

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ**  
**УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ**  
**«БРЕСТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**  
**КАФЕДРА СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ**

# **ЖУРНАЛ**

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

Брест 2021

УДК 624.014 (07)

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

Составители: Шурин А.Б., к.т.н., доцент, зав. кафедрой строительных конструкций  
Зинкевич И.В., к.т.н., доцент, доцент кафедры строительных конструкций  
Жданов Д.А., к.т.н., доцент кафедры строительных конструкций  
Ласкевич И.Г., м.т.н., ассистент

Рецензент: Директор РУП «Институт БелНИИС»–Научно-технический центр,  
д.т.н., доцент В. Н. Деркач

# Лабораторная работа №1

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

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

### 1.1 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:

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

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.

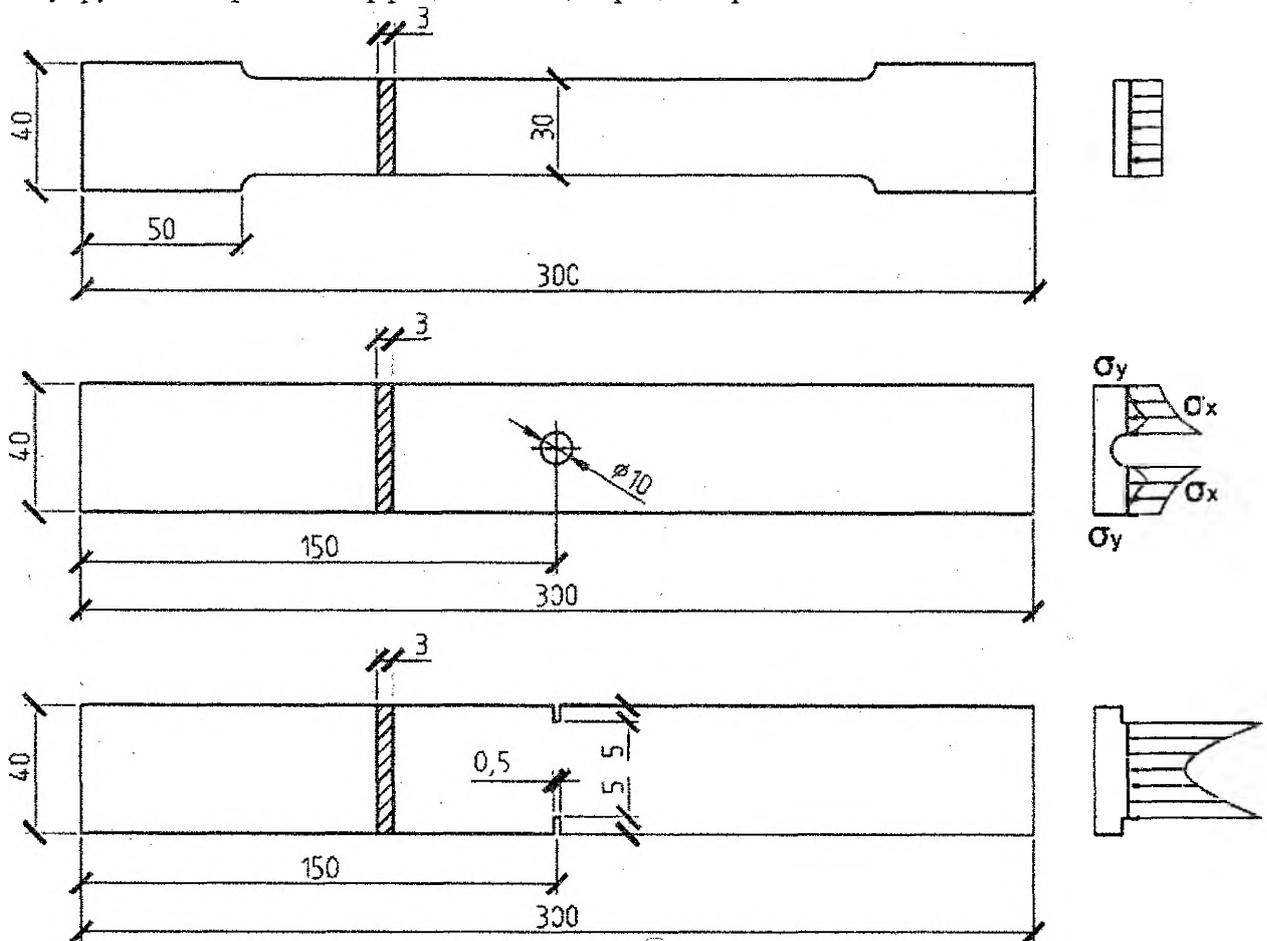


Рисунок 1.1 – Образцы для испытаний на растяжение

В лабораторной работе исследуются три типа образцов (рисунок 1.1). 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 1.2).

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 1.2).

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.

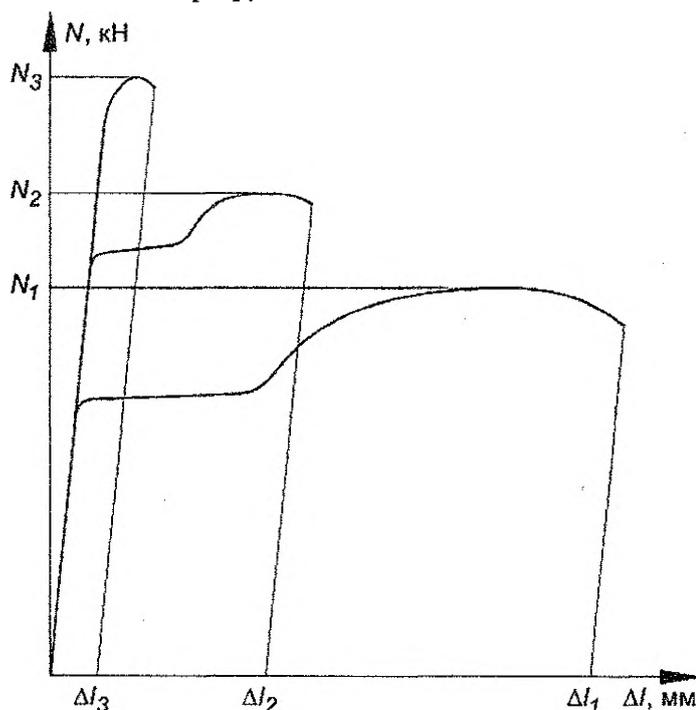


Рисунок 1.2 – Диаграммы деформирования образцов

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 удлинений:

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

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.

