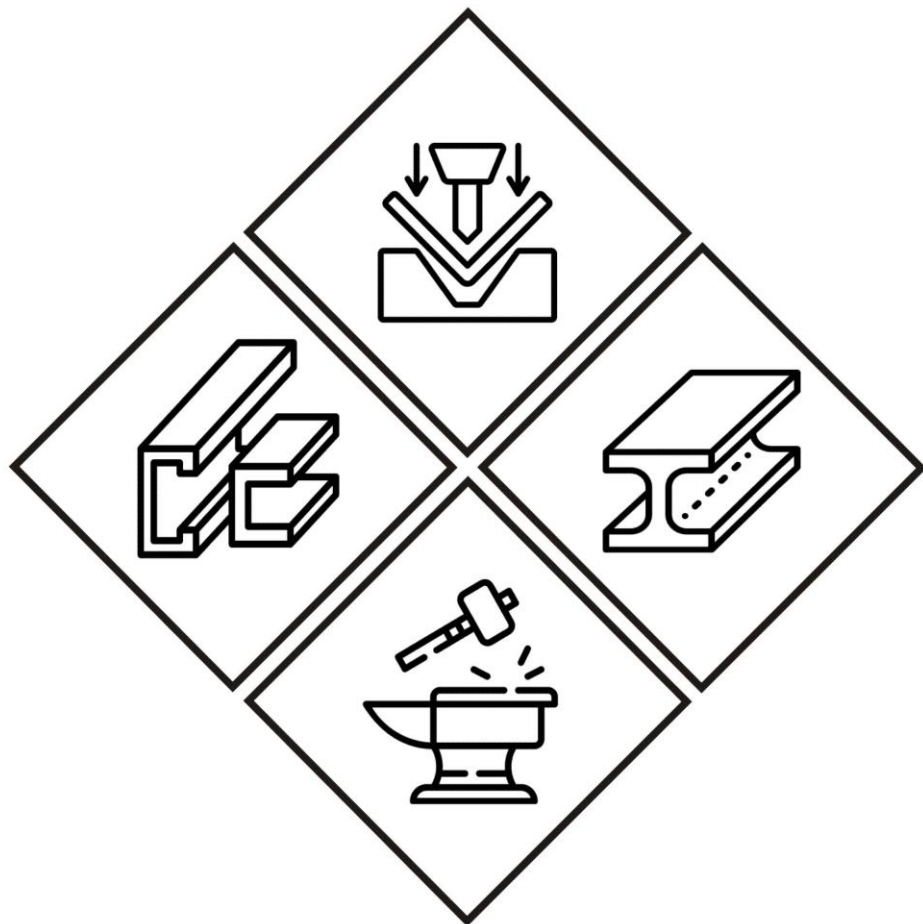


# НАПРУЖЕННЯ ТА ДЕФОРМАЦІЇ В МЕТАЛАХ



**Методичні рекомендації до лабораторних робіт з дисципліни  
здобувачам першого (бакалаврського) рівня вищої освіти  
спеціальності «Матеріалознавство»**

Хмельницький національний університет

## **НАПРУЖЕННЯ ТА ДЕФОРМАЦІЇ В МЕТАЛАХ**

*Методичні рекомендації до лабораторних робіт з дисципліни  
здобувачам першого (бакалаврського) рівня вищої освіти  
спеціальності 132 «Матеріалознавство»*

*Затверджено на засіданні  
кафедри трибології, автомобілів  
та матеріалознавства.  
Протокол № 1 від 22.08.2022*

Хмельницький 2022

Напруження та деформації в металах : методичні рекомендації до лабораторних робіт з дисципліни здобувачам першого (бакалаврського) рівня вищої освіти спеціальності 132 «Матеріалознавство» / С. Ф. Посонський. Хмельницький : ХНУ, 2022. 36 с.

Укладач: Посонський С. Ф., канд. техн. наук, доц.

Відповідальний за випуск: Диха О. В., д-р техн. наук, проф.

Редактор-коректор: Яремчук В. С.

Технічне редагування і верстка: Карпанасюк В. П.

Макетування та друк здійснено редакційно-видавничим відділом Хмельницького національного університету (м. Хмельницький, вул. Інститутська, 7/1). Підп. до друку 17.10.2022. Зам. № 126/22, тир. 50 прим., 2022.

© ХНУ, 2022

## Вступ

Дисципліна «Напруження та деформації в металах» займає важливе місце в циклі дисциплін з підготовки бакалаврів за спеціальністю 132 «Матеріалознавство». **Мета дисципліни** – засвоєння теоретичних основ та формування практичних навичок використання методик визначення напружень і деформацій в металах.

**Завданнями дисципліни є:**

– ознайомлення здобувачів з теоретичними основами виникнення напружень та деформацій в металах;

– формування у них здатності використовувати у професійній діяльності методи визначення та розрахунку напружень і деформацій в металах, визначати засоби запобігання та усунення напружень та деформацій в металах та металевих конструкціях.

Дисципліна має за мету сформувати у здобувачів вищої освіти такі **компетентності** та **результати** навчання:

– здатність застосовувати сучасні методи визначення та розрахунку напружень і деформацій в металах;

– формування практичних навичок способів запобігання та усунення напружень та деформацій в металах та металевих конструкціях;

– застосування сучасних методів виявлення, попередження, зменшення та усунення напружень та деформацій в металах;

– використання новітніх досягнень науки і техніки при розробці ефективних способів усунення напружень та деформацій в металах та металевих конструкціях.

**Загальні методичні поради.** Глибоке вивчення здобувачем теоретичного матеріалу є головною передумовою виконання лабораторної роботи. Ґрунтовно опанувавши теоретичні аспекти, він зможе проаналізувати, зрозуміти та пояснити отримані результати. Ступінь підготовки до виконання лабораторної роботи перевіряється шляхом усного опитування на початку заняття. Здобувач, який не засвоїв необхідного теоретичного матеріалу, до виконання лабораторної роботи не допускається. В результаті виконання роботи складається звіт.

Звіт з лабораторної роботи має містити: назву, її мету, вихідні дані, детальний розрахунок необхідних показників, результати та висновки. Здобувач, який не підготував звіт з лабораторної роботи, до її захисту не допускається. Захист роботи здійснюється на наступному занятті у формі усного опитування, що найбільш об'єктивно оцінює якість засвоєних знань та здатність до критичного мислення. Для самоконтролю знань до кожної роботи розроблено орієнтовний перелік питань. Здобувачі, які успішно виконали всі заплановані лабораторні роботи та їх захистили, допускаються до підсумкового семестрового контролю з дисципліни.

Оцінку **«відмінно»**, отримує здобувач за грамотні, логічні та повні відповіді на контрольні питання та якісне оформлення роботи (схеми, графіки, епюри).

Оцінку **«добре»**, отримує здобувач за повні відповіді на контрольні запитання з деякими неточностями або похибками та якісне оформлення роботи (схеми, графіки, епюри).

Оцінку **«задовільно»**, отримує здобувач за не повні відповіді на контрольні запитання з неточностями, похибками та якісне оформлення роботи (схеми, графіки, епюри).

Оцінку **«незадовільно»**, отримує здобувач за абсолютно неправильні відповіді на контрольні запитання та неякісне оформлення роботи (схеми, графіки, епюри).

## Лабораторна робота 1.

### Визначення геометричних характеристик плоского перерізу

**Мета:** опанувати методику визначення координат центру ваги, статичних моментів, моментів інерції та моментів опору для плоского перерізу.

**Матеріали та інструменти:** креслярське приладдя, вимірювальні інструменти, інженерний калькулятор.

#### Порядок виконання

1. Побудова ескізу плоского перерізу згідно з вихідними даними індивідуального завдання (див. рис. 1.4 та табл. 1.1).
2. Поділ плоского перерізу на прості перерізи прямокутників.
3. Послідовне визначення геометричних характеристик для кожного перерізу.
4. Визначення координат центрів ваги плоского перерізу з наступним визначенням його геометричних характеристик.

#### Теоретичні відомості і методичні рекомендації

**Геометричні характеристики** – числові величини (параметри), що визначають розміри, форму, розташування поперечного перерізу однорідного за пружними властивостями деформуючого елемента конструкції (і, як наслідок, що характеризують опір елемента різним видам деформації).

**Площа плоских перерізів.** Площа перерізу є однією з геометричних характеристик, що використовується, як правило, у розрахунках на розтягання і стиск. При розрахунках на кручення, згин, а також на стійкість використовуються більш складні геометричні характеристики: статичні моменти, моменти інерції, моменти опору.

Площа, обмежена довільною кривою, є:

$$F = \int dF. \quad (1.1)$$

Для обчислення геометричних характеристик складних перерізів, що складаються з найпростіших фігур, їх потрібно розбити на кінцеве число  $n$  найпростіших частин. У цьому випадку:

$$F = \sum_{i=1}^n f_i. \quad (1.2)$$

Відзначимо дві важливих властивості: площа завжди позитивна і не залежить від вибору системи координат.

Для перерізів, складених із профілів стандартного прокату, площа кожного профілю та інші необхідні для розрахунків розміри приймаються за таблицями ДСТУ на прокатну сталь.

**Статичні моменти перерізу.** Статичним моментом плоского перерізу щодо деякої осі називається, узята по всій його площі, сума добутків площ елементарних площадок  $dF$  на їхні відстані від цієї осі.

$$S_x = \int_F y dF, \quad S_y = \int_F x dF; \quad (1.3)$$

$$S_x = y_c F, \quad S_y = x_c F, \quad (1.4)$$

де  $y_c$  – відстань від центру ваги всього плоского перерізу до осі  $x$ ;  $x_c$  – відстань від центру ваги всього перерізу до осі  $y$ .

