

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Національний університет «Запорізька політехніка»

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до виконання практичної роботи №2
«Розрахунок міцності зварних з'єднань з кутовими швами»

з дисципліни
«Розрахунки та проектування зварних конструкцій»

для студентів спеціальності 131 Прикладна механіка освітньої
програми «Технології та устаткування зварювання»
усіх форм навчання

Методичні вказівки до виконання практичної роботи №2 «Розрахунок міцності зварних з'єднань з кутовими швами» з дисципліни «Розрахунки та проектування зварних конструкцій» для студентів спеціальності 131 Прикладна механіка освітньої програми «Технології та устаткування зварювання» усіх форм навчання / Укл. М.Ю. Осіпов, О.Є. Капустян. – Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2024. – 15 с.

Укладачі: Осіпов М.Ю., канд. техн. наук, доцент
Капустян О.Є., канд. техн. наук, доцент

Рецензент: Лаптева Г. М., канд. техн. наук, доцент

Редактор: Аверченко І.П., ст. лаб.

Відповідальний за випуск:
Осіпов М.Ю., канд. техн. наук, доцент

Затверджено
на засіданні кафедри ІТЗ та МК
Протокол №01 від 13.09.2023 р.

Рекомендовано
до видання НМК ІФФ
Протокол №06 від 16.01.2024 р.

ЗМІСТ

1 МЕТА РОБОТИ	4
2 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ	4
3 КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ ДЛЯ САМОПЕРЕВІРКИ І КОНТРОЛЮ ПІДГОТОВЛЕНOSTІ СТУДЕНТІВ ДО РОБОТИ	10
5 ВКАЗІВКИ З ТЕХНІКИ БЕЗПЕКИ	14
6 ПОРЯДОК ПРОВЕДЕННЯ ПРАКТИЧНОЇ РОБОТИ	14
7 ЗМІСТ ЗВІТУ	14
8 РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА	15

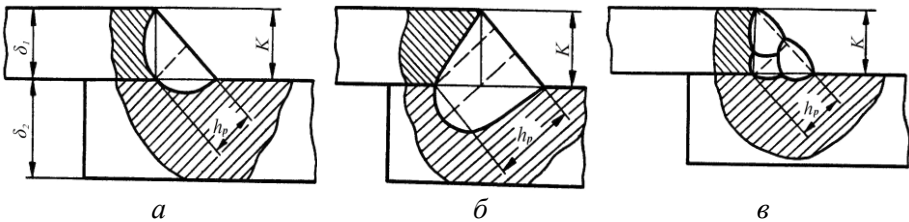
1 МЕТА РОБОТИ

Придбання практичних навичок у розрахунках зварних з'єднань з кутовими швами.

2 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ

Кутовими швами виконуються з'єднання внапусток, таврові, в кут.

Кутові шви можуть виконуватися за один або кілька проходів автоматичним, напіваавтоматичним і ручним зварюванням, що призводить до різної глибини провару основного металу (рис. 2.1).



a – ручне зварювання, *б* – автоматичне зварювання, *в* – багатопрохідне зварювання
Рисунок 2.1 – Кутові шви [1]

Розрахункова товщина шва h_p залежить від способу виконання зварного шва, його виду і пов'язана з катетом K залежністю:

$$h_p = \beta K, \quad (2.1)$$

де β – коефіцієнт для визначення розрахункової товщини кутового шва (табл. 2.1);

K – розрахунковий катет кутового шва, який дорівнює катету вписаного рівнобедреного прямокутного трикутника (рис. 2.1, в).

Часто при розрахунках міцності з'єднань з кутовими швами коефіцієнт β приймають рівним 0,7 незалежно від способу зварювання. Це призводить до додаткового запасу міцності з'єднання, але тягне за

собою перевитрату зварювальних матеріалів.

