

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ**

**УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ**

**«БРЕСТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

**КАФЕДРА СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ**

# **Методические указания и журнал испытаний**

**к проведению лабораторных работ по дисциплине  
«Основы проектирования, диагностики и обследования  
металлических конструкций»**

**для студентов дневной формы обучения по специальности  
1-70 02 02 «Экспертиза и управление недвижимостью»**

Выполнил студент группы Н-

Проверил преподаватель



Брест 2022

УДК 624.014 (07)

Методические указания предназначены для выполнения лабораторных занятий по дисциплине «Основы проектирования, диагностики и обследования металлических конструкций» для студентов специальности 1-70 02 02 «Экспертиза и управление недвижимостью» дневной формы обучения I степени высшего образования. Тематика лабораторных работ соответствует учебной программе дисциплины «Металлические конструкции».

Составитель: Шурин А.Б., к.т.н., доцент, зав. кафедрой строительных конструкций

Рецензенты: Заместитель директора РУП «Институт БелНИИС»–Научно-технический центр, к.т.н. В. А. Лебедь  
Заведующий кафедрой технологии бетона и строительных материалов, д.т.н., профессор В.В. Тур

# 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)

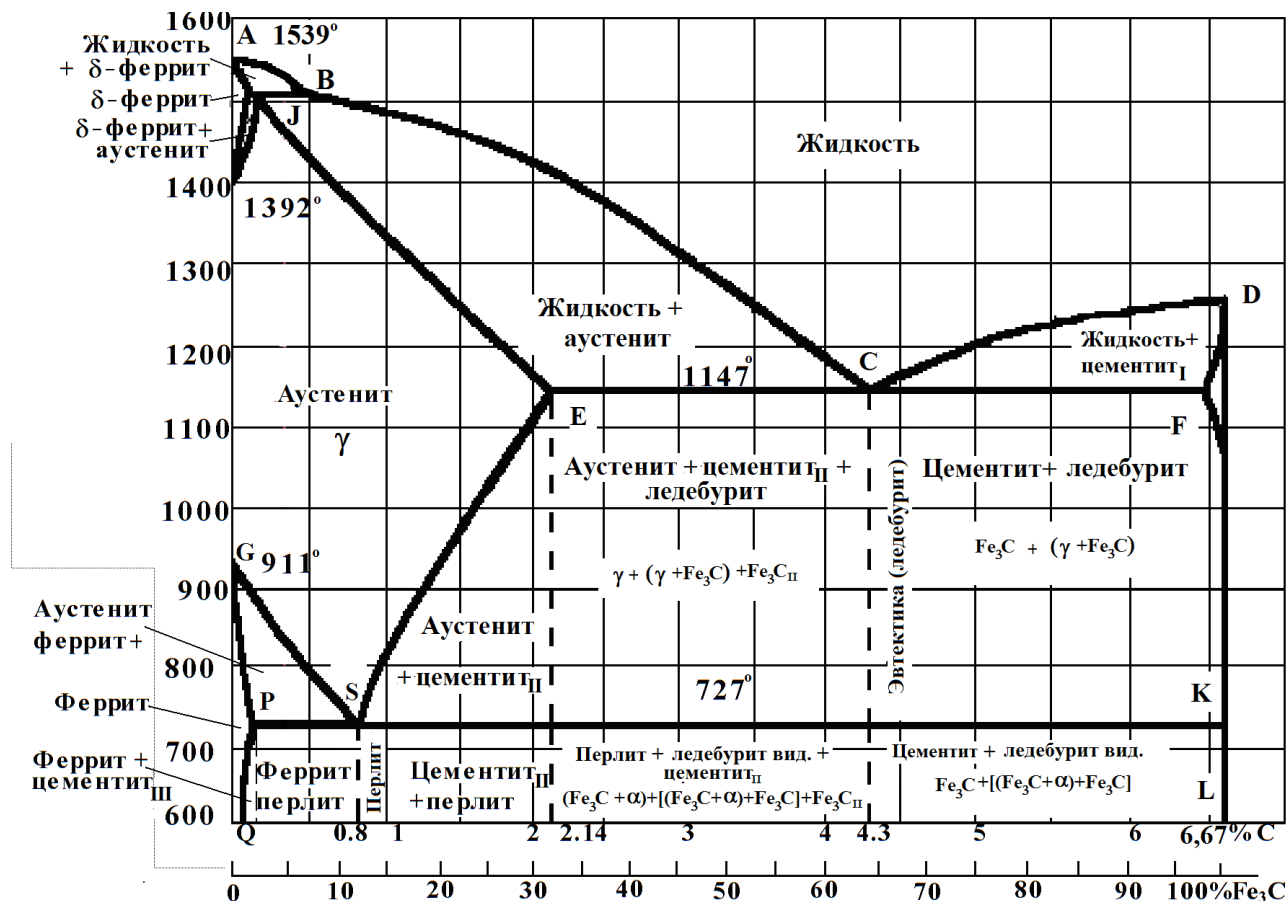


Рисунок 1.1 – Диаграмма состояния железо-углерод Fe–C (железо-цементит Fe–Fe<sub>3</sub>C)

### 1.1 Стали

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

Сталь (ЕН 10020:2000) – 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, эксплуатирующихся 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 РФ, Казахстана и РБ осуществляли поставки стали обыкновенного качества по ГОСТ 380 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. Отличаются от сталей по ГОСТ 380 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 0.8кп, 0.5кп 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 1.7), 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, $\sigma_u$												
Предел текучести, $\sigma_y$												
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  $\sigma_y$ ), подразделяют на условные классы строительных сталей.

Таблица 1.2 – Соответствие классам сталей по ГОСТ 27772 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 ГОСТ 535	C375	12Г2С	–
C245	Ст3пс5, Ст3сп5	ГОСТ 380 ГОСТ 535	C375Д	12Г2СД	–
C255	Ст3Гпс, Ст3Гсп	ГОСТ 380	C390	14Г2АФ	ГОСТ 19281
C275	Ст3пс	ГОСТ 380	C390Д	14Г2АФД	ГОСТ 19281
C285	Ст3сп, Ст3Гпс Ст3Гсп	ГОСТ 380	C390К	14Г2АФДпс	ГОСТ 19281
C345	12Г2С 09Г2С	– ГОСТ 19281	C440	16Г2АФ	ГОСТ 19281
C345Д	12Г2СД 09Г2СД	– –	C440Д	16Г2АФД	ГОСТ 19281
C345К	10ХНДП	ГОСТ 19281	C590	12Г2СМФ	–
			C590К	12ГН2МФАЮ	–
* – буквенные обозначения в классах: С – сталь строительная; К и Д – варианты химического состава					

Расшифруйте следующие обозначения сталей, выпускаемых по европейским стандартам:

S 275N/NL EN 10025-3:2004 – \_\_\_\_\_

S 235W EN 10025-5:2004 – \_\_\_\_\_

S 460Q/QL/QL1 EN 10025-6:2004 – \_

## 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 технического 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 АМг с добавлением цифры, указывающей примерное содержание магния

в процентах (АМг2, АМг3 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.



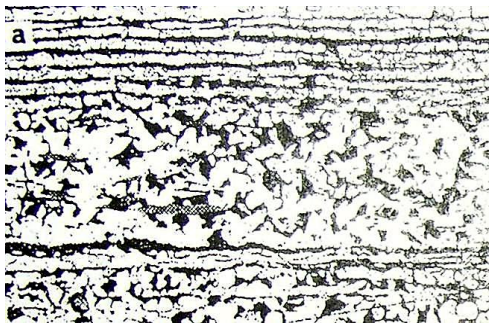


Рисунок 1.2 – Структура кипящей стали с ликвационной полосой (а×100)

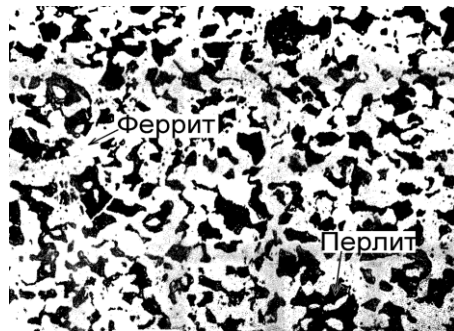


Рисунок 1.3 – Структура стали (0,3 %С) (×200)



Рисунок 1.4 – Серый чугун на ферритно-перлитной основе

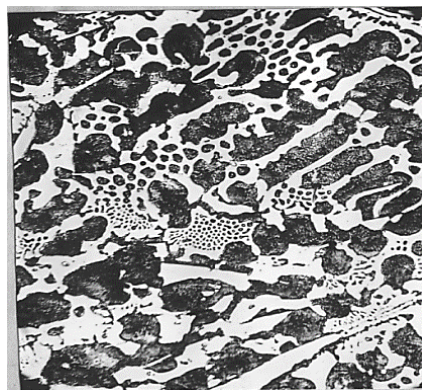


Рисунок 1.5 – Доэвтектический (ледебурит, перлит, вторичный цементит) белый чугун

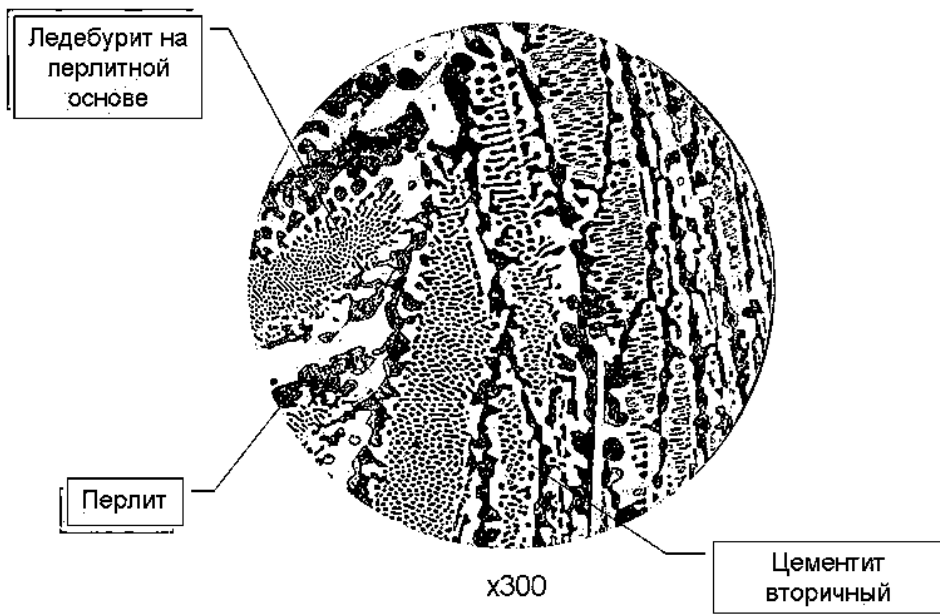


Рисунок 1.6 – Микроструктура эвтектического белого чугуна (4,25С)

**Выводы по работе:**



## Лабораторная работа № 2

### Работа и расчет элементов металлических конструкций с учётом концентраций напряжений

**Цель работы:** Ознакомиться с влиянием концентраторов напряжений на прочность, выносливость и «хладостойкость» металлических конструкций.

