

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
імені ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до практичних занять з дисципліни «Металеві конструкції»
для здобувачів вищої освіти спеціальності 192 «Будівництво та цивільна інженерія»
(в 3-х частинах)

Частина 2. Розрахунок і конструювання зварних та
болтових з'єднань сталевих конструкцій.
(Електронне видання)

ЗАТВЕРДЖЕНО
на засіданні кафедри
будівництва, урбаністики та
просторового планування
Протокол № 8 від 18.02.2025 р.

Київ, 2025 р.

УДК 624.014

Методичні вказівки до практичних занять з дисципліни «Металеві конструкції» для здобувачів вищої освіти спеціальності 192 «Будівництво та цивільна інженерія» (в 3-х частинах) Частина 2. Розрахунок і конструювання зварних та болтових з'єднань сталевих конструкцій. (Електронне видання) / Уклад.: К. В. Соколенко, В. М. Соколенко – Київ: вид-во СНУ ім. В. Даля, 2025. – 40 с.

Методичні вказівки мають ціль допомогти студентам денної та заочної форми при виконанні практичних занять оволодіти навичками розрахунку та проектування елементів і з'єднань сталевих конструкцій відповідно до чинних норм проектування. Під час занять вирішуються типові завдання, характерні для проектної практики.

Рецензент:

О.А. Черних, доц., к.т.н.

Укладачі:

К. В. Соколенко, ст. викл., PhD

В. М. Соколенко, доц., к.т.н.

ЗМІСТ

3 РОЗРАХУНОК І КОНСТРУЮВАННЯ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ СТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ.....	4
3.1 Теоретичні положення	4
3.2 Вказівки до розв'язання задач	6
3.3 Приклади розв'язання задач.....	8
3.4 Вихідні дані до практичного завдання.....	18
3.5 Контрольні питання	20
3.6 Додаткова література за темою.....	21
4 РОЗРАХУНОК І КОНСТРУЮВАННЯ БОЛТОВИХ З'ЄДНАНЬ СТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ.....	22
4.1 Теоретичні положення	22
4.2 Вказівки до розв'язання задач	27
4.3 Приклади розв'язання задач.....	29
4.4 Вихідні дані до практичного завдання.....	36
4.5 Контрольні питання	37
4.6 Додаткова література за темою.....	37
РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА	39

3 РОЗРАХУНОК І КОНСТРУЮВАННЯ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ СТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ

3.1 Теоретичні положення

Конструктивно зварні з'єднання бувають двох видів: стикові та кутові (рисунок 3.1, а, б), виконані автоматичним, напівавтоматичним або ручним зварюванням, з проплавленням і без проплавлення коренів кутового шва (рисунок 3.1, в).

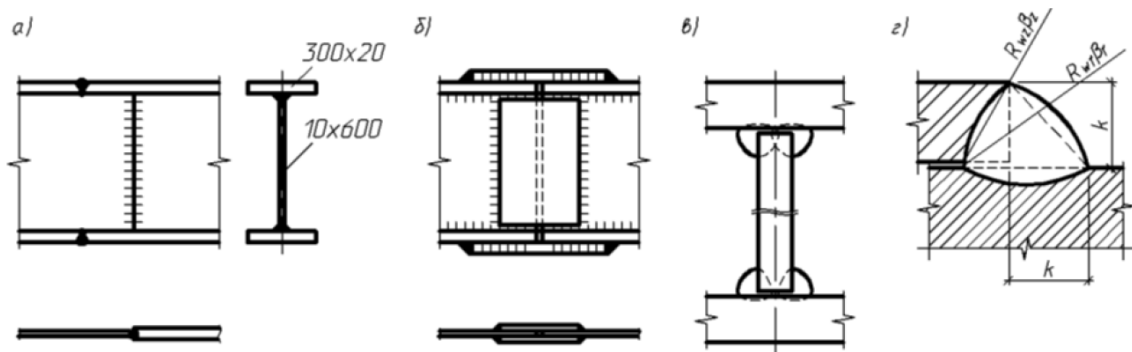


Рисунок 3.1. Зварні з'єднання

Напруження в стиковому шві для всіх деформацій (розтягнення, стиснення, вигин, зріз) визначають так само, як і для перерізу основного металу. Тому під час розрахунку стикових з'єднань використовують ті самі формули, що і для перерізу по основному металу:

$$\frac{N}{AR_{wy}\gamma_c} \leq 1; \frac{M}{WR_{wy}\gamma_c} \leq 1; \frac{QS}{I_x t R_{ws}\gamma_c} \leq 1; \quad (3.1)$$

Відмінності будуть лише у визначенні геометричних характеристик (A , W , I_x) і в розрахункових опорах ($R_{wy}\gamma_c$, $R_{sz}\gamma_c$) (табл. Г.2, додатку Г [3]).

Кутові зварні шви від будь-якого силового впливу (M , N , Q) працюють на умовний зріз.

Згідно з чинними нормами [3], розрахунок кутових швів слід проводити за двома перерізами (див. рисунок 3.1, з) по металу шва, що характеризується параметрами (R_{wf} , β_f), і по металу межі сплавлення, що характеризується параметрами (R_{wz} , β_z). Значення зазначених параметрів залежать від типу електродів, типу зварювального дроту, виду зварювання, катета зварного шва (розділ 16, додаток Д [3]). При цьому катетом (товщиною) шва є катет рівнобедреного прямокутного трикутника, вписаного в профіль шва (див. малюнок 3.1, з). В ідеальному випадку матеріали і вид зварювання можна підібрати так, що $R_{wf}\beta_f/R_{wz}\beta_z = 1$, але зазвичай характеристики міцності зварювання не збігаються. Тому під час розрахунків насамперед встановлюють, який із перерізів (метал шва або метал межі сплавлення) є розрахунковим. Якщо $R_{wf}\beta_f/R_{wz}\beta_z \leq 1$, розрахунковим є переріз за металом шва,

його слід використовувати в розрахунках (інакше – навпаки). За розрахункову довжину кутового шва приймають $l_w = l - 1$ см, де l – довжина зварної ділянки.

Зазвичай у зварному шві діють згинальний момент і зрізуючі сили. Зварні шви можуть бути розташовані в площині, перпендикулярній площині дії згинального моменту (малюнок 3.2, а), як у разі поперечного вигину, і в паралельній площині (малюнок 3.2, б), як у разі кручення.

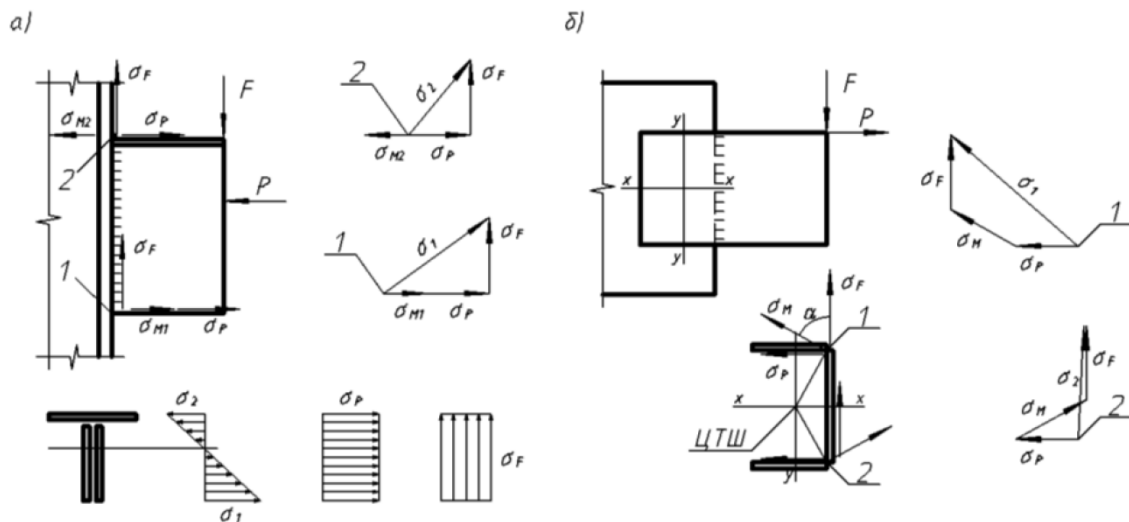


Рисунок 3.2. Зварні шви

У разі поперечного вигину зварний шов розташований перпендикулярно до площини дії моменту (див. рисунок. 3.2, а). Напруження від згинального моменту і середні від зрізувальних сил, у цьому випадку знаходять за формулами опору матеріалів:

$$\sigma_M = \frac{M}{W_w}; \sigma_F = \frac{F}{A_w}; \sigma_P = \frac{P}{A_w} \quad (3.2)$$

Відклавши значення цих напружень у характерних точках перерізу (зазвичай крайніх) у бік, зворотний до зовнішніх впливів (M , F , P), отримаємо векторну діаграму компонентів напружень, що дає змогу без розрахунків установити найбільш напружену точку шва та обчислити для неї сумарні (результуючі) напруження. Наприклад, для шва на малюнку 3.2, а з діаграм напружень видно, що найбільш напруженою точкою шва є точка 1, оскільки для неї сумарне напруження буде більшим, ніж для точки 2.

Сумарні напруження можна обчислити аналітично і графічно (див. рисунок 3.2, а):

$$\vec{\sigma} = \vec{\sigma}_M + \vec{\sigma}_F + \vec{\sigma}_P \quad (3.3)$$

Якщо напрямки складових ортогональні, застосовують формулу Піфагора. Тоді умова міцності (загальна формула) для точки 1 (див. рисунок 3.2, а)

$$\sigma_w = \sqrt{(\sigma_M + \sigma_P)^2 + \sigma_F^2} \quad (3.4)$$

Використовуючи цей вираз, можна розв'язати відомі три види задач:

1. знаходити катет або довжину зварного шва;
2. визначати величину зовнішньої граничної сили на консоль;
3. перевіряти міцність шва.

Для обчислення геометричних характеристик перерізу шва його зображують окремо і проставляють необхідні розміри.

Під час розрахунку кутових швів, розміщених у площині дії моменту (див. рисунок 3.2, б), компоненти (складові) середніх напружень від зрізуючих сил, та їхній напрямок визначають, як і в разі поперечного згину швів, за формулами опору матеріалів. Напруження від моменту визначають у припущенні повороту консолі на малий кут навколо центру тяжіння зварних швів (ЦТШ) за формулою:

$$\sigma_M = \frac{M \rho}{I_{wx} + I_{wy}} \quad (3.5)$$

де M – згинальний момент усіх зовнішніх сил відносно центру тяжіння зварних швів; ρ – відстань від ЦТШ до розглянутої точки шва; I_{wx} , I_{wy} – осьові моменти інерції зварних швів.

Напруження від моменту діє перпендикулярно плечу, та спрямовано в бік, зворотний до згинального моменту. Складові напружень від зовнішніх зрізуючих сил, також спрямовані в бік, зворотний дії зовнішніх сил.

Сумарне максимальне напруження в точці визначають за загальною формулою після аналізу діаграм напружень у крайніх точках шва.

Розклавши напруження від моменту на взаємно перпендикулярні напрямки (див. рисунок 3.2, б), умова міцності в аналітичній формі набуде вигляду:

$$\sigma_w = \sqrt{(\sigma_M \cos \alpha + \sigma_F)^2 + (\sigma_M \sin \alpha + \sigma_F)^2} \leq R_{wf} \gamma_c \quad (3.6)$$

За цим виразом також можна знайти розміри зварних швів, граничну силу або перевірити міцність зварювання. На малюнку 3.2, б наведено розв'язання задачі в графічній формі.

3.2 Вказівки до розв'язання задач

Мета заняття: вивчити методику розрахунку зварних з'єднань сталевих конструкцій за ДБН В.2.6-198:2014 «Сталеві конструкції» [3].

Вихідні дані: типові задачі на розрахунок зварного з'єднання, які містить схему з'єднання з необхідними розмірами, навантаженнями, характеристиками елементів, необхідних для розрахунку відповідно до індивідуального варіанту.

Перед виконанням завдання слід ознайомитися із положеннями щодо розрахунку та проектування зварних з'єднань, викладених в нормах проектування ДБН [3]:

- a) Підрозділ 16.1 який містить основні положення з проектування зварних з'єднань сталевих конструкцій.
- b) Вимоги, щодо розмірів зварних кутових швів (п. 16.1.5)
- c) Мінімальний катет зварного шва (табл. 16.1)
- d) Визначення коефіцієнтів, що враховують вид зварювання та діаметр зварювального дроту, положення шва та його катет (табл. 16.2)
- e) Формули для визначення розрахункових опорів зварних швів (табл. 7.3)
- f) Розрахунок зварних стикових з'єднань на дію поздовжньої сили N , що проходить через центр ваги з'єднання (п. 16.1.14)
- g) Розрахунок зварних з'єднань з кутовими швами на дію поздовжньої сили N , що проходить через центр ваги з'єднання (п. 16.1.16)
- h) Розрахунок зварних з'єднань з кутовими швами на дію згинального моменту M , у площині перпендикулярній до площини розташування швів (п. 16.1.17)
- i) Розрахунок зварних з'єднань з кутовими швами на дію згинального моменту M , у площині розташування цих швів (п. 16.1.18)
- j) Розрахунок зварних з'єднань з кутовими швами на одночасну дію поздовжньої N і поперечної Q сил, та згинального моменту M (п. 16.1.19)
- k) Матеріали для зварних з'єднань (табл. Д.1 додатку Д)
- l) Характеристичні та розрахункові опори металу кутових швів (табл. Д.2 додатку Д)

Як правило розрахунок зварного з'єднання полягає у розрахунку необхідного катету шва зварного з'єднання, або призначенні його конструктивно мінімально можливим з наступною перевіркою розрахунком.