Статичний момент складного перерізу щодо деякої осі дорівнює сумі статичних моментів всіх частин цього перерізу щодо тієї ж осі:

$$S_x = F_1 y_1 + F_2 y_2 + \dots + F_n y_n = \sum_{i=1}^n F_i y_i, \quad (1.5)$$

$$S_y = F_1 x_1 + F_2 x_2 + \dots + F_n x_n = \sum_{i=1}^n F_i x_i,$$

де  $F_1, F_2, \dots, F_n$  – площі простих елементів, з яких складається складний переріз;  $x_1; y_1$ ,  $x_2; y_2$ ,  $x_i; y_i$ ,  $x_n; y_n$ , – координати центрів ваги простого плоского перерізу щодо обраних осей.

Положення центру ваги плоскої фігури визначається за наступними співвідношеннями:

$$x_c = \frac{S_y}{F} = \frac{\sum_{i=1}^n F_i x_i}{\sum_{i=1}^n F_i}; \quad y_c = \frac{S_x}{F} = \frac{\sum_{i=1}^n F_i y_i}{\sum_{i=1}^n F_i}. \quad (1.6)$$

Статичний момент перерізу дорівнює нулю щодо будь-якої осі, що проходить через центр ваги цього перерізу.

Якщо плоский перетин має вісь симетрії, то ця вісь завжди проходить через центр ваги плоского перерізу, а тому статичний момент перерізу щодо осі симетрії завжди дорівнює нулю.

Якщо плоский перетин має дві осі симетрії, то центр ваги перерізу лежить на перетині цих осей симетрії.

**Моменти інерції плоских перерізів простої форми.** На додаток до статичних моментів у системі координат  $xOy$  розглянемо три інтегральних вирази:

$$I_x = \int_F y^2 dF, \quad I_y = \int_F x^2 dF, \quad I_{xy} = \int_F xy dF. \quad (1.7)$$

Перші два інтегральних вирази називаються осьовими моментами інерції щодо осей  $x$  і  $y$ , а третє – відцентровим моментом інерції перерізу щодо осей  $x$ ,  $y$ .

Для перерізів, що складаються з  $n$ -числа областей (рис. 1.1), формули (1.7) набудуть вигляду:

$$\begin{aligned} I_x &= \sum_{k=1}^n \int_{F_k} y^2 dF = \sum_{k=1}^n I_x^k, \\ I_y &= \sum_{k=1}^n \int_{F_k} x^2 dF = \sum_{k=1}^n I_y^k, \\ I_{xy} &= \sum_{k=1}^n \int_{F_k} xy dF = \sum_{k=1}^n I_{xy}^k. \end{aligned} \quad (1.8)$$

Розглянемо, як змінюються моменти інерції перерізу при паралельному переносі координатних осей  $x$  і  $y$  (рис. 1.2). Перетворюючи формулу (1.7), отримаємо:

$$\begin{aligned} I_x &= I_{x_1} + 2bS_{x_1} + b^2F, \\ I_y &= I_{y_1} + 2aS_{y_1} + a^2F, \\ I_{xy} &= I_{x_1y_1} + aS_{x_1} + bS_{y_1} + abF. \end{aligned} \quad (1.9)$$

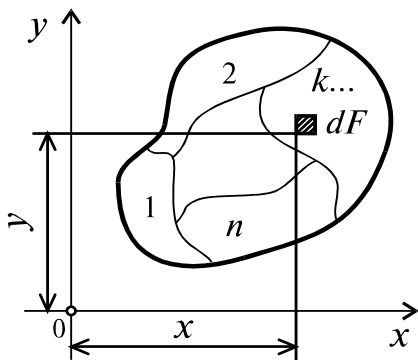


Рис. 1.1 – Вигляд перерізу з кількістю областей  $n$

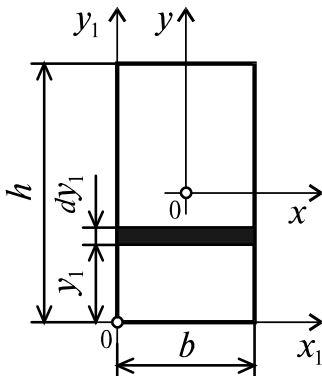


Рис. 1.2 – Паралельний перенос координатних осей

Якщо припустити, що осі  $x_1$  і  $y_1$  (рис. 1.2) є центральними, тоді  $S_{x_1} = S_{y_1} = 0$  і вирази (1.9) спрощуються та приймають вигляд:

$$I_x = I_{x_1} + b^2F; \quad I_y = I_{y_1} + a^2F, \quad I_{xy} = I_{x_1y_1} + abF \quad (1.10)$$



де  $I_{x1}$  і  $I_{y1}$  – осьові моменти інерції прямокутника щодо осей  $x$  і  $y$ , що проходять через його центр ваги,  $a, b$  – відстані від центру ваги перерізу до координатних осей (рис. 1.3).

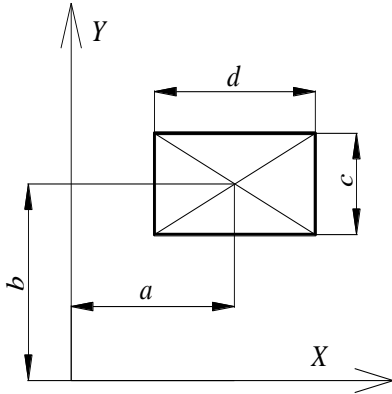


Рис. 1.3 – Відстані від центру ваги перерізу до координатних осей

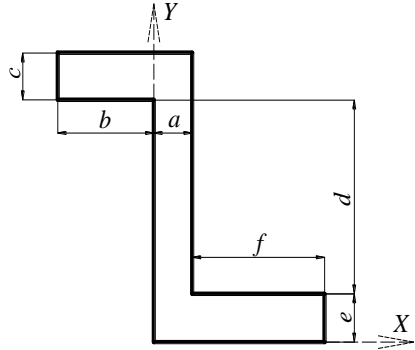


Рис. 1.4 – Схема перерізу

Відцентровий момент інерції перерізу щодо осей, хоча б одна з яких є вісю симетрії, дорівнює нулю.

$$I_{x1} = \frac{c^3 d}{12}, \quad I_{y1} = \frac{cd^3}{12}. \quad (1.11)$$

Осі називаються центральними, якщо вони проходять через центр ваги фігури, тобто статичні моменти щодо цих осей дорівнюють нулю. Головними осями інерції фігури називаються осі щодо яких відцентровий момент інерції дорівнює нулю. Якщо фігура має хоча б одну вісь симетрії, то ця вісь є головною вісю.

**Моменти опору.** Осьовий момент опору щодо розглянутої осі – величина дорівнює відношенню моменту інерції щодо тієї ж осі до відстані найбільш віддаленої точки від цієї осі:

$$W_x = \frac{I_x}{y_{\max}}, \quad W_y = \frac{I_y}{x_{\max}}, \quad W_\rho = \frac{I_\rho}{\rho_{\max}}. \quad (1.12)$$

**Радіуси інерції.** Радіусом інерції плоскої фігури щодо будь якої осі, називається довжина перпендикуляра від цієї осі:

$$i_x = \sqrt{\frac{I_x}{F}}, \quad i_y = \sqrt{\frac{I_y}{F}}. \quad (1.13)$$

**Таблиця 1.1 – Варіанти індивідуальних завдань**

| Варіант | Геометричний розмір, мм |     |     |     |     |     |
|---------|-------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|
|         | $f$                     | $e$ | $d$ | $c$ | $b$ | $a$ |
| 1       | 50                      | 20  | 200 | 8   | 100 | 40  |
| 2       | 60                      | 18  | 190 | 10  | 50  | 42  |
| 3       | 70                      | 16  | 180 | 12  | 60  | 44  |
| 4       | 80                      | 14  | 170 | 14  | 70  | 46  |
| 5       | 90                      | 12  | 160 | 16  | 80  | 48  |
| 6       | 100                     | 14  | 150 | 18  | 90  | 50  |
| 7       | 50                      | 16  | 150 | 20  | 100 | 52  |
| 8       | 60                      | 18  | 160 | 22  | 40  | 54  |
| 9       | 70                      | 20  | 170 | 24  | 50  | 56  |
| 10      | 80                      | 22  | 180 | 26  | 60  | 8   |
| 11      | 90                      | 24  | 190 | 28  | 70  | 10  |
| 12      | 100                     | 26  | 200 | 30  | 80  | 12  |
| 13      | 50                      | 28  | 200 | 32  | 90  | 14  |
| 14      | 60                      | 30  | 190 | 34  | 100 | 16  |
| 15      | 70                      | 20  | 180 | 36  | 50  | 18  |
| 16      | 80                      | 18  | 170 | 38  | 60  | 20  |
| 17      | 90                      | 16  | 160 | 40  | 70  | 22  |
| 18      | 100                     | 14  | 150 | 42  | 80  | 24  |
| 19      | 50                      | 12  | 150 | 44  | 40  | 26  |
| 20      | 60                      | 14  | 160 | 46  | 50  | 28  |
| 21      | 70                      | 16  | 170 | 48  | 60  | 30  |
| 22      | 80                      | 18  | 180 | 50  | 70  | 32  |
| 23      | 90                      | 20  | 190 | 52  | 80  | 34  |
| 24      | 100                     | 22  | 200 | 54  | 90  | 36  |
| 25      | 40                      | 30  | 190 | 56  | 100 | 38  |

### Контрольні питання

1. Що називають геометричними характеристиками будь-якої фігури?
2. Що таке осьовий момент опору деталі відносно розглянутої осі?
3. Що називають радіусом інерції плоскої фігури щодо будь якої осі?
4. Що називають моментами інерції плоских перерізів простої форми?
5. В якому випадку відцентровий момент інерції перерізу щодо осей, дорівнює нулю?