#### 2.1 Теоретические сведения

**Под концентрацией напряжений** подразумевается явление возникновения местных напряжений в зонах резкого увеличения сечения элементов, вблизи отверстий, выточек, надрезов, в местах расположения дефектов сварки, таких как непровар, подрезы и т.д. Причина, вызвавшая концентрацию напряжений, называется **концентратором**.

Степень концентрации напряжений определяется при упругом деформировании теоретическим коэффициентом концентрации напряжений, равным отношению максимальных напряжений, вызванных концентрацией к номинальным напряжениям:

$$\alpha_{\sigma} = \frac{\sigma_{max}}{\sigma}; \alpha_{\tau} = \frac{\tau_{max}}{\tau}.$$

Коэффициент концентрации напряжений зависит от радиуса кривизны ( $r$ ) подреза. Чем меньше радиус подреза, тем выше коэффициент. Так у крупных отверстий  $\alpha = 1,5 \dots 3,0$ , у острых может достигать  $6 \dots 9$ . Теоретически при  $r \rightarrow 0$  (надрез типа трещины) и при идеально упругом материале коэффициент концентраций стремится к бесконечности.

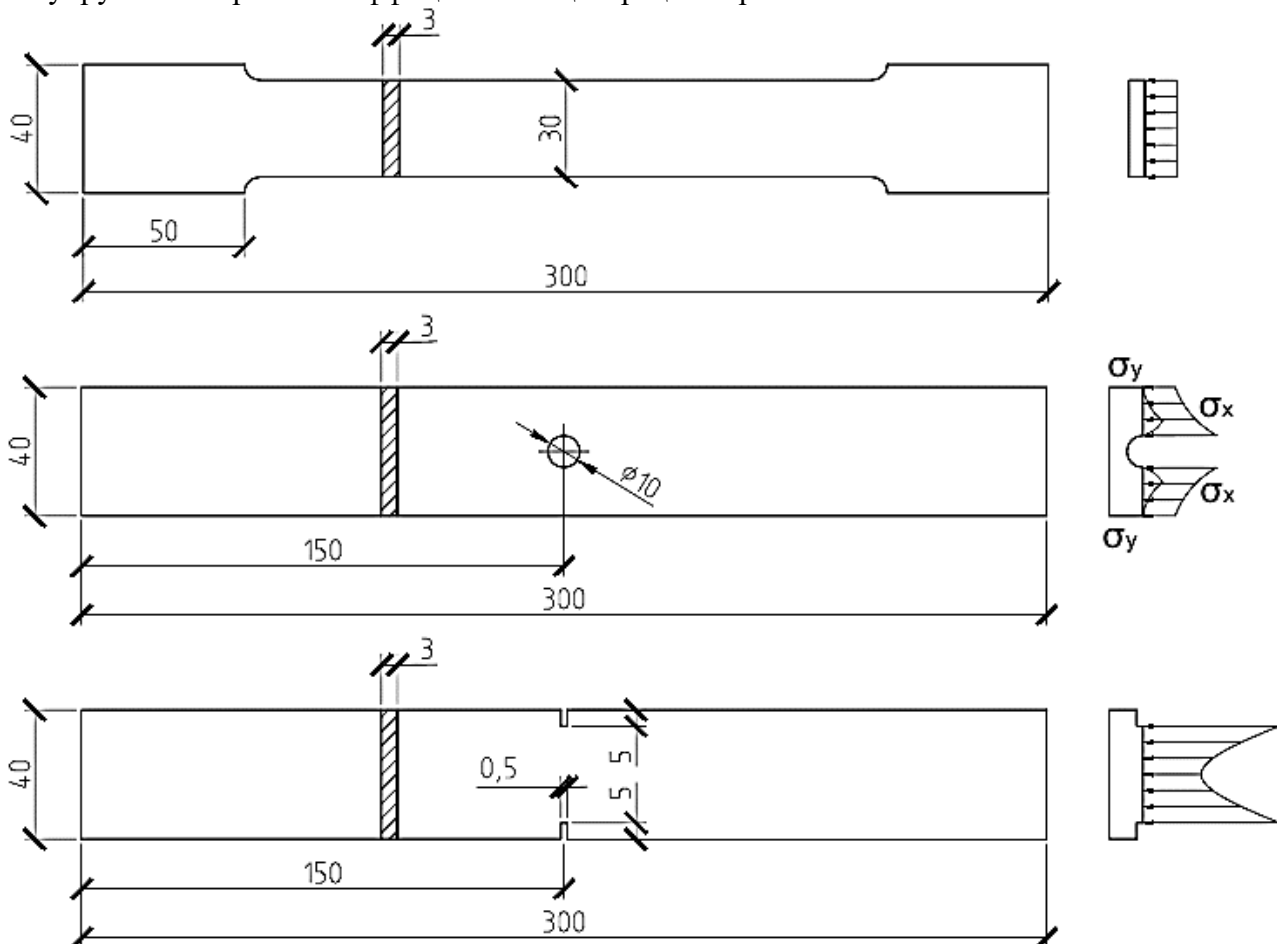


Рисунок 2.1 – Образцы для испытаний на растяжение

В лабораторной работе исследуются три типа образцов (рисунок 2.1). Образец №1 не имеет концентратора, образец №2 имеет круглое отверстие диаметром 10 мм, образец №3 – два узких надреза глубиной по 5 мм. Площадь нетто всех образцов одинакова и равна  $A_{net} = 3 \cdot 0,3 = 0,9 \text{ см}^2$ .

При испытаниях образца №1 без концентратора получаем классическую диаграмму растяжения малоуглеродистой стали. Образец разрывается после больших пластических деформаций, распространяющихся почти по всей рабочей части образца и после образования шейки. Разрыв происходит в самом узком месте шейки по плоскостям, наклоненным под углом  $45^\circ$  к плоскости образца (рисунок 2.2).

При растяжении образца №2 получаем диаграмму, значительно отличающуюся от предыдущей. Разрывное усилие  $N_2$  увеличилось, и во много раз уменьшилось удлинение образца в момент разрыва  $\Delta l_2$ . Объясняется это тем, что пластические деформации развиваются не по всей длине, а только в зоне отверстия. Разрушение происходит не только сдвигом, но и отрывом в зонах уменьшения пластических деформаций (рисунок 2.2).

При растяжении образца №3 зоны пластических деформаций еще более локализованы у концентратора напряжений, поэтому пластичность уменьшается, а разрывное усилие увеличивается. Все меньшая часть сечения разрушается за счет сдвигов и больше за счет отрыва.

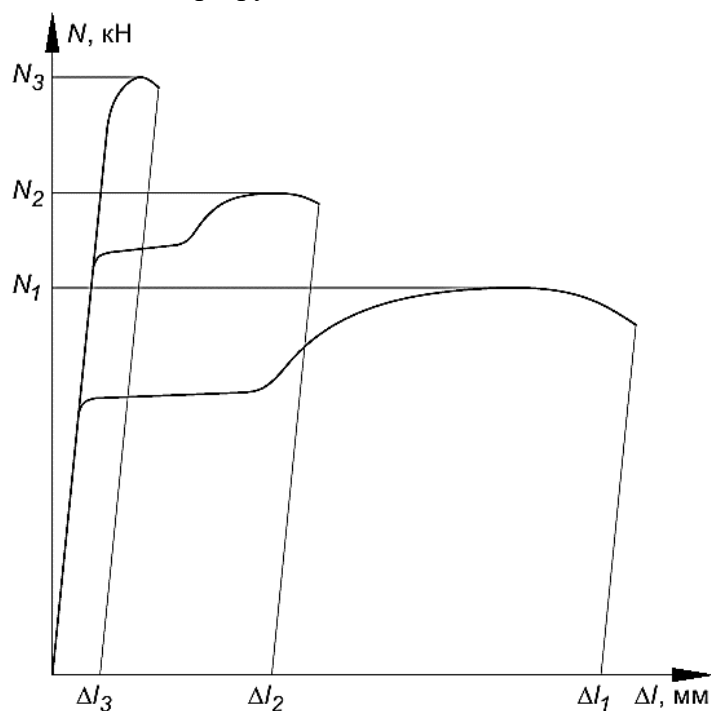


Рисунок 2.2 – Диаграммы деформирования образцов

Для оценки степени влияния концентраторов определяет эффективность концентратора, равную отношению усилия разрыва образца с коэффициентом разрывающего усилия образца без концентратора. Эти коэффициенты отличаются от теоретических, приведенных ранее, так как отражают не только упругую, но и пластическую работу материала образцов.

Для образцов №2 и №3 эффективные коэффициенты можно получить как:

$$K_2 = \frac{N_{u2}}{N_{u1}}; K_3 = \frac{N_{u3}}{N_{u1}}.$$

Аналогично степень пластичности образцов можно оценить как отношение удлине-

ний:  $\beta_2 = \frac{\Delta l_{u2}}{\Delta l_{u1}}; \beta_3 = \frac{\Delta l_{u3}}{\Delta l_{u1}}.$

Из рассмотренного выше можно сделать **выводы**:

- элементы конструкции из малоуглеродистых сталей при наличии концентраторов могут разрушаться хрупко, то есть при увеличении нагрузок, но при малых удлинениях;
- в зоне концентраторов из линейного напряженного состояние переходит в плоское, при котором снижается величина наибольших касательных напряжений, являющихся причиной пластических сдвигов, а разрушение происходит частично от сдвигов, а частично от отрыва при малых деформациях;

– величина эффективного коэффициента концентрации напряжений и снижение пластических деформаций тем более, чем острее концентратор.