В загальному випадку при розрахунку зварного з'єднання виконуються наступні операції (для кутових швів):

1. За таблицею Е.2 ДБН [3] визначається характеристичний – R_{un} і розрахунковий опір – R_y , листового прокату (більшої товщини) для класу сталі елементів конструкцій, що з'єднуються.
2. Визначаються розрахункові опори швів, у випадку кутових швів за металом шва R_{wf} (таблиця Д.2 ДБН [3]) і за металом межі сплавлення $R_{wz} = 0.45R_{un}$ (формула з таблиці 7.3 ДБН [3]).
3. За вказівками пункту 16.1.5 ДБН [3] визначається максимально можливий катет кутового шва з округленням до найближчого меншого стандартного розміру (катет шва не більше ніж $1.2t$, де t – найменша з товщини зварюваних елементів; та не більше ніж товщина елемента, що зварюється)
4. За таблицею 16.2 ДБН [3] залежно від виду зварювання, положення і катету зварних швів визначаються коефіцієнти форми шва β_f та β_z .

5. Відповідно до розрахункової ситуації за формулами ДБН [3] визначаються розрахункові довжини зварних швів чи виконується перевірка їх міцності з умов міцності металу шва і металу межі сплавлення
6. Необхідна довжина зварного шва визначається за більшою розрахунковою довжиною зварного шва з урахуванням непровару довжиною, що дорівнює 1 см чи розміру катету шва, з округленням у більшу сторону.

Конкретні алгоритми розрахунку для різних розрахункових ситуацій наведені в прикладах до даного практичного завдання, та в рекомендованій літературі.

3.3 Приклади розв'язання задач

Приклад 1

Розрахувати прикріплення кутиків кронштейна. Товщина фасонки 6 мм. Зварювання проводиться вручну електродом Э42А за ГОСТ 9467

Розрахунковий опір металу кутових швів умовному зрізу в площині наплавленого металу $R_{wf} = 180 \text{ МПа}$, при класі міцності основного металу С315 та нижче (по табл. Д.2 додатку Д ДБН)

Розрахунковий опір металу кутових швів умовному зрізу у площині металу межі сплавлення – $R_{wz} = 0.45 \times 360 = 162 \text{ МПа}$ ($R_{un} = 360 \text{ МПа}$ для фасонного прокату завтовшки до 20 мм за табл. Г.2 додатка Г ДБН).

Коефіцієнти, які враховують режим зварювання – $\beta_f = 0.7$; $\beta_z = 1$

Положення шва – нижнє, горизонтальне, вертикальне

$$\beta_z R_{wz} = 162 \text{ МПа} > \beta_f R_{wf} = 127 \text{ МПа}$$

Розрахунковим є переріз металу шва.

У разі прикріплення фланговими швами асиметричних профілів, якими є прокатні кутики, щоб уникнути появи додаткового моменту, площу кожного шва, слід призначати так, щоб рівнодіюча зусиль, що передаються ними, збігалася з віссю прикріплюваного елемента (лінією центру ваги кутиків). Тому зусилля N має бути розподілене обернено пропорційно відстаням швів до зазначеної осі.

Прямий кут утворений двома гранями кутика називається обушком, відповідно кінці граней – пером.

$$\frac{N_n}{x_0} = \frac{N_{об}}{b - x_0} = \frac{N}{b}$$

Звідки:

$$N_n = \frac{N}{b} x_0; N_{об} = \frac{N}{b} (b - x_0)$$

До прикладу, для кутика $90 \times 90 \times 6$ – $x_0 = y_0 = 2.43 \text{ см}$

$$N_n = 0.27N; N_{об} = 0.73N$$

На практиці ці співвідношення наближено вважають рівними відповідно 0.3 і 0.7 для рівнополичних кутиків, 0.25 і 0.75 для нерівнополичних кутиків, що прикріплюються вузькою полицею, 0.35 і 0.65 для нерівнополичних кутиків, що прикріплюються широкою полицею.

Розраховуємо прикріплення кутика $70 \times 70 \times 5$, $N = 260 \text{ кН}$

За табл. 16.1 ДБН визначаємо мінімальний катет шва в 5 мм, в той же час дотримуючись вимог по п.16.1.5б – для кутиків при накладенні шва вздовж закругленої кромки (по перу) катет шва приймаємо не більше $0,9t_{yz} \cong 4 \text{ мм}$, при зварюванні по обушку не більше $1,2t_{yz} = 6 \text{ мм}$

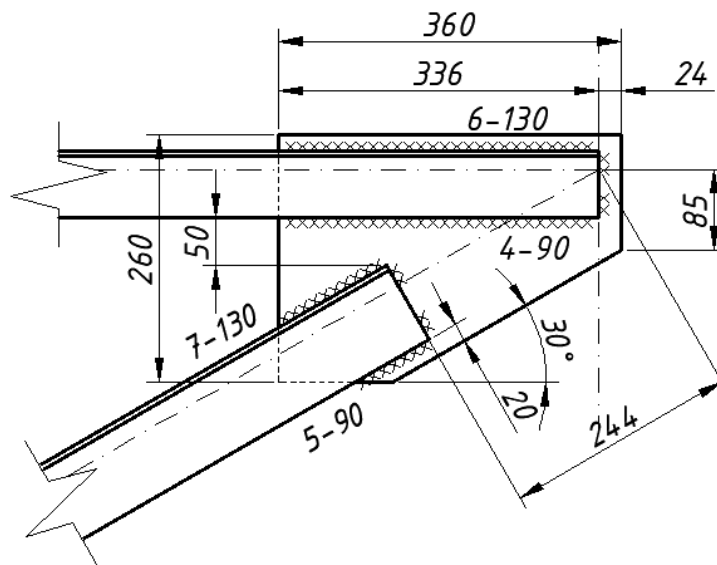


Рисунок 3.3. Схема до прикладу 1

Обчислюємо довжину зварних швів по обушку та перу кутика.

$$l_w^{об} = \frac{0.7N}{2\beta_f R_{wf} k_f} = \frac{0.7 \times 260 \times 10^3}{2 \times 0.7 \times 180 \times 6} + 10 \text{ мм} \cong 130 \text{ мм} < 85\beta_f k_f = 357 \text{ мм}$$

$$l_w^n = \frac{0.3N}{2\beta_f R_{wf} k_f} = \frac{0.7 \times 260 \times 10^3}{2 \times 0.7 \times 180 \times 4} + 10 \text{ мм} \cong 90 \text{ мм} < 85\beta_f k_f = 238 \text{ мм}$$

Розраховуємо прикріплення кутика $90 \times 90 \times 6$, $N = -300 \text{ кН}$

$$k_{f_{\min}} = 5 \text{ мм}; k_f^n = 0,9t_{yz} \cong 5 \text{ мм}; k_f^{об} = 1,2t_{yz} \cong 7 \text{ мм}$$

$$l_w^{об} = \frac{0.7N}{2\beta_f R_{wf} k_f} = \frac{0.7 \times 300 \times 10^3}{2 \times 0.7 \times 180 \times 7} + 10 \text{ мм} \cong 130 \text{ мм} < 85\beta_f k_f = 417 \text{ мм}$$

$$l_w^n = \frac{0.3N}{2\beta_f R_{wf} k_f} = \frac{0.7 \times 300 \times 10^3}{2 \times 0.7 \times 180 \times 5} + 10 \text{ мм} \cong 90 \text{ мм} < 85\beta_f k_f = 298 \text{ мм}$$

При приварюванні кутиків до фасонки кінці швів слід заводити на торець кутика на 20 мм, для зниження концентрації напружень.

Дотримуючись центрування осей кутиків, за отриманими розмірами швів виконують побудову форми фасонки.

Приклад 2

Консольна двотаврова балка вильотом у 2 м, прикріплена зварюванням по периметру кутовими швами катетом $k_f = 6$ мм, поздовжня сила $P = N = 90$ кН, поперечна сила $Q = 30$ кН; $\beta = 0.7$

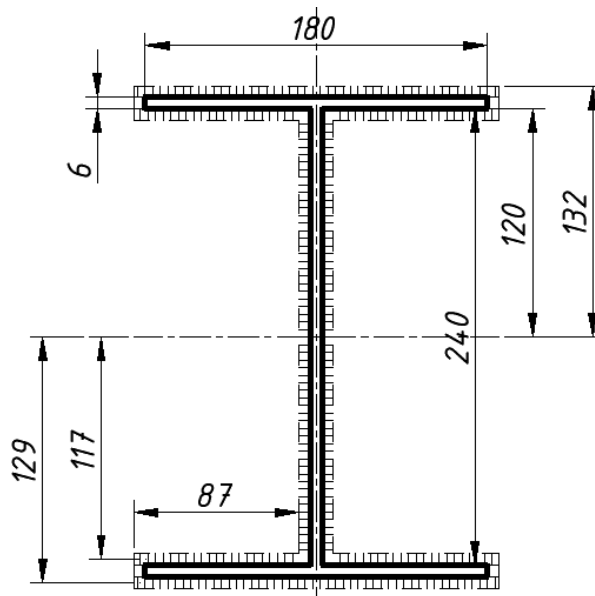


Рисунок 3.4. Схема до прикладу 2

Визначаємо момент інерції периметра кутових швів:

$$I = 2 \times \left(\frac{19.2 \times 0.6^3}{12} + 12.9^2 \times 19.2 \times 0.6 \right) + 4 \times \left(\frac{8.7 \times 0.6^3}{12} + 11.7^2 \times 8.7 \times 0.6 \right) + 2 \times \frac{0.6 \times 24^3}{12} = 8076.067 \text{ см}^4$$

Розрахунковий момент інерції кутових швів з урахуванням руйнування по небезпечній площині:

$$I_c = \beta I = 0.7 \times 8076.067 = 5653.247 \text{ см}^4$$

Площа небезпечного периметра кутових швів становить:

$$A = 2 \times 24 \times 0.6 + 2 \times 19.2 \times 0.6 + 4 \times 8.7 \times 0.6 = 72.72 \text{ см}^2$$

Розрахункова площа з урахуванням руйнування по небезпечній площині:

$$A_c = \beta A = 0.7 \times 72.72 = 50.9 \text{ см}^2$$

Розрахункова площа вертикальних швів з урахуванням руйнування по небезпечній площині:

$$A_g = 2 \times 0.6 \times 24 \times 0.7 = 22.68 \text{ см}^2$$

Напруги від згину у віддаленій точці $-y = 13.2 \text{ см}$ (розподіл напружень по довжині швів рівномірний)

$$\sigma_M = \frac{Ql}{W} = \frac{30 \times 10^3 \times 2 \times 10^3}{5653.247 \times 10^4 / 132} = 140.1 \text{ МПа} < R_{wf} = 180 \text{ МПа}$$

Напруження від поздовжньої сили у кутових швах з'єднання:

$$\sigma_N = \frac{N}{A_c} = \frac{90 \times 10^3}{50.9 \times 10^2} = 17.68 \text{ МПа}$$

Сумарні напруження від згину та поздовжньої сили в точці $y = 13.2 \text{ см}$ – $127.36 + 17.68 = 157.78 \text{ МПа}$

Середні дотичні напруження у вертикальних швах з'єднання (поперечна сила сприймається тільки вертикальними швами):

$$\tau_Q = \frac{Q}{A_g} = \frac{30 \times 10^3}{22.68 \times 10^2} = 13.23 \text{ МПа} < 0.58 R_y = 133.4 \text{ МПа}$$

Результуюче напруження:

$$\sigma_{red} = \sqrt{(\sigma_N + \sigma_M)^2 + \tau_Q^2} = \sqrt{157.78^2 + 13.23^2} = 158.34 \text{ МПа} < R_f = 180 \text{ МПа}$$

Міцність з'єднання забезпечена.

Приклад 3

Консоль у вигляді зведеного швелера №30 приварюється до колони електродами Э42. На консоль діє навантаження 50 кН. Виконати перевірочний розрахунок міцності з'єднання, якщо всі елементи консолі виконані зі сталі С235, катет шва $k_f = 7 \text{ мм}$

Поперечна сила P викликає у з'єднанні напруження зрізу від поперечної сили $Q = P$, спрямовані перпендикулярно до поздовжньої осі швелера, та напруження від моменту пари $M = Pa$, направлені паралельно осі швелера. Для визначення напружень у шві необхідно знайти положення центру тяжіння O бісекторних перерізів шва.

$$x_c = \frac{\sum_{i=1}^n F_i y_i}{\sum_{i=1}^n F_i} = \frac{2 \times 200 \times 7 \times 0.7 \times 100 + 300 \times 7 \times 0.7 \times (200 + 7/2 \times 0.7)}{(2 \times 200 \times 7 + 300 \times 7) \times 0.7} = 144 \text{ мм}$$