### 1.2 Испытания образцов на растяжение статической нагрузкой

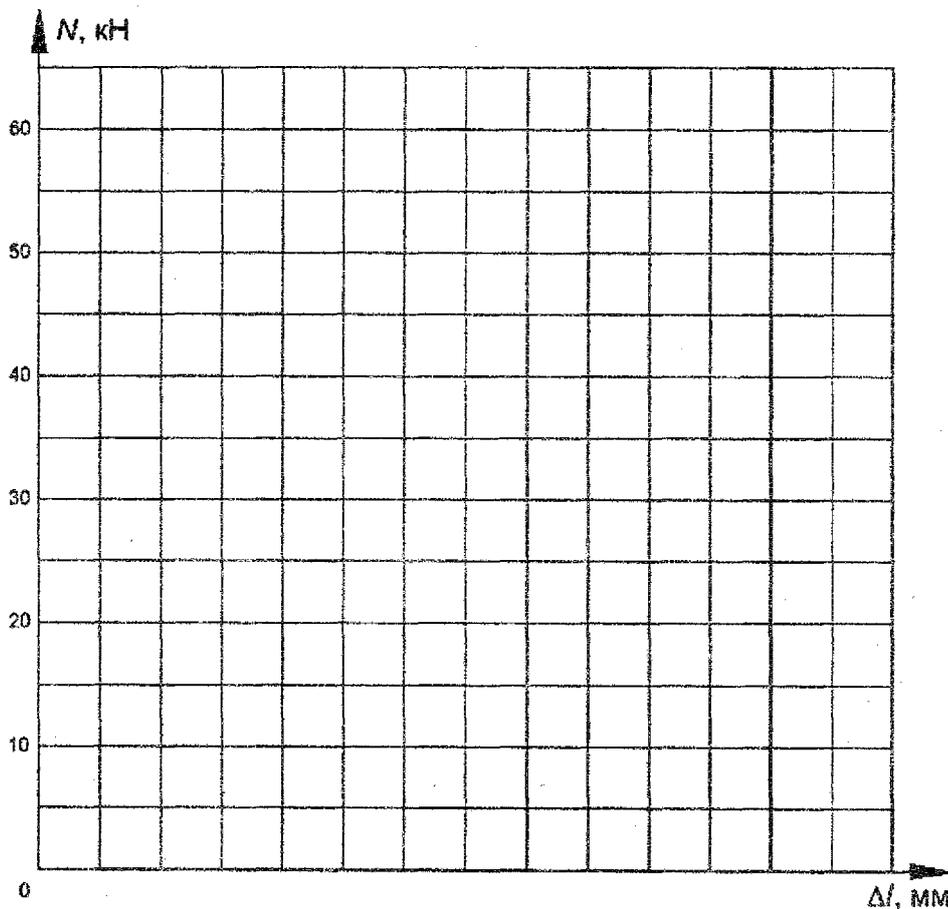


Рисунок 1.3 – Диаграммы деформирования образцов в осях  $N - \Delta l$

Таблица 1.1 – 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 1.2 – 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				

### 1.3 Работа элементов с концентраторами при многократных нагрузках

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

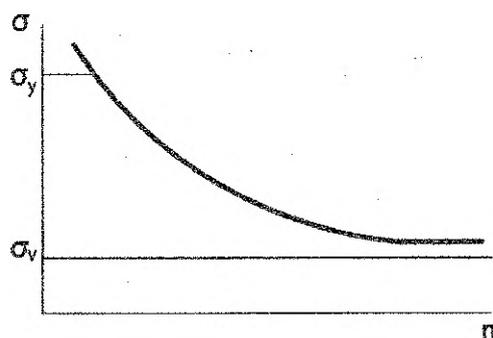


Рисунок 1.4 – Зависимость разрушающего напряжения от числа циклов

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.

### 1.4 Работа элементов с концентраторами при отрицательных температурах

Механические свойства стали при нагревании ее до температуры  $t = 200...250$  °С не меняются.

При температуре 250...300°С прочность стали несколько повышается, пластичность снижается. Сталь в изломе имеет крупнозернистое строение и становится более хрупкой (*сильнеломкость*).

Нагрев выше 400°С приводит к резкому падению предела текучести и временного сопротивления, а при  $t = 600...650$ °С наступает температурная пластичность и сталь теряет свою несущую способность.

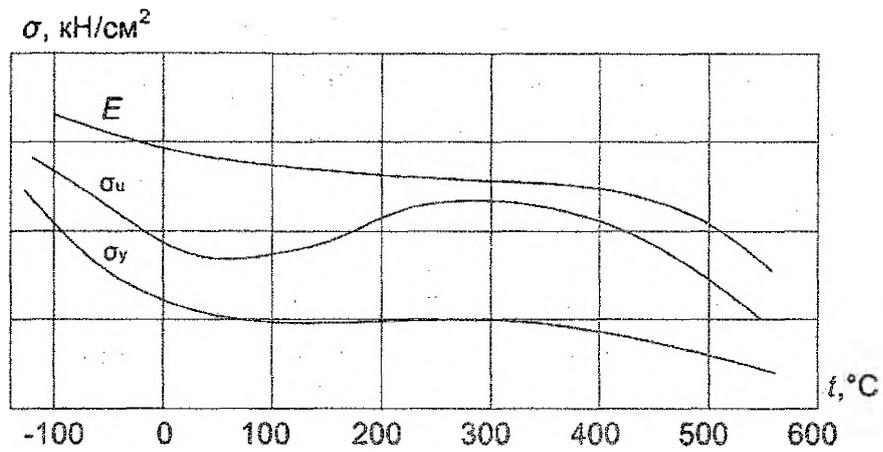


Рисунок 1.5 – Механические свойства низкоуглеродистой стали при изменении температуры

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.

