

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до виконання практичної роботи №1
«Розрахунок міцності зварних з'єднань зі стиковими швами»

з дисципліни
«Розрахунки та проектування зварних конструкцій»

для студентів освітньої програми «Технології та устаткування
зварювання» усіх форм навчання

Методичні вказівки до виконання практичної роботи №1 «Розрахунок міцності зварних з'єднань зі стиковими швами» з дисципліни «Розрахунки та проектування зварних конструкцій» для студентів освітньої програми «Технології та устаткування зварювання» усіх форм навчання / Укл. М.Ю. Осіпов, О.Є. Капустян. – Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2020. – 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 ОТЗВ
Протокол №7 від 19.02.2020 р.

Рекомендовано
до видання НМК ІФФ
Протокол №6 від 10.03.2020 р.

ЗМІСТ

1 МЕТА РОБОТИ.....	4
2 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ.....	4
3 КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ ДЛЯ САМОПЕРЕВІРКИ І КОНТРОЛЮ ПІДГОТОВЛЕНOSTІ СТУДЕНТІВ ДО РОБОТИ	9
4 РОЗРАХУНОК ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ	10
ІЗ СТИКОВИМИ ШВАМИ.....	10
5 ПОРЯДОК ПРОВЕДЕННЯ ПРАКТИЧНОЇ РОБОТИ	15
6 ЗМІСТ ЗВІТУ	15
7 РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА	15

1 МЕТА РОБОТИ

Придбання практичних навичок у розрахунку зварних з'єднань зі стиковими швами.

2 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ

В даний час використовують два рівноправних методи розрахунку сталевих конструкцій: за граничним станом і за допустимими напруженнями.

Метод розрахунку зварних конструкцій за граничним станом.

Граничним станом конструкції називається стан, при якому вона перестає задовольняти пропонованим експлуатаційним вимогам, тобто перестає чинити опір зовнішнім впливам або отримує неприпустимі деформації або місцеві пошкодження.

У більшості випадків розрахунок металевих конструкцій проводиться за першим граничним станом – за умовою міцності.

У загальному вигляді умову міцності можна виразити такою формулою:

$$\sigma_{\text{розрах.}} \leq \frac{\sigma_T}{k_3}, \quad (2.1)$$

$$k_3 = \frac{n}{k \cdot m}$$

де $\sigma_{\text{розрах.}}$ – розрахункове напруження в небезпечному перерізі елементу, МПа (кГс/см²);

k_3 – коефіцієнт запасу міцності по відношенню до нормальної межі текучості σ_T ;

n – коефіцієнт можливого перевантаження конструкції (від 1 і вище);

k – коефіцієнт однорідності металу (для маловуглецевої сталі – 0,9, для низьколегованої сталі – 0,85);

m – коефіцієнт умов роботи, що характеризує особливості навантаження, змінність середовища (менше 1).

Вихідна загальна формула для розрахунку будь-якого елементу або перетину конструкції буде мати наступний вигляд:

$$\sigma_{\text{розрах.}} \leq \frac{k \cdot m}{n} \cdot \sigma_T. \quad (2.2)$$

З урахуванням неоднорідності властивостей матеріалу межа плинності σ_T замінюється на розрахунковий опір R :

$$R = k \cdot \sigma_T.$$

Для маловуглецевої сталі $R = 0,9\sigma_T$.

Таким чином, при використанні методики розрахунку конструкції за граничним станом загальний коефіцієнт запасу міцності замінений коефіцієнтами k , n , m , які в різних поєднаннях дають різні значення коефіцієнта запасу міцності, і загальна формула умови міцності виглядає так:

$$\sigma_{\text{розрах.}} \leq \frac{m}{n} R. \quad (2.3)$$

Величина $\frac{m}{n} R$, являє собою, по суті, допустиме напруження. Коефіцієнти m і n неоднакові не тільки для різних виробів, але в деяких випадках і для елементів однієї конструкції.

Таким чином, методом за граничним станом для різних конструкцій розрахунок проводиться за різними допустимими напруженнями [1].

Метод розрахунку зварних конструкцій за допустимими напруженнями.

При розрахунку конструкцій за допустимими напруженнями умова міцності має вигляд:

$$\sigma_{\text{розрах.}} \leq [\sigma], \quad (2.4)$$

де $[\sigma]$ – допустимі напруження, МПа (кГс/см^2).