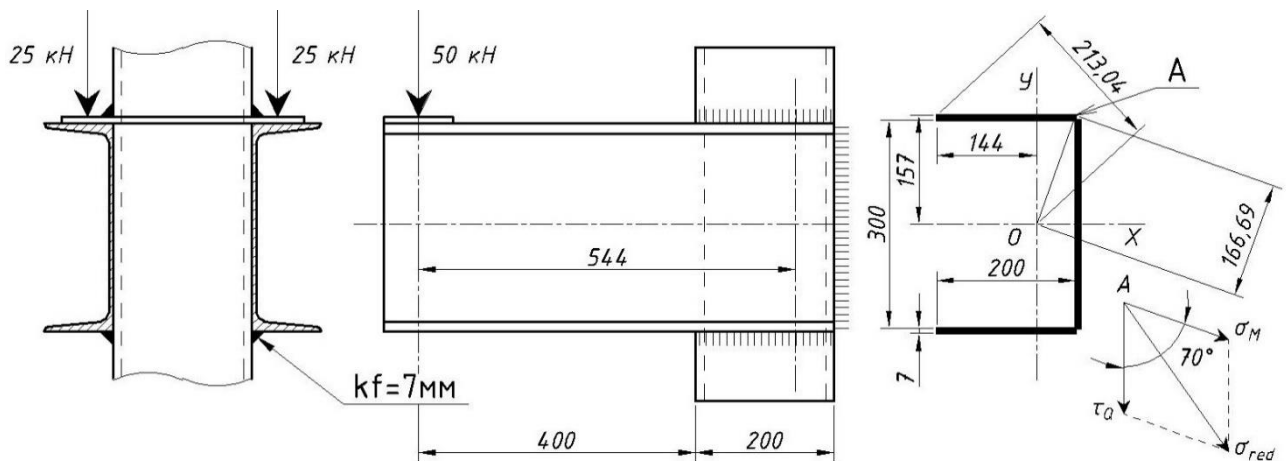


Рисунок 3.5. Схема до прикладу 3

Плече пари сил:

$$a = 40 + x_c = 400 + 144 = 544 \text{ мм}$$

Моменти інерції відносно осей x , y :

$$I_x = 2 \times \left[\frac{20 \times (0.7)^3}{12} + 20 \times 0.7 \times 0.7 \times \left(\frac{30 + (0.7)}{2} \right)^2 \right] +$$

$$+ \frac{0.7 \times 30^3}{12} = 8173.573 \text{ см}^4$$

$$I_y = 2 \times \left(\frac{0.7 \times 20^3}{12} + 20 \times 0.7 \times 4.4^2 \right) +$$

$$+ \left(\frac{30 \times (0.7)^3}{12} + 30 \times 0.7 \times 5.6^2 \right) = 2134.831 \text{ см}^4$$

Полярний момент інерції периметра швів:

$$I_p = 8173.573 + 2134.831 = 10308.404 \text{ см}^4$$

Розрахунковий полярний момент інерції швів з урахуванням руйнування по площині, що збігається з бісектрисою прямого кута при $\beta = 0.7$

$$I_p = 10308.404 \times 0.7 = 7215.883 \text{ см}^4$$

Згинаючий момент $M = \frac{50}{2} \times 10^3 \times 544 = 13.6 \times 10^6 \text{ МН} \cdot \text{мм}$ (враховуємо, що

консоль складається з двох швелерів, кожен із яких сприйме половину зусилля)

Найбільше напруження від моменту виникне у найбільш віддаленій точці, з координатами $x = -144$; $y = 152 - r_{\max} = \sqrt{(-144)^2 + 157^2} = 213.038 \text{ мм}$

$$\sigma_M = \frac{M \times \sqrt{x^2 + y^2}}{I_x + I_y} = \frac{13.6 \times 10^6 \times 213.038}{7215.883 \times 10^4} = 40.152 \text{ МПа}$$

Середнє напруження у вертикальному шві:

$$\tau_Q = \frac{25 \times 10^3}{0.7 \times 7 \times 300} = 17 \text{ МПа}$$

Так як у зоні, де напруження від моменту максимальні, напруження від поперечної сили відсутні, то перевірки результуючих напружень не потрібні.

Визначимо напруження від моменту в точці з координатами $x = 56$; $y = 152$ –

$$r_{\max} = \sqrt{56^2 + 157^2} = 166.688 \text{ мм}$$

$$\sigma_M = \frac{13.6 \times 10^6 \times 166.688}{7215.883 \times 10^4} = 31.416 \text{ МПа}$$

Результуюче напруження у цій точці:

$$\alpha = \arctg\left(\frac{157}{56}\right) \approx 70^\circ$$

$$\sigma_{red} = \sqrt{\sigma_M^2 + \tau_Q^2 + 2\sigma_M\tau_Q \cos(\alpha)} =$$

$$= \sqrt{31.416^2 + 17^2 + 2 \times 31.416 \times 17 \times 0.342} = 40.513 \text{ МПа}$$

Визначимо напруження в цьому ж з'єднанні за методом розчленування на два горизонтальні шви і один вертикальний:

$$\sigma_M = \frac{My_{\max}}{I_x \beta} = \frac{M}{W_x \beta} = \frac{13.6 \times 10^6 \times 157}{8173.573 \times 0.7 \times 10^4} = 37.319 \text{ МПа}$$

За цим способом розрахунку напруження постійні по довжині горизонтальних швів.

Розрахункове результуюче напруження у перерізі горизонтального та вертикального швів.

$$\sigma_{red}^* = \sqrt{37.719^2 + 17^2} = 41.373 \text{ МПа}$$

У всіх випадках напруження не перевищують допустимих $\sigma < R_{wf} = 180 \text{ МПа}$

В цілому обидва методи дають приблизно однакові результати, але як правило, розрахунок за методом полярного моменту інерції дає більший запас міцності.

Приклад 4

Розрахункова схема вузла кріплення консолі показана на малюнку. Колона складається з прокатного двотавра №50Б1 за ГОСТ 26020-83 з паралельними гранями полиць, консоль також запроектована із двотавра того ж профілю, вильотом 658 мм. Консоль сприймає вертикальний крановий тиск від двох зближених кранів (включаючи вагу підкранових балок) $F_{D\max} = 413.7 \text{ кН}$. Сталь С235.

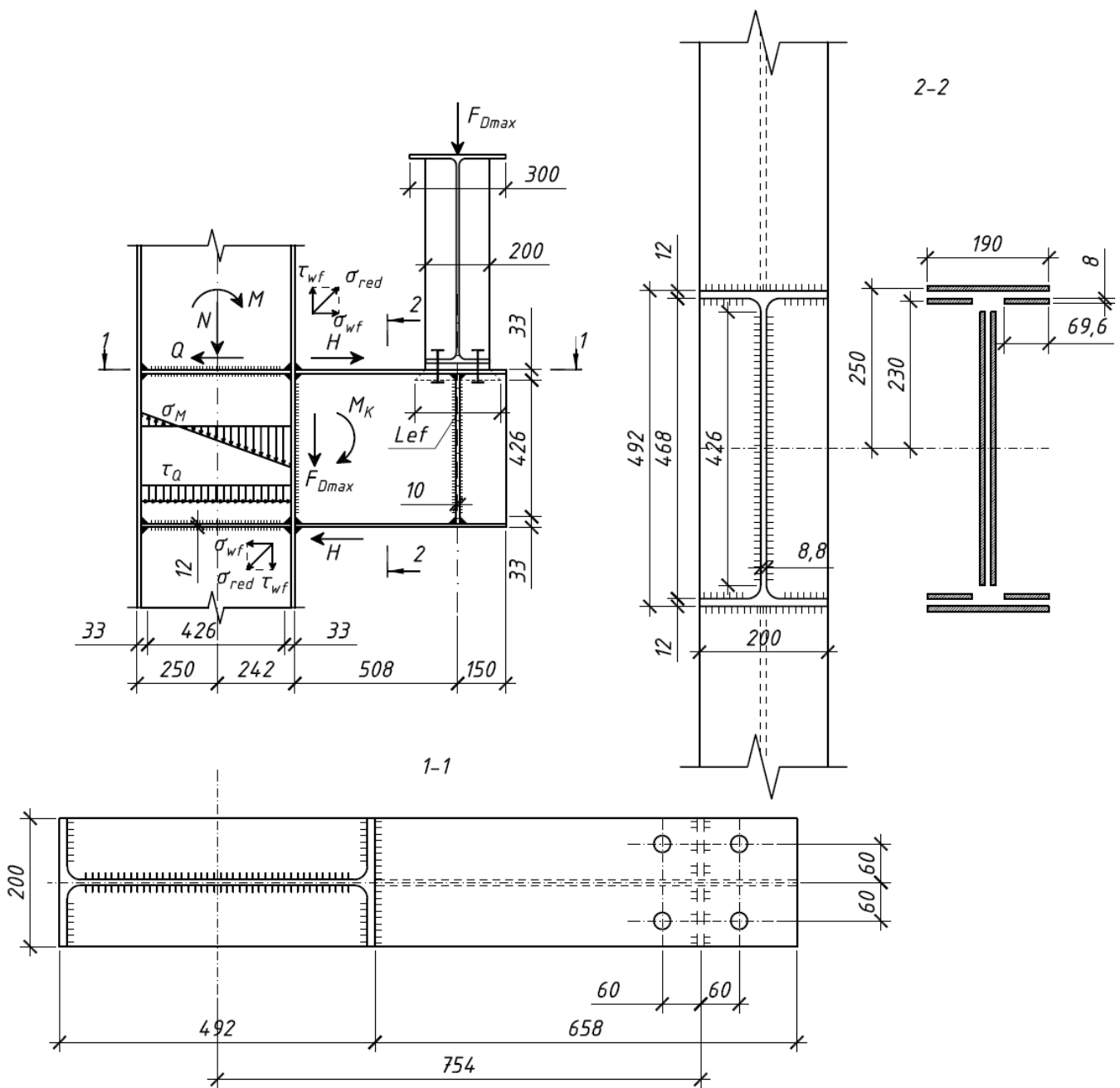


Рисунок 3.6. Схема до прикладу 4

Згинаючий момент, що сприймається консоллю:

$$M_k = F_{D_{\max}} e_k = 413.7 \times 0.508 = 210.16 \text{ кН} \cdot \text{м};$$

$$e_k = \lambda_k + 250 - h = 750 + 250 - 492 = 508 \text{ мм}$$

Горизонтальна складова згинаючого моменту:

$$H = M_k / h_k = 210.16 / 0.492 = 427.15 \text{ кН} \cdot \text{м}$$

Геометричні характеристики двотавра:

$$\begin{aligned}
 h &= 492 \text{ мм} & b &= 200 \text{ мм} & s &= 8.8 \text{ мм} & t &= 12 \text{ мм} \\
 A &= 92.98 \text{ см}^2 & I_x &= 31760 \text{ см}^4 & W_x &= 1511 \text{ см}^3 & S_x &= 860.4 \text{ см}^3 \\
 & & I_y &= 1606 \text{ см}^4 & W_y &= 160.6 \text{ см}^3 & r &= 21 \text{ мм}
 \end{aligned}$$

Перевірку міцності консолі проводимо за приведеними напруженнями в опорному перерізі консолі, у полиці колони, на рівні початку внутрішнього закруглення.

Нормальні напруження:

$$\sigma = \frac{M_k}{I_x} \frac{h_{ef}}{2} = \frac{210.16 \times 10^6}{37160 \times 10^4} \frac{(492 - 2 \times (12 + 21))}{2} = 120.462 \text{ МПа}$$

Статичний момент інерції відсіченої частини перерізу за вирахуванням стінки заввишки h_{ef}

$$S'_x = S_x - \frac{h_{ef}}{2} t_w \frac{h_{ef}}{4} = 860.4 - \frac{42.6}{2} \times 0.88 \times \frac{42.6}{4} = 660.78 \text{ см}^3$$

Дотичні напруження:

$$\begin{aligned}
 \tau &= \frac{QS'_x}{I_x t_w} = \frac{413.7 \times 10^3 \times 660.78 \times 10^3}{31760 \times 10^4 \times 8.8} = 83.608 \text{ МПа} < \\
 &< \frac{\gamma_c}{\gamma_n} R_s = \frac{1}{0.95} \times 0.58 \times 230 = 140.42 \text{ МПа}
 \end{aligned}$$

Приведені напруження:

$$\begin{aligned}
 \sigma_{red} &= \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} = \sqrt{120.463^2 + 3 \times 83.608^2} = 188.367 \text{ МПа} < \\
 &< \frac{1.15 R_y}{\gamma_n} = \frac{1.15}{0.95} \times 230 = 278.42 \text{ МПа}
 \end{aligned}$$

Визначаємо місцеві напруження в стінці консолі в місці спирання підкранових балок згідно п. 9.2.2 ДБН

Розрахункова довжина умовного майданчика, через яку передається зосереджене навантаження, за формулою 9.8 ДБН:

$$l_{ef} = b + 2h = b + 2(t_f + r) = 200 + 2 \times (12 + 21) = 266 \text{ мм}$$

Місцеві нормальні напруження, що виникають у стінці балки, не укріпленої поперечними ребрами жорсткості, за формулою 9.6 ДБН:

$$\sigma_{loc} = \frac{F_{D \max}}{t_w l_{ef}} = \frac{413.7 \times 10^3}{8.8 \times 266} = 176.73 \text{ МПа} < \frac{R_y \gamma_c}{\gamma_n} = 242.11$$

Стінку консолі зміцнюємо поперечними ребрами жорсткості згідно з п. 9.5.9 ДБН. Ширина ребра має бути не менше $25 \text{ мм} + h_w/30 = 25 + 468/30 \cong 41 \text{ мм}$, приймаємо виступаючу ширину ребра 80 мм. Товщина ребра жорсткості має бути не

менше $2b_r\sqrt{R_y/E} = 2 \times 80 \times \sqrt{230/2.06 \times 10^5} = 5.35 \text{ мм}$, товщину ребер призначаємо з конструктивних міркувань – 10 мм.

По табл. Д.1 додатку Д ДБН приймаємо для зварювання зварювальний дріт Св-08ГА по ГОСТ 2246 та флюс марки АН-60 за ГОСТ 9087

Розрахунковий опір металу кутових швів умовному зрізу в площині наплавленого металу $R_{wf} = 180 \text{ МПа}$, при класі міцності основного металу С315 та нижче (по табл. Д.2 додатку Д ДБН)

Розрахунковий опір металу кутових швів умовному зрізу в площині металу межі сплавлення – $R_{wz} = 0.45 \times 360 = 162 \text{ МПа}$ ($R_{un} = 360 \text{ МПа}$ для фасонного прокату товщиною до 20 мм по табл. Г.2 додатку Г ДБН).

