы швов соединений и характеристика условий их эксплуатации                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|-----------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| I – высокий                                         | <p>1. Поперечные стыковые швы, воспринимающие растягивающие напряжения <math>\sigma_p \geq 0,85f_y</math> (в растянутых поясах и стенках балок, элементов ферм и т. п.).</p> <p>2. Швы тавровых, угловых, нахлесточных соединений, работающие на отрыв, при растягивающих напряжениях, действующих на прикрепляемый элемент, <math>\sigma_p \geq 0,85f_y</math>, и при напряжениях среза в швах <math>\tau_{ш} \geq 0,85f_{wf}</math>.</p> <p>3. Швы в конструкциях или в их элементах, относящихся к 1-й группе по классификации нормативных документов, действующих на территории государства – участника Соглашения, принявшего настоящий стандарт, а также в конструкциях 2-й группы в климатических районах строительства с расчетной температурой ниже минус 45 °С (кроме швов, отнесенных к типам 7–12).</p> |
| II – средний                                        | <p>4. Поперечные стыковые швы, воспринимающие растягивающие напряжения <math>0,4f_y \leq \sigma_p \leq 0,85f_y</math>, а также работающие на отрыв швы тавровых, угловых, нахлесточных соединений при растягивающих напряжениях, действующих на прикрепляемый элемент, <math>\sigma_p &lt; 0,85f_y</math>, и при напряжениях среза в швах <math>\tau_{ш} \geq 0,85f_{wf}</math> (кроме случаев, отнесенных к типу 3).</p> <p>5. Расчетные угловые швы, воспринимающие напряжения среза <math>\tau_{ш} \geq 0,75f_{wf}</math>, которые соединяют основные элементы конструкций 2-й и 3-й групп (кроме случаев, отнесенных к типам 2 и 3).</p> <p>6. Продольные стыковые швы, воспринимающие напряжения растяжения или сдвига <math>0,4f \leq \sigma &lt; 0,85f</math>.</p>                                           |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | <p>7. Продольные (связующие) угловые швы в основных элементах конструкций 2-й и 3-й групп, воспринимающие растягивающие напряжения (поясные швы элементов составного сечения, швы в растянутых элементах ферм и т. д.).</p> <p>8. Стыковые и угловые швы, прикрепляющие к растянутым зонам основных элементов конструкций (узловые фасонки, фасонки связей, упоры и т. п.).</p> |
| III – низкий                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | <p>9. Поперечные стыковые швы, воспринимающие сжимающие напряжения.</p> <p>10. Продольные стыковые швы и связующие угловые швы в сжатых элементах конструкций.</p> <p>11. Стыковые и угловые швы, прикрепляющие фасонки к сжатым элементам конструкций.</p> <p>12. Стыковые и угловые швы во вспомогательных элементах конструкций (конструкции 4-й группы).</p>                |
| <p>Условные обозначения:</p> <p><math>f</math> – расчетное сопротивление металла шва;</p> <p><math>f_y</math> – расчетное сопротивление стали растяжению, сжатию и изгибу по пределу текучести;</p> <p><math>f_{wf}</math> – расчетное сопротивление угловых швов срезу (условному) по металлу шва;</p> <p><math>\sigma</math> – напряжение металла шва;</p> <p><math>\sigma_p</math> – растягивающее напряжение металла шва;</p> <p><math>\tau_{уш}</math> – касательное напряжение металла углового шва.</p> |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |

Таблица 4.2 – Оценка уровня качества углового шва по его геометрии по ГОСТ 23118-2019 [12], ТКП 45-5.04-121-2009 [13], СТБ 1133-98 [14]

| Наименование дефектов             | Характеристика дефектов по расположению, форме и размерам                                              | Допустимые дефекты по уровням качества     |                                                                                                                     |                                            |
|-----------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|
|                                   |                                                                                                        | Высокий                                    | Средний                                                                                                             | Низкий                                     |
| 1. Увеличение катета углового шва | $h = K_{\phi} - K$  | $h \leq 1 \text{ мм} + 0,1K$<br>Макс. 2 мм | $h \leq 1 \text{ мм} + 0,15K$<br>Макс. 3 мм                                                                         | $h \leq 1 \text{ мм} + 0,2K$<br>Макс. 5 мм |
| 2. Уменьшение катета углового шва |  $h = K - K_{\phi}$ | Не допускаются                             | Длинные дефекты не допускаются<br>Короткие дефекты:<br>$h \leq 0,3 \text{ мм} + 0,1K$<br>Макс. 1 мм      Макс. 2 мм |                                            |

#### 4.2 Порядок выполнения работы

Оценить уровень качества сварных соединений по ГОСТ 23118-2019 [12], ТКП 45-5.04-121-2009 [13], СТБ 1133-98 [14].