Таблиця 2.1 – Значення β в залежності від виду зварювання [1,2]

Технологічний процес зварювання	β
Ручне дугове зварювання	0,7
Однопрохідне автоматичне зварювання	1,1 (1,0*)
2-3-х прохідне автоматичне зварювання	0,9
Багатопохідне автоматичне зварювання	0,7
Однопрохідне напівавтоматичне зварювання	0,9 (0,8*)
2-3-х прохідне напівавтоматичне зварювання	0,8
Багатопохідне напівавтоматичне зварювання	0,7

* - різні літературні джерела

При дії статичних розтягуючих, стискаючих або зрізуючих навантажень зварні кутові шви розраховуються по дотичним напруженням за формулами:

$$\tau_{\text{розрах.}} = \frac{P}{F_{\text{ш}}} = \frac{P}{h_p l} \leq \frac{m}{n} R'_{\text{ср}} \quad \text{або} \quad \tau_{\text{розрах.}} = \frac{P}{F_{\text{ш}}} = \frac{P}{h_p l} \leq [\tau'] \quad (2.2)$$

Площа зрізу кутового шва залежить від розрахункової товщини шва h_p і його довжини l .

Розрахункова довжина шва повинна бути не менш $4h_p$ і не менш 40 мм, тому що при меншій довжині неможливо забезпечити гарний провар.

Для з'єднань **внапуск**, (рис. 2.2) в умові міцності враховується довжина двох швів:

$$\tau_{\text{розрах.}} = \frac{P}{F_{\text{ш}}} = \frac{P}{h_p 2l} \leq \frac{m}{n} R'_{\text{ср}} \quad \text{або} \quad \tau_{\text{розрах.}} = \frac{P}{F_{\text{ш}}} = \frac{P}{h_p 2l} \leq [\tau'] \quad (2.3)$$

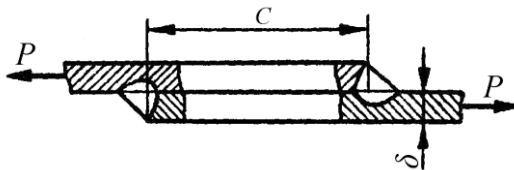


Рисунок 2.2 – З'єднання внапуск

Величина одностороннього напущку C в з'єднанні з лобовими кутовими швами береться $C \geq 4\delta$.

При використанні в з'єднанні внапуск комбінованих кутових швів рівних катетів (рис. 2.3) умови міцності (2.2) зберігаються, але під довжиною шва мається на увазі довжина периметра всіх швів:

$$\tau_{\text{розрах.}} = \frac{P}{h_p L} \leq \frac{m}{n} R'_{\text{ср}} \quad \text{або} \quad \tau_{\text{розрах.}} = \frac{P}{h_p L} \leq [\tau'], \quad (2.4)$$

де $L = \sum l = 2l_1 + 2l_2 + l_3$ – довжина периметрів швів, см.

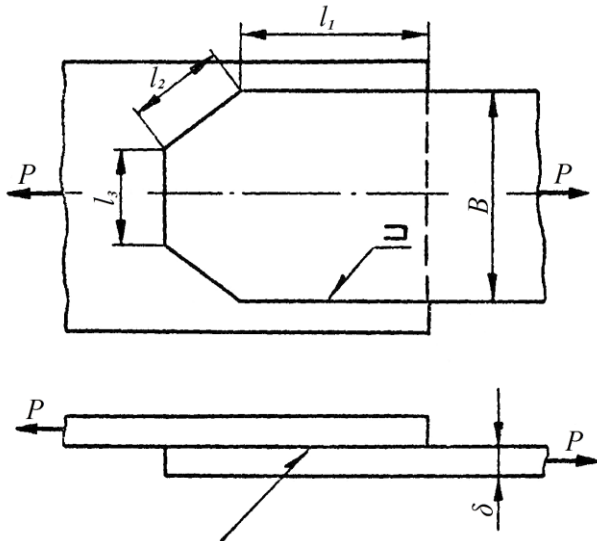


Рисунок 2.3 – Комбіноване з'єднання внапуск [2]

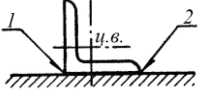
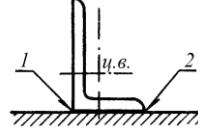
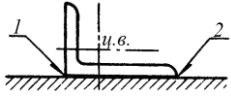
Деяку особливість має розрахунок міцності швів, що прикріплюють куточок, який працює під дією поздовжньої сили P .