Коефіцієнти, які враховують режим зварювання – $\beta_f = 0.8$; $\beta_z = 1.0$ (механізоване зварювання при $d_f = 1.4 - 2$ і нижньому, вертикальному та горизонтальному положенні шва, катеті шва в межах 9...12 мм)

Положення шва – нижнє, горизонтальне, вертикальне

$$\beta_z R_{wz} = 162 \text{ МПа} > \beta_f R_{wf} = 144 \text{ МПа}$$

Розрахунковим є переріз по металу шва.

Зварні шви, що прикріплюють полиці консолі до полиці колони, а також шви ребер колони, повинні сприймати зусилля H . Товщина зварних швів:

$$k_f = \frac{H \gamma_n}{2 \beta_f (b - 10 \text{ мм}) R_{wf} \gamma_c} = \frac{427.15 \times 10^3 \times 0.95}{2 \times 0.8 \times (200 - 10) \times 180 \times 1} = 7.42 \text{ мм}$$

Приймаємо катет $k_f = 8 \text{ мм}$

Товщину кутових зварних швів, що прикріплюють стінку консолі до полиці, також визначаємо з умови їхньої роботи на зріз:

$$k_f = \frac{H \gamma_n}{2 \beta_f l_w R_{wf} \gamma_c} = \frac{413.7 \times 10^3 \times 0.95}{2 \times 0.8 \times 426 \times 180 \times 1} = 3.66 \text{ мм}$$

По табл. 16.1 ДБН – $k_{f \min} = 6 \text{ мм}$, по конструктивним і технологічним вимогам при зварюванні, приймаємо $k_f = 8 \text{ мм}$. Тут:

$$l_w = h_{ef} = 426 \text{ мм} < 85 \beta_f k_f = 85 \times 0.8 \times 8 = 544 \text{ мм}$$

Остаточню перевіряємо міцність зварних швів, обчислюючи нормальне та дотичне напруження в швах та їх результуюче значення.

Обчислюємо момент інерції перерізу периметра зварних швів:

$$I'_{wx} = 2 \times \left(\frac{19 \times 0.8^3}{12} + 19 \times 0.8 \times 25^2 \right) + 4 \times \left(\frac{6.96 \times 0.8^3}{12} + 6.96 \times 0.8 \times 23^2 \right) + 2 \times \frac{0.8 \times 42.6^3}{12} = 41092.534 \text{ см}^4;$$

$$I_{wx} = I'_{wx} \beta_f = 41092.534 \times 0.8 = 32874.027 \text{ см}^4$$

Нормальні напруження від згинаючого моменту:

$$\sigma_{wf} = \frac{M_k h_{ef}}{I_{wx} 2} = \frac{210.16 \times 10^6}{32874.027} \times \frac{426}{2} = 136.17 \text{ МПа}$$

Дотичні напруження від поперечної сили:

$$\tau_{wf} = \frac{F_{D \max}}{2 \beta_f k_f h_{ef}} = \frac{413.7 \times 10^3}{2 \times 0.8 \times 8 \times 426} = 75.87 \text{ МПа}$$

Результуючі напруження:

$$\sigma_{red} = \sqrt{\sigma_{wf}^2 + \tau_{wf}^2} = \sqrt{136.17^2 + 75.87^2} = 155.88 \text{ МПа} <$$

$$< R_{wf} \frac{\gamma_c}{\gamma_n} = \frac{180}{0.95} = 189.47 \text{ МПа}$$

Таврове з'єднання поясів консолі та колони перевіряємо на міцність:

$$\frac{H}{(t_f + 2k_f)b} = \frac{413.7 \times 10^3}{(12 + 2 \times 8) \times 200} = 73.88 \text{ МПа} <$$

$$< \frac{R_{th} \gamma_c}{\gamma_n} = \frac{0.5 \times 350}{0.95} = 184.21 \text{ МПа}$$

Де $R_{th} = 0.5R_u$ – розрахунковий опір розтягу у напрямку товщини прокату.

Ребра, що зміцнюють стінку колони, приймаємо такої ж товщини, як і полиці консолі – 12 мм; шви кріплення поперечних ребер до стіни колони – 8 мм. Напруження у швах:

$$\frac{H}{4 \beta_f k_f l_w} = \frac{427.15 \times 10^3}{4 \times 0.8 \times 8 \times 426} = 39.17 < 187.49 \text{ МПа}$$

На рівні консолі колона зазнає таких зусиль:

$$N = -575.12 \text{ кН}; M = -212.16 \text{ кН} \cdot \text{м}; Q = -15.97 \text{ кН}$$

Перевіримо міцність стінки колони:

$$\sigma = \frac{N}{A} \pm \frac{M}{I_x} \frac{h_{ef}}{2} = \frac{-575.12 \times 10^3}{92.98 \times 10^2} \mp \frac{-212.16 \times 10^6}{37160 \times 10^4} \times \frac{426}{2} = \begin{cases} -178.086 \text{ МПа} \\ +65.133 \text{ МПа} \end{cases}$$

$$\tau = \frac{H - Q}{t_w h_w} = \frac{(427.15 - 15.97) \times 10^3}{8.8 \times 468} = 99.84 < 140.42$$

$$\sigma_{red} = \sqrt{(-178.086)^2 + 3 \times 99.844^2} = 248.23 \text{ МПа} < 278.42 \text{ МПа}$$

3.4 Вихідні дані до практичного завдання

Задача 1. У зварному стику стінки рамної конструкції (рис. 3.7, а) визначити найбільші нормальні та дотичні напруження. Зварювання ручне, контроль якості зварювання - візуальний, зусилля: $M = 2Fl$, $N = 4F$, $Q = 0,5F$. Значення F і l , класс сталі, прийняти за таблицею 3.1.

Задача 2. У кутовому зварному з'єднанні (див. рис. 3.7, б) визначити найбільші та найменші напруження. Зварювання ручне, катет шва – 8 мм. Зовнішні впливи $Q = 4F$, значення F , класс сталі, прийняти за таблицею 3.1.

Задача 3. Опорний столик зі сталі приварений ручним зварюванням до колони (рис. 3.8, а). Перевірити міцність зварного з'єднання, якщо катет зварного шва дорівнює 10 мм. Значення F і h , класс сталі, прийняти за таблицею 3.1, $\gamma_c = 1$, $e = 0.5h$.

Задача 4. Визначити катет зварного шва, яким консоль зі сталі С345 приварюється ручним зварюванням до сталевій колоні (рис. 3.8, б). Значення F і h , класс сталі, прийняти за таблицею 3.1, $\gamma_c = 1$, $e = 0.5h$, електроди типу Э46.

Задача 5. Жорстке сполучення ригеля з колоною (рис. 3.9, в) здійснено за допомогою ручного зварювання і накладок. Задавшись катетом шва ($k_f = 8 \dots 10$ мм), визначити довжини поясних накладок і перевірити міцність вертикальних і горизонтальних лобових зварних швів. Поясні накладки до колони приварені кутовими швами з обробленням крайок і підварюванням кореня шва. Значення F і h , класс сталі, прийняти за таблицею 3.1, $\gamma_c = 1$, $M = F \cdot h$.

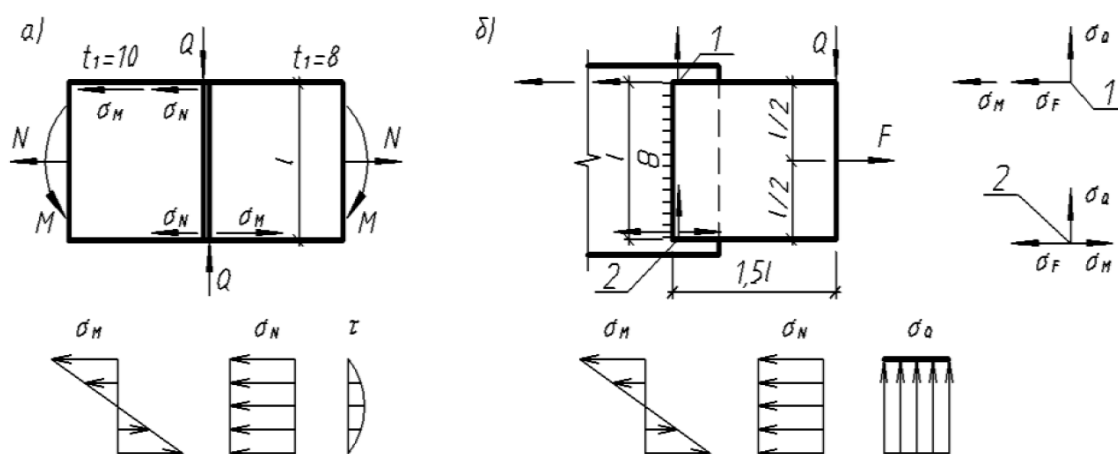


Рисунок 3.7. До задач 1 та 2

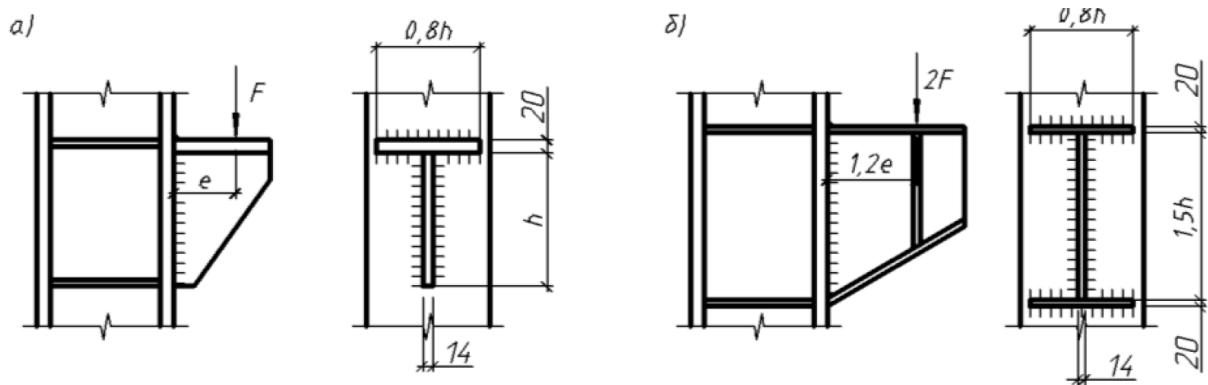


Рисунок 3.8. До задач 3 та 4

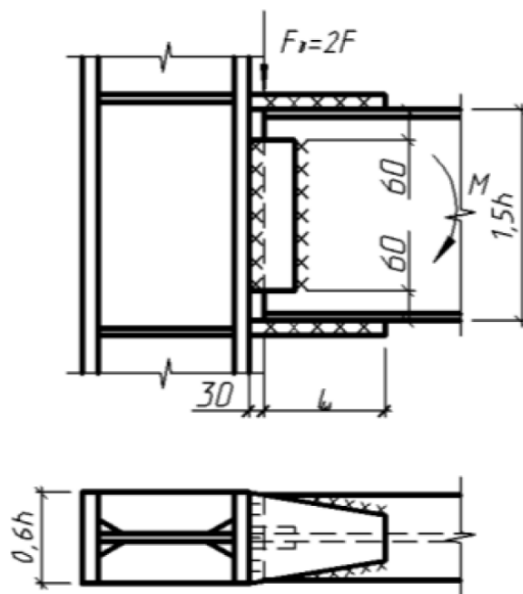


Рисунок 3.9. До задачі 5

Таблиця 3.1. Вихідні дані до завдань

Варіант	F, кН	L, мм	h, мм	Клас сталі
1	2	3	4	5
1	200	140	180	C235
2	210	150	210	C245
3	150	160	240	C255
4	170	170	270	C275
5	220	180	300	C285
6	250	190	336	C295
7	280	200	370	C325
8	270	210	390	C275
9	280	220	420	C255
10	290	230	420	C285
11	300	240	440	C285

1	2	3	4	5
12	310	260	350	C355
13	310	260	360	C375
14	310	300	390	C375
15	305	290	270	C345
16	290	300	270	C235
17	280	270	210	C245
18	290	250	240	C255
19	265	250	186	C245
20	300	300	310	C345
21	245	230	276	C275
22	225	220	276	C285
23	225	220	276	C295
24	215	200	336	C325
25	200	190	336	C285
26	255	230	396	C325
27	230	200	336	C245
28	245	250	336	C275
29	225	210	336	C295
30	205	230	276	C325
31	210	240	276	C255
32	210	250	246	C275
33	200	220	216	C285
34	220	200	216	C275
35	180	250	246	C295

3.5 Контрольні питання

1. Що називають зварним з'єднанням.
2. У чому особливості стикового з'єднання.
3. У чому особливості з'єднання внапусток.
4. У чому особливості таврового з'єднання.
5. У чому особливості кутового з'єднання.
6. Як класифікують зварні шви.
7. Як класифікують зварні шви за довжиною.
8. Які вимоги висуваються до зварних кутових швів і конструкцій з'єднань.
9. Як розрахувати зварне стикове з'єднання.
10. Як розрахувати зварне з'єднання з кутовими швами при дії поздовжньої сили.
11. Як розрахувати зварне з'єднання з кутовими швами при дії згинального моменту.

3.6 Додаткова література за темою

1. Расчет сварных соединений и конструкций. Примеры и задачи. Серенко А.Н., Крумбольдт М.Н., Багрянский К.В. Киев, Издательское объединение “Вища школа”, 1977, 336 с.
2. Николаев Г.А., Винокуров В.А. Сварные конструкции. Расчет и проектирование: Учеб. для вузов / под. ред. Г.А. Николаева. – М.: Высш. Шк., 1990. – 446 с.: ил.