Общий вид сварного образца представлен на рисунке 4.2.

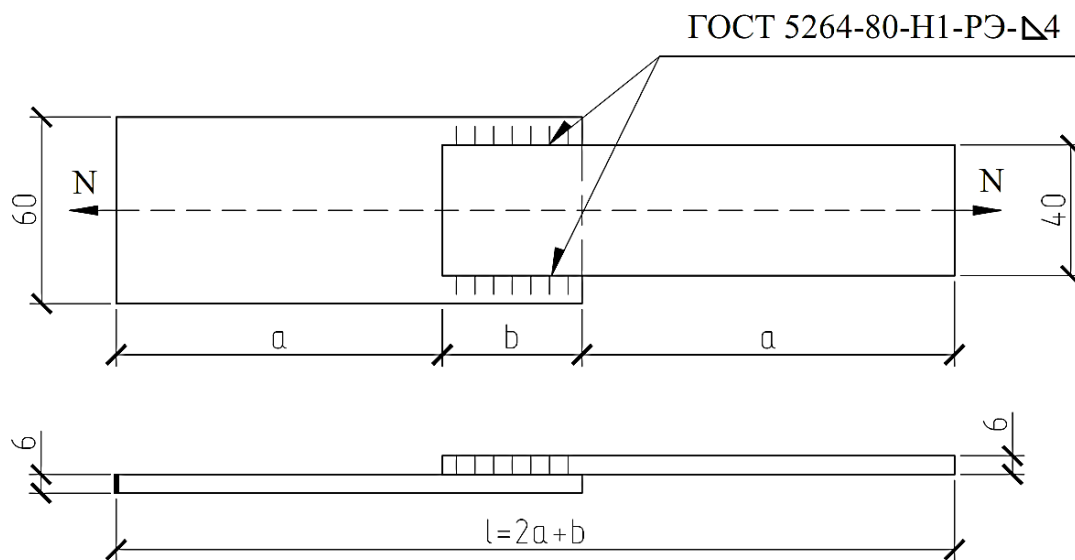


Рисунок 4.2 – Общий вид сварного образца

Рисунок 4.3 – Дефекты углового сварного шва со стороны 1  
(№ – вид дефектов по ГОСТ Р ИСО 6520-1-2012 [18])

Рисунок 4.4 – Дефекты углового сварного шва со стороны 2  
(№ – вид дефектов по ГОСТ Р ИСО 6520-1-2012 [18])

Определить типы швов по таблице 4.1. Изучить и классифицировать основные дефекты сварных швов, представленных на рисунках 4.2–4.4, и образцах, предложенных преподавателем. Занести полученные результаты в журнал ниже.

---

---

---

Сделать необходимые выводы 1 или 2.

1. Сварка изделия выполнена с недопустимыми дефектами по ГОСТ Р ИСО 6520-1-2012 [18] \_\_\_\_\_ и изделие к использованию не допускается.

2. Сварка изделия выполнена с допустимыми дефектами и изделие к использованию допускается.

**Оценить уровень качества углового шва по его геометрии по ГОСТ 23118-2019 [12], ТКП 45-5.04-121-2009 [13], СТБ 1133-98 [14] в балке таврового сечения.**

Выполнить перечень работ, описанный ниже на одной из тавровых балок, представленных в лаборатории. Необходимые данные для работы каждому студенту задаются индивидуально.

В образце № 2 (балке таврового сечения) оценить уровень качества сварных поясных швов в соответствии с требованиями таблицы 4.2 при заданном проектном значении катета сварного шва и требуемом уровне качества (рисунок 4.5).