*Література:* [1, с. 12–30; 2, с. 15–20]

## *Лабораторна робота 2.* **Визначення напружень та деформацій у стикових зварних з'єднаннях**

---

**Мета:** опанувати методику визначення напружень та деформацій у стикових зварних з'єднаннях.

**Матеріали та інструменти:** креслярське приладдя, вимірювальні інструменти, інженерний калькулятор.

### **Порядок виконання роботи**

1. Побудова ескізів зварних з'єднань згідно вихідних даних індивідуального завдання (див. рис. 2.1–2.4 та табл. 2.1).
2. Визначення допустимих напружень для зварного шва  $\sigma'$  з врахуванням матеріалу деталей, що з'єднуються, виду зварювання та типу зовнішнього навантаження (додаток А).
3. Визначення діючих напружень в зварному шві для кожного стикового з'єднання з послідуною перевіркою умови міцності.
4. Визначення максимально допустимого зовнішнього навантаження на зварний шов для кожного зварного з'єднання з врахуванням умови міцності.
5. Побудова епюри напружень в зварних швах.

### **Теоретичні відомості і методичні рекомендації**

Стикові зварні шви, що сприймають повздовжні сили розтягання або стиску, згинальні моменти та поперечні сили зрізу призначають прямими, косими та кільцевими залежно від способу зварювання та прийнятих методах контролю якості зварних швів. Залежно від зовнішнього навантаження в зварних швах виникають нормальні  $\sigma_\phi$  чи дотичні  $\tau_\phi$  напруження. При виникненні нормальних і дотичних напружень одночасно, для розрахунків застосовують еквівалентні напруження  $\sigma_{\text{екв}}$ .

Умова міцності стикових швів залежить від виду зовнішнього навантаження та виконання зварного шва. *Для прямих швів* діючі напруження в шві та перевірка умови міцності визначаються за наступними виразами при:

– розтяганні (рис. 2.1):

$$\sigma_\phi = \frac{P}{F_\phi} = \frac{P}{\delta_\phi L_\phi} \leq \sigma'_{\phi p}, \quad (2.1)$$

– стиску (див. рис. 2.1):

$$\sigma_\phi = \frac{P}{F_\phi} = \frac{P}{\delta_\phi L_\phi} \leq \sigma'_{\phi c}, \quad (2.2)$$

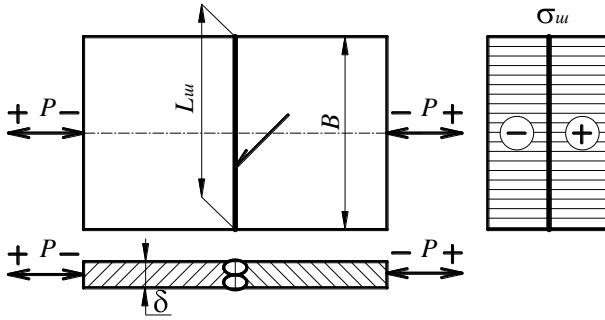


Рис. 2.1 – Стикове зварне з'єднання при дії сили розтяганні або стиску

– згині (рис. 2.2):

$$\sigma_{\phi} = \frac{M}{W_{\phi}} = \frac{6M}{\delta_{\phi} L_{\phi}^2} \leq \sigma'_{p}, \quad (2.3)$$

– зрізі (див. рис. 2.2):

$$\tau_{\phi} = \frac{QS_{\phi}}{I_{\phi} \delta_{\phi}} \leq \tau'_{p}. \quad (2.4)$$

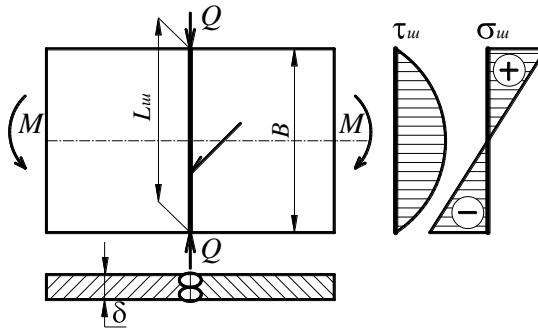


Рис. 2.2 – Стикове зварне з'єднання при дії сили зрізу та моменту згину

*Косий шов* (див. рис. 2.3):

$$\sigma_{\hat{a}\hat{a}} = \sqrt{\sigma_{\phi}^2 + 3\tau_{\phi}^2} \leq \sigma'_{p}, \quad (2.5)$$

$$\sigma_{\phi} = \frac{P \sin \alpha}{\delta_{\phi} L_{\phi}} \leq \sigma'_{p}, \quad \tau_{\phi} = \frac{P \cos \alpha}{L_{\phi} \delta_{\phi}} \leq \tau'_{p}. \quad (2.6)$$

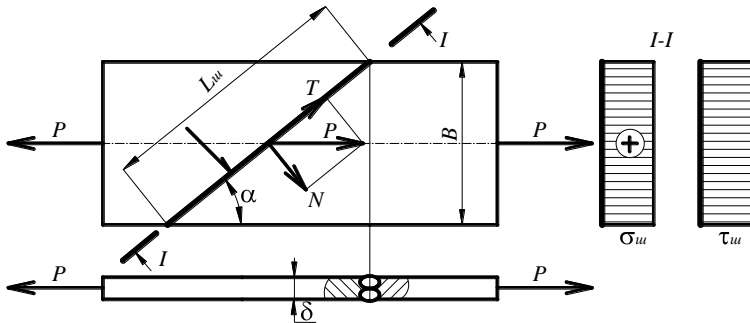


Рис. 2.3 – Стикове зварне з'єднання з косим швом при дії сили розтягання

Якщо навантаження прикладене під кутом до повздовжньої осі пластини (рис. 2.4), то силу розкладають на складові: нормальну  $N$  та тангенціальну  $T$  і окремо для кожної визначають напруження в шві. Напруження порівнюють між собою, та перевіряють умову міцності за максимальним з них.

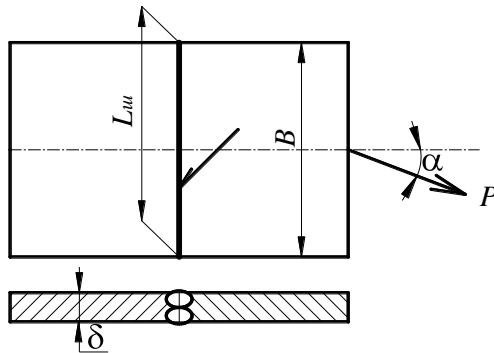


Рис. 2.4 – Стикове зварне з'єднання при дії сили, що прикладена під кутом

У формулах (2.1)–(2.6) прийняті наступні позначення:

- $P, M, Q$  – зовнішні навантаження (відповідно, повздовжня сила, момент згину, поперечна сила), що діють у перерізі;
- $F_\phi, W_\phi, I_\phi$  – відповідно площа, момент опору та момент інерції перерізу зварного шва;
- $S_\phi$  – статичний момент відносно нейтральної осі частини перерізу зварного шва, розташованої вище (нижче) рівня волокон, що розглядаються;
- $L_\phi$  – довжина зварного шва;
- $B, \delta$  – відповідно ширина та товщина пластин.

Розрахункова довжина зварного шва  $L_{ш}$  приймається такою, що дорівнює фактичній  $L_{ф}$  коли кінці зварного шва виведені на технологічні планки. В іншому випадку, розрахункова довжина шва зменшується на 10 мм.

Розрахункова товщина зварного шва  $\delta_{ш}$  приймається рівній товщині пластини  $\delta$ , якщо зварний шов виконаний з повним проваром на всю товщину.

$$S_{\phi} = \frac{\delta_{\phi} L_{\phi}^2}{8}, \quad I_{\phi} = \frac{\delta_{\phi} L_{\phi}^3}{12}. \quad (2.7)$$

Руйнування стикового зварного шва може відбутися безпосередньо по шву, по місцю сплавлення основного металу з металом шва або по перерізу деталі в зоні термічного впливу. У розрахунках цю невизначеність беруть до уваги відповідним вибором допустимого напруження  $\sigma'$  і  $\tau'$ , та з урахуванням властивостей матеріалу деталей, що з'єднуються (додаток А).