4 РОЗРАХУНОК І КОНСТРУЮВАННЯ БОЛТОВИХ З'ЄДНАНЬ СТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ

4.1 Теоретичні положення

Болтові з'єднання бувають на звичайних і високоміцних болтах. Зусилля в з'єднаннях на звичайних болтах, що працюють на зсув, передаються через зріз болтів і зминання листа (рис. 4.1, а). У з'єднаннях на високоміцних болтах зусилля зсуву передаються через сили тертя (див. рис. 4.1, б) завдяки обтисненню листів попередньо напруженими болтами. Такі з'єднання іноді називають фрикційними. Самі ж болти при цьому працюють на розтягнення. За конструкцією болтові з'єднання бувають: з напуском, на накладках, таврові, фланцеві (див. рис. 4.1, в).

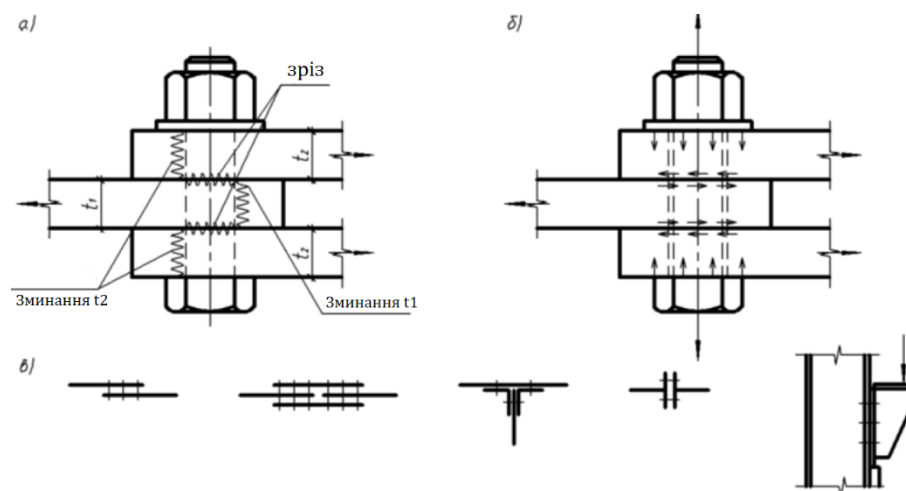


Рисунок 4.1. Болтові з'єднання

Як і в зварних з'єднаннях, болти (болтове поле) можуть розміщуватися в площині, перпендикулярній площині дії зусилля (приклад, фланцеві з'єднання), і в площині, паралельній площині зусилля (з'єднання з накладками). Звичайні болти залежно від технології виготовлення можуть бути грубої (ДСТУ ISO 4016:2007 «Болти з шестигранною головкою. Клас точності С»), нормальної (ДСТУ ГОСТ 7798:2008 «Болти із шестигранною головкою класу точності В») і підвищеної (ДСТУ ISO 4014-2001 Болти з шестигранною головкою. Класи точності А і В) точності. Для болтів класу точності С властива значна розбіжність діаметрів з отвором, найчастіше стрижень болта на 2–3 мм менше отвору. Такий клас точності вважається грубим і застосовується у менш відповідальних з'єднаннях. Болти класу точності В встановлюються в отвори, діаметр яких на 1–1,5 мм більший за діаметр стрижня болта. Клас точності В є найбільш поширеним. І, нарешті, болти підвищеного класу точності А застосовують у особливо відповідальних з'єднаннях, різниця у діаметрах деталей становить 0,25–0,30 мм.

Високоміцні болти поставляють за ДСТУ ГОСТ 22353:2008 «Болти високоміцні класу точності В».

Клас міцності болтів зазвичай визначається за їхнім стандартним позначенням, яке вказується на голівці болта або на упаковці. Для прикладу, болт може мати позначення 8.8, 10.9 або 12.9, які вказують на його міцність та стійкість до розтягу. Механічні властивості болтів з вуглецевих нелегованих і легуваних сталей (ISO 898/1-78) за нормальних умов характеризують 12 класів міцності: 3.6; 4.6; 4.8; 5.6; 5.8; 6.6; 6.8; 8.8; 9.8; 10.9; 12.9; 14.9. Перше число, помножене на 100, визначає номінальний тимчасовий опір у Н/мм², друге число (відокремлене крапкою від першого), помножене на 10, — відношення границі текучості до тимчасового опору у відсотках. Добуток чисел, помножений на 10, визначає номінальну границю текучості в Н/мм². Характеристики міцності визначаються відповідною маркою сталі й технологією виготовлення болтів.

Вибір класу міцності болта здійснюють за таблицею Д.3 додатку Д ДБН [3] в залежності від різних умов їх застосування.

Умова міцності болтових з'єднань:

- на звичайних болтах – $N_{\max} \leq N_{b,\min}$
- високоміцних болтах – $N_{\max} \leq Q_{bh}$

де N_{\max} – найбільше розрахункове зусилля, що залежить від величини і виду зусилля, а також від геометрії болтового з'єднання (кількості болтів і відстані між ними); $N_{b,\min}$ – мінімальна несуча здатність болта, що залежить від міцності матеріалу з'єднання, діаметра болта, товщини листів і кількості зрізів; Q_{bh} – несуча здатність високоміцного болта, що залежить від зусилля попереднього напруження болта і способу оброблення поверхонь.

Несуча здатність одного болта під час роботи з'єднання на зсув приймається меншою з двох:

- болта на зріз – $N_{bs} = R_{bs} A_b n_s \gamma_b \gamma_c \gamma_n$
- листа на зминання – $N_{bp} = R_{bp} d_b \sum t_{\min} \gamma_b \gamma_c \gamma_n$

Несуча здатність болта на розтягнення – $N_{bt} = R_{bt} A_{bn} \gamma_c \gamma_n$

Несуча здатність одного високоміцного болта однієї площини тертя – $Q_{bh} = R_{bh} A_{bn} \mu_s / \gamma_h$

Де R_{bs} , R_{bp} , R_{bt} – розрахунковий опір болтів на зріз, зім'яття, розтягнення; R_{bh} – розрахунковий опір високоміцного болта на розтягнення (п. 7.8 ДБН [3]); γ_b , γ_h – коефіцієнти умов робіт болтів і з'єднань на високоміцних болтах, які приймають за таблицями 16.4 та 16.5 ДБН [3]; A_b , A_{bn} – площа поперечного перерізу болта відповідно бруто та нетто (з урахуванням послаблення болта різьбленням); n_s – число зрізів болта, що дорівнює числу з'єднаних листів без одного ($n_s = n - 1$); n – число

площин тертя; n - число площин тертя; $\sum t$ - мінімальна товщина листів, що мнеться, з'єднаних в одному напрямку; μ_s - коефіцієнт тертя, який приймають за таблицею 16.5 ДБН [3] залежно від марки сталі та способу оброблення з'єднуваних поверхонь.

Розрахункове зусилля в болті N_{max} (найбільш навантажений болт) встановлюється, як і для зварних швів, з аналізу діаграми зусиль у крайніх болтах. Так, у разі простого розтягування з'єднання (рисунок 4.2, а), приймаючи рівномірний розподіл зусилля між болтами:

$$N_{max} = F/n \quad (4.1)$$

де n – число болтів.

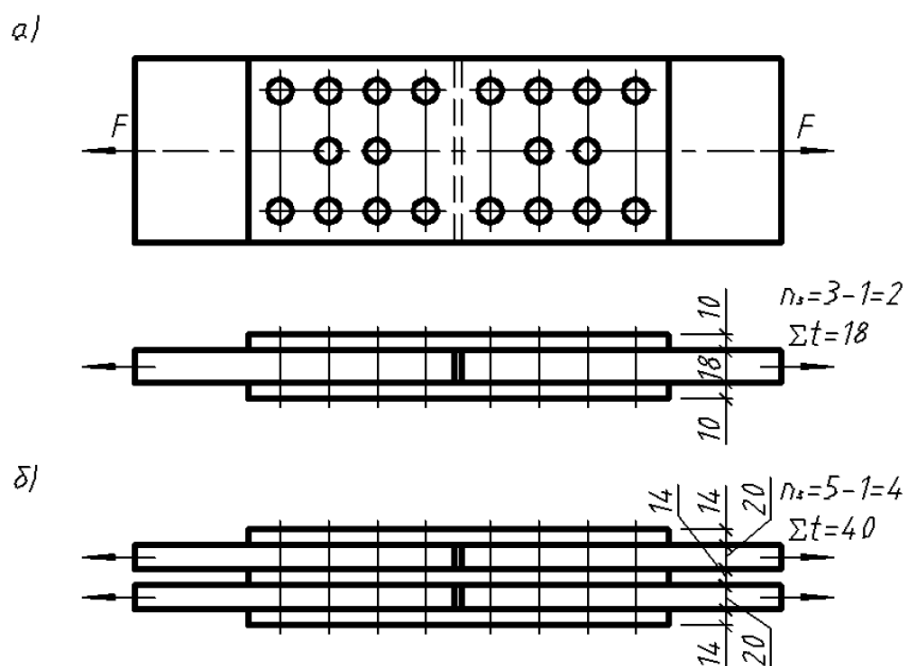


Рисунок 4.2. Болтові з'єднання

У з'єднаннях елементів, що зазнають згину, болти працюють нерівномірно, тому припущення, про те, що діюче в з'єднанні зусилля, розподіляється між усіма болтами порівну неприпустимо. У цьому випадку попередньо визначають зусилля у найбільш навантажених болтах.

У з'єднанні ($h_{max} < 3l$, тут h_{max} – висота болтового поля, відстань між крайніми горизонтальними рядами болтів; l – крок між вертикальними рядами болтів), що передає тільки згинальний момент, припускають, що з'єднані елементи, повертаються навколо центру O болтового поля на стиковій напівнакладці. Тоді тиск окремих болтів на стінки елементів та реакції останніх N_i розподіляються пропорційно до відстаней болтів від центру повороту і спрямовані перпендикулярно до радіусів-векторів ρ_i

Максимальне зусилля N_{max} виникає у болті, найбільш віддаленому від центру повороту. Воно визначається з умови:

$$\sum M_O = 0; M - \sum_i N_i \rho_i = 0 \quad (4.2)$$

Так як:

$$\frac{N_i}{\rho_i} = \frac{N_{i+1}}{\rho_{i+1}} \quad (4.3)$$

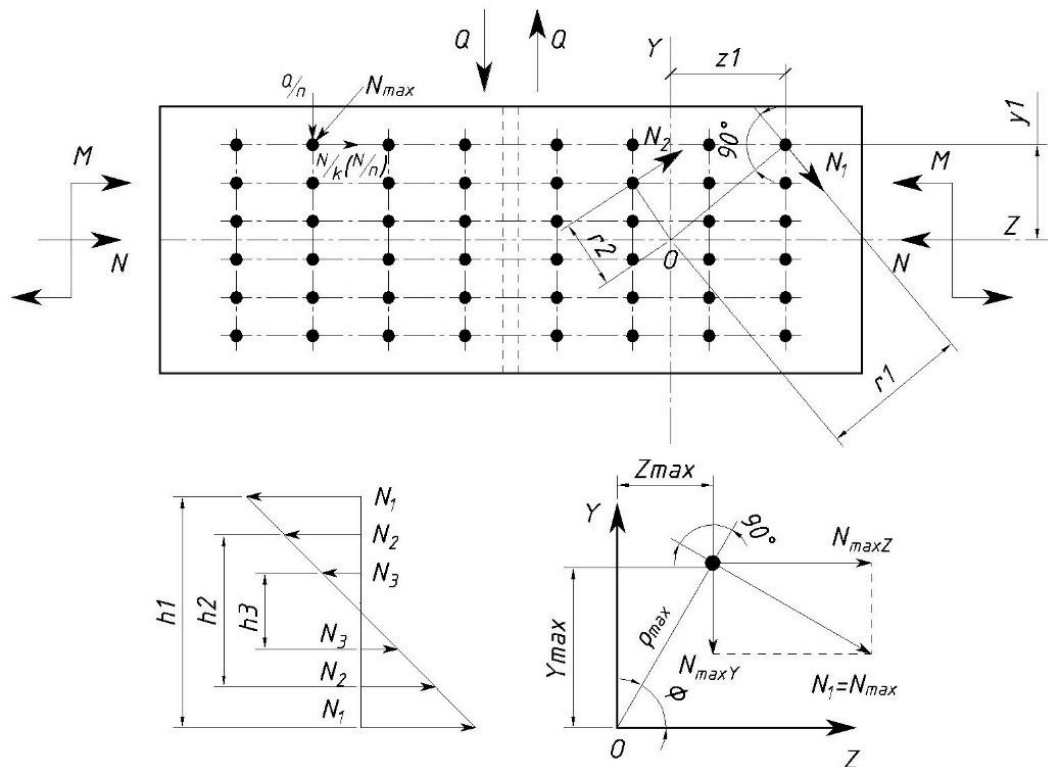


Рисунок 4.3. Розрахункова схема болтового поля, що зазнає згину, стиску та зсуву

Тоді зусилля в i -му болті можна виразити через зусилля в найбільш навантаженому болті:

$$N_i = N_1 \frac{\rho_i}{\rho_1} \quad (4.4)$$

Підставляючи в рівняння рівноваги та виконуючи перетворення отримуємо:

$$M = \frac{N_1}{\rho_1} \sum_i \rho_i^2 \quad (4.5)$$

Звідки шукане зусилля:

$$N_{\max} = N_1 = \frac{M \rho_{\max}}{\sum_i \rho_i^2} \quad (4.6)$$

Де M – зовнішній розрахунковий згинальний момент, що передається з'єднанням; $\rho_{\max} = \rho_1$ – найбільший радіус-вектор, тобто відстань від центру повороту до найбільш віддаленого болта; $\sum \rho_i^2$ – сума квадратів радіусів-векторів у межах напівстику.