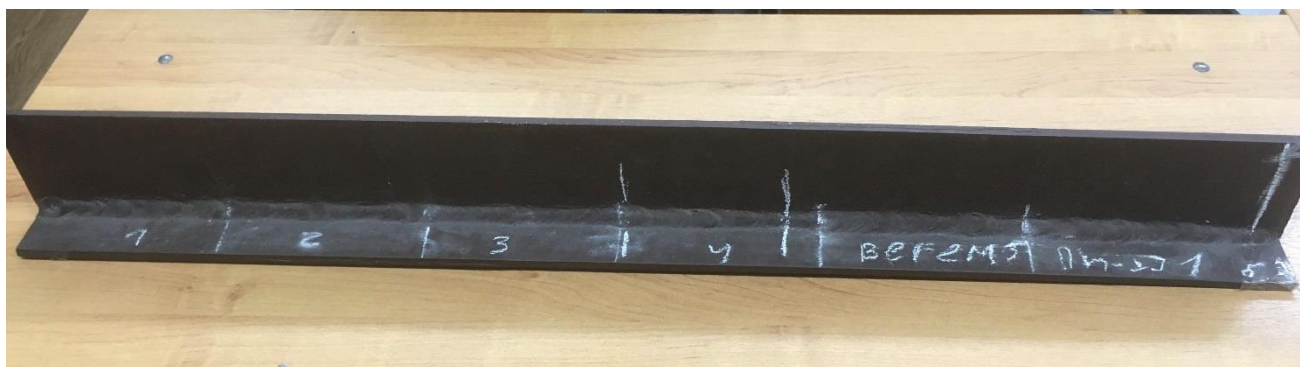


Рисунок 4.5 – Общий вид сварной тавровой балки (образец № 2 или № 3)

Проектный размер катета  $k_f =$  \_\_\_ мм и уровень требуемого качества: высокий, средний низкий. Минимальные и максимальные величины катетов студенты определяют путём визуального осмотра и измерениями штангенциркулем или шаблоном сварщика.

Минимальный размер катета  $k_{1.min} =$  \_\_\_\_\_ мм, соответствующий  $k_{1.min.coor} =$  \_\_\_\_\_ мм.

Максимальный размер катета  $k_{1.max} =$  \_\_\_\_\_ мм, соответствующий  $k_{1.coor} =$  \_\_\_\_\_ мм.

Наблюдается увеличение катета сварного шва  $h \leq$  \_\_\_\_\_, что \_\_\_\_\_ при требуемом уровне качества \_\_\_\_\_.

Наблюдается уменьшение катета сварного шва  $h \leq$  \_\_\_\_\_, что \_\_\_\_\_ при требуемом уровне качества \_\_\_\_\_.

Нанести сечение с выбранными значениями катетов на рисунок 4.5.



**Выводы по работе:**

Максимальное превышение размера сварного шва составляет \_\_\_\_\_ мм, что не подпадает ни под один из вышеуказанных уровней качества.

Балка подлежит демонтажу.

Максимальное превышение размера сварного шва составляет \_\_\_\_\_ мм, что соответствует уровню качества \_\_\_\_\_.

Балка принимается техническим надзором.

## Лабораторная работа № 5

### Сварочные деформации и перемещения

**Цель работы:** *изучить механизм появления сварочных деформаций и перемещений, их виды, метод расчёта сварочных деформаций, способы уменьшения и устранения сварочных деформаций.*

**Оборудование и материалы:** *тавровые балки с односторонним и двухсторонним поясными швами, измерительный инструмент для измерения и регистрации прогиба и угловых деформаций.*

#### 5.1 Основные сведения о сварочных деформациях и перемещениях

В процессе сварки металл сварного соединения и электрода плавится под действием концентрированного источника тепла – дуги, газового пламени и т. д. При дуговой сварке объём расплавленного металла относительно невелик и составляет 4...60 см<sup>3</sup>. Расплавленный металл до начала кристаллизации существует всего несколько секунд.

Равномерно нагретый незакреплённый стержень после постепенного охлаждения примет свои первоначальные размеры (в нём не возникнут напряжения или деформации). Если при нагревании или охлаждении стержню будут препятствовать какие-либо силы или связи, то в нём возникают напряжения с последующей пластической деформацией (на это сильно влияют механические свойства металлов при высоких температурах).

Предел прочности  $\sigma_b$  стали в интервале температур от 200 до 350 °С достигает максимума, а относительное удлинение  $\delta$  снижается. При дальнейшем повышении температуры  $\sigma_b$  падает, а  $\delta$  возрастает. Модуль упругости стали  $E$  и предел текучести  $\sigma_y$  с повышением температуры падают, и примерно при 650 °С сталь теряет свои упругие свойства. Из этого следует, что при указанной температуре нагрева достаточно небольшого усилия для создания пластической деформации металла.

Напряжения, которые остаются в металле от местного неравномерного нагрева или сварки, называются **остаточными**, или **собственными**, так как существуют в изделии без воздействия внешних сил.

При сварке, кроме неравномерного местного нагрева возникновению остаточных напряжений способствуют литейная усадка расплавленного металла шва и структурные изменения металла в зоне термического влияния.

**Литейной усадкой** называют уменьшение объёма металла в результате остывания и твердения жидкою расплава. Усадка измеряется в процентах от первоначального линейного размера (для низкоуглеродистой стали – 2 %; алюминия – 1,8 %). В результате литейной усадки металла шва возникают сжимающие силы как в продольном, так и в поперечном направлениях к оси шва.