У машинобудуванні в конструкціях, що працюють під статичними навантаженнями, в більшості випадків допустимі напруження призначаються в залежності від межі текучості σ_T і визначаються відношенням:

$$[\sigma] = \frac{\sigma_T}{k_1}, \quad (k_1 = 1,4 \dots 1,6)$$

в рідкісних випадках – в залежності від межі міцності – σ_B :

$$[\sigma] = \frac{\sigma_B}{k_2}, \quad (k_2 = 2,0 \dots 2,4)$$

k_1 і k_2 – коефіцієнти запасу міцності.

При розрахунку за граничним станом і за допустимими напруженнями основні формули мають наступний вигляд.

1. При перевірці на міцність центрально-розтягнутих (стиснутих) елементів:

$$\sigma_{\text{розрах.}} = \frac{P}{F} \leq \frac{m}{n} R \quad \text{або} \quad \sigma_{\text{розрах.}} = \frac{P}{F} \leq [\sigma] \quad (2.5)$$

де P – розрахункове навантаження – осьова сила, Н (кГс);

F – площа поперечного перерізу елемента (зварного шва), м^2 (см^2).

$$F_{\text{ш}} = l \cdot \delta,$$

де δ – відповідно довжина і товщина перерізу, в якому визначаються напруження (довжина і висота шва), м (см).

2. При перевірці на міцність елементів, що згинаються:

$$\sigma_{\text{розрах.}} = \frac{M}{W} \leq \frac{m}{n} R \quad \text{або} \quad \sigma_{\text{розрах.}} = \frac{M}{W} \leq [\sigma], \quad (2.6)$$

$$\tau_{\text{розрах.}} = \frac{Q \cdot S}{J \cdot \delta} \leq \frac{m}{n} R_{\text{ср}} \quad \text{або} \quad \tau_{\text{розрах.}} = \frac{Q \cdot S}{J \cdot \delta} \leq [\tau], \quad (2.7)$$

де M – згинальний момент, діючий в перерізі, Н·м (кГс·см);

W – момент опору поперечного перерізу елемента (зварного шва), м^3 (см^3);

τ – дотичні напруження в елементі конструкції від розрахункових силових впливів, МПа (кГс/см²);

Q – перерізуюча сила, Н (кГс);

S – статичний момент частини перерізу, що зрушується відносно нейтральної осі (зварного шва), м^3 (см^3);

J – момент інерції перерізу відносно нейтральної осі (зварного шва), м^4 (см^4);

$$W_{\text{ш}} = \frac{\delta \cdot l^2}{6};$$

$$J_{\text{ш}} = \frac{\delta \cdot l^3}{12};$$

$$S_{\text{ш}} = \frac{\delta \cdot l^2}{8}.$$

3. При перевірці на стійкість центрально-стиснутих елементів або елементів, що згинаються:

$$\sigma_{\text{розрах.}} = \frac{P}{F} \leq \frac{m}{n} \varphi R \quad \text{або} \quad \sigma_{\text{розрах.}} = \frac{P}{F} \leq [\sigma] \varphi, \quad (2.8)$$

$$\sigma_{\text{розрах.}} = \frac{M}{W} \leq \frac{m}{n} \varphi_{\delta} R_{\text{або}} \quad \sigma_{\text{розрах.}} = \frac{M}{W} \leq [\sigma] \varphi_{\delta}, \quad (2.9)$$

де φ – коефіцієнт поздовжнього вигину;

φ_{δ} – коефіцієнт зменшення несучої здатності елементів, що згинаються при перевірці загальної стійкості.

4. При перевірці на міцність елементів, що працюють на зріз (в припущенні рівномірного розподілу напружень по перерізу):

$$\tau_{\text{розрах.}} = \frac{Q}{F_{\text{ср}}} \leq \frac{m}{n} R_{\text{ср}} \quad \text{або} \quad \tau_{\text{розрах.}} = \frac{Q}{F_{\text{ср}}} \leq [\tau] \quad (2.10)$$

5. При перевірці на міцність елементів, що знаходяться в складно-напруженому стані, одночасно зазнають дії нормальних σ і тангенціальних τ напружень:

$$\sigma_{\text{екв.}} = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} \leq \frac{m}{n} R \quad \text{або} \quad \sigma_{\text{екв.}} = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} \leq [\sigma]. \quad (2.11)$$

Відтак, як за граничними станами, так і за допустимими напруженнями можна проводити наступні розрахункові операції.