**Таблиця 2.1 – Варіанти індивідуальних завдань**

| Варіант | B, мм | δ, мм | α, град | P, Q, кН | [σ], МПа | M, Нм | Матеріал пластин | Вид зварювання |
|---------|-------|-------|---------|----------|----------|-------|------------------|----------------|
| 1       | 10    | 4     | 30      | 300      | 330      | 5     | ВСт2кп           | Ручне          |
| 2       | 20    | 5     | 35      | -400     | -        | 6     | АВТ1             | Автоматичне    |
| 3       | 30    | 6     | 40      | 500      | -        | 7     | АМг              | Напівавтомат.  |
| 4       | 40    | 7     | 45      | -150     | 370      | 8     | ВСт3кп           | Ручне          |
| 5       | 50    | 8     | 50      | 250      | -        | 9     | В92Т             | Автоматичне    |
| 6       | 90    | 9     | 55      | -350     | 420      | 10    | 15Г              | Напівавтомат.  |
| 7       | 50    | 10    | 60      | 450      | 450      | 5     | 20Г              | Ручне          |
| 8       | 30    | 11    | 65      | -550     | -        | 6     | АМг6             | Автоматичне    |
| 9       | 45    | 12    | 70      | 50       | 330      | 5     | ВСт2кп           | Напівавтомат.  |
| 10      | 55    | 13    | 75      | 300      | 370      | 4     | ВСт3кп           | Ручне          |
| 11      | 80    | 14    | 80      | 400      | -        | 9     | АМг              | Автоматичне    |
| 12      | 20    | 15    | 30      | 500      | 330      | 10    | ВСт2кп           | Напівавтомат.  |
| 13      | 30    | 16    | 35      | -150     | 330      | 5     | ВСт2кп           | Ручне          |
| 14      | 40    | 20    | 40      | -250     | -        | 6     | АМц              | Автоматичне    |
| 15      | 50    | 20    | 45      | 350      | 370      | 8     | ВСт3кп           | Напівавтомат.  |
| 16      | 15    | 4     | 50      | -450     | 370      | 5     | ВСт3кп           | Ручне          |
| 17      | 25    | 5     | 55      | 550      | -        | 9     | АВТ1             | Автоматичне    |
| 18      | 35    | 6     | 60      | 50       | -        | 9     | АМг              | Напівавтомат.  |
| 19      | 45    | 7     | 65      | -300     | 450      | 5     | 20Г              | Ручне          |
| 20      | 55    | 8     | 70      | 400      | -        | 6     | В92Т             | Автоматичне    |
| 21      | 50    | 9     | 75      | 500      | -        | 7     | АМц              | Напівавтомат.  |
| 22      | 80    | 10    | 80      | -150     | 370      | 8     | ВСт3кп           | Ручне          |
| 23      | 20    | 11    | 15      | 250      | 420      | 10    | 15Г              | Автоматичне    |
| 24      | 10    | 12    | 30      | -350     | 450      | 5     | 20Г              | Напівавтомат.  |
| 25      | 60    | 13    | 45      | 450      | -        | 4     | В92Т             | Ручне          |

## Контрольні питання

1. В яких місцях металевого виробу відбувається руйнування стикового зварного шва?
2. У якому випадку розрахункова довжина зварного шва приймається такою, що дорівнює фактичній?
3. Яким чином відбувається визначення напружень в металі, якщо навантаження прикладене під кутом до повздовжньої осі металеві пластини?
4. Від яких факторів залежить умова міцності стикових швів?
5. Які види напружень розрізняють в металевих виробках, від дії на них зовнішнього навантаження?

*Література:* [2, с. 35–40; 3, с. 5–12; 4, с. 128–130]

**Лабораторна робота 3.**  
**Визначення напружень та деформацій**  
**у кутових зварних з'єднаннях**

---

**Мета:** опанувати методику визначення напружень та деформацій у кутовому зварному з'єднанні.

**Матеріали та інструменти:** креслярське приладдя, вимірювальні інструменти, інженерний калькулятор.

**Порядок виконання роботи**

1. Побудова ескізів зварних з'єднань згідно вихідних даних індивідуального завдання (див. рис. 3.1–3.6 та табл. 3.1). Зовнішнє навантаження, матеріал та вид зварювання обираємо з таблиці 2.1.

2. Визначення допустимих напружень для зварного шва  $\sigma'$  з врахуванням матеріалу деталей, що з'єднуються, виду зварювання та типу зовнішнього навантаження (додаток А).

3. діючих напружень в зварному шві для кожного зварного з'єднання з послідуною перевіркою умови міцності.

4. Визначення максимально допустимого зовнішнього навантаження на зварний шов для кожного зварного з'єднання з врахуванням умови міцності.

5. Побудова епюри напружень в зварних швах.

**Теоретичні відомості і методичні рекомендації**

Кутові зварні шви виконують за один або декілька проходів, автоматичним, напівавтоматичним чи ручним зварюванням, що призводить до різної глибини провару.

Площа зрізу зварного кутового шва залежить від розрахункової товщини  $\delta_p$  і довжини зварного шва  $L_\phi$ .

Розрахункова товщина залежить від способу зварювання та катету шва.

$$\delta_p = \beta k, \quad (3.1)$$

де  $k$  – розрахунковий катет зварного шва, що дорівнює катету вписаного прямокутного трикутника;  $\beta = 1$  – для однопрохідного автоматичного зварювання;  $\beta = 0,8$  – для однопрохідного напівавтоматичного зварювання;  $\beta = 0,7$  – для ручного зварювання і багато прохідного автоматичного та напівавтоматичного.

Інколи при розрахунках  $\beta$  приймають 0,7, незалежно від виду зварювання.



При дії статичних навантажень зрізу, а також розтягувальних сил кутові зварні шви розраховуються за умовою:

$$\tau_{\phi} = \frac{D}{\delta_p L_{\phi}} \leq \tau' . \quad (3.2)$$

Довжина зварного шва не повинна бути меншою  $4\delta_p$  або 30 мм.

За менших значень неможливо забезпечити якісне зварне з'єднання.

Необхідно враховувати, що в з'єднаннях з фланговими швами (рис. 3.1) довжина шва не повинна перевищувати 60 катетів. Але ця умова не стосується швів, які рівномірно навантажені за всією довжиною (поясні шви балок). В цьому випадку умова міцності матиме вигляд:

$$\tau_{\phi} = \frac{D}{\delta_p 2L_{\phi}} \leq \tau' . \quad (3.3)$$

Величина одностороннього напуску  $C$  у зварних з'єднаннях з лобовими швами приймається  $C \geq 4\delta$ . Якщо виконують комбіноване зварне з'єднання і всі шви мають однаковий катет (рис. 3.2) то умова міцності зберігається. Тоді під довжиною зварного шва розуміють довжину периметра шва:

$$L_{\phi} = 2L_1 + 2L_2 + L_3 \quad (3.4)$$

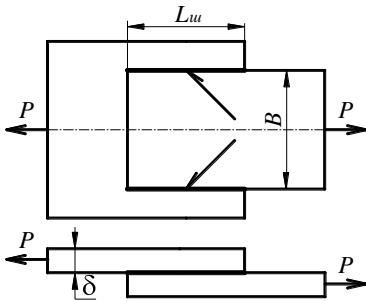


Рис. 3.1 – Зварне з'єднання з фланговими швами

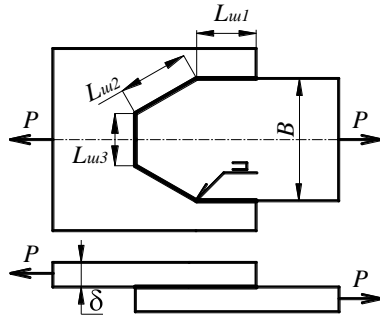


Рис. 3.2 – Комбіноване напунктове зварне з'єднання

Деяку особливість мають розрахунки кутових зварних швів за допомогою яких закріплюється кутник під дією поздовжньої сили (рис. 3.3). Оскільки центр ваги перерізу кутника знаходиться не посередині ширини елемента, то шов, що розташований ближче до центру ваги, сприймає більше навантаження. Вважається, що зусилля на шви обернено пропорційні відстаням до центру ваги перерізу та визначаються за формулами:

$$P_1 = P \frac{c}{b}, \quad P_2 = P \frac{a}{b} . \quad (3.5)$$

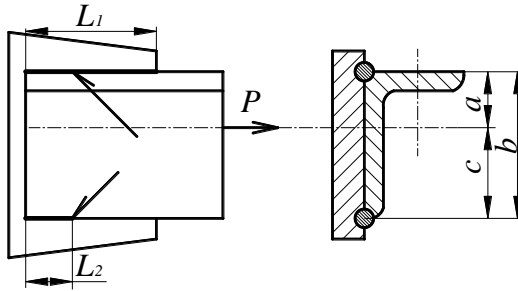


Рис. 3.3 – Зварне з'єднання кутника з кутовими швами

Відповідно довжини флангових швів:

$$L_1 = L_1 + L_2 \frac{c}{b}, \quad L_2 = L_1 + L_2 \frac{a}{b}. \quad (3.6)$$

При розрахунках таких з'єднань відношення розмірів  $a, b, c$  відіграють важливу роль. Для рівнобічного кутника:  $c/b=0,7$  та  $a/b=0,3$ ; нерівнобічного кутника привареного вузькою полицею:  $c/b=0,75$  та  $a/b=0,25$ ; нерівнобічного кутника привареного широкою полицею:  $c/b=0,65$  та  $a/b=0,35$ .

Таврові з'єднання, що працюють на розтягання розраховують залежно від способу зварювання. При ручному зварюванні умова міцності зварного з'єднання має вигляд:

$$\tau_{\phi} = \frac{P}{2\delta_p L_{\phi}} = \frac{P}{2 \cdot 0,7kL_{\phi}} \leq \tau' . \quad (3.7)$$

При автоматичному зварюванні з повним проваром таврове з'єднання розраховують аналогічно стиковим, а умова міцності з'єднання має вигляд:

$$\sigma_{\phi} = \frac{P}{F_{\phi}} = \frac{P}{\delta_{\phi} L_{\phi}} \leq \sigma' . \quad (3.8)$$

При розрахунках зварних з'єднань з кутовими швами, що сприймають моменти згину розрізняють два випадки: 1) момент згину сприймає один зварний шов (рис. 3.4); 2) момент згину сприймають два шви (рис. 3.5).