#### 1.5 Выводы по работе

## Лабораторная работа №2

### 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.

#### 2.1 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.

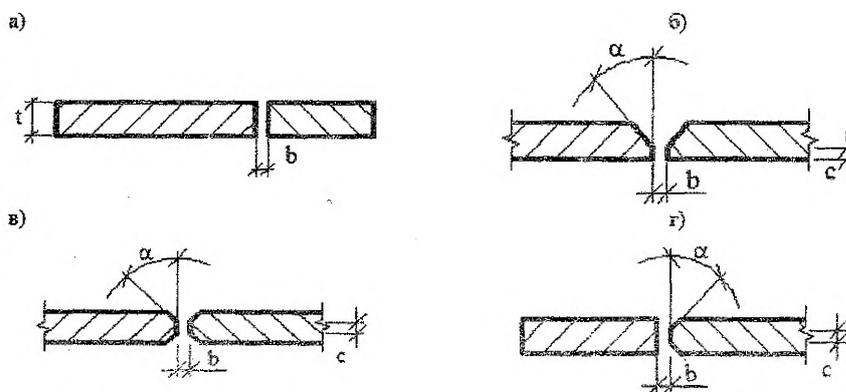
Когда односторонняя или двухсторонняя сварка не позволяет обеспечить полный провар, применяют разделку кромок, которая характеризуется:  $b$  - зазором,  $c$  - притуплением,  $\alpha$  - углом раскрытия стыка.

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 2.1 – 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.

#### 2.2 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:

$$F_{w,Ed} \leq F_{w,Rd} \quad (2.1)$$

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 2.2).

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

$$F_{w,Rd} = f_{vw,d} a, \quad (2.2)$$

где  $f_{vw,d}$  – расчетное сопротивление сдвигу сварного шва, рассчитывается по формуле 2.3;  
 $a$  – эффективная толщина сварного шва, таблица 3.5 [1].

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

$$f_{vw,d} = \frac{f_u / \sqrt{3}}{\beta_w \cdot \gamma_{M2}}, \quad (2.3)$$

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

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

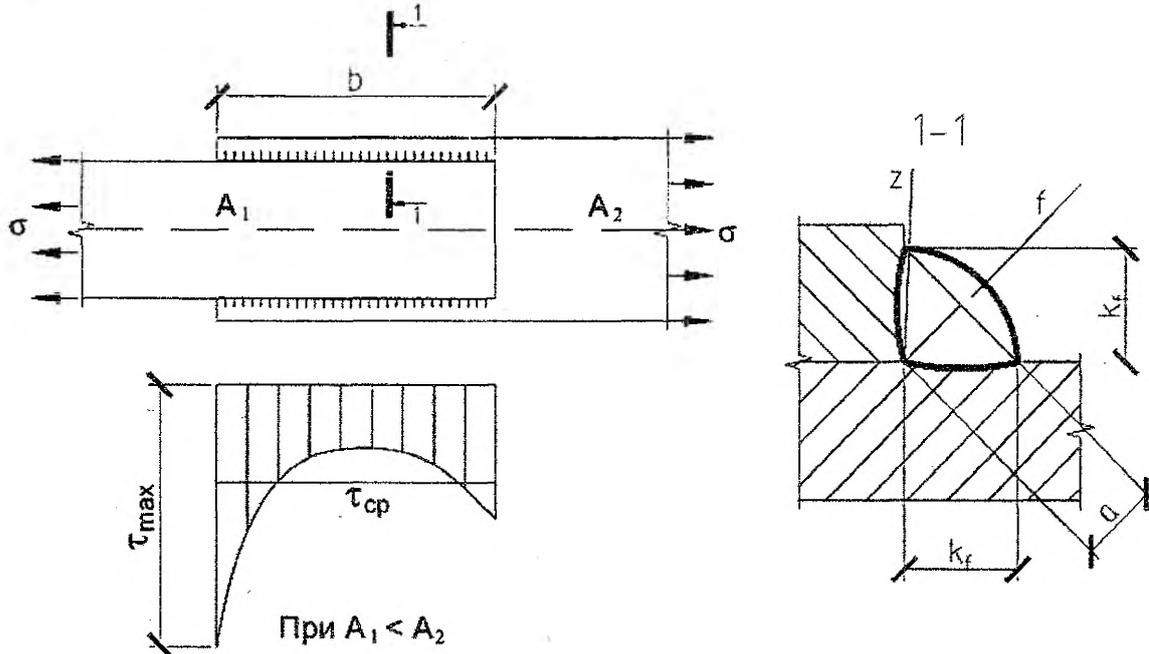


Рисунок 2.2 – Распределение напряжений в сварных соединениях

**СНиП II-23.** Наиболее нагруженные участки шва находятся в начале и в конце шва. На рисунке 2.2 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 табл. 34\* [2].

Согласно [2] расчёт соединения с угловыми швами следует вести по двум сечениям (рисунок 2.2): по металлу шва (сечение f-f) и границе сплавления (сечение z-z).