Так як центр ваги (ц. в.) перетину куточка знаходиться не посередині ширини полиці куточка, то шов, розташований ближче до центра ваги (№1), сприймає більше навантаження, ніж шов, розташований далі від центра ваги (№2).

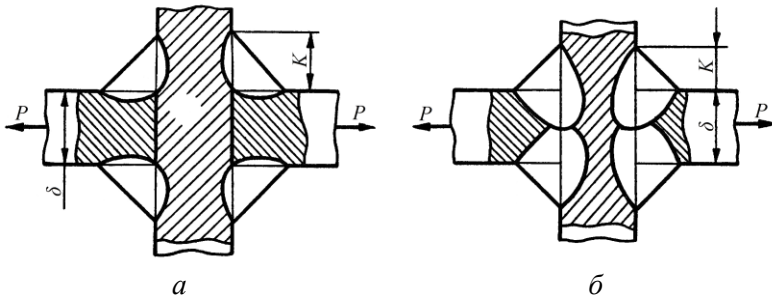
Вважається [1, 2], що зусилля, які припадають на шви (відповідно P_1 , P_2), будуть зворотно пропорційні відстаням їх від центра ваги

перерізу і складають (табл. 2.2):

Таблиця 2.2 – До розрахунку швів, що прикріплюють куточок [2]

Елемент, що прикріплюється	Ескіз (№1, №2 - зварні шви, що прикріплюють куточок)	P_1 зусилля для шва №1	P_2 зусилля для шва №2
Рівнобічний куточок		$0,7P$	$0,3P$
Нерівнобічний куточок, приварений вузькою полицею		$0,75P$	$0,25P$
Нерівнобічний куточок, приварений широкою полицею		$0,65P$	$0,35P$

Таврові з'єднання, що працюють на розтяг (рис. 2.4), розраховуються в залежності від виду зварювання і глибини проплавлення.



a – неповне проплавлення, *б* – повне проплавлення

Рисунок 2.4 – Таврові з'єднання [1, 2]

При ручному дуговому зварюванні з неповним проплавленням (рис. 2.4, *a*), умова міцності з'єднання має вигляд:

$$\tau_{\text{розрах.}} = \frac{P}{2h_p l} = \frac{P}{2 \cdot 0,7 K l} \leq \frac{m}{n} R'_{\text{ср}} \quad \text{або} \quad \tau_{\text{розрах.}} = \frac{P}{2h_p l} = \frac{P}{2 \cdot 0,7 K l} \leq [\tau'] . (2.5)$$

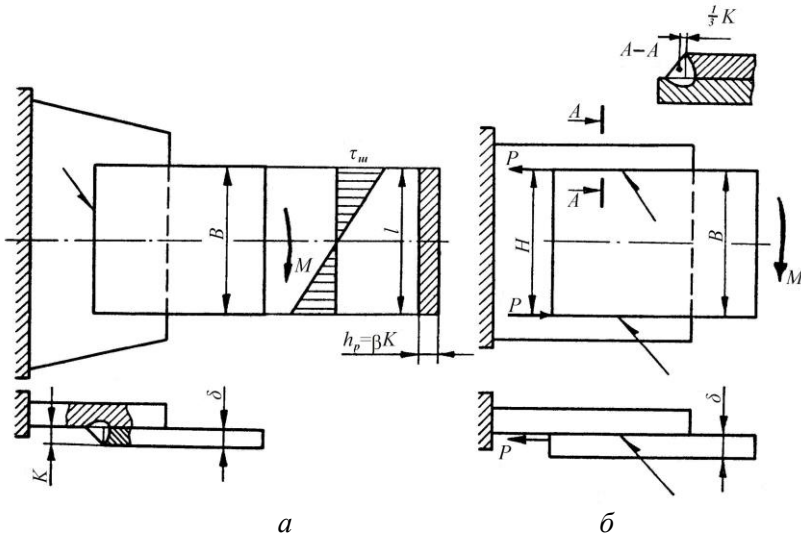
У з'єднанні даного виду в розрахунок приймається два зварних шви.