Структурные изменения в зоне термического влияния представляют собой изменения размеров и взаимного расположения кристаллов металла, которые сопровождаются изменением объёма металла, подверженного термическому воздействию. Такое местное изменение объёма металла приводит к возникновению внутренних напряжений. При сварке легированных и высокоуглеродистых сталей, склонных к закалке, эти напряжения могут достигать больших значений.

Напряжения от структурных изменений при сварке низкоуглеродистой стали весьма незначительны и ими можно пренебречь. Величина и распределение напряжений и деформаций зависят от жёсткости свариваемых конструкций и изделий (при этом большое значение имеет толщина металла). При сварке металла толщиной до 3 мм проявляются преимущественно большие деформации, а напряжения ничтожны. Сварка металла толщиной от 4 до 16...18 мм сопровождается значительными деформациями (при этом с увеличением толщины в большой степени начинают проявляться остаточные напряжения). При сварке

металла толщиной от 18 до 50...60 мм основным фактором является возникновение значительных остаточных напряжений, деформации при этом невелики.

Остаточные напряжения действуют в непосредственной близости к шву и резко затухают на расстоянии 50...80 мм от шва.

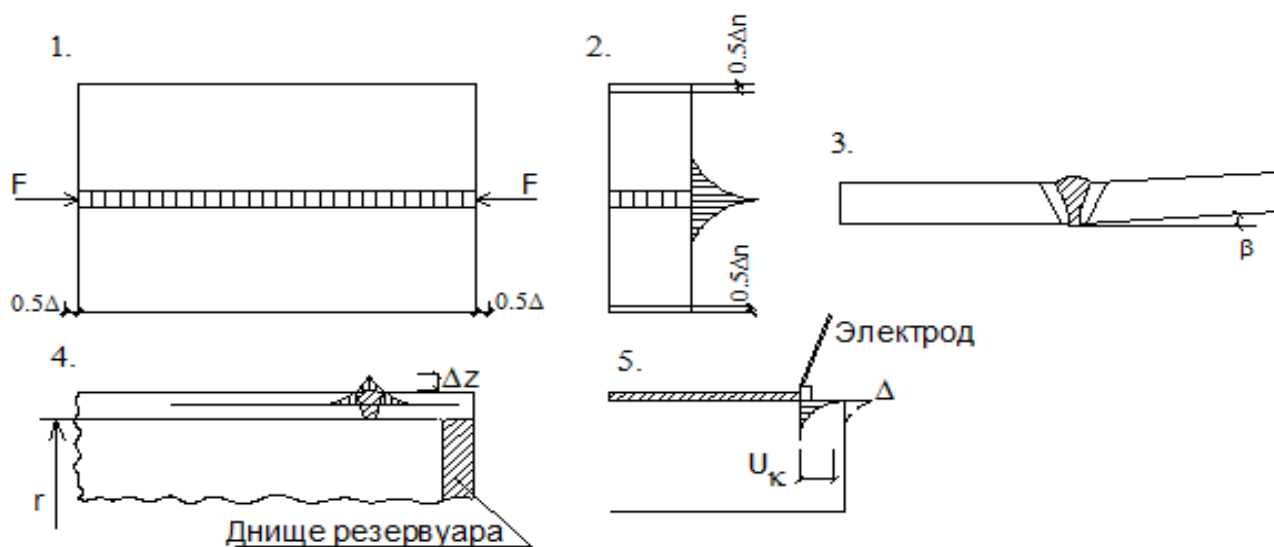


Рисунок 5.1 – Виды сварочных деформаций

Деформации и перемещения в зоне сварного соединения классифицируются следующим образом (рисунок 5.1):

1. Продольные остаточные пластические деформации вдоль сварного шва, создающие условную усадочную силу (усадка составляет от 0,05 до 0,3 мм на 1 погонный метр шва при толщине металла от 5 до 16 мм).

2. Равномерные по толщине поперечные остаточные пластические деформации, дающие поперечную усадку (для металла толщиной 6...8 мм поперечные перемещения при ручной, автоматической и полуавтоматической сварке практически одинаковы и составляют около 1 мм на один стык, для металла толщиной 12...20 мм перемещения при автоматической сварке увеличиваются незначительно, а при ручной — возрастают до 2...3 мм на один стык).

3. Неравномерные по толщине пластические деформации, образующие угловые перемещения (при сварке стыковых соединений с V-образной разделкой кромок угловые деформации могут достигать 3° при толщине металла 6...12 мм и 7° при толщине металла 13...20 мм).