1. За відомими навантаженнями і геометричним характеристикам конструкції визначити діючі напруження, наприклад:

$$\sigma_{\text{розрах.}} = \frac{P}{F} \leq [\sigma] \quad \text{або} \quad \sigma_{\text{розрах.}} = \frac{M}{W} \leq [\sigma]. \quad (2.12)$$

2. За відомим допустимим напруженням або розрахунковим опором для заданої конструкції знайти максимально допустиму

величину навантажень:

$$P_{max} = [\sigma] \cdot F \quad \text{або} \quad M_{max} = [\sigma] \cdot W. \quad (2.13)$$

3. З відомих навантажень, допустимих напружень або розрахункових опорів визначити необхідні геометричні розміри і характеристики конструкцій, наприклад:

$$F_{min} = \frac{P}{[\sigma]} \quad \text{або} \quad W_{min} = \frac{M}{[\sigma]}. \quad (2.14)$$

4. Стосовно до зварних конструкцій широко використовується ще один вид розрахунків – розрахунки зварних з'єднань на рівномірність основному металу.

У більшості випадків немає необхідності розраховувати зусилля, діючі в елементах конструкцій, так як розміри елементів вже призначені конструкторами за величиною цих зусиль. Тоді зварні з'єднання повинні бути рівномірні зварювальним елементам конструкцій. Цього можна досягти шляхом відповідного призначення катета, довжини шва і способу зварювання.

При розрахунках на рівномірність прирівнюються максимально допустимі для основного металу і зварного з'єднання величини сил і згинальних моментів, наприклад:

$$P_{\max \text{ о.м.}} = P_{\max \text{ шва}} \quad \text{або} \quad [\sigma] \cdot F_{\text{о.м.}} = [\tau'] F_{\text{шва}}, \quad (2.15)$$

$$M_{\max \text{ о.м.}} = M_{\max \text{ шва}} \quad \text{або} \quad [\sigma] \cdot W_{\text{о.м.}} = [\tau'] W_{\text{шва}}. \quad (2.16)$$

Так як допустимі напруження $[\sigma']$, $[\tau']$ і розрахункові опори R' і $R'_{\text{ср}}$ для зварних з'єднань призначають в частках від основних величин допустимого напруження і розрахункового опору на основний метал [2], то в розрахунках на рівномірність знання $[\sigma]$ або R не обов'язково. Наприклад, якщо $[\tau'] = 0,65[\sigma]$, то, підставляючи його в (2.16):

$$W_{\text{о.м.}} = 0,65 W_{\text{шва}},$$

визначаємо необхідні геометричні розміри зварного з'єднання, що забезпечує рівномірність основному металу.

Такі розрахунки прості і зручні для застосування в практиці.

Всі вищенаведені формули справедливі як для розрахунку основного металу, так і для розрахунку зварних з'єднань.

Слід враховувати, що $[\sigma]$ і R для зварних з'єднань і для основного металу можуть відрізнятися.

Надалі в символи для зварних з'єднань будемо додавати знак штриха, наприклад: R'_p , R'_{cp} , $[\sigma']_p$, $[\tau']$.

Допустимі напруження при розтягуванні або розрахункові опори при розтягуванні називають основними. При інших видах зусиль – визначаються як похідні від них і представлені в таблицях довідкової літератури [2, 3, 4] або визначаються на підставі експериментів.

3 КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ ДЛЯ САМОПЕРЕВІРКИ І КОНТРОЛЮ ПІДГОТОВЛЕНOSTІ СТУДЕНТІВ ДО РОБОТИ

1. Які фактори приймаються до уваги при розрахунку за граничним станом будівельних конструкцій?

2. Якими коефіцієнтами пов'язані розрахункові опори із допустимими напруженнями?

3. Залежно від яких чинників встановлюються допустимі напруження в машинобудуванні?

4. Що називається основним допустимим напруженням? Які його похідні напруження?