Для переходу від полярних координат до декартових розкладемо зусилля N_{\max} на складові уздовж координатних осей позначивши координати центрів отворів щодо точки O через z_i та y_i

$$N_{\max Z} = N_{\max} \cos(\varphi) = \frac{M \rho_{\max} \cos(\varphi)}{\sum \rho_i^2} = \frac{M y_{\max}}{\sum (z_i^2 + y_i^2)} \quad (4.7)$$

$$N_{\max Y} = N_{\max} \sin(\varphi) = \frac{M \rho_{\max} \sin(\varphi)}{\sum \rho_i^2} = \frac{M z_{\max}}{\sum (z_i^2 + y_i^2)} \quad (4.8)$$

$$N_{\max} = \sqrt{N_{\max Z}^2 + N_{\max Y}^2} = \frac{M \sqrt{z_{\max}^2 + y_{\max}^2}}{\sum (z_i^2 + y_i^2)} \quad (4.9)$$

У болтовому полі, що має зіставні розміри вздовж і поперек, необхідно враховувати і горизонтальну і вертикальну складову від моменту, а при високих стиках (при $h_{\max} \geq 3l$) вплив вертикальних складових зусиль у болтах стає незначним і ним можна знехтувати. Тоді вважають, що зусилля, що припадає на окремі болти вертикального ряду, розподіляється за тим самим лінійним законом, як і нормальні напруження по висоті перерізу елементів, тобто пропорційно відстаням від нейтральної лінії. При цьому максимальне зусилля виникає у болтах, найбільш віддалених від нейтральної лінії. Це зусилля визначається аналогічно вищенаведеним формулам із заміною ρ на h :

$$N_{\max} = N_1 = \frac{M h_{\max}}{\sum_i h_i^2} \quad (4.10)$$

Оскільки кількість вертикальних рядів у напівстику дорівнює – k , зусилля, що діє у кожному болті цього ряду:

$$N_{\max} = \frac{N_1}{k} = \frac{M h_{\max}}{k \sum_i h_i^2} \quad (4.11)$$

У загальному випадку за дії M , N , Q розрахункове зусилля в одному болті дорівнює геометричній сумі складових зусиль:

$$\overrightarrow{N_{\max}} = \overrightarrow{N_M} + \overrightarrow{N_F} + \overrightarrow{N_Q} \quad (4.12)$$

У разі складного опору, якщо стик крім згинального моменту передає поздовжню та поперечну сили, то припускають, що поздовжня та поперечна сили порівну розподіляються між усіма болтами напівстику. При цьому зусилля спрямовані по одній прямій підсумовують алгебраїчно, а зусилля, що діють під кутом один до одного – геометрично.

З урахуванням сказаного, розрахункові формули набувають вигляду, у загальному випадку:

$$N_{\max} = \sqrt{\left(N_{\max Z} + \frac{N}{n}\right)^2 + \left(N_{\max Y} + \frac{Q}{n}\right)^2} \quad (4.13)$$

В окремому випадку (високий стик):

$$N_{\max} = \sqrt{\left(\frac{N_1}{k} + \frac{N}{n}\right)^2 + \left(\frac{Q}{n}\right)^2} \quad (4.14)$$

4.2 Вказівки до розв'язання задач

Мета заняття: вивчити методику розрахунку болтових з'єднань сталевих конструкцій за ДБН В.2.6-198:2014 «Сталеві конструкції» [3].

Вихідні дані: типові задачі на розрахунок болтових з'єднань, які містять схему з'єднання з необхідними розмірами, навантаженнями, характеристиками елементів, необхідних для розрахунку відповідно до індивідуального варіанту.

Перед виконанням завдання слід ознайомитися із положеннями щодо розрахунку та проектування зварних з'єднань, викладених в нормах проектування ДБН [3]:

- a) Підрозділ 16.2 який містить основні положення з проектування болтових з'єднань сталевих конструкцій.
- b) Формули для визначення розрахункових опорів болтових з'єднань (табл. 7.4)
- c) Вимоги, щодо розміщення болтів (п. 16.2.2, табл. 16.3).
- d) Визначення розрахункового зусилля, яке може бути сприйняте одним болтом, залежно від виду напруженого стану (п. 16.2.9).
- e) Коефіцієнти умов роботи болтового з'єднання (табл. 16.4).
- f) Визначення кількості болтів, при дії на болтове з'єднання поздовжньої сили N , що проходить через центр ваги з'єднання (п. 16.2.10).
- g) Розподіл зусиль між болтами при дії на болтове з'єднання згинального моменту, який викликає зсув з'єднаних елементів (16.2.11).

- h) Врахування одночасної дії на болтове з'єднання поздовжньої і поперечної сил та згинального моменту, що діють в одній площині і викликають зсув з'єднаних елементів (п.16.2.12).
- i) Перевірка найбільш напруженого болта, при одночасній дії на болтове з'єднання зусиль, що викликають зріз і розтяг болтів (п. 16.2.13).
- j) Збільшення кількості болтів проти розрахованої у випадку болтових з'єднаннях одного елемента з іншим через прокладки чи інші проміжні елементи, а також в елементах з односторонньою накладкою кількість болтів (п. 16.2.14).
- k) Підрозділ 16.3 який містить основні положення з проектування фрикційних з'єднань.
- l) Визначення розрахункового зусилля, яке може бути сприйняте кожною площиною тертя елементів, затягнутих одним високоміцним болтом (п. 16.3.3) .
- m) Коефіцієнти надійності і коефіцієнти тертя фрикційних з'єднань (табл. 16.5).
- n) Визначення кількості високоміцних болтів при дії на фрикційне з'єднання сили N , що викликає зсув з'єднаних елементів і проходить через центр ваги з'єднання (п. 16.3.4)
- o) Положення щодо розподіл зусиль при дії на фрикційне з'єднання згинального моменту, чи сили і згинального моменту, що викликають зсув з'єднаних елементів (п 16.3.5).
- p) Врахування послаблення отворами при розрахунку на міцність з'єднаних елементів фрикційного з'єднання у розрахунковому перерізі (п. 16.3.11).
- q) Вимоги до болтів при різних умовах їх застосування (табл. Д.3, додатку Д).
- r) Характеристичні опори сталі болтів і розрахункові опори одноболтових з'єднань зрізу і розтягу (табл. Д.4, додатку Д).
- s) Розрахункові опори одноболтових з'єднань змінанню R_{bp} елементів, що з'єднуються болтами (табл. Д.5, додатку Д).
- t) Характеристичні опори і розрахункові опори на розтяг сталі високоміцних болтів, які працюють з попереднім натягом у фрикційних та фланцевих з'єднаннях (табл. Д.7, додатку Д).

Як правило розрахунок болтового з'єднання полягає у розрахунку необхідної кількості болтів, та урахуванням вимог до їх розташовування.

В загальному випадку при розрахунку болтового з'єднання виконуються наступні операції (у випадку роботи з'єднання на зріз та змінання):

- За таблицею Д.4 ДБН [3] визначається розрахунковий опір зрізу R_{bs} болтів прийнятого класу міцності. При розміщені отворів в прокатних профілях слід користуватися рисками – лініями уздовж профілів на яких можливо

розміщувати отвори вказаного діаметру (див. рекомендовану літературу до теми)

- За таблицею Д.5 ДБН [3] залежно від тимчасового опору сталі R_{in} з'єднаних елементів з таблиці Г.2, визначаємо розрахунковий опір зминанню R_{bp} елементів під болтами прийнятого класу точності .
- Площа перерізу болта A_b обчислюється за його номінальним діаметром.
- Менша сума товщин елементів, що зминаються в одному напрямку Σt , визначається за конструкцією з'єднання.
- Коефіцієнт умов роботи болтового з'єднання визначається за таблицею 16.4 залежно від кількості, розміщення й класу точності болтів.
- За формулами (16.12) і (16.13) ДБН [3] визначаємо несучу здатність одного болта при зрізі N_{bs} (з урахуванням кількості площини зрізу) та зминанні N_{bp}
- За меншою несучою здатністю одного болта згідно з формулою (16.15) ДБН [3] визначаємо шукану несучу здатність з'єднання в цілому/

При розрахунку фрикційних з'єднань виконуються наступні операції:

- Вибирається максимально можливий діаметр високоміцного болта d_b , за таблицею Д.7 ДБН [3] визначається розрахунковий опір болта із сталі 40Х "селект" R_{bh} , і визначається площа болта "нетто" A_{bn} (див. довідкову літературу до теми; ГОСТ 22356-77).
- З таблиці 16.5 ДБН [3] вибираємо коефіцієнт тертя μ_s і коефіцієнт надійності фрикційного з'єднання γ_h .
- За формулою 16.17 ДБН [3] обчислюємо несучу здатність однієї площини тертя Q_{bh} , затягнутої одним високоміцним болтом.
- Необхідну кількість болтів у з'єднанні визначаємо за формулою 16.18 ДБН [3] з урахуванням кількості наявних поверхонь тертя.
- Коефіцієнт умов роботи фрикційного з'єднання прийняти за пунктом 16.3.4 ДБН [3] для кількості болтів. Якщо обчислена кількість болтів не відповідає врахованій при визначенні коефіцієнта γ_b , її слід обчислити заново з уточненим значенням γ_b .
- Конструювання з'єднання полягає у розміщенні болтів на мінімальних відстанях відповідно до вимог таблиці 16.3 ДБН [3].

Конкретні алгоритми розрахунку для різних розрахункових ситуацій наведені в прикладах до даного практичного завдання, та в рекомендованій літературі.

4.3 Приклади розв'язання задач

Приклад 1

Розрахуємо прикріплення кутиків зі сталі С235 ($R_{in} = 360 \text{ МПа}$), до фасонки товщиною 6 мм. Приймаємо болти нормальної точності, класу за міцністю 5.6.

Відповідний розрахунковий опір одноболтового з'єднання зрізу за табл. Д.4, додатка Д ДБН – $R_{bs} = 210 \text{ МПа}$, по змінанню за табл. Д.5 – $R_{bp} = 475 \text{ МПа}$

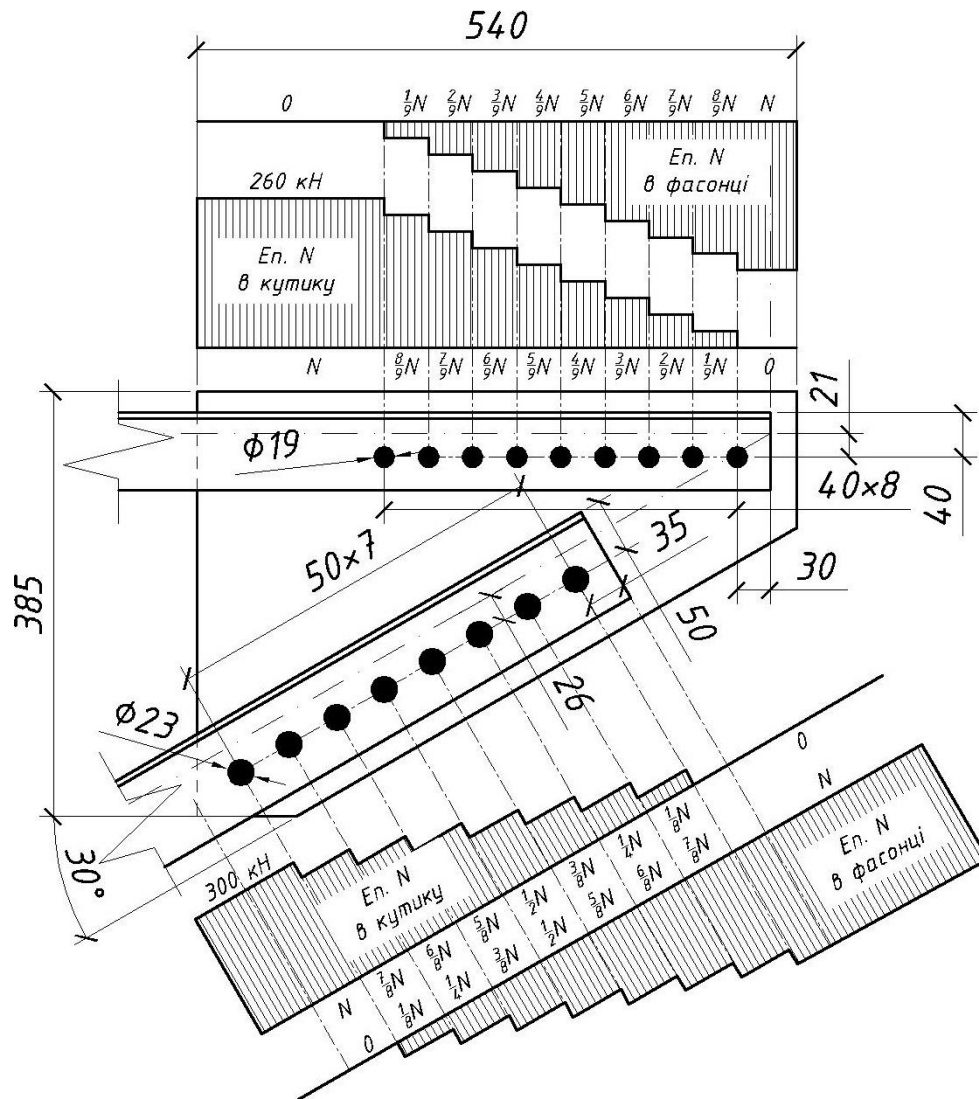


Рисунок 4.4. Схема до прикладу 1, конструктивне вирішення вузла

Для розтягнутого елемента кронштейна в попередньому прикладі був підібраний з умови міцності на розтяг (260 кН) рівнополочний кутовий профіль 70×70×5. Для кутиків із шириною полиці 70 мм, риска отворів розташовується в 40 мм від обушка, максимальний розмір отвору 19 мм, приймаємо болт діаметром 16 мм.