Расчет по металлу шва выполняют по формуле

$$\frac{N}{\beta_f \cdot k_f \cdot l_w} \leq R_{wf} \cdot \gamma_{wf} \cdot \gamma_c, \quad (2.4)$$

а по границе сплавления - по формуле

$$\frac{N}{\beta_z \cdot k_f \cdot l_w} \leq R_{wz} \cdot \gamma_{wz} \cdot \gamma_c, \quad (2.5)$$

где  $\beta_f$  и  $\beta_z$  – коэффициенты, учитывающие глубину проплавления шва и границы сплавления, п.11.2\* [2];

$l_w$  – расчетная длина углового шва, принимается меньше его полной длины на 10 мм;

$\gamma_{wf}$  и  $\gamma_{wz}$  – коэффициенты условий работы шва, п.11.2\* [2];

$R_{wf}$  и  $R_{wz}$  - расчетные сопротивления угловых швов срезу по металлу шва и границе сплавления соответственно;

$R_{wf}$  - определяется по табл. 56 [2];

$$R_{wz} = 0,45 \cdot R_{un},$$

где  $R_{un}$  - временное сопротивление стали (предел прочности) разрыву, табл. 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 табл. 38\*[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  $R_{wf}$  и  $R_{wz}$  следует заменить временными сопротивлениями при сдвиге  $R_{wun} / \sqrt{3}$  и  $R_{un} / \sqrt{3}$  ( $R_{wun}$  определяется по табл. 56 [2]).

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

$$N = A_1 \cdot f_y, \tag{2.6}$$

$$N_p = A_1 \cdot f_u. \tag{2.7}$$

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

Схема сварных образцов для статических испытаний осевой силой представлены на рисунке 2.3. Образцы изготовлены из малоуглеродистой листовой стали класса С235 (ГОСТ 27772-88) толщиной 6 мм и отличаются величиной нахлестки  $b$ . Сварка ручная электродуговая по ГОСТ 5264-8 (таблица 2.1).

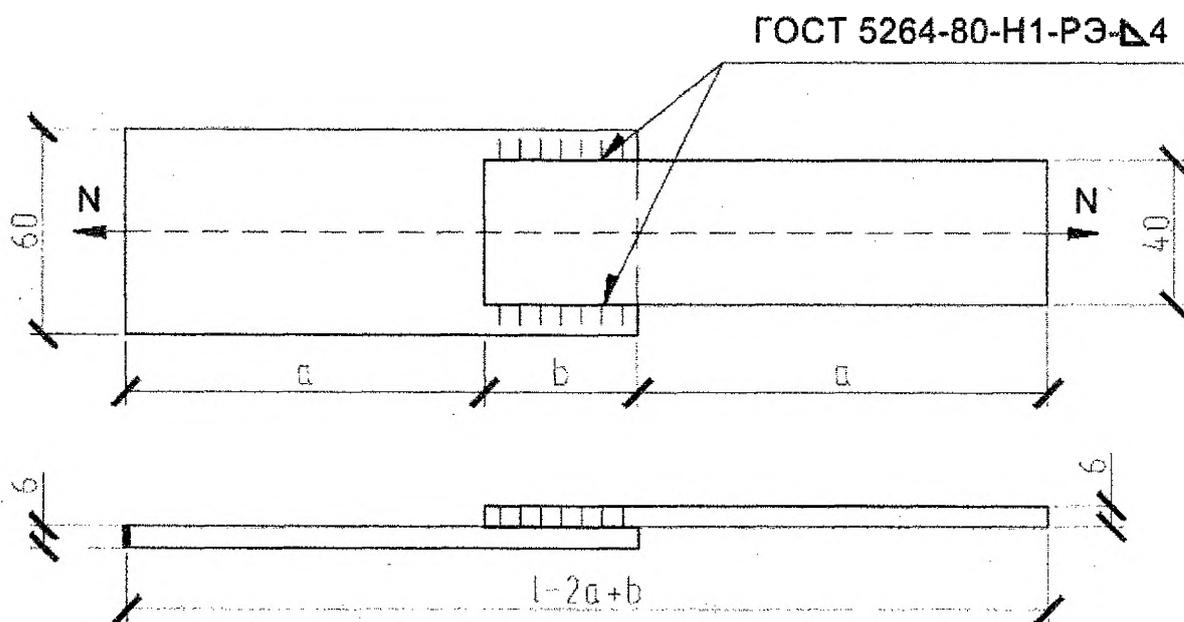


Рисунок 2.3 - Образцы для испытаний на осевое растяжение

Таблица 2.1 – Характеристики образцов для испытаний

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

Таблица 2.2 – 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 $a = k_f \cdot \cos 45^\circ =$		
Общая длина сварного шва $l = 2b =$		
Эффективная длина шва $l_{eff} = l - 4a =$		
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 $N_{w,Rd} = F_{w,Rd} \cdot l_{eff} =$		
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 2.3 – Расчет по СНиП II-23

Расчетный параметр	Образец № 1	Образец № 2
Расчет несущей способности сварного соединения		
Катет шва $k_f =$		
Коэффициенты условий работы и параметров шва $\gamma_{wf} =$ , $\gamma_{wz} =$ , $\beta_f =$ , $\beta_z =$		
Расчётная длина углового шва $l_w = 2b - 10 \text{ мм} =$		
Предел прочности $R_{un} =$		
Расчетное сопротивление срезу по: – границе сплавления $R_{wz} = 0,45 \cdot R_{un} =$		
– по металлу шва $R_{wf} =$		
Временное сопротивление при сдвиге $R_{win} =$		
Несущая способность по металлу шва $N = R_{wf} \cdot \gamma_{wf} \cdot \gamma_c \cdot \beta_f \cdot k_f \cdot l_w =$		

Окончание таблицы 2.3

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

Таблица 2.4 – Результаты испытаний и определения несущей способности

№ образцов	Размеры, мм		Разрушающая нагрузка, кН			Характер разрушения
			по испытаниям	по расчету		
	b	a		СНиП	ТКП EN	
1	120	90				
2	50	160				

2.4 Выводы по работе

## Лабораторная работа №3

### 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.

#### 3.1 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 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  $\text{кН/см}^2$ . Вторая цифра – это отношение  $(\sigma_y/\sigma_u) \times 10$  в %. Произведение этих цифр – это предел текучести материала болта  $\text{кН/см}^2$ .