5. Як розраховуються на міцність зварні шви в будівельних металоконструкціях?

6. Як призначаються допустимі напруження в зварних швах в машинобудуванні?

7. Записати формулу для розрахункового зусилля з'єднання при розтягуванні, стисненні, вигині.

8. Які основні типи зварних з'єднань застосовують при електродуговому зварюванні?

9. Які з'єднання називають звареними встик? Як змінюється підготовка кромок при зварюванні встик в залежності від товщини елемента?

10. Яка формула при розрахунку з'єднань встик, що працюють на поздовжні сили?

11. Як формулюється умова рівномірності зварного шва основному металу?

12. Чому за розрахункову товщину приймають товщину основного металу при розрахунку з'єднань встик?

4 РОЗРАХУНОК ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ ІЗ СТИКОВИМИ ШВАМИ

Зварні шви встик, що сприймають поздовжні розтягувальні або стискуючі сили, проектується прямі або косі.

Розрахункова довжина шва l приймається рівною фактичній, якщо кінці шва виведені на вивідні планки. Якщо шов не виведений на вивідні планки, то його розрахункова довжина зменшується на 10 мм.

Розрахункова висота шва δ береться рівній товщині основного металу, якщо шов виконаний з повним проваром. Якщо ж шов заварений не на всю товщину, то δ береться рівній істинній товщині шва.

Приклад розрахунку №1.

На пластину A , приварену встик до пластини B ручним дуговим зварюванням електродами типу Е42, діє сила P (рис. 4.1), яка складає з поздовжньою віссю кут α . Провести перевірочний розрахунок стикового шва, якщо матеріал пластин сталь Ст3; $P = 10$ тс; $B = 300$ мм; $\delta = 20$ мм; $L = 600$ мм; $\alpha = 30^\circ$; початок і кінець шва виведені на технологічні планки. Розрахунок провести по допустимим напруженням.

Рішення. Так як сила P прикладена до пластини під кутом α , то вона викличе в шві нормальні і дотичні напруження.

Розкладемо силу P на нормальну (по відношенню до осі шва) N і дотичну T сили і визначимо їх величини:

$$\begin{aligned} N &= P \cos \alpha, \\ T &= P \sin \alpha. \end{aligned}$$

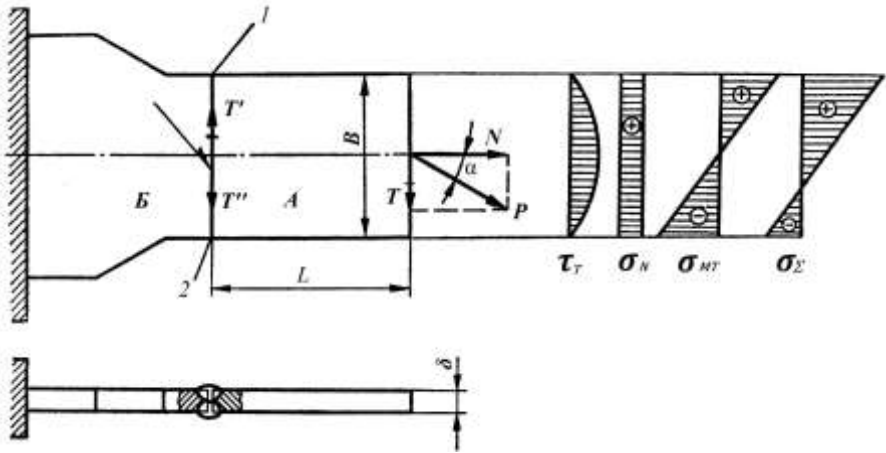


Рисунок 4.1 – Розрахункова схема до прикладу №1 [2]

Під дією сили N в шві виникають нормальні напруження розтягу σ_N , рівномірно розподілені по довжині шва l і визначаються за формулою:

$$\sigma_N = \frac{N}{F_{\text{ш}}} = \frac{N}{l\delta} = \frac{P \cos \alpha}{l\delta}.$$

Щоб оцінити дію на шов дотичної сили T , докладемо в будь-якій точці осі шва дві врівноважуючі сили T' і T'' , однакові по абсолютній величині T .