## 2.2 Испытания образцов на растяжение статической нагрузкой

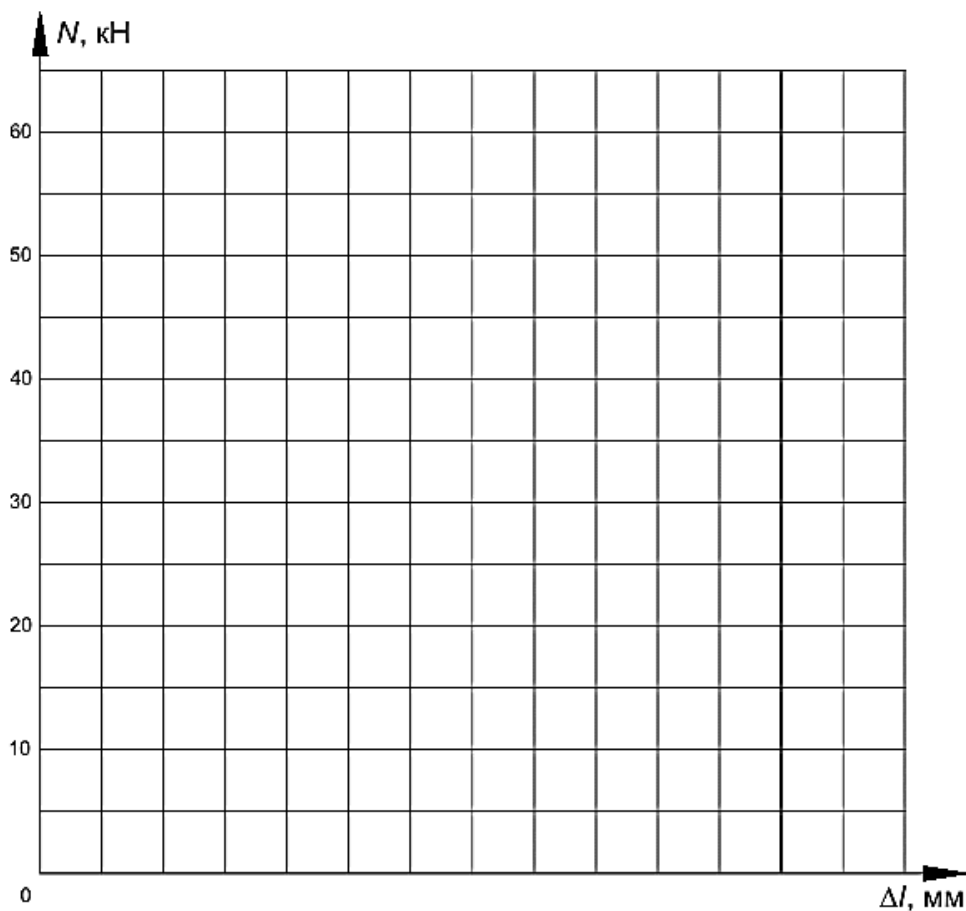


Рисунок 2.3 – Диаграммы деформирования образцов в осях  $N - \Delta l$

Таблица 2.1 – Результаты испытаний образцов на растяжение статической нагрузкой

№ образца	$N_u$ , кН	$\Delta l_u$ , мм	$N_y$ , кН	$\Delta l_y$ , мм	Эффективный коэффициент $K = N_{ui} / N_{u1}$	Степень пластичности $\beta = \Delta l_{ui} / \Delta l_{u1}$
№1						
№2						
№3						

Таблица 2.2 – Напряжения в образцах

№ образца	Расчетное, кН/см <sup>2</sup>		Предельное, кН/см <sup>2</sup>	
	$N_y / A_{net}$	$N_u / A_{net}$	$f_y / \gamma_{M0}$	$f_u / \gamma_{M0}$
№1				
№2				
№3				

### 2.3 Работа элементов с концентраторами при многократных нагрузках

Многократное повторное нагружение приводит к разрушению при напряжениях меньших, чем предел текучести (рисунок 2.4). Это называется *усталостью материала*, а разрушение *усталостным*. Способность материала сопротивляться усталостному разрушению называется *выносливостью*.

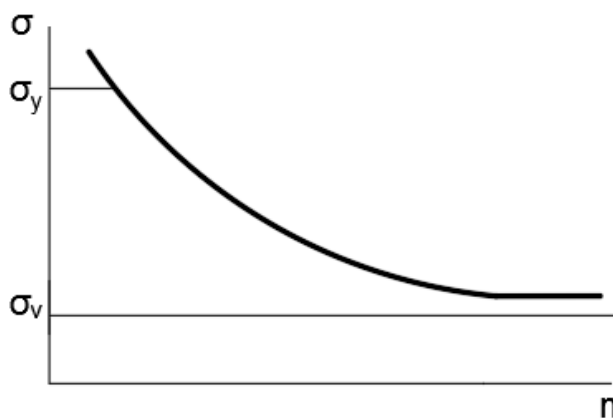


Рисунок 2.4 – Зависимость разрушающего напряжения от числа циклов

Усталостное разрушение происходит вследствие накопления числа дислокаций при каждом нагружении и концентрации их около стыков зерен с последующим скоплением в большие группы, что способствует разрыхлению металла в этом месте и, наконец, образованию трещины, которая, развиваясь, приводит к разрыву. При каждом нагружении деформации в поврежденном месте нарастают. Линии разгрузки не совпадают с линиями нагрузки, образуя петли гистерезиса.

Процесс усталостного разрушения происходит **в три стадии**:

- циклическое нагружение до образования трещины;
- рост трещины;
- хрупкое разрушение.

Ни в одном другом случае характеристики сопротивления разрушению не зависят в такой степени от такого многообразия факторов, как в случае разрушения от усталости при многоцикловом нагружении. Можно выделить три группы факторов, оказывающих влияние на характеристики сопротивления усталостному разрушению.

**К первой группе** относятся факторы, связанные со структурой материала и технологией изготовления образцов деталей.

**Ко второй группе** относятся конструктивные факторы, т.е. факторы, связанные с геометрией и размерами образца и детали. Наиболее существенным в этом случае является эффект масштаба и концентрации напряжений.

**К третьей группе** относятся эксплуатационные факторы, т.е. факторы, проявляющиеся в процессе эксплуатации тех или иных конструкций. К ним могут быть отнесены асимметрия цикла нагружения, вид напряженного состояния, режимы и частота нагружения, температура, коррозионная среда и другие.

### 2.4 Работа элементов с концентраторами при отрицательных температурах

Механические свойства стали при нагревании ее до температуры  $t = 200...250\text{ }^{\circ}\text{C}$  не меняются (рисунок 2.5).

При температуре  $250...300\text{ }^{\circ}\text{C}$  прочность стали несколько повышается, пластичность снижается. Сталь в изломе имеет крупнозернистое строение и становится более хрупкой (*сильная хрупкость*).

Нагрев выше  $400\text{ }^{\circ}\text{C}$  приводит к резкому падению предела текучести и временного сопротивления, а при  $t = 600...650\text{ }^{\circ}\text{C}$  наступает температурная пластичность и сталь теряет свою несущую способность.

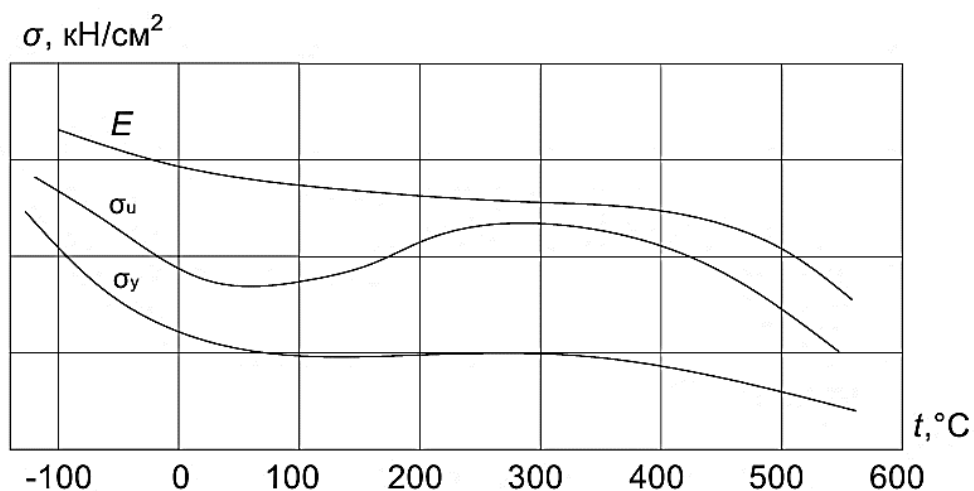


Рисунок 2.5 – Механические свойства низкоуглеродистой стали при изменении температуры

При отрицательных температурах прочность стали возрастает, ударная вязкость падает и сталь становится более хрупкой, повышается возможность хрупкого разрушения элементов МК при статических, и особенно при ударных и циклических нагрузках. На сопротивление хрупким разрушениям влияет целый ряд факторов:

- наличие в сталях фосфора, водорода и других загрязняющих примесей;
- структура стали, толщина проката;
- наличие концентраторов напряжений.

## 2.5 Выводы по работе

## Лабораторная работа № 3

### Работа и расчет сварного соединения при статическом нагружении

**Цель работы:** ознакомиться с видами сварных соединений, их напряженным состоянием и расчетом, влиянием конструктивных факторов и сварочных материалов на характер разрушения сварного соединения.

#### 3.1 Теоретическая часть

**Виды сварных соединений и швов.** Сварным соединением называют неразъемное соединение, выполненное сваркой. Вид сварного соединения определяется взаимным расположением свариваемых элементов. Различают *стыковые, угловые, тавровые и нахлесточные* соединения.

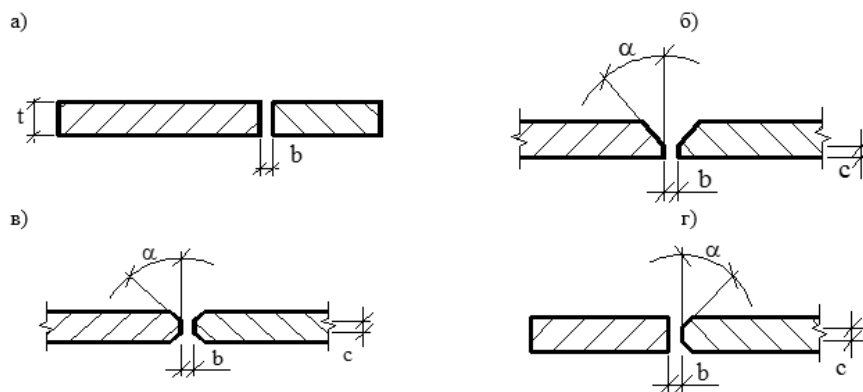
Когда односторонняя или двухсторонняя сварка не позволяет обеспечить полный провар, применяют разделку кромок, которая характеризуется:  $b$  - зазором,  $c$  - притуплением,  $\alpha$  - углом раскрытия стыка.

Участок сварного соединения, образовавшийся в результате кристаллизации металла сварочной ванны, называется **сварным швом**.

По конструктивному признаку швы разделяют на стыковые и угловые (валиковые).

**Типы сварных швов по ТКП EN 1993-1-8:** стыковые, угловые (сплошные и прерывистые), угловые круговые, пробочные с клинообразным зазором.

По положению в пространстве швы в момент их выполнения подразделяют: нижние, вертикальные, горизонтальные и потолочные.



а – без разделки; б – V-образная; в – X-образная; г – К-образная

Рисунок 3.1 – Форма подготовки кромок свариваемых элементов

Швы могут быть рабочими (передающими усилия) или связующими (конструктивными). По протяженности швы бывают сплошными и прерывистыми. По месту производства сварочных работ швы делят на заводские и монтажные.

#### 3.2 Основные положения по расчету сварных соединений

**ТКП EN 1993-1-8.** 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:

$$F_{w,Ed} \leq F_{w,Rd}, \quad (3.1)$$

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 3.2).

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



$$F_{w,Rd} = f_{vw,d} \cdot a, \quad (3.2)$$

где  $f_{vw,d}$  – расчетное сопротивление сдвигу сварного шва, рассчитывается по формуле 3.3;  
 $a$  – эффективная толщина сварного шва, таблица 3.5 [1].

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

$$f_{vw,d} = \frac{f_u / \sqrt{3}}{\beta_w \cdot \gamma_{M2}}, \quad (3.3)$$

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

$\beta_w$  – поправочный коэффициент для угловых сварных швов, таблица 3.6 [1].