Для першого випадку умова міцності:

$$\tau_{\phi} = \frac{M}{W_{\phi}} = \frac{6M}{\delta_p L_{\phi}^2} \leq \tau' . \quad (3.9)$$

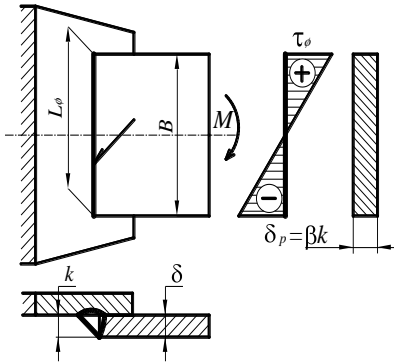


Рис. 3.4 – Зварне з'єднання з лобовим швом при дії згинального моменту

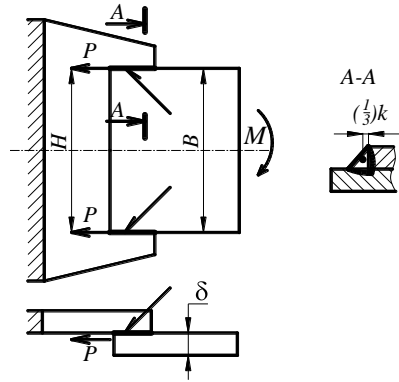


Рис. 3.5 – Зварне з'єднання з фланговими швами при дії згинального моменту

При розрахунках зварного з'єднання для другого випадку визначають сили, що сприймають зварні шви:

$$P = \frac{M}{H}, \quad (3.10)$$

де  $H = B + \frac{2}{3}k$  – плече реактивної пари, яке дорівнює відстані між центрами ваги зварних швів. Тоді умова міцності має вигляд:

$$\tau_{\phi} = \frac{P}{\delta_p L_{\phi}} \leq \tau'. \quad (3.11)$$

У зварному шві на який діє поперечна сила  $P$ , прикладена на відстані  $a$  від осі шва (рис. 3.6), виникають напруження зрізу  $\tau_{\phi}^P$  від сили, які направлені вздовж шва, та напруження зрізу  $\tau_{\phi}^M$  від моменту пари сил  $M = Pa$ , які направлені перпендикулярно до осі зварного шва.

Результуючі дотичні напруження в зварному шві  $\tau_{\delta\hat{\alpha}\zeta}$  визначають за правилом додавання векторів:

$$\tau_{\delta\hat{\alpha}\zeta} = \sqrt{\tau_{\phi}^j{}^2 + \tau_{\phi}^D{}^2}. \quad (3.12)$$

Компоненти  $\tau_{\phi}^P$  і  $\tau_{\phi}^M$  розраховують за формулами (3.2) і (3.9) відповідно. Умова міцності такого зварного з'єднання:  $\tau_{\delta\hat{\alpha}\zeta} \leq \tau'$ .

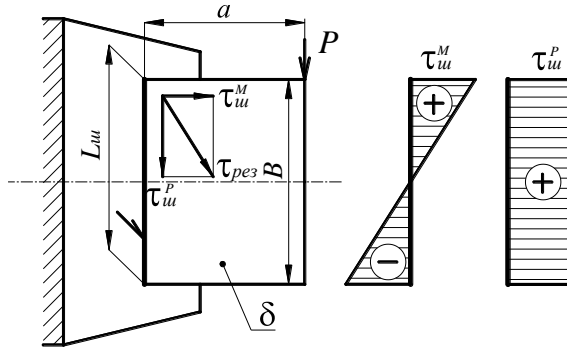


Рис. 3.6 – Зварне з'єднання з лобовим швом при дії сили, що прикладена на відстані від шва

Таблиця 3.1 – Варіанти індивідуальних завдань

| Варіант | Геометричний розмір зварного з'єднання, мм |     |     |       |          |          |          |
|---------|--|-----|-----|-------|----------|----------|----------|
|         | $B$  | $k$ | $a$ | $L_w$ | $L_{w1}$ | $L_{w2}$ | $L_{w3}$ |
| 1       | 100  | 4   | 30  | 20    | 10       | 5        | 30       |
| 2       | 200  | 5   | 35  | 30    | 20       | 6        | 35       |
| 3       | 300  | 6   | 40  | 40    | 30       | 7        | 40       |
| 4       | 400  | 3   | 45  | 50    | 40       | 8        | 45       |
| 5       | 500  | 4   | 50  | 60    | 50       | 9        | 5        |
| 6       | 90   | 5   | 55  | 20    | 10       | 10       | 6        |
| 7       | 50   | 6   | 60  | 10    | 10       | 5        | 3        |
| 8       | 30   | 3   | 65  | 8     | 8        | 6        | 4        |
| 9       | 45   | 4   | 70  | 10    | 10       | 7        | 5        |
| 10      | 55   | 5   | 75  | 10    | 10       | 8        | 6        |
| 11      | 80   | 6   | 80  | 20    | 20       | 9        | 3        |
| 12      | 200  | 3   | 30  | 40    | 40       | 10       | 50       |
| 13      | 30   | 4   | 35  | 10    | 10       | 5        | 4        |
| 14      | 40   | 5   | 40  | 15    | 15       | 6        | 5        |
| 15      | 50   | 6   | 45  | 15    | 15       | 7        | 6        |
| 16      | 150  | 4   | 50  | 30    | 30       | 8        | 2        |
| 17      | 25   | 5   | 55  | 5     | 5        | 9        | 4        |
| 18      | 35   | 6   | 60  | 8     | 8        | 10       | 5        |
| 19      | 45   | 3   | 65  | 10    | 10       | 5        | 6        |
| 20      | 55   | 8   | 70  | 6     | 4        | 6        | 4        |
| 21      | 50   | 4   | 75  | 8     | 5        | 7        | 5        |
| 22      | 80   | 5   | 80  | 8     | 6        | 8        | 6        |
| 23      | 20   | 6   | 15  | 5     | 5        | 9        | 2        |
| 24      | 10   | 12  | 30  | 5     | 5        | 10       | 6        |
| 25      | 60   | 13  | 45  | 8     | 8        | 4        | 4        |

## Контрольні питання

1. Залежно від яких факторів виконується визначення напружень для таврових металевих з'єднання, що працюють на розтягання?
2. Які випадки визначення напружень розрізняють при розрахунках зварних з'єднань з кутовими швами?
3. Яка максимальна довжина шва в з'єднаннях з фланговими швами?
4. В яких межах рекомендована довжина кутового зварного шва?
5. Від яких параметрів залежить розрахункова товщина шва?

*Література:* [2, с. 132–140; 3, с. 54–56; 4, с. 223–227]

## *Лабораторна робота 4.* **Визначення напружень та деформацій у металах при контактному зварюванні**

---

**Мета:** опанувати методику визначення напружень та деформацій у металах при контактному зварюванні.

**Матеріали та інструменти:** креслярське приладдя, вимірювальні інструменти, інженерний калькулятор.

### **Порядок виконання роботи**

1. Побудова ескізів зварних з'єднань згідно вихідних даних індивідуального завдання (див. рис. 4.1–4.8 та табл. 4.2). Зовнішнє навантаження та матеріал обираємо з таблиці 2.1.

2. Визначення допустимих напружень для зварного шва  $\sigma'$  з врахуванням матеріалу деталей, що з'єднуються, виду зварювання та типу зовнішнього навантаження (додаток А).

3. Визначення діючих напружень в зварному шві для кожного зварного з'єднання з послідуною перевіркою умови міцності.

4. Визначення максимально допустимого зовнішнього навантаження на зварний шов для кожного зварного з'єднання з врахуванням умови міцності.

5. Побудова епюри напружень в зварних швах.

### **Теоретичні відомості і методичні рекомендації**

Контактним зварюванням виконуються стикові зварні з'єднання, точкові та шовні напусткові з'єднання, або з'єднання з накладками.

В залежності від розташування точок штабові точкові з'єднання бувають однорядні і багаторядні. Точкові та шовні напусткові з'єднання, що зварені з двох штаб, називають одно зрізними, а з трьох штаб – двозрізними.

У зварному точковому та шовному з'єднаннях прийняті наступні позначення (див. рис. 4.1):  $t$  – крок точок;  $t_1$  – відстань від центру зварної точки до краю деталі у напрямку дії сили;  $t_2$  – відстань від центру зварної точки до вільної кромки у напрямку перпендикулярному щодо лінії дії сили;  $d$  – діаметр зварної точки;  $h$  та  $l$  – відповідно ширина та довжина при шовному зварюванні;  $\delta$ ,  $\delta_1$  – товщини штаб. При призначенні вказаних величин можливо керуватися такими співвідношеннями:

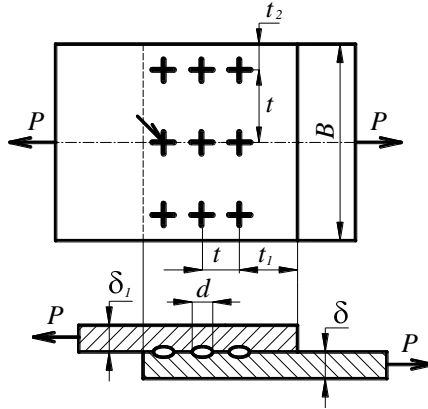
$$t \geq 3d, \quad t_1 \geq 2d, \quad t_2 \geq 1,5d. \quad (4.1)$$

Для сталевих деталей, що зварюються, рекомендуються наступні діаметри зварних точок:

$$d \leq 1,5\delta + 4 \text{ при } \delta \leq 1,5...3 \text{ мм}; \quad (4.2)$$

$$d \leq 1,5\delta + 5 \text{ при } \delta \leq 1,5...3 \text{ мм}; \quad (4.3)$$

де  $\delta$  – найменша товщина штаб.



**Рис. 4.1 – Однозрізне точкове зварне з'єднання**

У багатьох випадках діаметр точки вибирають у відповідності із даними, наведеними в таблиці 4.1.