4. Перемещения в зоне шва в направлении перпендикуляра к поверхности свариваемых листов.

5. Сдвиговые деформации, которые образуют в сварном соединении смещения вдоль шва.

## 5.2 Методы уменьшения деформаций и перемещений от сварки

а) на стадии проектирования:

- проектируют минимальные объёмы наплавляемого металла;
- используют способы сварки с минимальным тепловложением (многопроходная сварка вместо однопроходной);
- конструкцию проектируют с поперечным сечением и швами так, чтобы моменты от усадочных сил были уравновешены;

б) на стадии разработки технологии:

- используют приспособления для сборки и закрепления свариваемых элементов (если ширина зоны максимального разогрева меньше 0,15 общей ширины элемента, то при сварке в закрепленном состоянии деформации будут меньше, чем при сварке в свободном состоянии; при зоне максимального нагрева более 0,15 общей ширины элемента деформации закрепленных элементов будут больше, чем при сварке в незакрепленном состоянии);
- назначают размеры заготовок с учётом усадки от сварки;
- создают перемещения в заготовках, противоположные перемещениям при сварке;
- применяют искусственное охлаждение в зоне сварки с целью уменьшения зоны пластических деформаций;
- создают с помощью специальных установок напряжения растяжения для уменьшения усадочной силы;
- в) осуществляют правку сваренных элементов:
  - используют механическую правку, создавая пластические деформации удлинения: гибку, растяжение, проковку, вибрацию, прокатку, статическое осаживание металла по толщине под прессом;
  - применяют термические способы, основанные на создании пластических деформаций необходимого знака: местные нагревы вне зон пластических деформаций от сварки, создавая деформации укорочения, общий нагрев деталей при отпуске с закреплением элементов, создавая выпрямление в печи.

### 5.3 Определение общих деформаций в сварном тавровом элементе

После сварки продольного поясного шва или швов в тавровом элементе возникает условная усадочная сила  $F$ , которая создает его укорочение  $\Delta$ . Усадочная сила приложена в центре тяжести сечения наплавленного металла. Так как усадочная сила приложена с эксцентриситетом относительно центра тяжести сечения тавра, то возникает изгибающий момент  $M$ , который изгибает тавровую балку (рисунок 5.2).

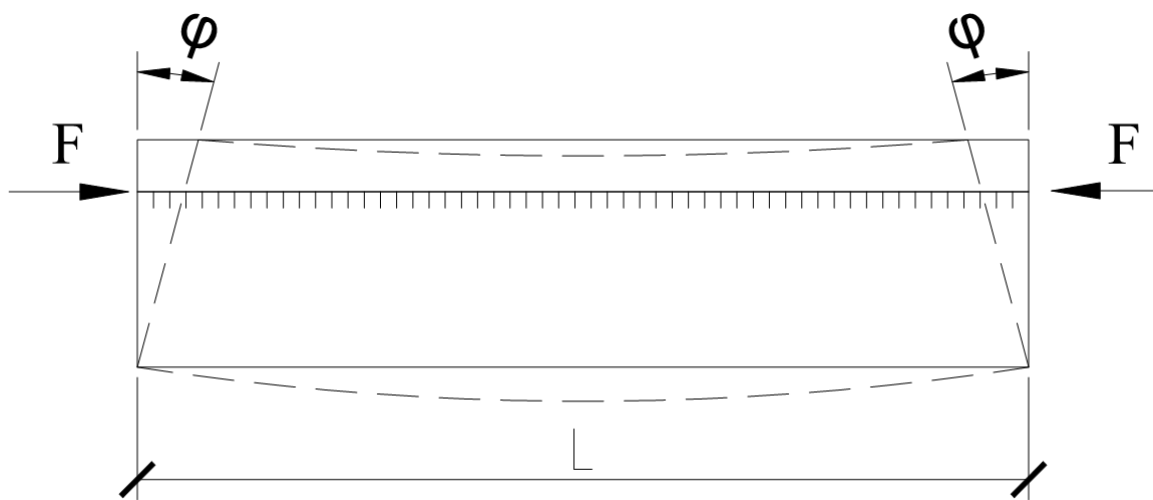


Рисунок 5.2 – Тавровый элемент

Основные обозначения и формулы:

$L$  – длина тавровой балки;  $b_f$  – ширина полки;  $t_f$  – толщина полки;  $h_{ef}$  – высота стенки тавра;  $k_f$  – высота катета сварного шва;  $t_w$  – толщина стенки тавра;  $A_w$  – площадь наплавленного металла шва;  $F_1$  – усадочная сила при однопроходной сварке одного поясного шва;  $A$  – площадь сечения тавра;  $e$  – эксцентриситет приложения силы;  $F_2$  – усадочная сила при однопроходной сварке двух поясных швов;  $q$  – тепловая мощность дуги;  $q_n$  – погонная энергия сварки;  $\eta$  – КПД процесса нагрева;  $I$  – ток сварки (А);  $U_d$  – напряжение дуги;

$V$  – скорость сварки;  $B = 170$  – коэффициент для определения погонной энергии для сварки сталей.