Розрахункове зусилля, що сприймається одним болтом на зріз, при двох площинах зрізу:

$$N_{bs} = R_{bs} A_b n_s \gamma_b \gamma_c \gamma_n = 210 \times 201 \times 2 \times 1 \times 1 \times 0.95 \times 10^{-3} = 80.2 \text{ кН}$$

Коефіцієнт умов роботи болтового з'єднання при розрахунку на зминання приймаємо по табл. 16.4 ДБН при $a/d = 1.5$ (см. п.2а табл. 16.3 ДБН) – $\gamma_b = 0.4a/d + 0.2 = 0.4 \times 1.5 + 0.2 = 0.8$

Розрахункове зусилля, яке може бути сприйняте одним болтом за зминання елементів:

$$N_{bp} = R_{bp} d_b \sum t_{\min} \gamma_b \gamma_c \gamma_n = 475 \times 16 \times 6 \times 0.8 \times 1 \times 0.95 \times 10^{-3} = 34.66 \text{ кН}$$

Тут t_{\min} – прийнято рівним товщині фасонки 6 мм, так як подвоєна товщина стінок кутика в 10 мм є більшою величиною.

Число болтів в з'єднанні:

$$n = \frac{N}{N_{b\min}} \gamma_f \gamma_n = \frac{260}{34.66} \times 1.2 \times 0.95 = 8.6 \text{ шт.}$$

Приймаємо 9 болтів з відстанню між ними рівною $2d \approx 40 \text{ мм}$, і від центру отвору для болта до краю елемента $1.5d = 30 \text{ мм}$

За умов встановлення, риска (центр) болта не може бути поставлена ближче, ніж 40 мм до грані куточка. Тому виникає ексцентриситет прикладання зусилля по відношенню до осі розташування болтів:

$$e = 40 - x_0 = 40 - 19 = 21 \text{ мм}; M = Ne = 260 \times 0.021 = 5.46 \text{ кН} \cdot \text{м}$$

Частина поздовжнього зусилля, що припадає на один болт:

$$N_b = \frac{N}{9} = \frac{260}{9} = 28.89 \text{ кН}$$

Зусилля в найбільш напруженому болті від згинального моменту (вивід формули представлений у наступному прикладі):

$$M_b = \frac{M l_{\max}}{\sum l_i^2} = \frac{5.46 \times 0.32}{(0.32^2 + 0.24^2 + 0.16^2 + 0.08^2)} = 9.1 \text{ кН}$$

Результуюче зусилля:

$$\sqrt{N_b^2 + M_b^2} = \sqrt{28.9^2 + 9.1^2} = 30.3 \text{ кН} < N_{b\min} = 34.66 \text{ кН}$$

Переріз кутиків ослаблений одним отвором під болт, виконаємо перевірку міцності ослабленого перерізу.:

$$\sigma = \frac{N}{A_n} \gamma_f \gamma_n = \frac{260 \times 10^3 \times 1.2 \times 0.95}{2 \times (6.86 - 1.9 \times 0.5) \times 10^2} = 250.76 > 230 \text{ МПа}$$

Перенапруження складає 9%, слід збільшити калібр кутика. У нашому випадку підійде кутик $70 \times 70 \times 6$, з площею поперечного перерізу 8.15 см^2

Виконаємо аналогічні розрахунки для кутика $90 \times 90 \times 6$ на діюче стискаюче зусилля в 300 кН. Для даного кутика з шириною полиці в 90 мм, риска отворів

розташовується в 50 мм від обушка, максимальний розмір отвору 23 мм, приймаємо болт діаметром 20 мм.

$$N_{bs} = R_{bs} A_b n_s \gamma_b \gamma_c \gamma_n = 210 \times 314 \times 2 \times 1 \times 1 \times 0.95 \times 10^{-3} = 125.286 \text{ кН}$$

$$N_{bp} = R_{bp} d_b \sum t_{\min} \gamma_b \gamma_c \gamma_n = 475 \times 20 \times 6 \times 0.8 \times 1 \times 0.95 \times 10^{-3} = 43.32 \text{ кН}$$

У цьому випадку розрахунок із умови зминання також є визначальним.

$$n = \frac{N}{N_{b\min}} \gamma_f \gamma_n = \frac{300}{43.32} \times 1.2 \times 0.95 = 7.89 \text{ шт.}$$

Приймаємо 8 болтів з відстанню між ними рівною $2d \approx 50 \text{ мм}$, і від центру отвору для болта до краю елемента $1.5d = 35 \text{ мм}$

$$e = 40 - x_0 = 50 - 24.3 = 25.7 \text{ мм}; M = Ne = 300 \times 0.026 = 7.8 \text{ кН} \cdot \text{м}$$

$$N_b = \frac{N}{9} = \frac{300}{9} = 37.5 \text{ кН}$$

$$M_b = \frac{Ml_{\max}}{\sum l_i^2} = \frac{7.8 \times 0.35}{(0.35^2 + 0.25^2 + 0.15^2 + 0.05^2)} = 13 \text{ кН}$$

$$\sqrt{N_b^2 + M_b^2} = \sqrt{37.5^2 + 13^2} = 39.69 \text{ кН} < N_{b\min} = 43.32 \text{ кН}$$

В даному випадку елемент зазнає зусилля стиску та його переріз підібрано виходячи з умови стійкості, отже, елемент має значний запас міцності. Розрахунок ж стійкості виконується за площею поперечного перерізу бруто.

В цілому порівнюючи зварне рішення вузла фасонки, можна помітити, що варіант з болтовим з'єднанням має більшу витрату металу. Так як при визначенні числа болтів визначальним було розрахункове зусилля, яке може бути сприйнято одним болтом по зминанню елементів, для зменшення їх числа, слід або збільшити товщину фасонки, підвищити клас сталі з'єднуваних елементів або клас точності болта. Діаметр болта, обмежений з конструктивних міркувань і не може бути збільшений.

Приклад 2

Розрахуємо приєднання консолі із двох швелерів №40У (товщина стінки 8 мм) із сталі С235 до колони (полиці 400×20 мм) на болтах. До консолі прикладена сила 80 кН на відстані 600 мм від осі колони.

Згинаючий момент і поперечна сила в консолі, що припадає на один швелер:

$$M = 80 \times 0.6 \times 0.5 = 24 \text{ кН} \cdot \text{м}; Q = 80 \times 0.5 = 40 \text{ кН}$$

Рекомендований діаметр отвору стінці швелера 25 мм, тобто під болт 22 мм. Оскільки застосування цих болтів не рекомендовано, приймаємо болти діаметром 20 мм нормальної точності, класу 5.6.

Несуча здатність одного болта з умови зрізу та зминання:

$$N_{bs} = R_{bs} A_b n_s \gamma_b \gamma_c \gamma_n = 210 \times 314 \times 1 \times 1 \times 1 \times 0.95 \times 10^{-3} = 62.643 \text{ кН}$$

$$N_{bp} = R_{bp} d_b \sum t_{\min} \gamma_b \gamma_c \gamma_n = 475 \times 20 \times 8 \times 0.8 \times 1 \times 0.95 \times 10^{-3} = 57.76 \text{ кН}$$

Розрахунковим є змінання болта.

Розрахуємо зусилля, що припадає на крайній болт:

$$N_{\max Z} = \frac{M y_{\max}}{\sum (z_i^2 + y_i^2)} = \frac{24 \times 10^6 \times 125}{4 \times (50^2 + 125^2) + 4 \times (150^2 + 125^2)} \times 10^{-3} = 13.333 \text{ кН}$$

$$N_{\max Y} = N \frac{M z_{\max}}{\sum (z_i^2 + y_i^2)} = \frac{24 \times 10^6 \times 150}{4 \times (50^2 + 125^2) + 4 \times (150^2 + 125^2)} \times 10^{-3} = 16 \text{ кН}$$

$$N_{\max} = \sqrt{N_{\max Z}^2 + \left(N_{\max Y} + \frac{Q}{n} \right)^2} = \sqrt{13.333^2 + \left(16 + \frac{40}{8} \right)^2} = 24.875 \text{ кН} < N_{bp}$$

Вертикальна складова зусилля від моменту алгебраїчно підсумовується з поперечною силою, оскільки напрям напружень від цих силових впливів збігається.

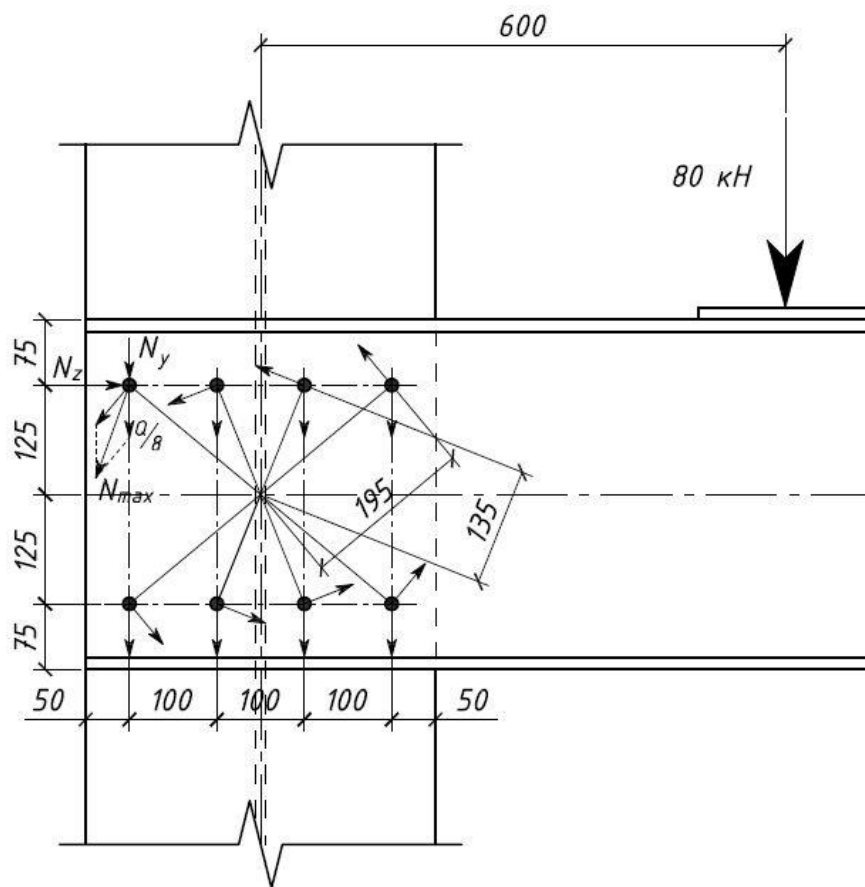


Рисунок 4.5. Схема до прикладу 2

Приклад 3

З'єднання (див. рисунок 2.3, б) виконано на болтах підвищеної точності діаметром 20 мм класу 5.6 ($R_{bs} = 210 \text{ МПа}$) зі сталі С345 ($R_{bp} = 560 \text{ МПа}$). Геометрія з'єднання і діючі навантаження показані на рисунку 4.6. Перевірити міцність з'єднання.

Аналіз роботи з'єднання показує, що воно працює на зсув, тому зусилля передаються через зріз болтів і зминання з'єднаних листів. Зусилля: зрізуючі сили $F = 40 \text{ кН}$, $P = 80 \text{ кН}$, згинальний момент сил F і P відносно центру ваги болтового поля (ЦВБП) – $M = 40 \cdot 0.18 + 80 \cdot 0.06 = 12 \text{ кН} \cdot \text{м}$.

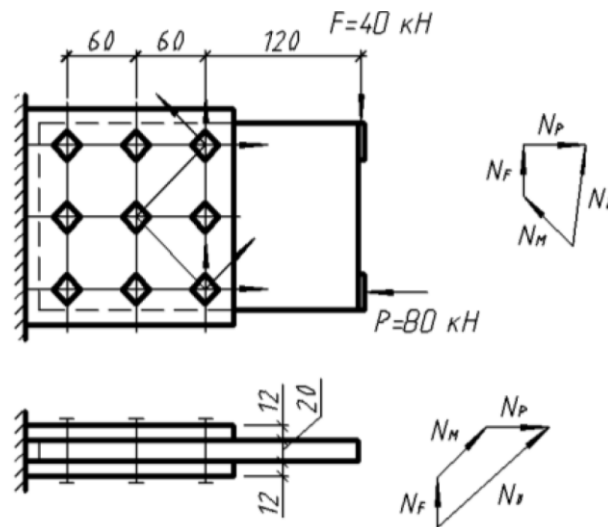


Рисунок 4.6. Схема до прикладу 3

Визначимо найбільше розрахункове зусилля, що виникає в болті, від зовнішніх сил M , F і P . Для цього побудуємо діаграми зусиль для двох крайніх болтів. Вектори зусиль у болті (N_F , N_P , N_M) відкладаємо в бік, протилежний напрямку дії сил (F , P , M). Вектор зусилля від моменту спрямований перпендикулярно до плеча ρ , що з'єднує ЦВБП із болтом, і діє в бік, протилежний дії згинального моменту. З векторних діаграм видно, що найбільше зусилля буде в нижньому болті, в якому сумарне зусилля більше, ніж у верхньому.