Новоутворена пара сил T і T' дасть момент $M = TL$, під дією якого в шві виникнуть нормальні напруження, розподілені по довжині шва, як показано на епюрі рис. 4.1 (σ_{MT}). У крайніх точках шва (1 і 2) нормальні напруження від моменту визначаються за формулою:

$$\sigma_{MT} = \frac{M}{W_{\text{ш}}} = \frac{6TL}{\delta l^2} = \frac{6LP \sin \alpha}{\delta l^2}.$$

При цьому в точці 1 нормальні напруження будуть розтягуючими, а в точці 2 – стискаючими.

Сумарна величина нормальних напружень в точках 1 і 2 від дії сили N і моменту M визначиться шляхом алгебраїчного складання напружень σ_N і σ_{MT} у відповідних точках:

$$\begin{aligned}\sigma_1 &= \sigma_N + \sigma_{MT}, \\ \sigma_2 &= \sigma_N - \sigma_{MT}.\end{aligned}$$

Сумарна епюра нормальних напружень в шві зображена на рис. 4.1 (σ_z). Так як допустимі напруження в шві на стиск більше, ніж на розтяг [2] і точка 1 шва більш напружена, ніж точка 2, то в подальшому будемо аналізувати напруження тільки в точці 1.

Сила T'' викличе в шві напруження зрізу, величина яких може бути визначена за формулою (2.7):

$$\tau_{ш} = \frac{T \cdot S_{ш}}{J_{ш} \cdot \delta}.$$

Максимальне значення дотичних напружень буде в центрі шва (епюра τ_T на рис. 4.1):

$$\tau_{max} = \frac{T}{\delta} \frac{12}{\delta l^3} \frac{\delta l^2}{8} = \frac{3P \sin \alpha}{2\delta l} = \frac{3 \cdot 10\,000}{2 \cdot 2 \cdot 30 \cdot 2} = 125 \text{ кгс/см}^2 (12,5 \text{ МПа}).$$

Допустимі напруження для зварного шва дорівнюватимуть [2, додатки 8 і 13]:

$$\begin{aligned}[\sigma']_p &= 0,9[\sigma] = 0,9 \cdot 1600 = 1440 \text{ кгс/см}^2 (144 \text{ МПа}); \\ [\tau'] &= 0,6[\sigma] = 0,6 \cdot 1600 = 960 \text{ кгс/см}^2 (96 \text{ МПа}).\end{aligned}$$

Так як величина максимальних дотичних напружень значно менша допустимих, а їх розташування не збігається з розташуванням максимальних значень нормальних напружень, то в подальшому дотичні напруження можна не враховувати.

Сумарне значення нормальних напружень в точці 1:

$$\begin{aligned}\sigma_1 &= \sigma_N + \sigma_{MT} = \frac{P \cos \alpha}{\delta l} + \frac{6LP \sin \alpha}{\delta l^2} = \\ &= \frac{10\,000 \cdot 3}{30 \cdot 2 \cdot 2} + \frac{6 \cdot 60 \cdot 10\,000}{2 \cdot 30^2 \cdot 2} = 1144 \text{ кгс/см}^2 (114,4 \text{ МПа}).\end{aligned}$$

Оскільки $\sigma_1 < [\sigma']_p$, то умова міцності з'єднання дотримано.

Приклад розрахунку №2.

Визначити граничний кут нахилу косого шва α (рис. 4.2),

виходячи з рівномірності шва і основного металу, якщо зварювання пластин, виготовлених з алюмінієвого сплаву АД35Т1, виконувалося в середовищі аргону вольфрамовим електродом. Початок і кінець шва виведені на технологічні планки.

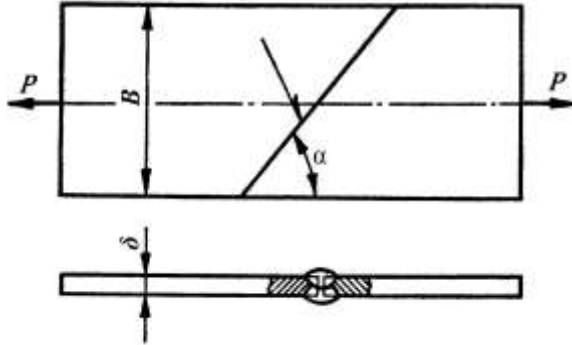


Рисунок 4.2 – Розрахункова схема до прикладу №2 [2]

Розрахунок виконати за граничним станом, прийнявши коефіцієнт перевантаження $n = 1,0$, коефіцієнт умов роботи $m = 0,8$.