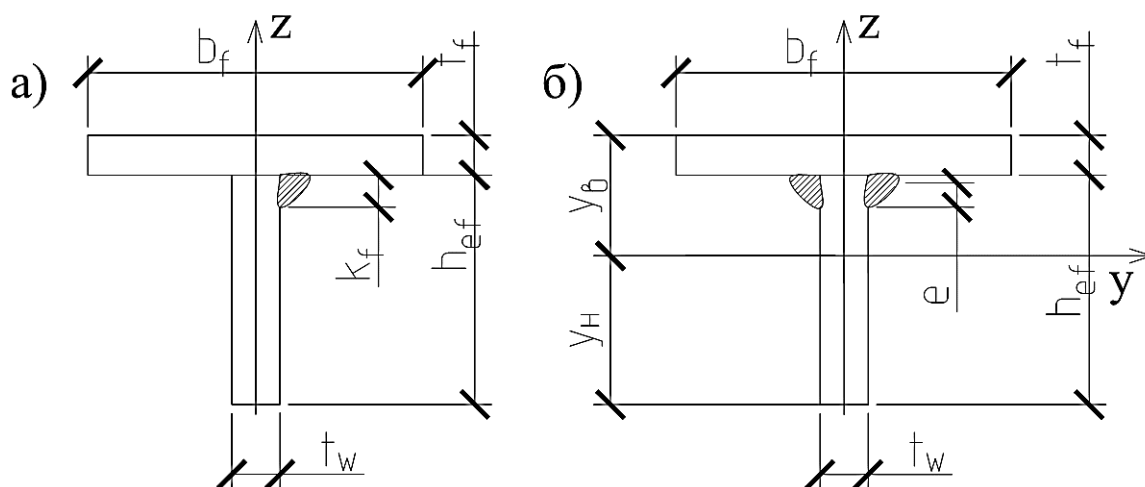


Рисунок 5.3 – Поперечные сечения тавровых балок

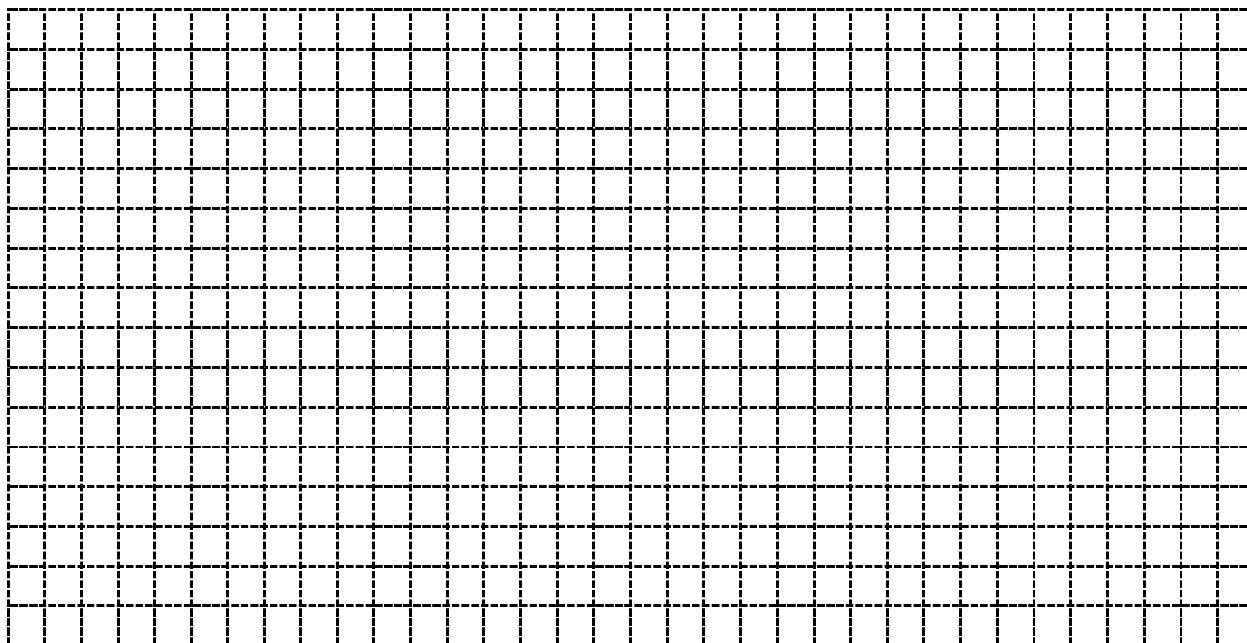
Таблица 5.1 – Значения коэффициента  $Q_v$