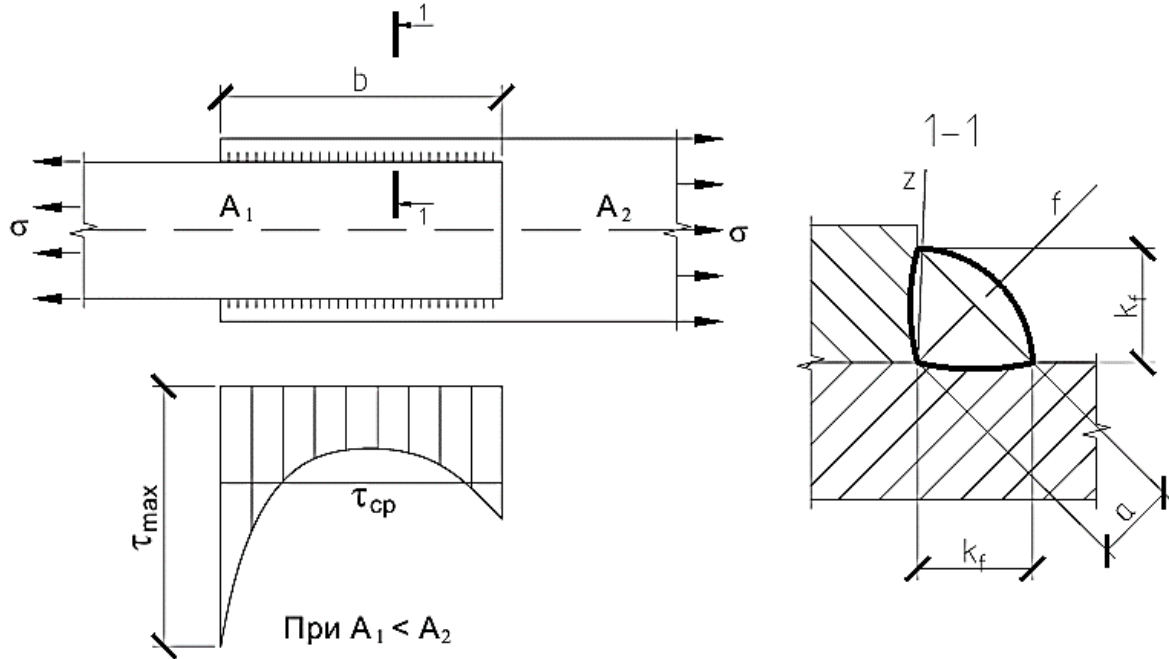


Рисунок 3.2 – Распределение напряжений в сварных соединениях

**СП 5.04.01-2021.** Наиболее нагруженные участки шва находятся в начале и в конце шва. На рисунке 3.2 показана эпюра распределения касательных напряжений  $\tau$  при  $A_1 < A_2$ . Если  $A_1 = A_2$ , то максимальные касательные напряжения в начале и в конце шва одинаковы. Значение коэффициента концентрации напряжений пропорционально длине шва. Поэтому нормы ограничивают расчетную длину флангового углового шва, которая должна быть не более  $l_w \leq 85 \cdot \beta_f \cdot k_f$ , за исключением швов, в которых усилие действует на всём протяжении шва, где  $k_f$  – катет шва;  $\beta_f$  – коэффициент, определяемый по т. 40 [2].

Согласно [2] расчёт соединения с угловыми швами следует вести по двум сечениям (рисунок 3.2): по металлу шва (сечение f-f) и границе сплавления (сечение z-z).

При  $\frac{\beta_f \cdot f_{wf}}{\beta_z \cdot f_{wz}} \leq 1$  расчет выполняют по металлу шва

$$\frac{N_{Ed}}{\beta_f \cdot k_f \cdot l_w \cdot f_{wf} \cdot \gamma_c} \leq 1. \quad (3.4)$$

При  $\frac{\beta_f \cdot f_{wf}}{\beta_z \cdot f_{wz}} > 1$  расчет выполняют по границе сплавления

$$\frac{N_{Ed}}{\beta_z \cdot k_f \cdot l_w \cdot f_{wz} \cdot \gamma_c} \leq 1, \quad (3.5)$$

где  $\beta_f$  и  $\beta_z$  – коэффициенты, учитывающие глубину проплавления шва и границы сплавления, т. 40 [2];

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

$f_{wf}$  – расчетное значение прочности угловых швов на срез (условный) по металлу шва (т. Г.2 [2]);

$f_{wz}$  – расчетное значение прочности угловых швов на срез (условный) по металлу границы сплавления,  $f_{wz} = 0,45 \cdot f_{uk}$ ;

$f_{uk}$  – характеристическое (нормативное) значение предела прочности стали, т. 51 [2].

Катеты сварных швов назначаются равными 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 12, 14, 16 мм и они должны удовлетворять условию  $k_{f,\min} \leq k_f \leq 1,2 \cdot t_{\min}$ , где  $k_{f,\min}$  принимается по т. 39 [2];

$t_{\min}$  – наименьшая толщина соединяемых элементов.

Расчетная длина углового сварного шва должна быть не менее  $4k_f$  и не менее 40 мм.

В соединениях внахлестку ее размер должен быть не менее 5 толщин наиболее тонкого из свариваемых элементов.

Формулы (2.4) и (2.5) могут быть использованы для определения разрушающей нагрузки  $N_p$ , для чего в этих выражениях расчетные сопротивления  $f_{wf}$  и  $f_{wz}$  следует заменить временными сопротивлениями при сдвиге  $f_{wuk} / \sqrt{3}$  и  $f_{uk} / \sqrt{3}$  ( $f_{wuk}$  определяется по т. Г.2 [2]).

При определении несущей способности  $N$  и разрушающей нагрузки  $N_p$  следует рассмотреть и сечение по основному металлу, то есть

$$N = A_1 \cdot f_{yd}, \quad (3.6)$$

$$N_p = A_1 \cdot f_{ud}. \quad (3.7)$$

### 3.3 Испытание сварных образцов с фланговыми швами при статическом нагружении осевой силой

Схема сварных образцов для статических испытаний осевой силой представлены на рисунке 3.3. Образцы изготовлены из малоуглеродистой листовой стали класса С235 (ГОСТ 27772-88) толщиной 6 мм и отличаются величиной нахлестки  $b$ . Сварка ручная электродуговая по ГОСТ 5264-80 (таблица 3.1).

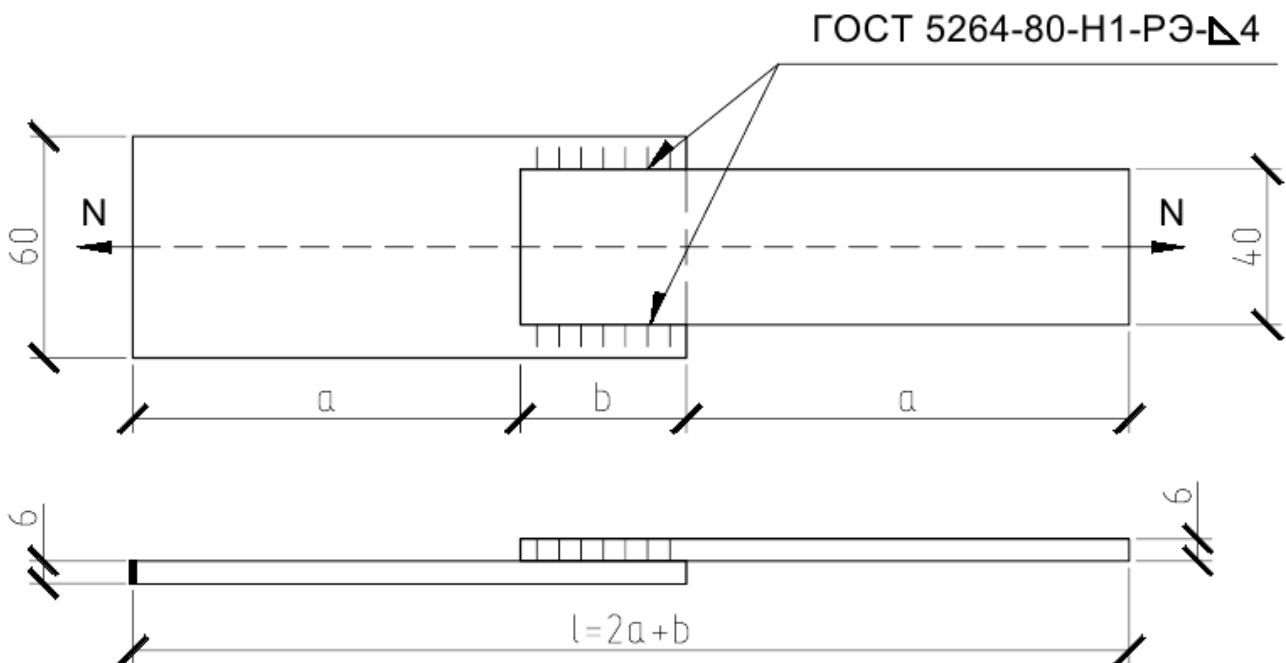


Рисунок 3.3 – Образцы для испытаний на осевое растяжение

Таблица 3.1 – Характеристики образцов для испытаний

№ образца	Размеры, мм		Тип электрода по ГОСТ 9467-75
	b	a	
1	120	90	Э42
2	50	160	Э42

Таблица 3.2 – Расчет по ТКП EN 1993-1-8

Расчетный параметр	Образец № 1	Образец № 2
Расчет несущей способности сварного соединения		
Катет шва $k_f =$		
Эффективная толщина шва $a = k_f \cdot \cos 45^\circ =$		
Геометрическая длина сварного шва $l = b =$		
Эффективная длина шва $l_{eff} = l - 2a =$		
Предел прочности $f_u =$		
Коэффициент $\beta_w =$		
$f_{vw,d} = f_u / (\sqrt{3} \cdot \beta_w \cdot \gamma_{M2})$		
Несущая способность на 1 см шва $F_{w,Rd} = f_{vw,d} \cdot a =$		
Несущая способность соединения $N_{w,Rd} = F_{w,Rd} \cdot 2 \cdot l_{eff} =$		
Расчет несущей способности основного металла		
Площадь сечения $A_1 =$		
Предел текучести $f_y =$		
$N_{Ed,y} = A_1 \cdot f_y =$		
$N_{Ed,u} = A_1 \cdot f_u =$		

Таблица 3.3 – Расчет по СП 5.04.01-2021

Расчетный параметр	Образец № 1	Образец № 2
Расчет несущей способности сварного соединения		
Катет шва $k_f =$		
Коэффициенты	$\beta_f =$	$\beta_z =$
Расчётная длина углового шва $l_w = l - 10 \text{ мм} = b - 10 \text{ мм}$		
Предел прочности $f_{uk} =$		
Расчетное значение прочности углового шва на срез (условный) по:		
– границе сплавления $f_{wz} = 0,45 \cdot f_{uk} =$		
– по металлу шва $f_{wf} =$		
Предел прочности металла шва $f_{wuk} =$		
Несущая способность по металлу шва $N = 2 \cdot f_{wf} \cdot \beta_f \cdot k_f \cdot l_w \cdot \gamma_c =$		

Окончание таблицы 3.3

Расчетный параметр	Образец № 1	Образец № 2
Разрушающая нагрузка по металлу шва $N_p = 2 \cdot (f_{wm} / \sqrt{3}) \cdot \beta_f \cdot k_f \cdot l_w \cdot \gamma_c =$		
Несущая способность по металлу границы сплавления $N = 2 \cdot f_{wz} \cdot \beta_z \cdot k_f \cdot l_w \cdot \gamma_c =$		
Разрушающая нагрузка по металлу границы сплавления $N_p = 2 \cdot (f_{uk} / \sqrt{3}) \cdot \beta_z \cdot k_f \cdot l_w \cdot \gamma_c =$		
Расчет несущей способности основного металла		
Площадь сечения $A_1 =$		
Расчетное сопротивление $f_{yd} =$		
$N_{Ed,y} = A_1 \cdot f_{yd} =$		
$N_{Ed,u} = A_1 \cdot f_{ud} =$		

Таблица 3.4 – Результаты испытаний и определения несущей способности

№ образцов	Размеры, мм		Разрушающая нагрузка, кН			Характер разрушения
			по испытаниям	по расчету		
	b	a		СП 5.04.01-2021	ТКП EN 1993-1-8	
1	120	90				
2	50	160				

**3.4 Выводы по работе**

## Лабораторная работа № 4

### Изучение работы болтовых соединений

**Цель работы:** исследование работы болтовых соединений на обычном и высокопрочном болтах; проверка несущей способности болтового соединения класса точности В и болтового соединения с высокопрочными болтами.