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 Вст3кп2 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.

### 3.2 Расчетная и экспериментальная части

1. Выполнить измерения деталей болтового соединения, болтов. Доработать чертеж соединений в сборке, указав размеры (рисунок 3.1). Количество пластин, болтов, а также значения толщин пластин и другие размеры занести в таблицу 3.1.

2. По маркировке на головках определить прочностные характеристики болтов, уточнить у преподавателя или лаборанта класс стали пластин и занести эти данные в таблицу 3.1.

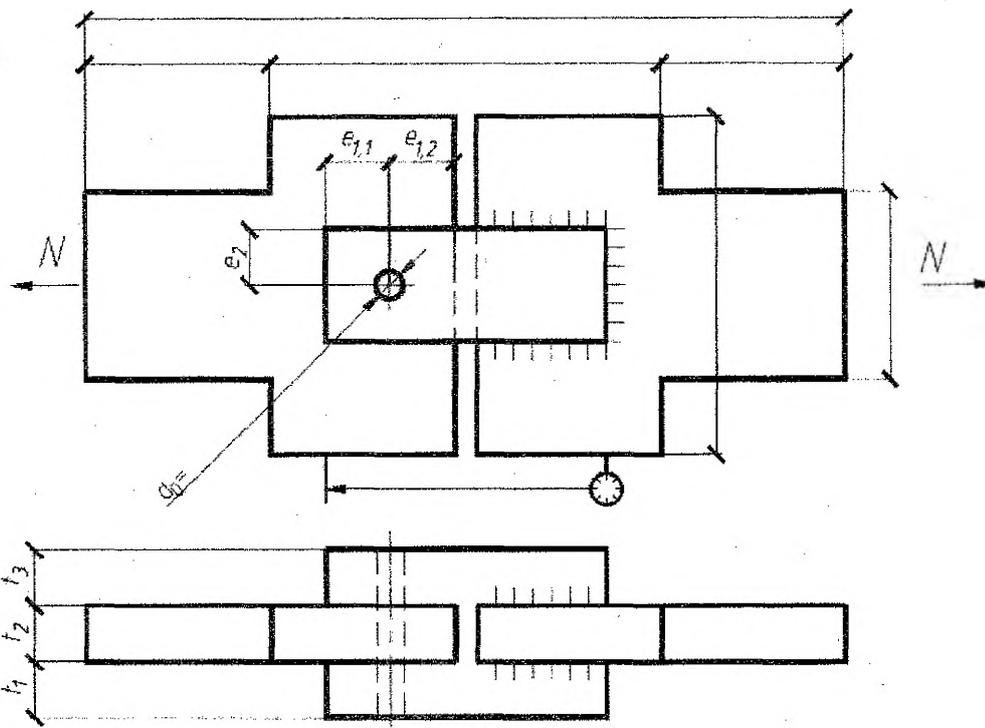


Рисунок 3.1 – Эскиз приспособления для испытания болтовых соединений

Таблица 3.1 – 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 СНиП II-23. Расчет свести в таблицы 3.2 и 3.3 соответственно.

Таблица 3.2 – 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 $F_{v,Rk,tot} = F_{v,Rk} \cdot n_s \cdot n_b =$	
$\alpha_d = \min \left\{ e_1 / 3d_0; P_1 / 3d_0 - 1/4 \right\} =$	
$\alpha_b = \min \left\{ \alpha_d; f_{ub} / f_u; 1,0 \right\} =$	
$k_1 = \min \left\{ 2,8 \frac{e_2}{d_0} - 1,7; 1,4 \frac{P_2}{d_0} - 1,7; 2,5 \right\} =$	
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 3.3 – Расчет прочности болтового соединения по СНиП II-23