При автоматичному зварюванні з повним проплавленням (рис 2.4, б) таврове з'єднання розраховується як стикове, а умова міцності має вигляд:

$$\sigma_{\text{розрах.}} = \frac{P}{F_{\text{ш}}} = \frac{P}{\delta l} \leq \frac{m}{n} R'_p \quad \text{або} \quad \sigma_{\text{розрах.}} = \frac{P}{F_{\text{ш}}} = \frac{P}{\delta l} \leq [\sigma']_p. \quad (2.6)$$

При розрахунку зварних з'єднань з кутовими швами, які сприймають згинальний момент, необхідно розглянути два випадки:

- а) згинальний момент сприймає один лобовий шов (рис. 2.5, а);
- б) згинальний момент сприймає два флангових шви (рис. 2.5, б).



а – з лобовим швом, б – з фланговими швами

Рисунок 2.5 – З'єднання внапуск зі згинальним моментом [2]

Умова міцності для випадку а записується в такому вигляді:

$$\tau_{\text{розрах.}} = \frac{M}{W_{\text{ш}}} \leq \frac{m}{n} R'_{\text{ср}}, \quad \text{або} \quad \tau_{\text{розрах.}} = \frac{M}{W_{\text{ш}}} \leq [\tau']. \quad (2.7)$$

При розрахунку зварних з'єднань для випадку б визначають сили, які сприймаються швами:

$$P = \frac{M}{H},$$

де $H = \left(B + 2\frac{K}{3}\right)$ – плече реактивної пари, рівне відстані між центрами ваги зварних швів, см.

Потім розраховуються зварні шви за формулою:

$$\tau_{\text{розрах.}} = \frac{P}{\beta Kl} \leq \frac{m}{n} R'_{\text{ср}}, \quad \text{або} \quad \tau_{\text{розрах.}} = \frac{P}{\beta Kl} \leq [\tau']. \quad (2.8)$$

В зварному шві, на який діє поперечна сила P (рис. 2.6), що відстоїть від вісі шва на відстані a , виникають напруження зрізу $\tau_{\text{ш}}^P$ від сили P , направлені вздовж шва і напруження зрізу $\tau_{\text{ш}}^M$ від моменту пари сил $M = P \cdot a$, які направлені перпендикулярно вісі шва.

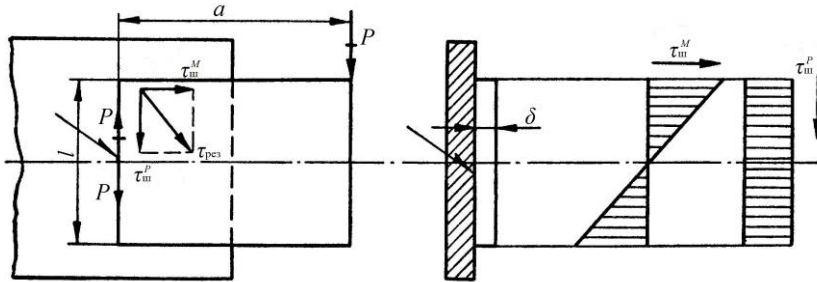


Рисунок 2.6 – З'єднання внапуск з поперечною силою P [1, 2]