Рішення. Умова рівномірності основного металу і зварного з'єднання має вигляд:

$$P_{\max \text{ о.м.}} = P_{\max \text{ шва}}. \quad (4.1)$$

Величина зусилля $P_{\max \text{ о.м.}}$ визначається умовою міцності основного металу:

$$\sigma_{\text{о.м.}} = \frac{n P_{\max \text{ о.м.}}}{\delta B} \leq m R.$$

З цього рівняння визначаємо $P_{\max \text{ о.м.}}$, вважаючи, що $\sigma_{\text{о.м.}} = m R$:

$$P_{\text{о.м.}} = \frac{m R \delta B}{n} = 0,8 R \delta B. \quad (4.2)$$

Оскільки в косому шві виникають нормальні і дотичні напруження, то необхідно виконувати розрахунок за формулами:

$$\sigma_{\text{ш}} = \frac{n P_{\text{ш}} \sin \alpha}{\delta l} \leq m R'_p, \quad (4.3)$$

$$\tau_{ш} = \frac{n P_{ш} \cos \alpha}{\delta l} \leq m R'_{cp}. \quad (4.4)$$

З огляду на умову (4.1) і виражаючи довжину шва l через ширину пластин B і α ($l = \frac{B}{\sin \alpha}$), знаходимо величину кута α (пам'ятаючи, що $\sin \alpha \times \cos \alpha = \frac{1}{2} \sin 2\alpha$):

$$\alpha = \arcsin \sqrt{\frac{0,8 R'_p \delta B}{P_{o.m.}}}, \quad (4.5)$$

$$\alpha = \frac{1}{2} \arcsin \frac{1,6 R'_{cp} \delta B}{P_{o.m.}}. \quad (4.6)$$

Підставляючи у формули (4.5) і (4.6) замість $P_{o.m.}$ його вираз з рівняння (4.2), а замість R , R'_p , R'_{cp} – їх значення з додатків 11 і 12 [2], знаходимо:

$$\begin{aligned} \alpha &= \arcsin \sqrt{\frac{R'_p}{R}} = \arcsin \sqrt{\frac{900}{1700}} = 46^\circ 40'; \\ \alpha &= \frac{1}{2} \arcsin \frac{2 R'_{cp}}{R} = \frac{1}{2} \arcsin \frac{2 \cdot 600}{1700} = 22^\circ 30'. \end{aligned}$$

Для остаточного визначення кута нахилу зварного шва необхідно провести ще перевірку по еквівалентним напруженням:

$$\sigma_{екв.} = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} \leq \frac{m}{n} R'_p. \quad (4.7)$$

Підставивши (4.3) і (4.4) в (4.7), отримаємо рівняння:

$$\sin^4 \alpha + 0,75 \sin^2 2\alpha = \left(\frac{900}{1700} \right)^2,$$

вирішуючи яке, знаходимо $\alpha = 18^\circ 27'$.

Таким чином, граничний кут нахилу зварного шва визначається еквівалентними напруженнями, причому забезпечити рівномірність шва і основного металу при прийнятих умовах зварювання через мале значення кута α практично неможна.

5 ПОРЯДОК ПРОВЕДЕННЯ ПРАКТИЧНОЇ РОБОТИ

1. Ознайомитись з метою 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.

6 ЗМІСТ ЗВІТУ

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

7 РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Николаев Г.А. Сварные конструкции. Расчеты и проектирование / Г.А. Николаев, В.А. Винокоуров. – М.: Высшая школа, 1990. – 446 с.
2. Серенко А.Н. Расчет сварных соединений и конструкций / А.Н. Серенко, М.Н. Крумбольш, К.В. Багрянский. – К.: Вища школа, 1977. – 336 с.
3. Чертов І.М. Зварні конструкції: Підручник. – К.: Арістей, 2006. – 376 с.
4. Биковський О.Г. Довідник зварника / О.Г. Биковський, І.В. Пінковський. – К.: Техніка, 2002. – 336 с.