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





## Лабораторная работа №4

### 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.

#### 4.1 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 4.1).

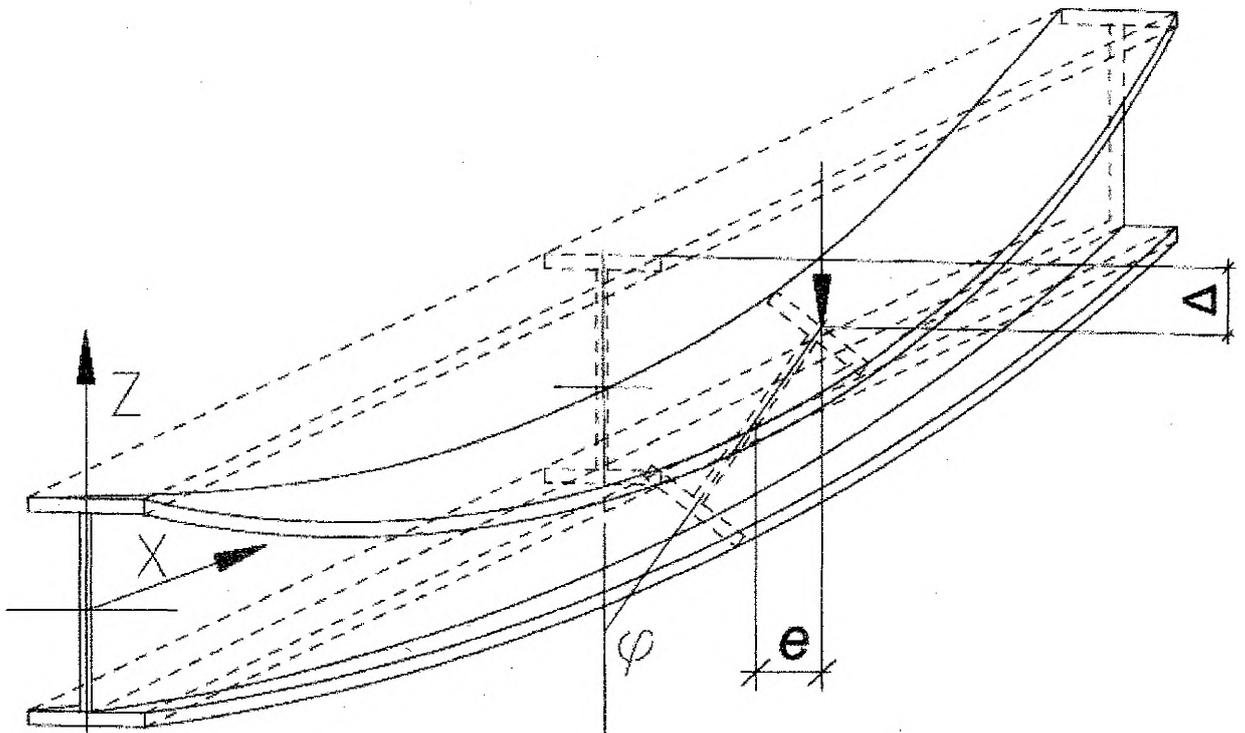


Рисунок 4.1 – Потеря устойчивости двутавровой балки при изгибе

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.

**СНиП II-23.** Расчет на устойчивость балок двутаврового сечения, изгибаемых в плоскости стенки и удовлетворяющих требованиям пп. 5.12 и 5.14\* [2] (т.е. проверенных по нормальным, касательным и приведенным напряжениям), следует выполнять по формуле:

$$\sigma = \frac{M}{\varphi_b \cdot W_c} \leq R_y \cdot \gamma_c, \quad (4.1)$$

где  $W_c$  – момент сопротивления для сжатого пояса;

$\varphi_6$  – коэффициент снижения расчетных сопротивлений при изгибно-крутильной форме потери устойчивости балок, определяемый по прил. 7\* [2] (обычно называемый  $\varphi_6$  – балочный).

Значения коэффициента  $\varphi_6$  в формуле (4.1):

при  $\varphi_1 \leq 0,85$  (работа в упругой стадии)  $\varphi_6 = \varphi_1$ ,

при  $\varphi_1 > 0,85$   $\varphi_6 = 0,68 + 0,21 \cdot \varphi_1$ , но не более 1,0.

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 4.2.

Таблица 4.1

Место приложения нагрузки	Наибольшие значения $l_{ef}/b$ , при которых не требуется расчет на устойчивость прокатных и сварных балок (при $1 \leq h/b < 6$ и $15 \leq b/t \leq 35$ )
К верхнему поясу	$\frac{l_{ef}}{b} = \left[ 0,35 + 0,0032 \cdot \frac{b}{t} + \left( 0,76 - 0,02 \cdot \frac{b}{t} \right) \cdot \frac{b}{h} \right] \cdot \sqrt{\frac{E}{R_y}}$
К нижнему поясу	$\frac{l_{ef}}{b} = \left[ 0,57 + 0,0032 \cdot \frac{b}{t} + \left( 0,92 - 0,02 \cdot \frac{b}{t} \right) \cdot \frac{b}{h} \right] \cdot \sqrt{\frac{E}{R_y}}$
Независимо от уровня приложения нагрузки при расчете участка балки между связями или при чистом изгибе	$\frac{l_{ef}}{b} = \left[ 0,41 + 0,0032 \cdot \frac{b}{t} + \left( 0,73 - 0,016 \cdot \frac{b}{t} \right) \cdot \frac{b}{h} \right] \cdot \sqrt{\frac{E}{R_y}}$
Обозначения, принятые в таблице 4.1: $b$ и $t$ – соответственно ширина и толщина сжатого пояса; $h$ – расстояние (высота) между осями поясных листов.	

Для балок с отношением  $b/t < 15$  в формулах таблицы 4.1 следует принимать  $b/t = 15$ .

#### Устойчивость балок не требуется проверять:

а) при передаче нагрузки через сплошной жесткий настил, непрерывно опирающийся на сжатый пояс балки и надежно с ним связанный (плиты железобетонные из тяжелого, легкого и ячеистого бетона, плоский и профилированный металлический настил, волнистую сталь и т. п.);

б) при отношении расчетной длины балки  $l_{ef}$  к ширине сжатого пояса  $b$ , не превышающем значений, определяемых по формулам табл. 1 (соответствует таблице 8\* [2]) для балок симметричного двутаврового сечения и с более развитым сжатым поясом, для которых ширина растянутого пояса составляет не менее 0,75 ширины сжатого пояса.

При определении значения  $\varphi_6$  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  $\varphi_6$  необходимо вычислить коэффициент перехода от нормативных сопротивлений к критическим напряжениям потери общей устойчивости изгибаемыми элементами  $\varphi_1$  по формуле

$$\varphi_1 = \psi \cdot \frac{J_y}{J_x} \cdot \left( \frac{h}{l_{ef}} \right)^2 \cdot \frac{E}{R_y}, \quad (4.2)$$

где значения  $\psi$  следует принимать по таблице 4.2 (т. 77 [2]) в зависимости от характера нагрузки и параметра  $\alpha$ , который должен вычисляться по формулам таблицы 4.2.

Таблица 4.2 – 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

$$\alpha = 8 \cdot \left( \frac{l_{ef} \cdot t_1}{h \cdot b_f} \right)^2 \cdot \left( 1 + \frac{a \cdot t^3}{b_f \cdot t_1^3} \right), \quad (4.3)$$

где  $t$  – толщина стенки;

$b_f$  и  $t_1$  – ширина и толщина пояса балки;

$h$  – расстояние между осями поясов;

$a = h / 2$ .

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 4.3.