**Таблиця 4.1 – Рекомендовані розміри діаметрів зварних точок**

| Товщина найбільш тонкої деталі пакета, мм | Мінімальний діаметр зварної точки $d$ (мм), для: |  |                |
|---|--|--|----------------|
|   | маловуглецевих та низьколегованих сталей         | нержавіючих та жароміцних сталей і титанових сплавів | легких сплавів |
| 0,8                                       | 3,0  | 3,5  | 3,5            |
| 1,0                                       | 3,5  | 4,0  | 4,0            |
| 1,2                                       | 4,0  | 4,5  | 5,0            |
| 1,5                                       | 5,0  | 5,5  | 6,0            |
| 2,0                                       | 6,0  | 6,5  | 7,0            |
| 2,5                                       | 6,5  | 7,0  | 8,0            |
| 3,0                                       | 7,0  | 8,0  | 9,0            |
| 4,0                                       | 9,0  | 10,0   | 10,0           |

При дії статичного навантаження розтягання одно зрізні точкові з'єднання розраховують за формулою:

$$\tau = \frac{4P}{i\pi d^2} \leq \tau', \quad (4.4)$$

де  $i$  – кількість зварних точок у з'єднанні;  $\tau'$  – допустиме напруження при зрізі.

Для двозрізних точкових з'єднань (рис. 4.2) дотичні напруження визначаються за формулою:

$$\tau = \frac{2P}{i\pi d^2} \leq \tau' . \quad (4.5)$$

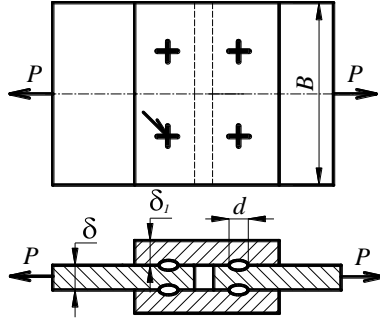


Рис. 4.2 – Двозрізне точкове зварне з'єднання

У випадку одно зрізних роликкових з'єднань (рис. 4.3):

$$\tau = \frac{P}{hL} \leq \tau' , \quad (4.6)$$

де  $h$  – ширина шва, мм;  $L$  – довжина шва, мм.

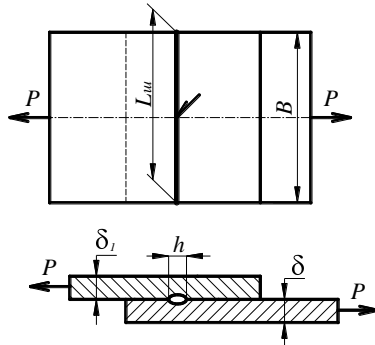


Рис. 4.3 – Однозрізне роликкове зварне з'єднання

Для точкових з'єднань, в яких один елемент працює на відрив по відношенню до іншого (див. рис. 4.4), розрахунок ведуть за двома умовами:



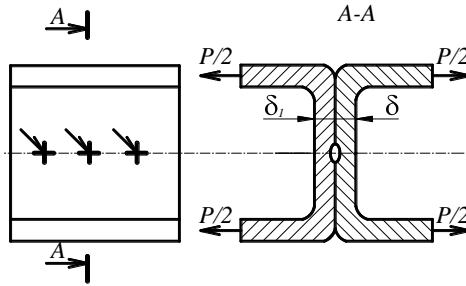
1) на відрив за перерізом у площині торкання деталей з врахуванням площі розриву точок:

$$\sigma_0 = \frac{4P}{i\pi d^2} \leq \sigma' , \quad (4.7)$$

2) при вириванні (зрізі) зварної точки з основного металу за її периметром:

$$\tau = \frac{P}{i\pi d\delta} \leq \tau' , \quad (4.8)$$

де  $\delta$  – товщина тоншої деталі.



**Рис. 4.4 – Точкове зварне з'єднання, що працює на відрив**

Якщо точкові з'єднання сприймають згинальні моменти, то їх розрахунок виконують за наступними формулам:

1) для з'єднання з двома точками (див. рис. 4.5) спочатку визначають зусилля зрізу:

$$T = \frac{\dot{I}}{h} . \quad (4.9)$$

Далі розраховують напруження зрізу в точці від знайденого зусилля:

$$\tau = \frac{4M}{h\pi d^2} = \frac{4T}{\pi d^2} \leq \tau' . \quad (4.10)$$

2) для з'єднань, що сприймають згинальний момент і поперечну силу (див. рис. 4.6), розрахунок полягає у визначенні результуючого напруження зрізу у точці та порівнянні його з допустимим:

$$\tau_{\partial\varphi} = \sqrt{\tau_M^2 + \tau_Q^2} \leq \tau' , \quad (4.11)$$

де  $\tau_M$  – напруження зрізу у точці від моменту  $M = Pa$ ;  $\tau_Q$  – напруження зрізу у точці від поперечної сили  $Q/2$ .

$$\tau_Q = \frac{4P}{2\pi d^2}, \quad (4.12)$$

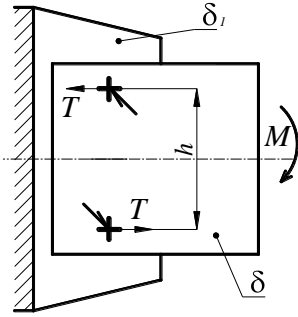


Рис. 4.5 – Точкове зварне з'єднання, що сприймає згинальний момент

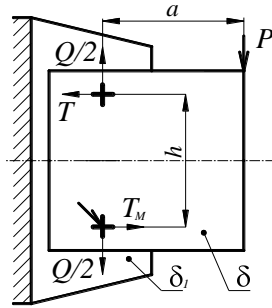


Рис. 4.6 – Точкове зварне з'єднання, що сприймає поперечну силу

3) для з'єднання з декількома точками в ряду (рис. 4.7), що сприймає поперечну силу, розрахунок ведеться за результируючим дотичним напруженням  $\tau_{\partial\zeta}$  за формулою (4.11), в яких складові визначаються за наступними залежностями:

$$\tau_M = \frac{4My_{\max}}{\pi d^2 \sum y^2}, \quad \tau_Q = \frac{4Q}{i\pi d^2}, \quad (4.13)$$

де  $y_{\max}$  – ордината точки, що є найбільш віддаленою від нейтральної осі, мм;  $\sum y^2 = y_1^2 + y_2^2 + \dots + y_i^2$  – сума квадратів відстаней всіх точок ряду до нейтральної осі;  $i$  – кількість точок у вертикальному ряду;

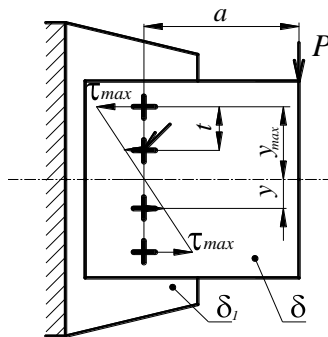


Рис. 4.7 – Зварне з'єднання виконане контактним зварюванням з декількома точками в ряду

4) для з'єднання з декількома рядами точок (рис. 4.8), розрахункові залежності (4.11) будуть справедливими, а складові  $\tau_M$  і  $\tau_Q$  необхідно визначити за формулами:

$$\tau_M = \frac{4My_{\max}}{m\pi d^2 \sum y^2}, \quad \tau_Q = \frac{4Q}{m\pi d^2}, \quad (4.14)$$

де  $m$  – кількість вертикальних рядів.

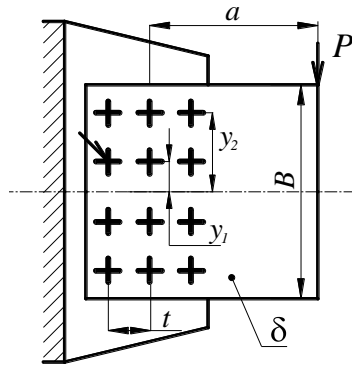


Рис. 4.8 – Зварне з'єднання виконане контактним зварюванням з декількома рядами точок

Необхідно пам'ятати, що у випадку навантаження моментом та поперечною силою двозрізного з'єднання у формулах (4.12)–(4.14) замість цифри 4 необхідно брати цифру 2.

Таблиця 4.2 – Варіанти індивідуальних завдань

| Варіант | Геометричний розмір зварного з'єднання, мм |            |          |     |         |       |       |
|---------|--|------------|----------|-----|---------|-------|-------|
|         | $B$  | $\delta_1$ | $\delta$ | $h$ | $t = y$ | $t_1$ | $t_2$ |
| 1       | 100  | 0,8        | 1,0      | 90  | 10      | 5     | 30    |
| 2       | 200  | 1,0        | 1,2      | 50  | 20      | 6     | 35    |
| 3       | 300  | 1,2        | 1,4      | 30  | 30      | 7     | 40    |
| 4       | 400  | 1,5        | 2,0      | 45  | 40      | 8     | 45    |
| 5       | 500  | 2,0        | 2,5      | 55  | 50      | 9     | 50    |
| 6       | 90   | 2,5        | 3,0      | 80  | 10      | 10    | 6     |
| 7       | 50   | 3,0        | 4,0      | 20  | 10      | 5     | 3     |
| 8       | 30   | 4,0        | 1,0      | 10  | 8       | 6     | 4     |
| 9       | 45   | 0,8        | 1,2      | 15  | 10      | 7     | 5     |
| 10      | 55   | 1,0        | 1,4      | 25  | 10      | 8     | 6     |
| 11      | 80   | 1,2        | 2,0      | 50  | 20      | 9     | 3     |
| 12      | 200  | 1,5        | 2,5      | 100 | 40      | 10    | 50    |