Результуючі дотичні напруження у шві визначають за правилом додавання векторів (теорема Піфагора):

$$\tau_{\text{рез.}} = \sqrt{(\tau_{\text{ш}}^P)^2 + (\tau_{\text{ш}}^M)^2}. \quad (2.9)$$

Величини $\tau_{\text{ш}}^P$ і $\tau_{\text{ш}}^M$ обчислюються аналогічно раніше розглянутим випадкам:

$$\tau_{\text{ш}}^P = \frac{P}{\beta Kl}, \quad \tau_{\text{ш}}^M = \frac{M}{W_{\text{ш}}}.$$

Умова міцності з'єднання:

$$\tau_{\text{рез.}} \leq \frac{m}{n} R'_{\text{ср}}, \quad \text{або} \quad \tau_{\text{рез.}} \leq [\tau']. \quad (2.10)$$

При дії сили P під кутом до поздовжньої осі пластини (рис. 2.7) необхідно розкласти цю силу на складові N і T , а потім визначити дотичні напруження у шві (у точці А – самої навантаженої, небезпечної точки) від дії кожної з них.

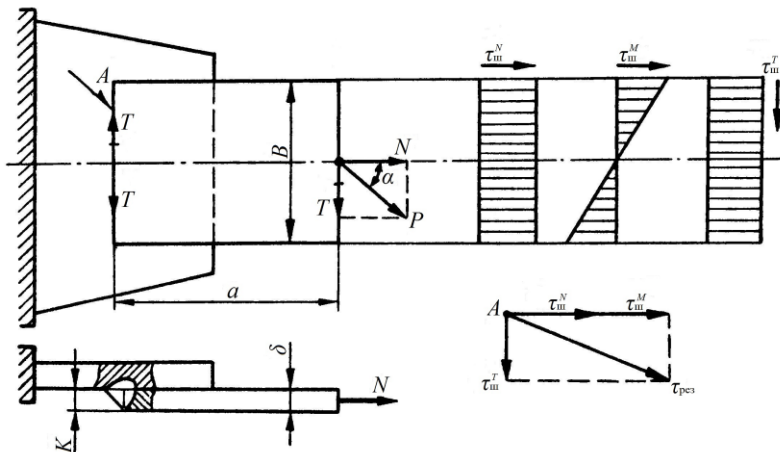


Рисунок 2.7 – З'єднання внапуск при дії сили P під кутом [1, 2]
Умова міцності з'єднання:

$$\tau_{\text{рез.}} = \sqrt{(\tau_{\text{ш}}^N + \tau_{\text{ш}}^M)^2 + (\tau_{\text{ш}}^T)^2} \leq [\tau'] ,$$

або

$$\tau_{\text{рез.}} = \sqrt{(\tau_{\text{ш}}^N + \tau_{\text{ш}}^M)^2 + (\tau_{\text{ш}}^T)^2} \leq \frac{m}{n} R'_{\text{сп}} .$$

3 КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ ДЛЯ САМОПЕРЕВІРКИ І КОНТРОЛЮ ПІДГОТОВЛЕНOSTІ СТУДЕНТІВ ДО РОБОТИ

1. Які шви називають кутовими? Наведіть приклади з'єднань з кутовими швами.
2. Наведіть приклади напусткових з'єднань з лобовими, фланговими, косими швами.
3. Чому розрахунок кутових швів проводиться на дотичні

напруження?

4. Як провести розрахунок міцності прикріплення куточка?

5. Які напруження утворюються у флангових швах при роботі з'єднання на поздовжню силу?

6. Які типи швів застосовують в з'єднаннях втавр?

7. Як розраховуються з'єднання втавр при поздовжне-розтягуючих і стискаючих силах?

8. Як розраховуються зварні з'єднання з кутовими швами, які сприймають згинальний момент?