#### 4.1 Теоретическая часть

**Соединения, болты.** Соединение металлических конструкций, осуществляемое установкой металлических стержней в совмещенные отверстия, относится к классу монтажных соединений на болтах, заклёпках или их модификациях. Неразъёмность соединяемых элементов обеспечивается за счёт скрепления металлических элементов головками, имеющимися на концах стержней.

Если одна из головок формируется за счёт выступающего конца стержня, то данное соединение относится к заклепочному.

В соединениях металлических конструкций принимают болты 16...18 мм грубого класса точности – С, нормального класса точности – В, повышенного класса точности А.

Болты грубой точности ставят в отверстие в 2...3 мм больше диаметра стержня и принимают для нерасчётных монтажных соединений, то есть ставят конструктивно. В соединениях, воспринимающих расчетные усилия, ставят болты класса точности В, которые устанавливают в отверстие в 1...1,5 мм больше диаметра стержня, и болты класса точности А, которые ставят в отверстие на 0,25...0,3 мм больше диаметра стержня.

Соединение класса В и А является малодеформативными.

В стальных конструкциях используют болты классов: 4,6; 4,8; 5,6; 5,8; 6,6; 8,8; 10,9. Эти цифры выбиваются на головке болта. Первая цифра умножается на 10 – это предел прочности материала болта кН/см<sup>2</sup>. Вторая цифра – это отношение  $(\sigma_y/\sigma_u) \times 10$  в %. Произведение этих цифр – это предел текучести материала болта кН/см<sup>2</sup>.

Для крепления профилированного настила, панелей к несущим конструкциям зданий применяется самонарезающие болты из стали 30, стали 10 по ГОСТ 1050 по ГОСТ 34-13-018-77 в виде комплект БС6х20МН с металлической или неметаллической шайбой. Для этих же цели применяют самонарезающие винты по ГОСТ 26805-79.

Для соединения листовых конструкций между собой применяют заклепки ЗК трубчатые для односторонней клепки тонколистовых стропильных металлоконструкций по ГОСТ 26805-86.

Для соединения алюминиевых конструкций принимают болты из алюминия по ГОСТ 102.299, стальные болты всех видов, винты, заклепки из алюминия.

Для крепления колонн, рам к фундаментам применяют фундаментные болты по ГОСТ 24379 диаметром 12...140 мм, который изготавливается из стали ВстЗкп2 болты по ГОСТ 535 09Г2С2 по ГОСТ 19281, 10Г2С1 по ГОСТ 19281, или химические анкеры.

В монтажных соединениях с большими усилиями при динамических и вибрационных воздействиях применяют фрикционные соединения на высокопрочных болтах класса точности В, по ГОСТ 22353, ГОСТ 22356 диаметром 16...48 мм.

#### **Категории болтовых соединений в соответствии с ТКП EN1993-1-8:**

– соединения, работающие на сдвиг:

**категория А** – срезное;

**категория В** – фрикционное соединение в предельном состоянии эксплуатационной пригодности;

**категория С** – фрикционное соединение в предельном состоянии несущей способности;

– соединения, работающие на растяжение:

**категория D** – соединение без предварительного натяжения болтов;

**категория С** – соединения с предварительным натяжением болтов.

**Монтаж болтовых соединений.** На высокопрочных болтах собирается обычными, а затягивают динамометрическими ключами после контроля плотностью собранных деталей.

Динамометрические ключи по принципу работы подразделяются на две группы:

- самовыключающиеся предельные с регулируемым крутящим моментом;
- динамические с указанием величины крутящего момента.

#### 4.2 Расчетная и экспериментальная части

1. Выполнить измерения деталей болтового соединения, болтов. Доработать чертеж соединений в сборке, указав размеры (рисунок 4.1). Количество пластин, болтов, а также значения толщин пластин и другие размеры занести в таблицу 4.1.

2. По маркировке на головках определить прочностные характеристики болтов, уточнить у преподавателя или лаборанта класс стали пластин и занести эти данные в таблицу 4.1.

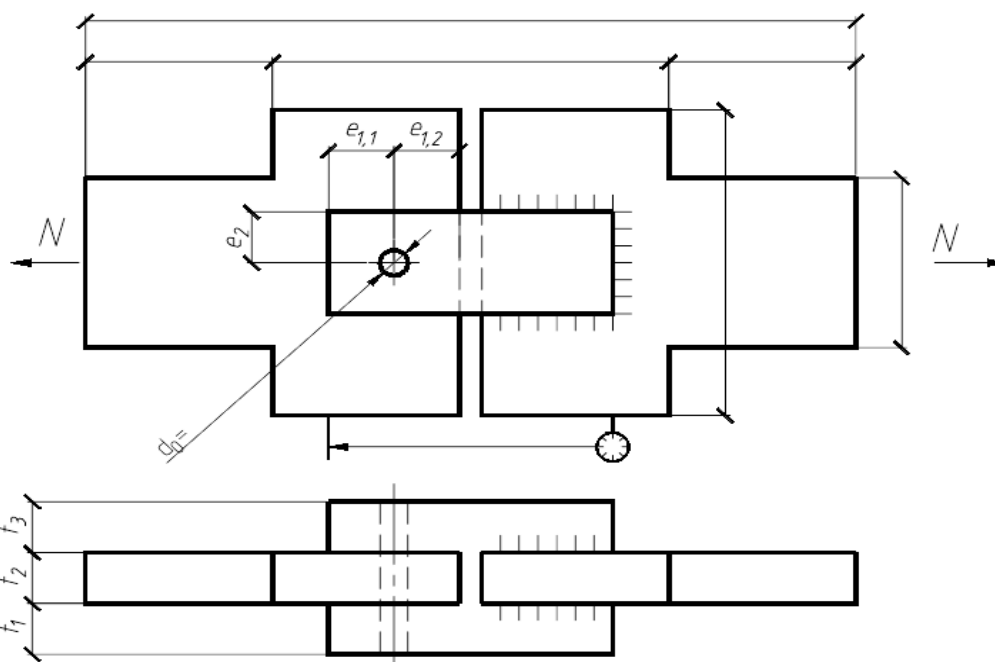


Рисунок 4.1 – Эскиз приспособления для испытания болтовых соединений

Таблица 4.1 – Исходные данные к расчету прочности болтового соединения

Расчетный параметр / Формула расчета	Значение
Число пластин в соединении	$n_p =$
Число расчетных срезов болта	$n_v = n_p - 1 =$
Количество болтов	$n_b =$
Толщина пластин	$t_1 =$
	$t_2 =$
	$t_3 =$
Класс стали пластин	
Класс прочности болта	
Диаметр болта	$d =$
Поперечное сечение болта брутто	$A =$
Поперечное сечение болта нетто	$A_s =$
Диаметр отверстия	$d_0 =$
Расстояния от центра болта до края пластины	$e_1 =$
	$e_2 =$

3. Выполнить расчет болтового соединения по ТКП EN 1993-1-8 и СП 5.04.01-2021. Расчет свести в таблицы 4.2 и 4.3 соответственно.



Таблица 4.2 – Расчет прочности болтового соединения по ТКП EN 1993-1-8

Расчетный параметр / Формула расчета	Значение / Вычисление
Категория соединения	
Предел прочности $f_u =$	
Временное сопротивление на растяжение болта $f_{ub} =$	
$\alpha_v =$	
Частный коэффициент безопасности $\gamma_{M2} =$	
Расчетная несущая способность одного болта на срез при одной плоскости среза $F_{v,Rd} = \frac{\alpha_v f_{ub} A}{\gamma_{M2}} =$	
Расчетная несущая способность соединения на срез $F_{v,Rd,tot} = F_{v,Rd} \cdot n_v \cdot n_b =$	
Несущая способность одного болта на срез при одной плоскости среза $F_{v,Rk} = \alpha_v f_{ub} A =$	
Несущая способность соединения на срез $F_{v,Rk,tot} = F_{v,Rk} \cdot n_s \cdot n_b =$	
$\alpha_d = \min \left\{ \frac{e_1}{3d_0}; \frac{P_1}{3d_0} - \frac{1}{4} \right\} =$	
$\alpha_b = \min \left\{ \alpha_d; \frac{f_{ub}}{f_u}; 1,0 \right\} =$	
$k_1 = \min \left\{ 2,8 \frac{e_2}{d_0} - 1,7; 1,4 \frac{P_2}{d_0} - 1,7; 2,5 \right\} =$	
Минимальная суммарная толщина элементов, сминаемых в одном или другом направлениях $t = \min ( t_1 + t_3 ; t_2 ) =$	
Расчетная несущая способность одного болта на смятие $F_{b,Rd} = \frac{k_1 \alpha_b f_u d t}{\gamma_{M2}} =$	
Расчетная несущая способность болтового соединения на смятие $F_{b,Rd,tot} = F_{b,Rd} \cdot n_b =$	
Несущая способность одного болта на смятие $F_{b,Rk} = k_1 \alpha_b f_u d t =$	
Несущая способность соединения на смятие $F_{b,Rk,tot} = F_{b,Rk} \cdot n_b =$	
Расчетная несущая способность болтового соединения	
Несущая способность болтового соединения $F_{Rk} =$	
Форма разрушения	

Таблица 4.3 – Расчет прочности болтового соединения по СП 5.04.01-2021

Расчетный параметр / Формула расчета	Значение / Вычисление
Коэффициент условий работы $\gamma_c =$	
Коэффициент условий работы болтового соединения $\gamma_b =$	
Расчетное сопротивление болта на срез $f_{bs} =$	
Расчетная несущая способность одного болта на срез $N_{bs} = f_{bs} \cdot \gamma_b \cdot A \cdot n_s =$	
Расчетная несущая способность соединения на срез $N_{bs,tot} = N_s \cdot \gamma_c \cdot n_b =$	
Несущая способность одного болта на срез $N_s = f_{bs} \cdot A \cdot n_v =$	

Расчетный параметр / Формула расчета	Значение / Вычисление
Несущая способность соединения на срез $N_{sn,tot} = N_{sn} \cdot n_b =$	
Минимальная суммарная толщина элементов, сминаемых в одном или другом направлениях $\Sigma t_{min} = \min ( t_1 + t_3 ; t_2 ) =$	
Расчетное сопротивление смятию соединяемых элементов $f_{bp} =$	
Расчетная несущая способность одного болта на смятие $N_b = f_{bp} \cdot \gamma_b \cdot d \cdot \Sigma t_{min} =$	
Расчетная несущая способность болтового соединения на смятие $N_{b,tot} = N_b \cdot \gamma_c \cdot n_b =$	
Несущая способность одного болта на смятие $N_{bp} = f_{bp} \cdot d \cdot \Sigma t_{min} =$	
Несущая способность болтового соединения на смятие $N_{bp,tot} = N_{bp} \cdot n_b =$	
Расчетная несущая способность болтового соединения	
Несущая способность болтового соединения $N_{Rd}$	
Форма разрушения	

4. Выполнить испытание соединения. Образец для испытания устанавливается в разрывную машину. Нагружение выполняют соединения ступенями в 0,2 N, записывая отсчеты  $m$  по индикатору в таблицу 4.4.