**Продовження таблиці 4.2**

| 1  | 2   | 3   | 4   | 5  | 6  | 7  | 8 |
|----|-----|-----|-----|----|----|----|---|
| 13 | 30  | 2,0 | 3,0 | 10 | 10 | 5  | 4 |
| 14 | 40  | 2,5 | 4,0 | 15 | 5  | 6  | 5 |
| 15 | 50  | 3,0 | 1,0 | 25 | 15 | 7  | 6 |
| 16 | 150 | 4,0 | 1,2 | 50 | 30 | 8  | 2 |
| 17 | 25  | 0,8 | 1,4 | 10 | 5  | 9  | 4 |
| 18 | 35  | 1,0 | 2,0 | 15 | 8  | 10 | 5 |
| 19 | 45  | 1,2 | 2,5 | 25 | 10 | 5  | 6 |
| 20 | 55  | 1,5 | 3,0 | 50 | 4  | 6  | 4 |
| 21 | 50  | 2,0 | 4,0 | 10 | 5  | 7  | 5 |
| 22 | 80  | 2,5 | 1,0 | 15 | 6  | 8  | 6 |
| 23 | 20  | 3,0 | 1,2 | 10 | 5  | 9  | 2 |
| 24 | 10  | 4,0 | 1,4 | 5  | 5  | 10 | 2 |
| 25 | 60  | 1,0 | 2,0 | 30 | 8  | 4  | 4 |

**Контрольні питання**

1. Яким чином виконують розрахунок для точкових з'єднань, в котрих один елемент працює на відрив по відношенню до іншого?

2. Які діаметри зварних точок рекомендуються для сталевих деталей, що зварюються?

3. Яким чином виконують розрахунок для точкових з'єднань, якщо точкові з'єднання сприймають згинальні моменти?

4. Яким чином виконують розрахунок одно зрізних точкових з'єднань, при дії статичного навантаження розтягання?

5. З якої умови визначається максимально допустиме зовнішнє навантаження на зварний шов?

**Література:** [1, с. 155–166; 2, с. 142–150]

## *Лабораторна робота 5.*

### **Визначення напружень і деформацій у зварних з'єднаннях, що працюють на згин та складний опір**

---

**Мета:** опанувати методику визначення напружень і деформацій у зварних з'єднаннях, що працюють на згин та складний опір.

**Матеріали та інструменти:** креслярське приладдя, вимірювальні інструменти, інженерний калькулятор.

#### **Порядок виконання роботи**

1. Побудова ескізів зварних з'єднань згідно вихідних даних індивідуального завдання (див. рис. 5.1–5.5 та табл. 5.1). Матеріал деталей та вид зварювання обираємо з таблиці 2.1.

2. Визначення допустимих напруження для зварного шва  $\sigma'$  з врахуванням матеріалу деталей, що з'єднуються, виду зварювання та типу зовнішнього навантаження (додаток А).

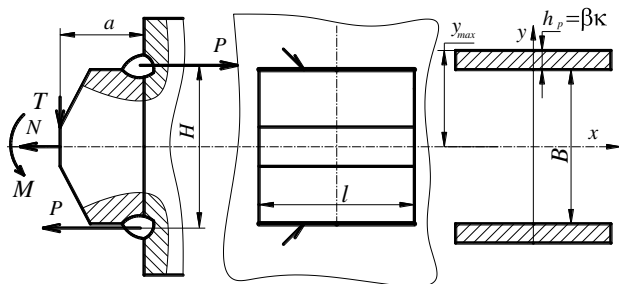
3. Визначення діючих напружень в зварному шві для кожного зварного з'єднання з послідуною перевіркою умови міцності.

#### **Теоретичні відомості і методичні рекомендації**

Взаємне розташування елементів конструкцій може бути шарнірним або жорстким. На практиці проектування зварних конструкцій найбільш розповсюджений жорсткий тип з'єднання, який забезпечує підвищену жорсткість і стійкість усієї конструкції.

Розрахунок спряжень виконується за відомими силовими чинниками (момент згину, поперечна сила). Якщо силовий вплив не може бути визначений на основі статичного розрахунку, тоді спряження конструюють рівноцінним щодо основних перерізів елементів.

З'єднання одного елемента з іншим здійснюється, як правило, за допомогою кутових швів, що виконані горизонтально (рис. 5.1), вертикально (рис. 5.2) або по контуру торця (рис. 5.3).



**Рис. 5.1 – Зварне з'єднання одного елемента з іншим  
за допомогою кутових швів виконаних горизонтально**

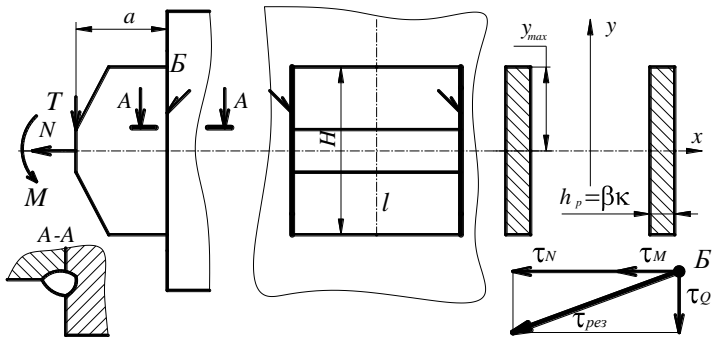


Рис. 5.2 – Зварне з'єднання одного елемента з іншим за допомогою кутових швів виконаних вертикально

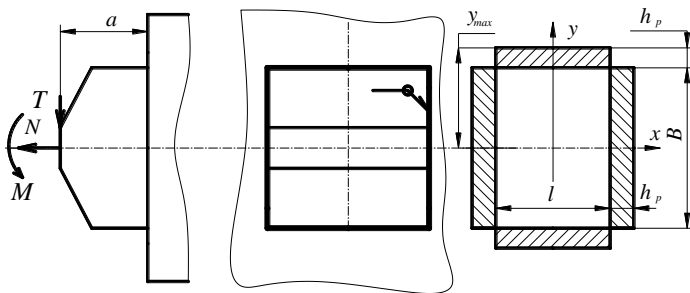


Рис. 5.3 – Зварне з'єднання одного елемента з іншим за допомогою кутових швів виконаних по контуру торця

Під дією згинального моменту  $M$ , нормальної  $N$  і дотичної  $T$  сил (рис. 5.1–5.4) в кутових швах виникає складний напружений стан, точне визначення якого є ускладненим. Тому кутові шви спряжень умовно розраховують на зріз.

Якщо елемент приварений горизонтальними швами (див. рис. 5.1), то величину напруження зрізу визначають наступним чином.

**1. Від дії згинального моменту.**

1.1. Першим способом:

$$\tau = \frac{M}{W_{\phi}}, \quad (5.1)$$

момент опору кутових шві відносно осі  $x$  (рис. 5.1):

$$W_{\phi} = \frac{J_{\phi}}{y_{\max}}, \quad (5.2)$$

де  $J_{\phi}$  – момент інерції бісекторних перерізів швів відносно осі  $x$ , мм<sup>4</sup>;  
 $y_{\max} = B/2 + h_p$  – відстань від осі  $x$  до найбільш віддаленої точки шва, мм.

Момент інерції бісекторних перерізів швів:

$$J_{\phi} = 2J_0 + 2F_{\phi} \left( \frac{B}{2} + \frac{k}{2} \right)^2 = 2 \frac{lh_p^3}{12} + 2lh_p \left( \frac{B}{2} + \frac{k}{2} \right)^2, \quad (5.3)$$

де  $J_0$  – момент інерції бісекторних перерізів швів відносно власної осі;  $F_{\phi} = lh_p$  – розрахункова площа перерізу кутового шва, мм<sup>2</sup>.

При  $B/k > 10$  значенням  $J_0$ , а також всіма членами, що містять величину катета  $k$  в степені більшій ніж за першу, нехтують в зв'язку із малим їх значенням. Тоді вираз (5.3) спрощується:

$$J_{\phi} \approx \frac{lh_p B^2}{2}. \quad (5.4)$$

1.2. Другим способом:

$$\tau_{\phi} = \frac{P}{F_{\phi}} = \frac{M}{HF_{\phi}}, \quad (5.5)$$

де  $H = B + 2k/3$  – плече пари сил, мм.

**2. Від дії нормальної сили:**

$$\tau_N = \frac{N}{F_{\phi}}. \quad (5.6)$$

**3. Від дії поперечної (дотичної) сили.**

3.1. Від моменту пари сил  $M = Ta$ :

$$\tau = \frac{Ta}{W_{\phi}}; \quad (5.7)$$

3.2. Від поперечної сили  $Q = T$ :

$$\tau_Q = \frac{T}{2lh_p}. \quad (5.8)$$

Використовуючи правило додавання векторів, можливо визначити результуюче дотичне напруження у найбільш навантаженому шві (див. рис. 5.1, верхній шов):

$$\tau_{\partial\zeta} = \sqrt{\tau_N + \tau_M^2 + \tau_Q^2}, \quad (5.9)$$

де  $\tau_M$  – сума напружень зрізу від дії моменту  $M$  і моменту пари сил  $M = Ta$ .

Тоді умова міцності зварного з'єднання:

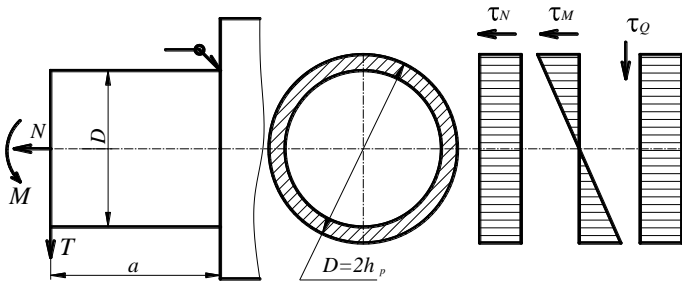
$$\tau_{\partial\zeta} \leq \tau' . \quad (5.10)$$

При приварюванні елемента лише вертикальними кутовими швами (див. рис. 5.2) умова міцності зберігається (5.9–5.10).