4 РОЗРАХУНОК ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ ІЗ КУТОВИМИ ШВАМИ

Проектуючи зварні з'єднання, необхідно забезпечувати можливість застосування механізованих способів зварювання.

Катети зварних швів призначаються рівними 4, 5, 6, 8, 10, 12, 14, 16 мм. Найбільша товщина кутових швів не повинна перевищувати 1,2 меншою з товщини з'єднуваних елементів.

При статичних навантаженнях допускається будь-яка форма кутового шва. При динамічних навантаженнях поверхня шва повинна бути увігнутою з співвідношенням катетів для лобових швів 1:1,5, для флангових – 1:1.

Приклад розрахунку №1.

Швелер №12 (рис. 4.1) прикріплений до листа лобовим і фланговими швами. Зварювання ручне ($\beta = 0,7$). Визначити напруження в швах при $P = 180$ кН.

Рішення. Визначаємо площу перерізу лобового шва з катетом $k = 5$ мм і двох флангових швів з катетом $k = 8$ мм:

$$F_{\text{л}} = l_{\text{л}} \beta k = 12 \cdot 0,7 \cdot 0,5 = 4,2 \text{ см}^2,$$

$$F_{\text{фл}} = 2l_{\text{фл}} \beta k = 2 \cdot 20 \cdot 0,7 \cdot 0,8 = 22,4 \text{ см}^2.$$

Сумарна площа усіх кутових швів:

$$F = F_{\text{л}} + F_{\text{фл}} = 4,2 + 22,4 = 26,6 \text{ см}^2.$$

Напруження зрізу в швах:

$$\tau_{\text{розрах.}} = \frac{P}{F} = \frac{0,18 \text{ МН}}{0,00266 \text{ м}^2} = 67,7 \text{ МПа (677 кгс/см}^2\text{)}.$$

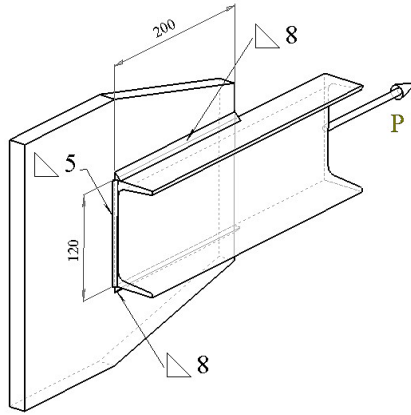


Рисунок 4.1 – До прикладу розрахунку №1 [1]

Рівень розрахункових напружень можна порівняти з допустимими напруженнями для даного матеріалу: $\tau_{\text{розрах.}} \leq [\tau]$. Наприклад, для сталі Ст3 $[\tau] = 120 \text{ МПа (1200 кгс/см}^2\text{)}$.

Приклад розрахунку №2.

Куточок 90×90×9 мм має площу перерізу $F = 15,6 \text{ см}^2$. Допустиме напруження у металі куточка $[\sigma]_{\text{р}} = 200 \text{ МПа}$, допустиме напруження зрізу в шві $[\tau'] = 120 \text{ МПа}$. Спроекувати зварне з'єднання, яке має міцність рівну куточку. Зварювання напівавтоматичне за один прохід ($\beta = 0,8$).

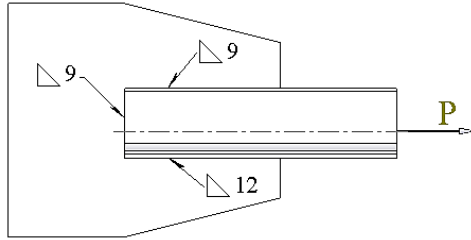


Рисунок 4.2 – До прикладу розрахунку №2 [1]