Таблица 4.3

$\frac{M_{Ed}}{M_{b,Rd}} \leq 1,0$	$M_{Ed}$ – расчетный изгибающий момент; $M_{b,Rd}$ – расчетное сопротивление изгибаемого элемента при потере устойчивости по изгибно-крутильной форме
$M_{b,Rd} = \chi_{LT} W_y \frac{f_y}{\gamma_{M1}}$	Расчетное сопротивление изгибаемого элемента при потере устойчивости по изгибно-крутильной форме
$\chi_{LT}$ – 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 4.2). 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.

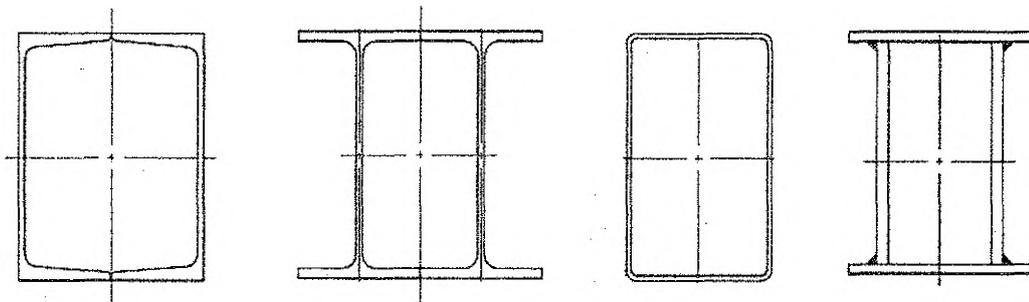


Рисунок 4.2 – Поперечные сечения балок, для которых не требуется проверка устойчивости по изгибно-крутильной форме

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])

$$M_{cr} = C_1 \frac{\pi^2 EI_z}{(k_z L)^2} \left\{ \sqrt{\left( \frac{k_z}{k_w} \right)^2 \frac{I_w}{I_z} + \frac{(k_z L)^2 GI_t}{\pi^2 EI_z}} + (C_2 z_g)^2 - C_2 z_g \right\}, \quad (4.4)$$

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

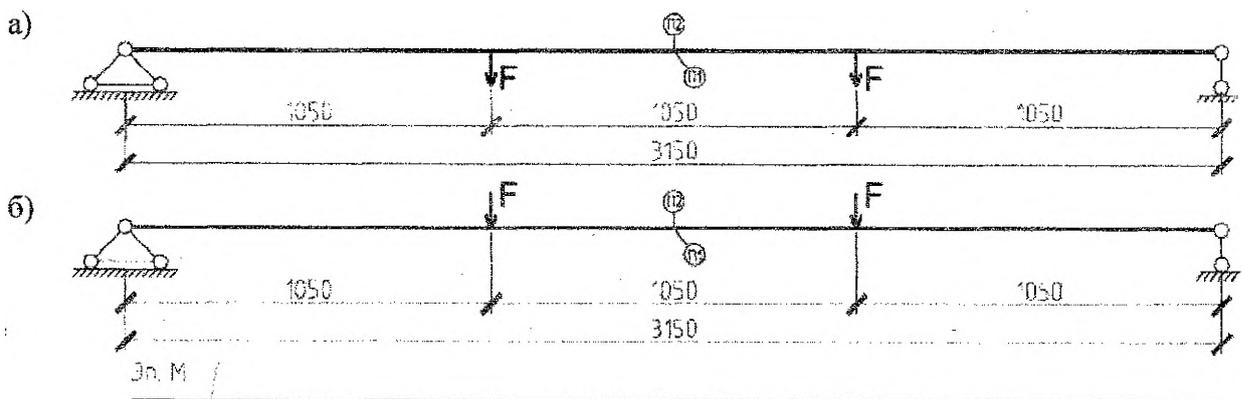
$C_1, C_2$  – коэффициенты, зависящие от внешней нагрузки, действующей на элемент, и условия раскрепления концов элемента;

$k_z$  – коэффициент, учитывающий условия закрепления концов элемента от поворота относительно оси  $z-z$ ;

$k_w$  – коэффициент, учитывающий условия закрепления концов элемента от депланации;

$z_g$  – координата точки приложения внешней нагрузки относительно центра сдвига (изгиба) сечения; координата  $z_g$  принимается положительной, если внешняя нагрузка действует по направлению к центру сдвига (изгиба) сечения.

#### 4.2 Расчетная часть



а) нагрузка приложена к нижнему поясу;