| Виды сварки                                                         | Сварочные материалы              | $Q_v$ ,<br>Дж/мм <sup>3</sup> |
|---------------------------------------------------------------------|----------------------------------|-------------------------------|
| Ручная электродуговая по ГОСТ 5264-80 [21]                          | Электрод УОНИИ 13/45             | 65                            |
|                                                                     | Электрод 48Н-1                   | 46                            |
| Дуговая в CO <sub>2</sub> по ГОСТ 14771-76 [22]                     | Проволока Св-08ГС                | 38                            |
| Автоматическая и полуавтоматическая под флюсом по ГОСТ 8713-79 [23] | Проволока Св-08А;<br>Флюс ОСЦ-45 | 65                            |

#### Порядок расчета

|                                                                                                                                                                         |  |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|
| Момент инерции тавра<br>$I = \frac{h_{ef}^3 \cdot t_w}{12} + (y_c - 0,5 \cdot h_{ef})^2 \cdot h_{ef} \cdot t_w + (0,5 \cdot t_f + h_{ef} - y_c)^2 \cdot b_f \cdot t_f;$ |  |
| Положение центра тяжести тавра<br>$y_c = \frac{b_f \cdot t_f \cdot (h_{ef} + 0,5 \cdot t_f) + 0,5 \cdot h_{ef}^2 \cdot t_w}{A}$                                         |  |
| Эксцентриситет приложения усадочной силы $e = h_{ef} - y_c - 0,4 \cdot k_f$                                                                                             |  |
| Погонная энергия сварки<br>$q_n = Q_v \cdot A_w \cdot q_n = \frac{q}{V}$                                                                                                |  |
| Тепловая мощность дуги<br>$q = \eta \cdot I \cdot U_d$                                                                                                                  |  |
| Продольное укорочение балки<br>$\Delta = \frac{F \cdot l}{E \cdot A}$                                                                                                   |  |

|                                                                                 |  |
|---------------------------------------------------------------------------------|--|
| Прогиб балки<br>$f = \frac{F \cdot e \cdot l^2}{8 \cdot E \cdot I}$             |  |
| Угловой поворот концов балки<br>$\varphi = \frac{F \cdot e \cdot l}{E \cdot I}$ |  |
| Изгибающий момент в тавре<br>$M = F \cdot e$                                    |  |