Величини складових зусиль:

$$N_F = \frac{40}{9} = 4.5 \text{ кН}; N_P = \frac{80}{9} = 8.9 \text{ кН}$$

Сума радіусів від ЦВБП до болтів:

$$\sum \rho_i^2 = 4 \cdot 0.06^2 + 4 \cdot 0.085^2 = 0.043 \text{ м}^2;$$

$$\rho_{\max} = 0.06\sqrt{2} = 0.085 \text{ м}$$

Тому, маємо:

$$N_M = \frac{M \rho_{\max}}{\sum \rho_i^2} = \frac{12 \cdot 0.085}{0.043} = 23.72 \text{ кН}$$

Сумарне зусилля в болті при $\alpha = 45^\circ$ отримаємо за теоремою Піфагора:

$$\begin{aligned} N_0 &= \sqrt{(N_M \cos \alpha + N_P)^2 + (N_M \sin \alpha + N_F)^2} = \\ &= \sqrt{(23.72 \cdot 0.707 + 8.9)^2 + (23.72 \cdot 0.707 + 4.5)^2} = 33.34 \text{ кН} \end{aligned}$$

Обчислимо несучу здатність болта на зріз при $A_{bn} = 3,14 \text{ см}^2$ та $n_s = 3 - 1 = 2$

$$N_{bs} = R_{bs} A_{bn} n_s \gamma_b \gamma_s = 210 \cdot 314 \cdot 2 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 10^{-3} = 131.88 \text{ кН}$$

на зминання, за мінімальної товщини елементів, що з'єднуються $\sum t = 2 \text{ см}$

$$N_{bp} = R_{bp} d_b \sum t_{\min} \gamma_b \gamma_c = 560 \cdot 20 \cdot 20 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 10^{-3} = 224 \text{ кН}$$

Розрахунковою є мінімальна несуча здатність на зріз.

Порівнюючи з найбільшим зусиллям у болті доходимо до висновку, що умова міцності забезпечена: $N_0 = 33.34 \text{ кН} < N_{bs} = 131.88 \text{ кН}$

Приклад 4

Консоль із двотавра № 40 прикріплена до колони болтами (див. рисунок 2.3, в). Тиск $F = 100 \text{ кН}$ сприймається опорним столиком, але передається з ексцентриситетом $e = 200 \text{ мм}$, тому болти працюють на розтягнення, спричинене дією згинального моменту. Визначити діаметр болтів класу 5.6 ($R_{bt} = 225 \text{ МПа}$).

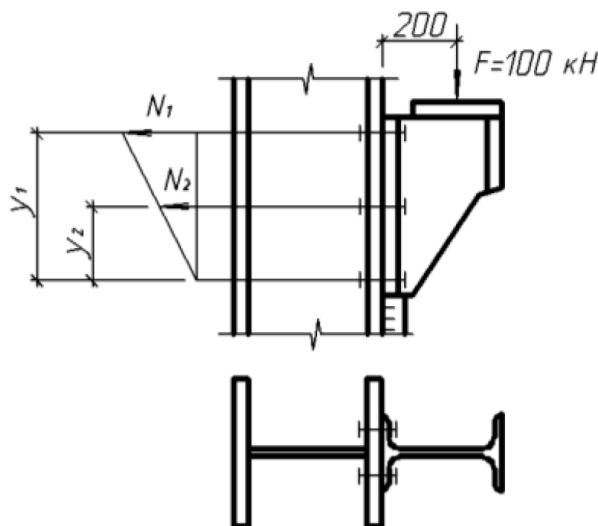


Рисунок 4.7. Схема до прикладу 4

Маємо випадок обмеженого повороту перерізу. За вісь обертання консолі приймаємо вісь болтів нижнього ряду. Зусилля в болтах будуть прямо пропорційні відстані до осі обертання. Найбільше зусилля в болті визначається за формулою (при двох рядах болтів у з'єднанні):

$$N_0 = \frac{Fe}{2} \frac{y_1}{\sum y_i^2} = \frac{100 \cdot 0.2}{2} \cdot \frac{0.2}{(0.2^2 + 0.1^2)} = 40 \text{ кН}$$

З умови міцності $N_0 \leq N_{bt}$ визначаємо площу поперечного перерізу болта нетто:

$$A_{bt} \geq \frac{N}{R_{bt}} = \frac{40 \cdot 10^3}{225} = 178.78 \text{ мм}^2$$

Приймаємо болти діаметром 18 мм ($A_{bn} = 1.92 \text{ см}^2$).

4.4 Вихідні дані до практичного завдання

Задача 1. Перевірити міцність з'єднання на болтах (рис. 4.8, а). Болти нормальної точності діаметром 20 мм, класу 5.6. Прийняти: $P = 2F$, $a = h/3 \text{ мм}$, $t_1 = 13 \text{ мм}$, $t = 20 \text{ мм}$. Значення F і h , клас сталі, прийняти за таблицею 3.1.

Задача 2. Верхній пояс ферми з'єднаний з колоною чотирма болтами за допомогою фланця (рис. 4.8, б). Діаметр болтів – 24 мм, клас – 5.8. Перевірити міцність болтового з'єднання. Прийняти $P = 4F$, $a = h/3 \text{ мм}$, $\gamma_c = 1$. Значення F і h , клас сталі, прийняти за таблицею 3.1

Задача 3. Перевірити міцність з'єднання на високоміцних болтах (рис. 4.8, в) діаметром 20 мм зі сталі 40Х «селект». Спосіб обробки поверхонь тертя дробеструменевий, контроль натягу болтів здійснюється за моментом закручування. Прийняти $P = 5F$, $a = h/3 \text{ мм}$. Значення F і h , клас сталі, прийняти за таблицею 3.1

Задача 4. Визначити граничну силу F_0 на консоль, прикріплену до колони болтами нормальної точності класу 5.6 діаметром 24 мм (рис. 4.9, а), $a = h/3 \text{ мм}$. Значення F і h , клас сталі, прийняти за таблицею 3.1

Задача 5. У з'єднанні консолі з колоною (рис. 4.9, б) визначити діаметр болта грубої точності класу 5.6, якщо $a = h/3 \text{ мм}$, $F_0 = 3F$. Значення F і h , клас сталі, прийняти за таблицею 3.1

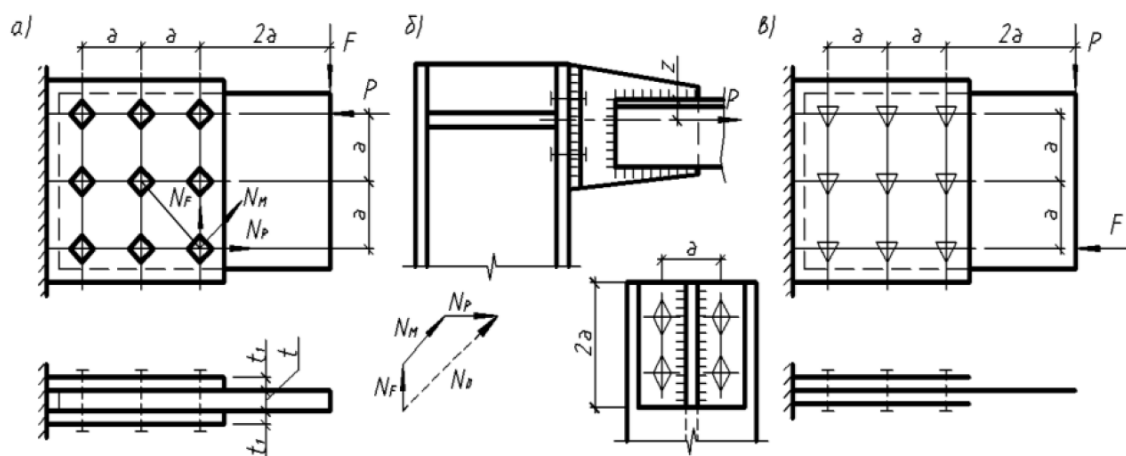


Рисунок 4.8. Схеми до задач 1-3

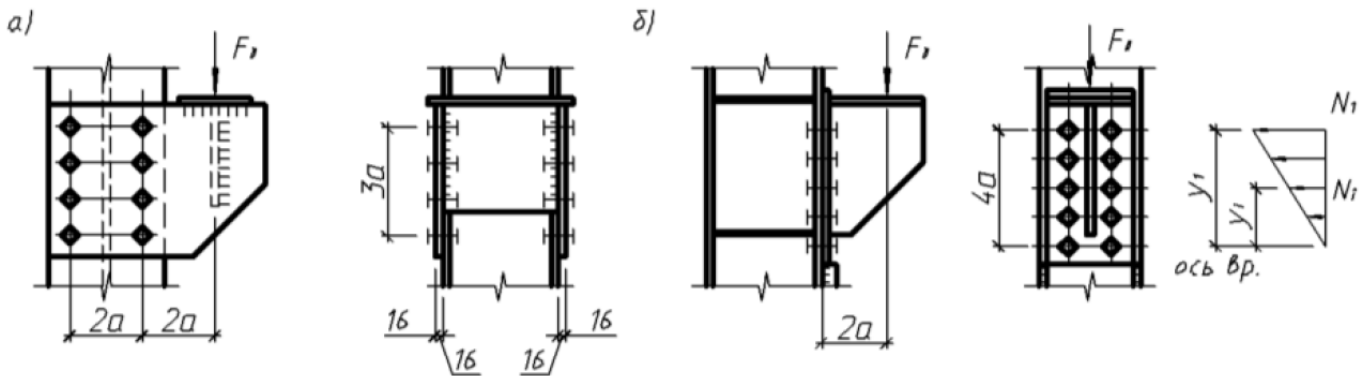


Рисунок 4.9. Схеми до задач 4 та 5

4.5 Контрольні питання

1. Чим відрізняються один від одного болти різної точності.
2. Чим відрізняються високоміцні болти.
3. Як позначається клас міцності болтів.
4. Як визначити характеристичні опори сталі болтів та розрахункові опори одноболтових з'єднань.
5. Як працюють болтові з'єднання.
6. На які зусилля працюють болти.
7. Як потрібно розміщувати болти.
8. Як визначити розрахункове зусилля, яке може бути сприйняте одним болтом.
9. Як визначити кількість болтів при дії поздовжньої сили, що проходить через центр ваги з'єднання.
10. Як розподіляються між болтами зусилля зрізу при дії згинального моменту.
11. Що треба визначити при одночасній дії на болтове з'єднання поздовжньої і поперечної сили та згинального моменту.
12. Як перевірити найбільш напружений болт при одночасній дії на болтове з'єднання зусиль, що викликають зріз і розтяг.

4.6 Додаткова література за темою

1. Металлические конструкции : учебник / Н.С. Стрелецкий. – 3-е изд. – М.: Государственное издательство литературы по строительству, архитектуре и строительным материалам, 1962 – с. 778 – (стор. 207-210)
2. Расчет стальных конструкций : Справ. пособие / Я. М. Лихтарников, Д. В. Ладыженский, В. М. Клыков. – 2-е изд., перераб. и доп. – К.: Будівельник, 1984. – с. 368
3. Металлические конструкции (Справочник проектировщика) / Под ред. Н. П. Мельникова. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1980. – 776 с. – (стор. 174-175)

4. Серия 2.440-2. Узлы Стальных конструкций производственных зданий и промышленных предприятий. Выпуск 1. Шарнирные узлы балочных клеток и рамные узлы примыкания ригелей к колоннам. Чертежи КМ
5. Будур А.И., Белогуров В.Д. Стальные конструкции. Справочник конструктора. – К.: Изд-во “Сталь”, 2004. – 210 с.

РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. ДБН В.1.2-14:2018. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель і споруд. . К.: Мінрегіон України, 2018. URL: https://e-construction.gov.ua/laws_detail/3199634775304307868?doc_type=2
2. ДБН В.1.2-2:2006. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Навантаження і впливи. Норми проектування. Зі зміною №1 та №2. К.: Мінрегіонбуд України, 2020. URL: https://e-construction.gov.ua/laws_detail/3199621970136139233?doc_type=2
3. ДБН В.2.6-198:2014. Сталеві конструкції. Норми проектування. К.: Мінрегіон України, 2014. URL: https://e-construction.gov.ua/laws_detail/3200869840512354218?doc_type=2
4. Металеві конструкції: Загальний курс: підручник для вищих навчальних закладів. – 2-е видання, перероблене і доповнене / Під загальною редакцією О.О. Нілова та О.В. Шимановського. – К.: Видавництво «Сталь», 2010 – 869 с. URL: <https://drive.google.com/file/d/1FC8txk9tf8n1S8v2wqOvYauoUvbQeabl/view?usp=sharing>
5. Конспект лекцій з дисципліни «Металеві конструкції» для здобувачів вищої освіти спеціальності 192 «Будівництво та цивільна інженерія» (в 2-ч частинах) Частина 1. Основи розрахунку конструкцій за методом граничних станів. З'єднання металевих конструкцій. (Електронне видання) / Уклад.: В. М. Соколенко, К. В. Соколенко – Київ: вид-во СНУ ім. В. Даля, 2023. – 111 с.
6. Конспект лекцій з дисципліни «Металеві конструкції» для здобувачів вищої освіти спеціальності 192 «Будівництво та цивільна інженерія» (в 2-ч частинах) Частина 2. Основи розрахунку та конструювання балок, центрально-стиснутих колон, ферм. (Електронне видання) / Уклад.: В. М. Соколенко, К. В. Соколенко – Київ: вид-во СНУ ім. В. Даля, 2023. – 129 с.

Навчальне видання

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до практичних занять з дисципліни «Металеві конструкції»
для здобувачів вищої освіти спеціальності 192 «Будівництво та цивільна інженерія»
(в 3-х частинах)

Частина 2. Розрахунок і конструювання зварних та болтових з'єднань сталевих
конструкцій.

(Електронне видання)

Укладачі:

Соколенко Костянтин Валерійович

Соколенко Валерій Михайлович

Техн. Редактор

К. В. Соколенко

Оригінал - макет

К. В. Соколенко

Підписано до друку _____

Формат $60 \times 84 \frac{1}{16}$. Папір типограф. Гарнітура *Times*.

Друк офсетний. Умов. друк. арк. _____. Обл.-вид.арк. _____.

Тираж ____ прим. Вид. № _____. Замовл. № _____. Ціна договірна.

Видавництво СНУ ім. Володимира Даля

Адреса видавництва: Україна, 01042, м. Київ, вул. Іоанна Павла II, 17

Телефон: +38 (050) 218 04 78

E-mail: izdat@snu.edu.ua