б) нагрузка приложена к верхнему поясу

Рисунок 4.3 – Расчётная схема двутавровой сварной балки





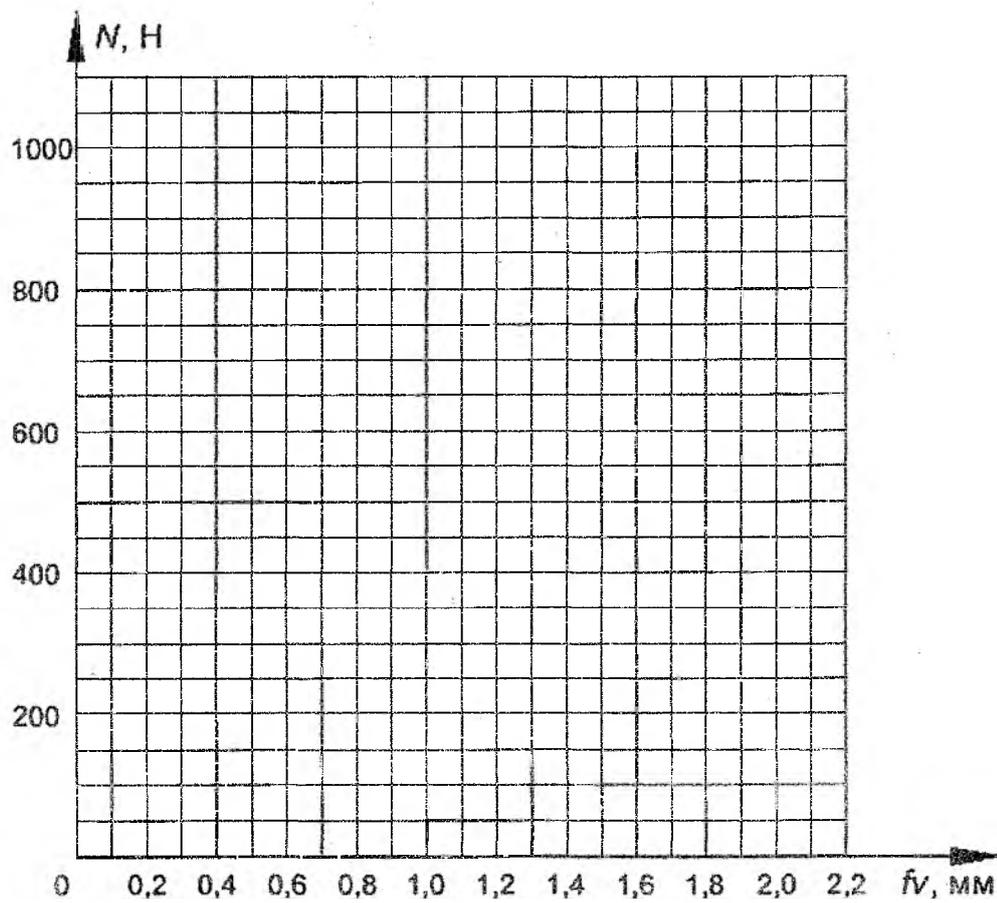


Рисунок 4.5 – Зависимость вертикальных перемещений от нагрузки

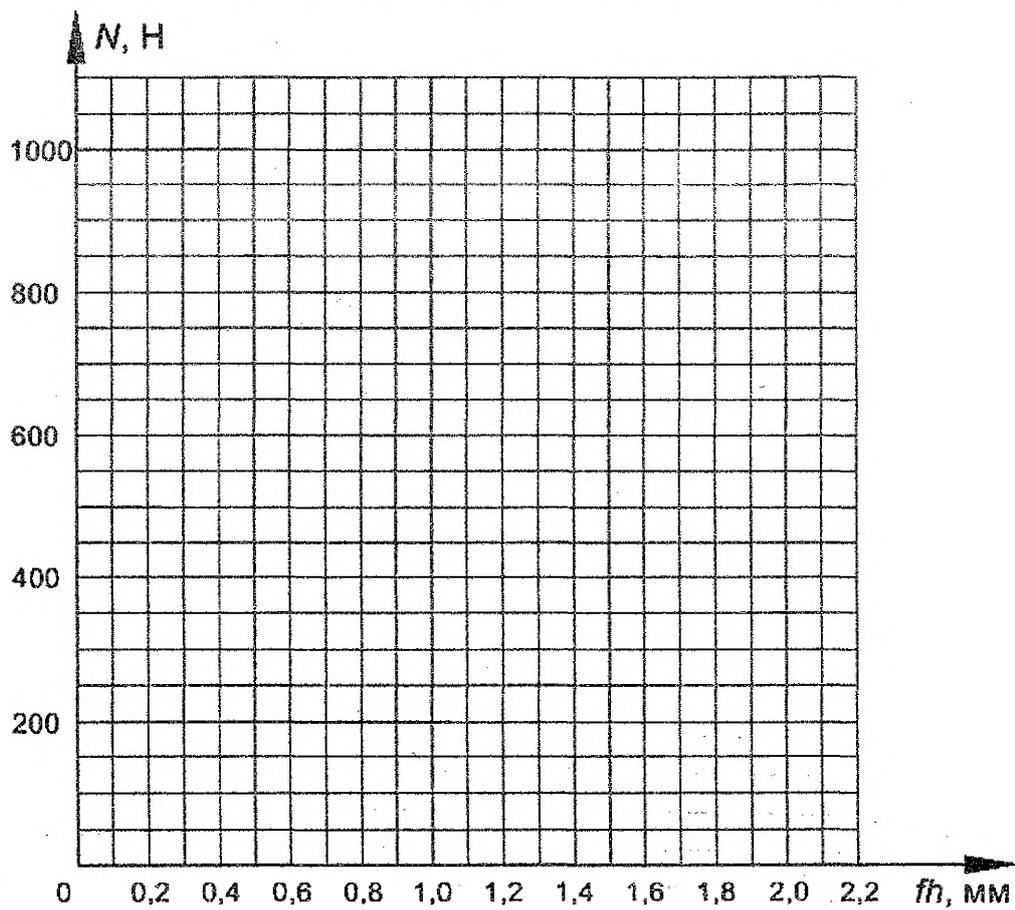


Рисунок 4.6 – Зависимость горизонтальных перемещений от нагрузки

#### 4.4 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. Строительные нормы и правила. Нормы проектирования. Стальные конструкции : СНиП II-23-81\*. – М. : Госстрой СССР : ЦНИИП, 1990. – 96 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.

Учебное издание

**Составители:**

*Шурин Андрей Брониславович  
Зинкевич Игорь Владимирович  
Жданов Дмитрий Александрович  
Ласкевич Ирина Геннадьевна*

# ЖУРНАЛ

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

*Текст печатается в авторской редакции,  
орфографии и пунктуации*

Ответственный за выпуск: Шурин А.Б.  
Редактор: Боровикова Е.А.  
Компьютерная вёрстка: Шурин А.Б.

---

Подписано в печать 27.01.2021 г. Формат 60x84 <sup>1</sup>/<sub>8</sub>. Бумага «Performer».  
Гарнитура «Times New Roman». Усл. печ. л. 3,26. Уч. изд. л. 3,50. Заказ № 28. Тираж 7 экз.  
Отпечатано на ризографе учреждения образования «Брестский государственный  
технический университет». 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.