Таблица 4.4 – Результаты испытания соединения с болтом М\_\_\_\_\_ класса прочности \_\_\_\_\_, соединения класса \_\_\_\_\_

Шаг нагружения	Нагрузка $N$ , кN	Отсчеты по индикатору $m$ , мм	Перемещение $\delta$ , мм

Разрушающая нагрузка  $N_{Ed} =$

5. Определить для момента разрушения

$$\tau = \frac{N_d}{\pi d^2 / 4} =$$

--

$$\sigma_p = \frac{N_d}{d(\sum t)} =$$

--

6. Определить отношения

$$\frac{F_{Rk}}{N_{Ed}} =$$

--

$$\frac{N_n}{N_{Ed}} =$$

--

7. Построить график  $N - \delta$ .

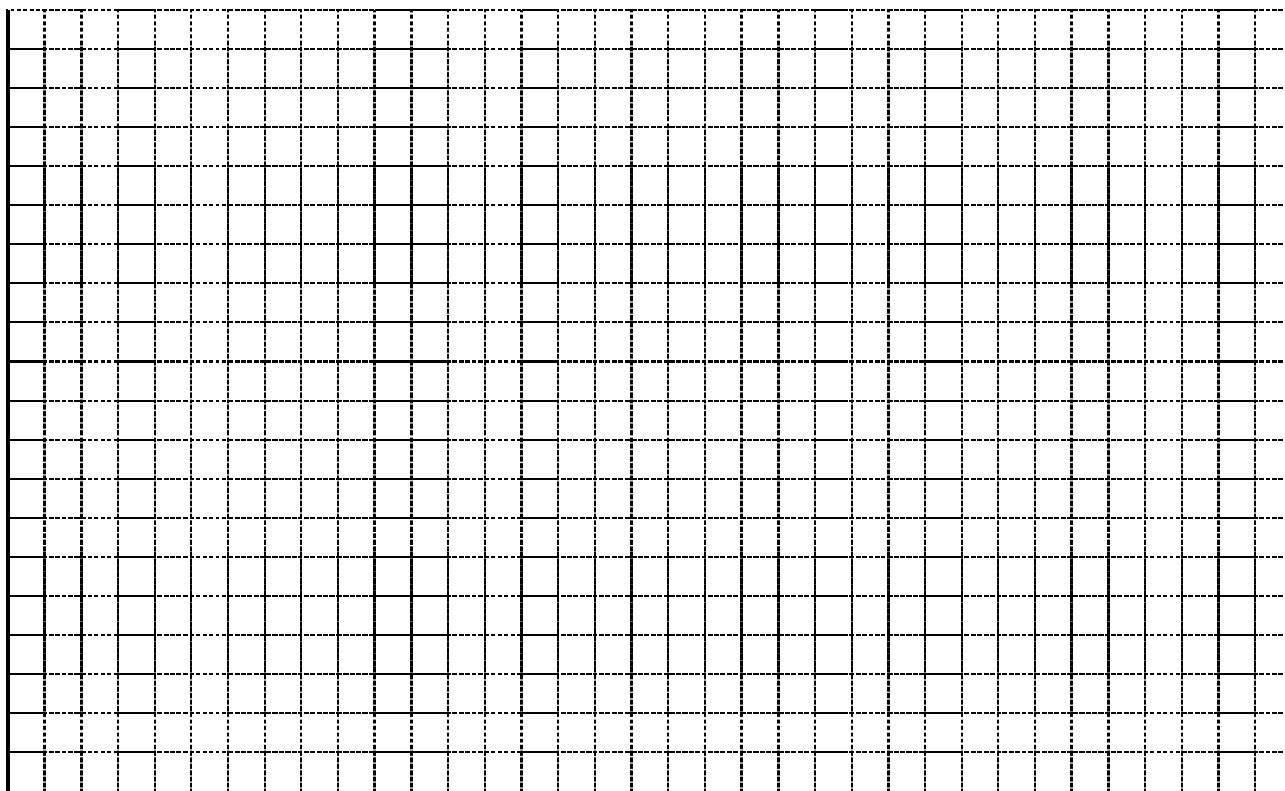


Рисунок 4.2 – График  $N - \delta$

	Экспериментальное значение $N_{Ed}$	Расчет по СП 5.04.01-2021	Расчет по ТКП EN 1993-1-1
Несущая способность болтового соединения, кН			

4.3 Выводы по работе

## Лабораторная работа № 5

### Общая устойчивость сварной двутавровой балки

**Цель работы:** Изучить закономерности деформирования сварной двутавровой балки при потере ею общей устойчивости. Изучить методику расчёта общей устойчивости изгибаемого элемента.

#### 5.1 Теоретическая часть

Для изгибаемых элементов в большинстве случаев их работы расчётом проверяются следующие предельные состояния: первой группы – вязкое или усталостное разрушение, потеря устойчивости, а также текучесть материала; второй группы – достижение предельных перемещений.

При расчётах изгибаемых элементов проверяется как местная устойчивость отдельных элементов сечения стержня, так и общая устойчивость сечения стержня в целом.

При потере общей устойчивости изгибаемый элемент (например, балка) при расположении нагрузки в плоскости главной оси инерции сначала изгибается в своей плоскости, затем при достижении нагрузкой критического значения начинает закручиваться и выходить из плоскости изгиба (рисунок 5.1).

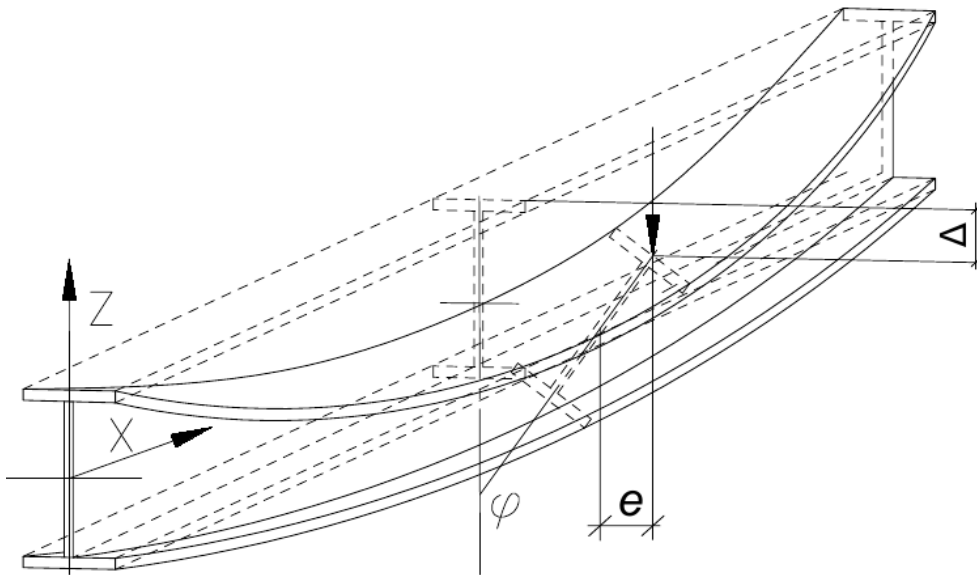


Рисунок 5.1 – Потеря устойчивости двутавровой балки при изгибе

Критическое напряжение потери общей устойчивости зависит от положения нагрузки на балке; нагрузка, расположенная по верхнему поясу балки, увеличивает скручивание, расположенная по нижнему поясу – уменьшает его. Поэтому расположение нагрузки по верхнему поясу значительно опаснее.

**СП 5.04.01-2021.** Расчет на устойчивость двутавровых балок 1-го класса, изгибаемых в плоскости стенки и удовлетворяющих требованиям п. 8.2.1 и 8.2.8 [2], следует выполнять по формуле:

$$\frac{M_{x,Ed}}{\varphi_{\delta} \cdot W_{cx} \cdot f_{yd} \cdot \gamma_c} \leq 1, \quad (5.1)$$

где  $W_{cx}$  – момент сопротивления сечения относительно оси x–x, вычисленный для сжатого пояса;

$\varphi_{\delta}$  – коэффициент устойчивости при изгибе, определяем по приложению Ж [2].

Значения коэффициента  $\varphi_{\delta}$  в формуле (5.1):

при  $\varphi_1 \leq 0,85$  (работа в упругой стадии)  $\varphi_{\delta} = \varphi_1$ ,

при  $\varphi_1 > 0,85$   $\varphi_{\delta} = 0,68 + 0,21 \cdot \varphi_1 \leq 1$ .

Это вызвано тем, что при  $\varphi_1 > 0,85$  критические напряжения переходят в упругопластическую фазу, что приводит к уменьшению модуля деформации. Коэффициент  $\varphi_1$  определяется по формуле 5.2.

**Устойчивость балок 1-го класса считают обеспеченной:**

а) при передаче нагрузки на балку через сплошной жесткий настил (железобетонные плиты из тяжелого, легкого и ячеистого бетонов, плоский и профилированный металлический настил, волнистая сталь и т. п.), непрерывно опирающийся на сжатый пояс балки и связанный с ним с помощью сварки, болтов, самонарезающих винтов и др.; при этом силы трения не учитывают;

б) при значениях условной гибкости сжатого пояса балки  $\bar{\lambda}_b = \frac{l_{ef}}{b} \cdot \sqrt{\frac{f_{yd}}{E}}$ , не превышающих ее предельных значений  $\bar{\lambda}_{ub}$ , определяемых по формулам таблицы 5.1 для балок симметричного двутаврового сечения или асимметричного – с более развитым сжатым поясом, рассчитываемых по формуле (5.1) и при отношении ширины растянутого пояса к ширине сжатого пояса не менее 0,75.