**Выводы по работе:**

## Список использованных источников

1. Сталь. Определение и классификация по химическому составу и классам качества : ГОСТ Р 54384-2011 (ЕН 10020:2000). – Введ. 01.03.2012. – М. : Стандартиформ, 2012. – 11 с.
2. Сталь углеродистая обыкновенного качества : ГОСТ 380-2005. – Введ. 01.07.2008. – М. : Стандартиформ, 2009. – 13 с.
3. Металлопродукция из нелегированных конструкционных качественных и специальных сталей : ГОСТ 1050-2013. – Введ. 01.01.2015. – М. : Стандартиформ, 2014. – 36 с.
4. Прокат сортовой и фасонный из стали углеродистой обыкновенного качества. Общие технические условия : ГОСТ 535-2005. – Введ. 01.07.2008. – М. : Стандартиформ, 2008. – 16 с.
5. Прокат повышенной прочности. Общие технические условия : ГОСТ 19281-2014. – Введ. 01.01.2015. – М. : Стандартиформ, 2016. – 50 с.
6. Линейки измерительные металлические. Технические условия : ГОСТ 427-75. – Введ. 01.01.1977. – М. : Стандартиформ, 2007. – 7 с.
7. Сталь. Эталоны микроструктуры : ГОСТ 8233-56. – Введ. 01.07.1957. – М. : ИПК Издательство стандартов, 2004. – 12 с.
8. Металлы. Метод измерения твердости по Бринеллю : ГОСТ 9012-59. – Введ. 01.01.1960. – М. : Стандартиформ, 2007. – 40 с.
9. Металлы. Метод измерения твердости по Роквеллу : ГОСТ 9013-59. – Введ. 01.01.1960. – М. : Издательство стандартов, 1991. – 13 с.
10. Металлы и сплавы. Метод измерения твердости по Виккерсу : ГОСТ 2999-75. – Введ. 01.07.1976. – М. : Издательство стандартов, 1987. – 31 с.
11. Металлы и сплавы. Измерение твердости методом упругого отскока бойка (по Шору) : ГОСТ 23273-78. – Введ. 01.01.1980. – М. : Издательство стандартов, 1985. – 4 с.
12. Конструкции стальные строительные. Общие технические условия : ГОСТ 23118-2019. – Введ. 01.01.2021. – М. : Стандартиформ, 2020. – 40 с.
13. Стальные строительные конструкции. Правила изготовления : ТКП 45-5.04-121-2009 (02250). – Введ. 01.01.2010. – Минск : М-во архит. и строит. Республики Беларусь, 2009. – 39 с.
14. Соединения сварные. Метод контроля внешним осмотром и измерениями. Общие требования : СТБ 1133-98. – Введ. 01.07.1999. – Минск : Госстандарт, 1998. – 15 с.
15. Возведение стальных и алюминиевых конструкций. Часть 2. Технические требования к стальным конструкциям : СТБ EN 1090-2-2013. – Введ. 01.03.2014. – Минск : Госстандарт, 2013. – 205 с.
16. Штангенциркули. Технические условия : ГОСТ 166-89. – Введ. 01.01.1991. – М. : Издательство стандартов, 2003. – 11 с.
17. Сварка. Сварные соединения из стали, никеля, титана и их сплавов, полученные сваркой плавлением (исключая лучевые способы сварки). Уровни качества : ГОСТ Р ИСО 5817-2021. – Введ. 09.01.2021. – М. : Стандартиформ, 2021. – 32 с.
18. Сварка и родственные процессы. Классификация дефектов геометрии и сплошности в металлических материалах. Часть 1. Сварка плавлением : ГОСТ Р ИСО 6520-1-2012. – Введ. 01.01.2014. – М. : Стандартиформ, 2014. – 36 с.
19. Стальные конструкции : СП 5.04.01-2021. – Введ. 01.10.2021. – Минск : М-во архит. и строит. Республики Беларусь, 2021. – 153 с.
20. Прокат для строительных стальных конструкций. Общие технические условия : ГОСТ 27772-2021. – Введ. 08.01.2022. – М. : Российский институт стандартизации, 2021. – 36 с.
21. Ручная дуговая сварка. Соединения сварные. Основные типы, конструктивные элементы и размеры : ГОСТ 5264-80. – Введ. 01.07.1981. – М. : Стандартиформ, 2010. – 35 с.
22. Дуговая сварка в защитном газе. Соединения сварные. Основные типы, конструктивные элементы и размеры : ГОСТ 14771-76. – Введ. 07.01.1977. – М. : Стандартиформ, 2007. – 43 с.
23. Сварка под флюсом. Соединения сварные. Основные типы, конструктивные элементы и размеры : ГОСТ 8713-79. – Введ. 01.01.1981. – М. : Стандартиформ, 2005. – 39 с.
24. Еврокод 3. Проектирование стальных конструкций. Часть 1-1. Общие правила и правила для зданий : ТКП EN 1993-1-1-2009\* (02250). – Введ. 01.01.2010. – Минск : М-во архит. и строит. Республики Беларусь, 2021. – 184 с.
25. Металлические конструкции / А. Б. Шурин [и др.] ; под ред. А. Б. Шурина. – Брест : Издательство БрГТУ, 2020. – 177 с.

Учебное издание

**Составители:**

*Шурин Андрей Брониславович*  
*Маркечко Екатерина Владимировна*

*Мухин Анатолий Викторович*

# **Методические указания и журнал испытаний**

к проведению лабораторных работ по дисциплине  
«Металловедение и сварка»  
для студентов дневной формы обучения по специальности  
1-70 02 01 «Промышленное и гражданское строительство»

2-ое издание, дополненное и переработанное

Ответственный за выпуск: Шурин А. Б.

Редактор: Митлошук М. А.

Компьютерная вёрстка: Шурин А. Б.

Корректор: Дударук С. А.

---

Подписано в печать 17.02.2023 г. Формат 60x84 <sup>1</sup>/<sub>8</sub>. Бумага «Performer».  
Гарнитура «Times New Roman». Усл. печ. л. 3,72. Уч. изд. л. 4,0. Заказ № 120. Тираж 19 экз.  
Отпечатано на ризографе учреждения образования «Брестский государственный  
технический университет». 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.  
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,  
распространителя печатных изданий № 1/235 от 24.03.2014 г.