Рішення. Допустимі розтягуючі зусилля в куточку:

$$P = [\sigma]_p \cdot F = 200 \cdot 15,6 \cdot 10^{-4} = 0,312 \text{ МН.}$$

Лобовий шов вибираємо з катетом $k = 9$ мм. Зусилля, що допускається на лобовий шов:

$$P_{\text{л}} = [\tau'] \cdot l_{\text{л}} \cdot \beta \cdot k = 120 \cdot 0,09 \cdot 0,8 \cdot 0,009 = 0,078 \text{ МН.}$$

Решта зусилля передається на флангові шви:

$$P_{\text{фл}} = P - P_{\text{л}} = 0,312 - 0,078 = 0,234 \text{ МН.}$$

Це зусилля для рівнобічного куточка розподіляється між фланговим швом у "обушка" (шов №1) і фланговим швом у "пера" (шов №2) в наступній пропорції:

$$P_1 = 0,7 P_{\text{фл}} = 0,7 \cdot 0,234 = 0,164 \text{ МН,}$$

$$P_2 = 0,3 P_{\text{фл}} = 0,3 \cdot 0,245 = 0,07 \text{ МН.}$$

Далі розраховуємо довжини флангових швів.

Для шва №1 приймаємо катет $k_1 = 12$ мм. Тоді

$$l_1 = \frac{P_1}{[\tau'] \cdot \beta \cdot k_1} = \frac{0,164}{120 \cdot 0,8 \cdot 0,012} = 0,142 \text{ м,}$$

приймаємо $l_1 = 14$ см.

Для шва №2 максимальний катет можна призначити $k_1 = 9$ мм.

Тоді довжина шва:

$$l_2 = \frac{P_2}{[\tau'] \cdot \beta \cdot k_2} = \frac{0,07}{120 \cdot 0,8 \cdot 0,009} = 0,08 \text{ м.}$$

Приймаємо довжину флангового шва $l_2 = 8 \text{ см.}$

Таким чином напуск куточка на пластину визначається по більшій довжині флангового шва (в даному випадку l_1). На практиці часто збільшують довжину меншого флангового шва до довжини більшого шва.

5 ВКАЗІВКИ З ТЕХНІКИ БЕЗПЕКИ

1. До практичних робіт допускаються студенти після інструктажу з охорони праці та пожежної безпеки.
2. Забороняється вмикати електричні прилади та обладнання без дозволу завідуючого лабораторією або викладача.
3. У випадку виявлення неполадок обладнання студент повинен негайно повідомити викладача або завідуючого лабораторією.
4. У випадку виникнення пожежі або поразки електричним струмом студенти повинні діяти у відповідності із затвердженими інструкціями з охорони праці та пожежної безпеки.
5. При виконанні роботи не допускати можливості нанесення травм при випадковому падінню зразків чи нанесення подряпин їх гострими кромками.

6 ПОРЯДОК ПРОВЕДЕННЯ ПРАКТИЧНОЇ РОБОТИ

1. Ознайомитись з метою роботи і вивчити розділ 2 "Загальні відомості".
2. Підготувати усні відповіді на контрольні запитання і відповісти на питання викладача (пройти тест з позитивною оцінкою).
3. Отримати у викладача завдання на практичну роботу.
4. Виконати розрахункові завдання і оформити звіт.
5. Захистити отримані розрахунки.

7 ЗМІСТ ЗВІТУ

1. Мета роботи.
2. Загальні відомості.
3. Результати розрахунків.
4. Аналіз отриманих результатів.
5. Висновки по роботі.

8 РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Серенко А.Н. Расчет сварных соединений и конструкций / А.Н. Серенко, М.Н. Крумбольт, К.В. Багрянский. – К.: Вища школа, 1977. – 336 с.
2. Чертов І.М. Зварні конструкції: Підручник / І.М. Чертов. – К.: Арістей, 2006. – 376 с.
3. Лихтарников Я.М. Расчет стальных конструкций (справочное пособие) / Я.М. Лихтарников, В.М. Клыков, Д.В. Ладьженский. – К.: Будівельник, 1976. – 352 с.