Таблица 5.1

Место приложения нагрузки	Предельная условная гибкость сжатого пояса прокатной или сварной балки $\bar{\lambda}_{ub}$
К верхнему поясу	$\bar{\lambda}_{ub} = 0,35 + \frac{0,0032 \cdot b}{t} + \left(0,76 - \frac{0,02 \cdot b}{t}\right) \cdot \frac{b}{h}$
К нижнему поясу	$\bar{\lambda}_{ub} = 0,57 + \frac{0,0032 \cdot b}{t} + \left(0,92 - \frac{0,02 \cdot b}{t}\right) \cdot \frac{b}{h}$
Независимо от уровня приложения нагрузки при расчете участка балки между связями или при чистом изгибе	$\bar{\lambda}_{ub} = 0,41 + \frac{0,0032 \cdot b}{t} + \left(0,73 - \frac{0,016 \cdot b}{t}\right) \cdot \frac{b}{h}$
<p>Обозначения, принятые в таблице 5.1:</p> <p>1. <math>b</math> и <math>t</math> – соответственно ширина и толщина сжатого пояса; <math>h</math> – расстояние (высота) между осями поясных листов.</p> <p>2. Значение <math>\bar{\lambda}_{ub}</math> определены при <math>1 \leq \frac{h}{b} \leq 6</math> и <math>15 \leq \frac{b}{t} \leq 35</math>. Для балок с отношением <math>b/t &lt; 15</math> в приведенных формулах следует принимать <math>b/t = 15</math>.</p> <p>3. Значения <math>\bar{\lambda}_{ub}</math> следует повышать умножением на коэффициент <math>\sqrt{\frac{f_{yd}}{\sigma}} = \sqrt{\frac{f_{yd} \cdot W_{cx} \cdot \gamma_c}{M_{Ed}}}</math>.</p>	

При определении значения  $\varphi_b$  за расчетную длину балки  $l_{ef}$  следует принимать расстояние между точками закреплений сжатого пояса от поперечных смещений (узлами продольных или поперечных связей, точками крепления жесткого настила); при отсутствии связей  $l_{ef} = l$  (где  $l$  – пролет балки) за расчетную длину консоли следует принимать:  $l_{ef} = l$  при отсутствии закрепления сжатого пояса на конце консоли в горизонтальной плоскости (здесь  $l$  – длина консоли); расстояние между точками закреплений сжатого пояса в горизонтальной плоскости при закреплении пояса на конце и по длине консоли.

Для балок двутаврового сечения с двумя осями симметрии для определения коэффициента  $\varphi_b$  необходимо вычислить коэффициент перехода от нормативных сопротивлений к критическим напряжениям потери общей устойчивости изгибаемыми элементами  $\varphi_1$  по формуле

$$\varphi_1 = \psi \cdot \frac{J_y}{J_x} \cdot \left(\frac{h}{l_{ef}}\right)^2 \cdot \frac{E}{f_{yd}}, \quad (5.2)$$

где  $\psi$  – коэффициент, определяют по таблице 5.2 (т. Ж.1 [2]);

$h$  – полная высота сечения прокатного двутавра или расстояние между осями поясов (пакетов поясных листов) составного двутавра;

$l_{ef}$  – расчетная длина балки (консоли).

Таблица 5.2 – Коэффициенты  $\psi$  для двутавровых балок с двумя осями симметрии

Количество закреплений сжатого пояса в пролете	Вид нагрузки в пролете	Нагруженный пояс	Формулы для $\psi$ при значениях $\alpha$	
			$0,01 \leq \alpha \leq 40$	$40 < \alpha \leq 400$
Без закреплений	Сосредоточенная	Верхний	$\psi = 1,75 + 0,09 \cdot \alpha$	$\psi = 3,3 + 0,053 \cdot \alpha - 4,5 \cdot 10^{-5} \cdot \alpha^2$
		Нижний	$\psi = 5,05 + 0,09 \cdot \alpha$	$\psi = 6,6 + 0,053 \cdot \alpha - 4,5 \cdot 10^{-5} \cdot \alpha^2$
	Равномерно распределенная	Верхний	$\psi = 1,6 + 0,08 \cdot \alpha$	$\psi = 3,15 + 0,04 \cdot \alpha - 2,7 \cdot 10^{-5} \cdot \alpha^2$
		Нижний	$\psi = 3,8 + 0,08 \cdot \alpha$	$\psi = 5,35 + 0,04 \cdot \alpha - 2,7 \cdot 10^{-5} \cdot \alpha^2$
Два и более, делящих пролет на равные части	Любая	Любой	$\psi = 2,25 + 0,07 \cdot \alpha$	$\psi = 3,6 + 0,04 \cdot \alpha - 3,5 \cdot 10^{-5} \cdot \alpha^2$

Для сварных двутавров, составленных из трех листов

$$\alpha = 8 \cdot \left( \frac{l_{ef} \cdot t_f}{h \cdot b_f} \right)^2 \cdot \left( 1 + \frac{a \cdot t_w^3}{b_f \cdot t_f^3} \right), \quad (5.3)$$

где  $t_w$  – толщина стенки;

$b_f$  и  $t_f$  – ширина и толщина пояса балки соответственно;

$h$  – расстояние между осями поясов;

$a = 0,5 \cdot h$ .

При учете упругопластической работы балки ее общая устойчивость ухудшается, и расстояние между узлами связей, закрепляющими сжатый пояс от горизонтальных смещений, уменьшается умножением на коэффициент  $\delta \leq 1$  (п. 5.20 [2]).

**ТКП EN 1993-1-1.** Элемент, изгибаемый относительно главной оси и не раскрепленный из плоскости действия изгибающего момента, следует проверять с учетом потери устойчивости по изгибно-крутильной форме (потеря устойчивости плоской формы изгиба) по таблице 5.3.

Таблица 5.3

$\frac{M_{Ed}}{M_{b,Rd}} \leq 1,0$	$M_{Ed}$ – расчетный изгибающий момент; $M_{b,Rd}$ – расчетное сопротивление изгибаемого элемента при потере устойчивости по изгибно-крутильной форме
$M_{b,Rd} = \chi_{LT} W_y \frac{f_y}{\gamma_{M1}}$	<b>Расчетное сопротивление изгибаемого элемента при потере устойчивости по изгибно-крутильной форме</b>
$\chi_{LT}$ – понижающий коэффициент при потере устойчивости по изгибно-крутильной форме (см. таблицу 2.16 [1])	

Балки с достаточным раскреплением сжатой полки не теряют устойчивости по изгибно-крутильной форме. Кроме того, балки определенного типа поперечного сечения, такого как **квадратные** или **круглые замкнутые профили**, **сварные круглые трубы** или **прямоугольные коробчатые сечения**, также не чувствительны к потере устойчивости по изгибно-крутильной форме (рисунок 5.2). При условной гибкости  $\bar{\lambda}_{LT} \leq \bar{\lambda}_{LT,0}$  или при  $\frac{M_{Ed}}{M_{cr}} \leq \bar{\lambda}_{LT,0}^2$  проверкой устойчивости по изгибно-крутильной форме допускается пренебрегать и проверять только поперечное сечение на прочность.



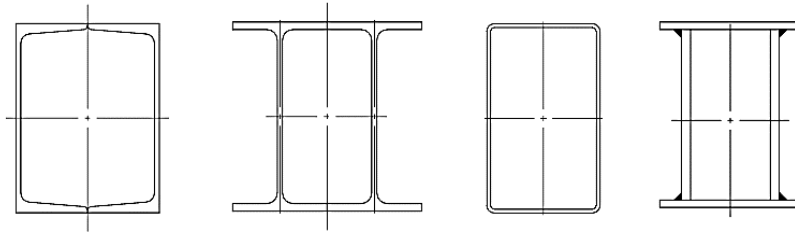


Рисунок 5.2 – Поперечные сечения балок, для которых не требуется проверка устойчивости по изгибно-крутильной форме

Критический момент потери устойчивости по изгибно-крутильной форме (потеря устойчивости плоской формы изгиба) элемента симметричного сечения, изгибаемого в плоскости симметрии (см. п. 2.4 [1])

$$M_{cr} = C_1 \frac{\pi^2 EI_z}{(k_z L)^2} \left\{ \sqrt{\left( \frac{k_z}{k_w} \right)^2 \frac{I_w}{I_z} + \frac{(k_z L)^2 GI_t}{\pi^2 EI_z}} + (C_2 z_g)^2 - C_2 z_g \right\}, \quad (5.4)$$

где  $L$  – расстояние между точками раскрепления элемента от бокового смещения;

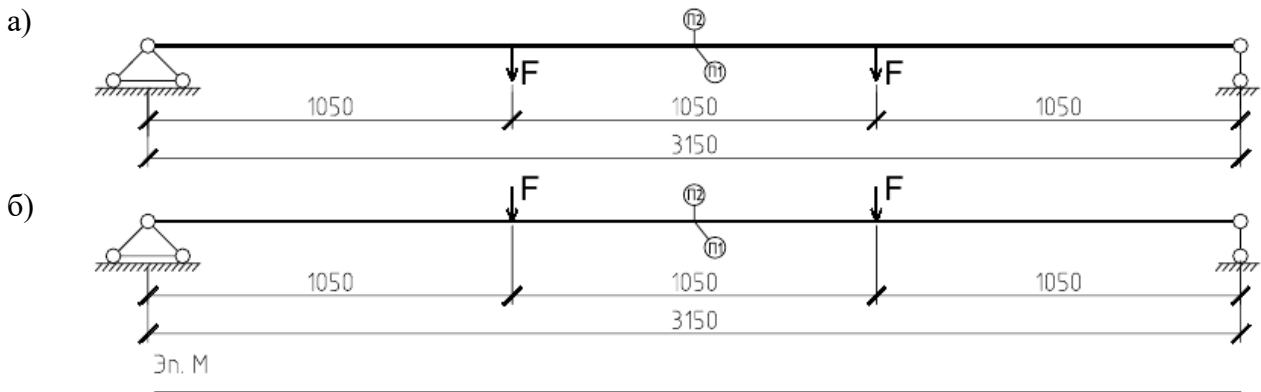
$C_1, C_2$  – коэффициенты, зависящие от внешней нагрузки, действующей на элемент, и условия раскрепления концов элемента (т. 2.34 [1]);

$k_z, k_w$  – коэффициенты, учитывающие условия закрепления концов элемента; принимаю равными:

- а) 0,5 – раскреплены оба конца элемента;
- б) 0,7 – раскреплен один конец элемента;
- в) 1,0 – раскрепления концов элемента отсутствуют.

$z_g$  – координата точки приложения внешней нагрузки относительно центра сдвига (изгиба) сечения; при приложении нагрузки к верхнему поясу  $z_g = h/2$ . Если нагрузка приложена к нижнему поясу  $z_g = -h/2$ .

## 5.2 Расчетная часть



а) нагрузка приложена к нижнему поясу; б) нагрузка приложена к верхнему поясу

Рисунок 5.3 – Расчётная схема двутавровой сварной балки

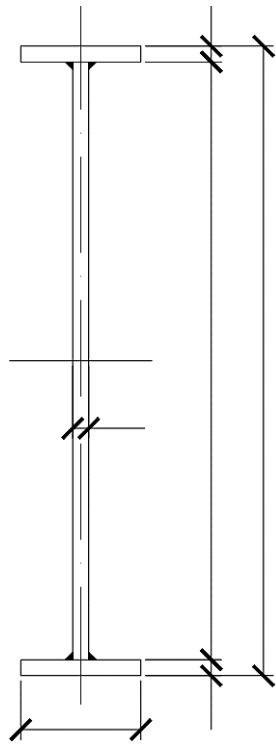


Рисунок 5.4 – Сечение балки

**Класс поперечного сечения балки.** Коэффициент корректировки по стали  $\varepsilon = \sqrt{235 / f_y} =$

Свес полки  $c_f = \frac{b - t_w}{2} =$

$c_f / t_f =$

Полка относится к \_\_\_\_\_ классу.