Розрахунок швів при обварюванні елемента по контуру торця (див. рис. 5.3–5.5) виконують за формулами (5.1), (5.6) і (5.10) враховуючи наступні особливості.

Момент опору кутових швів (відповідно момент інерції бісекторних перерізів швів) визначається для тієї фігури, яка утворена бісекторними перерізами усіх швів (заштриховані фігури див. рис. 5.3–5.5). Наприклад, для спрощення, яке показано на рис. 5.4 момент опору шва:

$$W_x = W_y = \delta\Omega = h_p \frac{\pi}{4} D + h_p^2 . \quad (5.11)$$



**Рис. 5.4 – Зварне з'єднання циліндричного елемента, що працює на складний опір**

Умовно вважають, що силу  $Q = T$  сприймають шви, які направлені вздовж лінії дії цієї сили. Так, наприклад, для з'єднання (див. рис. 5.3), напруження зрізу від сили  $T$  становлять:

$$\tau_Q = \frac{T}{2Bh_p} . \quad (5.12)$$

Для торців з криволінійним або складним обрисом (див. рис. 5.4. і 5.5) умовно вважають, що силу  $Q$  сприймають шви з довжиною, яка дорівнює

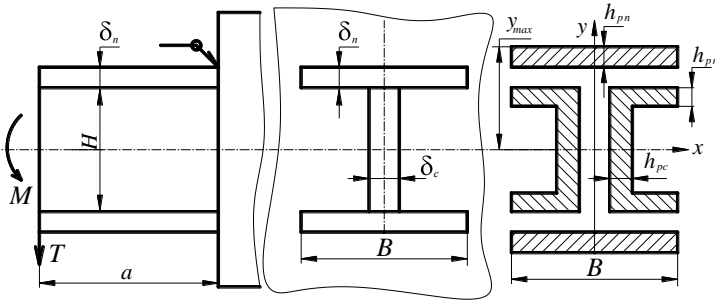


сумі проєкцій криволінійних похилих швів на напрям сили. Так для з'єднання, що показано на рис. 5.4:

$$\tau_Q = \frac{T}{2Dh_p}. \quad (5.13)$$

Для з'єднання, що показано на рис. 5.5:

$$\tau_Q = \frac{T}{Bh_p}. \quad (5.14)$$



**Рис. 5.5 – Зварне з'єднання циліндричного елемента, що працює на складний опір**

**Таблиця 5.1 – Варіанти індивідуальних завдань**

| Варіант  | Геометричний розмір зварного з'єднання, мм |            |            |          |          | Навантаження    |              |
|----------|--|------------|------------|----------|----------|-----------------|--------------|
|          | <i>B</i>                                   | $\delta_n$ | $\delta_c$ | <i>a</i> | <i>k</i> | <i>N, T, кН</i> | <i>M, Нм</i> |
| <i>l</i> | 2  | 3          | 4          | 5        | 6        | 7               | 8            |
| 1        | 100  | 8          | 10         | 30       | 3        | 300             | 5            |
| 2        | 200  | 10         | 12         | 35       | 4        | 400             | 6            |
| 3        | 300  | 12         | 14         | 40       | 5        | 500             | 7            |
| 4        | 400  | 15         | 20         | 45       | 6        | 150             | 8            |
| 5        | 500  | 20         | 25         | 50       | 3        | 250             | 9            |
| 6        | 90   | 25         | 30         | 55       | 4        | 350             | 10           |
| 7        | 50   | 30         | 40         | 60       | 5        | 450             | 5            |
| 8        | 30   | 40         | 10         | 65       | 6        | 550             | 6            |
| 9        | 45   | 8          | 12         | 70       | 3        | 50              | 5            |
| 10       | 55   | 10         | 14         | 75       | 4        | 300             | 4            |
| 11       | 80   | 12         | 20         | 80       | 5        | 400             | 9            |
| 12       | 200  | 15         | 25         | 30       | 6        | 500             | 10           |
| 13       | 30   | 20         | 30         | 35       | 3        | 150             | 5            |
| 14       | 40   | 25         | 40         | 40       | 4        | 250             | 6            |
| 15       | 50   | 30         | 10         | 45       | 5        | 350             | 8            |
| 16       | 150  | 40         | 12         | 50       | 6        | 450             | 5            |
| 17       | 25   | 8          | 14         | 55       | 3        | 550             | 9            |

**Продовження таблиці 5.1**

| 1  | 2  | 3  | 4  | 5  | 6 | 7   | 8  |
|----|----|----|----|----|---|-----|----|
| 17 | 25 | 8  | 14 | 55 | 3 | 550 | 9  |
| 18 | 35 | 10 | 20 | 60 | 4 | 50  | 9  |
| 19 | 45 | 12 | 25 | 65 | 5 | 300 | 5  |
| 20 | 55 | 15 | 30 | 70 | 6 | 400 | 6  |
| 21 | 50 | 20 | 40 | 75 | 3 | 500 | 7  |
| 22 | 80 | 25 | 10 | 80 | 4 | 150 | 8  |
| 23 | 20 | 30 | 12 | 15 | 5 | 250 | 10 |
| 24 | 10 | 40 | 14 | 30 | 6 | 350 | 5  |
| 25 | 60 | 10 | 20 | 45 | 3 | 450 | 4  |

**Контрольні питання**

1. Яке буває взаємне розташування елементів конструкцій?
2. Як визначають величину напруження зрізу, якщо елемент приварений горизонтальними швами?
3. Які особливості враховують при розрахунках швів після обварювання елемента по контуру торця?
4. Який напружений стан виникає під дією згинального моменту, нормальної і дотичної сил в кутових швах?
5. Якими видами виконуються з'єднання складних металевих конструкцій, якщо силовий вплив не може бути визначений на основі статичного розрахунку?

*Література:* [1, с. 176–190; 2, с. 189–201; 5, с. 1–5]

## Література

1. Напруження та деформації при зварюванні і паянні : підручник / за заг. ред. Л. М. Лобанова. – Миколаїв : НУК, 2016. – 246 с.
2. Махненко В. І. Напруження та деформації при зварюванні : навч. посіб. / В. І. Махненко, Г. В. Єрмолаєв, В. В. Квасницький, А. В. Лабарткава. – Миколаїв : НУК, 2011. – 240 с.
3. Холявко В. В. Фізичні основи міцності та руйнування : конспект лекцій / В. В. Холявко. – Київ : НТУУ «КПІ», 2015. – 100 с.
4. Єрмолаєв Г. В. Паяння матеріалів : підручник / Г. В. Єрмолаєв [та ін.] ; за заг. ред. В. Ф. Хорунова і В. Ф. Квасницького. – Миколаїв: НУК, 2015. –340 с.
5. Сивак Р. І. Пластичність металів при немонотонному навантаженні / Р. І. Сивак, К. І. Коцюбівська // Наукові праці ВНТУ. – 2011. – № 1. – С. 1–5.

## ДОДАТОК А

**Таблиця А.1 – Допустимі напруження для швів маловуглецевих сталей звичайної якості та низьколегованих, МПа**

| Вид шва  | Вид зусилля | Зварювання автоматичне, напівавтоматичне, ручне електродами підвищеної якості | Ручне зварювання електродами звичайної якості |
|----------|-------------|---|---|
| Стиковий | Розтягання  | $\sigma'_p = \sigma$  | $\sigma'_p = 0,9 \sigma$                      |
|          | Стиск       | $\sigma'_c = \sigma$  | $\sigma'_c = \sigma$                          |
|          | Зріз        | $\tau' = 0,65 \sigma$   | $\tau' = 0,6 \sigma$                          |
| Кутовий  | Зріз        | $\tau' = 0,65 \sigma$   | $\tau' = 0,6 \sigma$                          |

**Таблиця А.2 – Допустимі напруження для швів алюмінієвих сплавів, МПа**

| Вид шва  | Вид зусилля | АМц | АМг | АМг6 | АВТ1 | В92Т |
|----------|-------------|-----|-----|------|------|------|
| Стиковий | Розтягання  | 40  | 70  | 140  | 110  | 170  |
|          | Стиск       | 40  | 70  | 140  | 90   | 150  |
|          | Зріз        | 30  | 50  | 105  | 70   | 120  |
| Кутовий  | Зріз        | 25  | 45  | 80   | 50   | 90   |

## Зміст

|   |    |
|---|----|
| <b>Вступ</b> .....  | 3  |
| <i>Лабораторна робота 1.</i><br>Визначення геометричних характеристик плоского перерізу .....   | 5  |
| <i>Лабораторна робота 2.</i><br>Визначення напружень та деформацій у стикових зварних з'єднаннях .....                                | 10 |
| <i>Лабораторна робота 3.</i><br>Визначення напружень та деформацій у кутових зварних з'єднаннях .....                                 | 15 |
| <i>Лабораторна робота 4.</i><br>Визначення напружень та деформацій у металах<br>при контактному зварюванні .....                      | 21 |
| <i>Лабораторна робота 5.</i><br>Визначення напружень і деформацій у зварних з'єднаннях,<br>що працюють на згин та складний опір ..... | 28 |
| <b>Література</b> .....   | 34 |
| <b>Додаток А</b> .....  | 35 |