Расчетная высота стенки  $c_w = h - 2 \cdot t_f =$

Т. к.  $c_w / t_w =$

Стенка относится к \_\_\_\_\_ классу

Следовательно, сечение балки соответствует \_\_\_\_\_ классу.

**Геометрические характеристики сечения**

$J_y =$

$J_z =$

$J_t =$

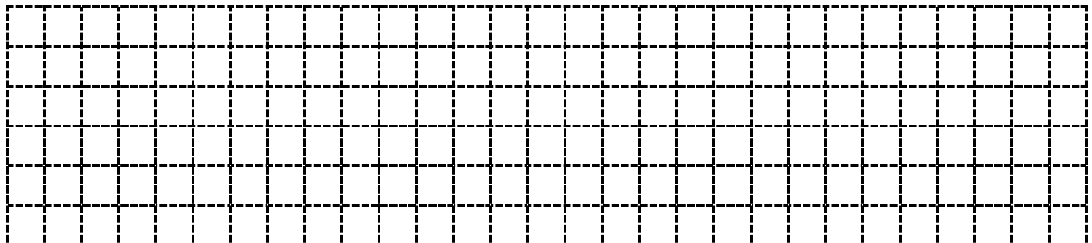
$J_w =$

$W_y =$

$S_y =$

$W_{pl} =$

$M_{cr.1} =$



$M_{cr.2} =$

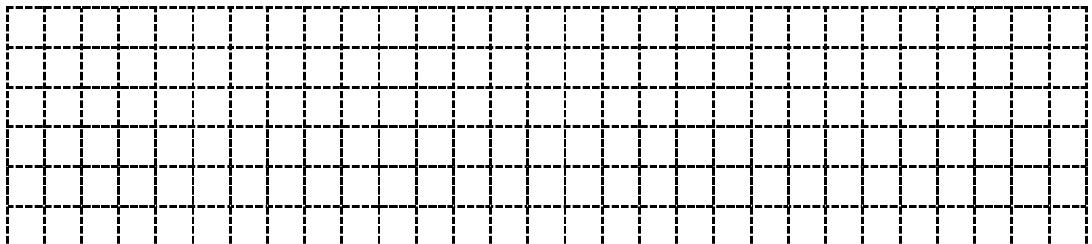


Таблица 5.5 – Расчет по ТКП EN 1993-1-1

Параметр	Нагрузка к нижнему поясу	Нагрузка к верхнему поясу
$F_{cr}$		
$M_{b,Rd}$		
$\chi_{LT}$ (т. 2.15 [2])		
$\Phi_{LT}$ (т. 2.16 [2])		
$\lambda_{LT}$ (т. 2.15 [2])		
$M_{cr}$		



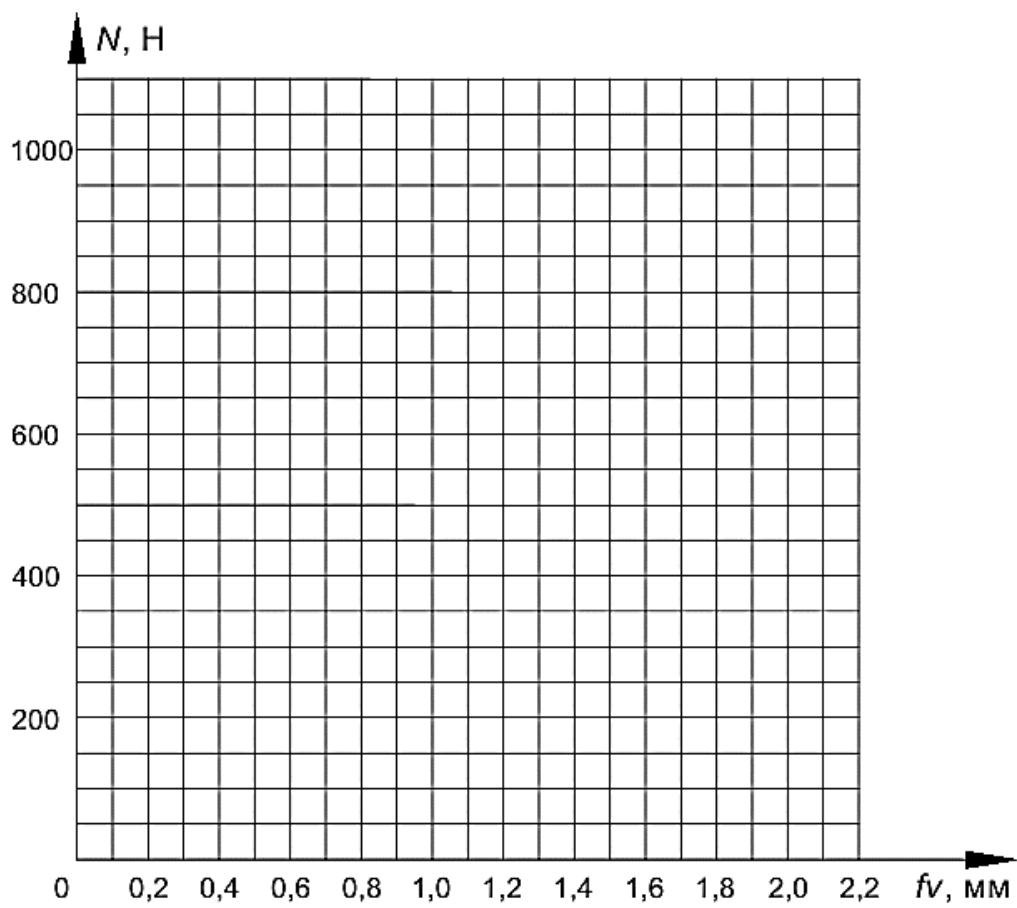


Рисунок 5.5 – Зависимость вертикальных перемещений от нагрузки

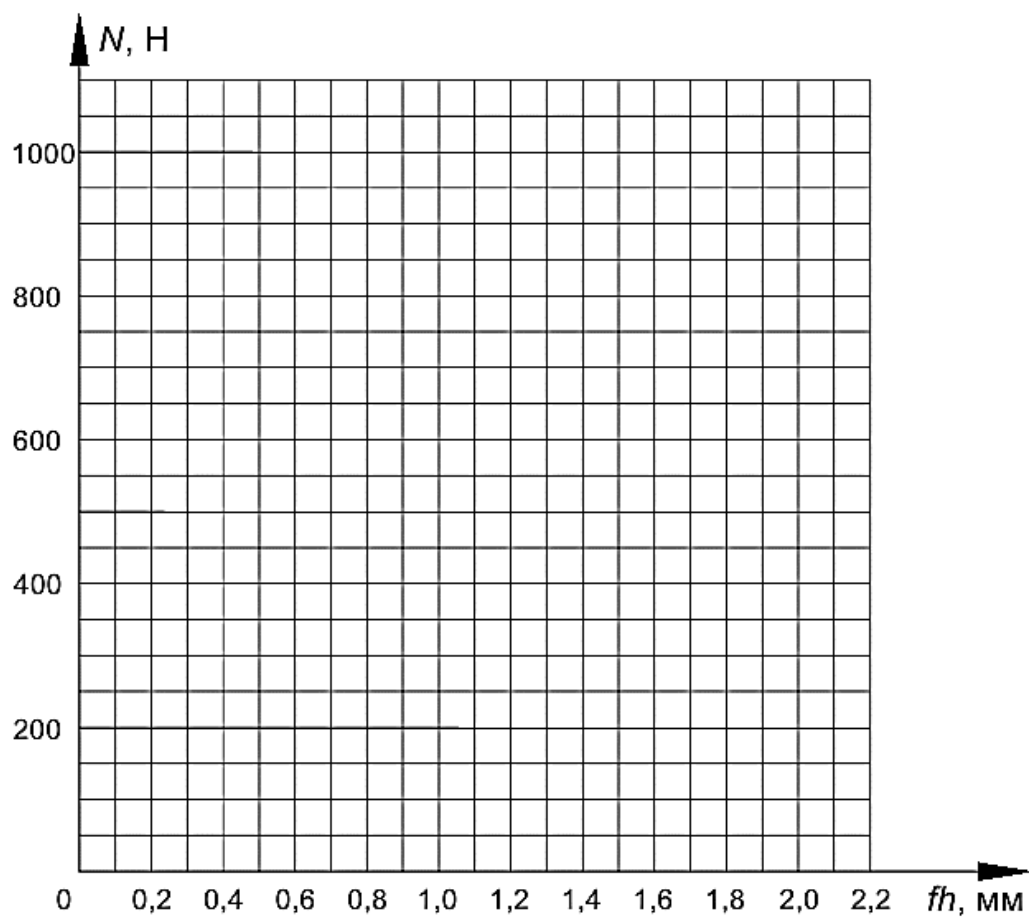


Рисунок 5.6 – Зависимость горизонтальных перемещений от нагрузки

Таблица 5.5 – Результаты испытаний и расчета критической силы

Место приложения нагрузки	Значение критической силы $F_{cr}$ , кН		
	экспериментальное значение	рассчитанное по СП 5.04.01-2021	рассчитанное по ТКП EN 1993-1-1
Нагрузка, приложенная к нижнему поясу			
Нагрузка, приложенная к нижнему поясу			

#### 5.4 Выводы по работе

#### Список использованных источников

1. Металлические конструкции / А. Б. Шурин [и др.] ; под ред. А. Б. Шурина. – Брест: Издательство БрГТУ, 2020. – 177 с.
2. Стальные конструкции : СП 5.04.01-2021. – Введ. 29.07.2021. – Минск : Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь, 2021. – 147 с.
3. Шурин, А.Б. Нормативные и справочные материалы для проектирования стальных конструкций / А.Б. Шурин, А.В. Мухин, В.И. Драган. – 3-е изд. – Брест: Издательство БрГТУ, 2014. – 159 с.
4. Еврокод 3. Проектирование стальных конструкций. Часть 1-8. Расчет соединений : ТКП EN 1993-1-8. – Введ. 10.12.2009. – Минск : Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь, 2015. – 147 с.

Учебное издание

**Составитель:**  
*Шурин Андрей Брониславович*

# **Методические указания и журнал испытаний**

к проведению лабораторных работ по дисциплине  
«Основы проектирования, диагностики и обследования  
металлических конструкций»  
для студентов дневной формы обучения по специальности  
1-70 02 02 «Экспертиза и управление недвижимостью»

*Текст печатается в авторской редакции  
орфографии и пунктуации*

Ответственный за выпуск: Шурин А. Б.

Редактор: Митлошук М. А.

Компьютерная вёрстка: Шурин А. Б.

---

Подписано в печать 20.07.2022 г. Формат 60x84 <sup>1</sup>/<sub>8</sub>. Бумага «Performer».  
Гарнитура «Times New Roman». Усл. печ. л. 3,72. Уч. изд. л. 4. Заказ № 877. Тираж 18 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.