

**Сергій Владиславович Олексієнко¹, Михайло Миколайович Руденко²,
Світлана Михайлівна Ющенко³, Максим Геннадійович Болотов⁴,
Микола Миколайович Корзаченко⁵**

¹кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри технологій зварювання та будівництва
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)
E-mail: sv.oleks@stu.cn.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5475-4439>
ResearcherID: F-8197-2014. SCOPUS Author ID: 57190370561

²старший викладач кафедри технологій зварювання та будівництва,
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)
E-mail: m.rudenko@stu.cn.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9542-7792>
ResearcherID: G-6235-2014. SCOPUS Author ID: 57190378153

³кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри технологій зварювання та будівництва
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)
E-mail: rasssveta@stu.cn.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0863-9020>
ResearcherID: F-7741-2014. SCOPUS Author ID: 57190373626

⁴кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри технологій зварювання та будівництва
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)
E-mail: m.bolotov@stu.cn.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0915-4132>
ResearcherID: AAJ-6633-2020. SCOPUS Author ID: 57190377278

⁵кандидат технічних наук, доцент кафедри технологій зварювання та будівництва
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)
E-mail: korzachenko_87@stu.cn.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5674-8662>
ResearcherID: F-5177-2016. SCOPUS Author ID: 57330883100

САЕ-АНАЛІЗ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЗВАРНОЇ ДВОТАВРОВОЇ КОЛОНИ З РЕГУЛЬОВАНИМ ПОЛЕМ ЗАЛИШКОВИХ НАПРУЖЕНЬ У ЇЇ ПЕРЕРІЗІ

Розрахунок на міцність та стійкість суцільних зварних двотаврових колон за чинними нормами проектування виконується з врахуванням наявності залишкових напружень від зварювання у їх перерізі. Вплив залишкових зварювальних напружень стиску на кромках полиць проявляється у втраті їх місцевої стійкості. Проведено комп'ютерне моделювання напружено-деформованого стану, що виникає при експлуатації зварних колон. Розглянуто способи зниження величини зварювальних напружень стиску на кромках полиць, визначено їх ефективність стосовно підвищення загальної стійкості колон та зниження їх матеріалоемності.

Ключові слова: зварна колона; суцільний переріз; стійкість; залишкові напруження; матеріалоемність.

Рис.: 9. Бібл.: 14.

Актуальність теми дослідження. Основу каркасів промислових будівель складають плоскі поперечні рами, які утворюються з колон та ригелів, що на них спираються. На вибір конструктивних рішень при проектуванні колон та ригелів мають вплив безліч факторів: призначення будівлі, тип покриття, наявність кранів та їхня вантажопідйомність, габаритні розміри, крок колон тощо.

Колони є вертикальними елементами, які підтримують розташовані на них конструкції, сприймають навантаження і передають їх на фундаменти. Використовується два типи перерізів колон: суцільні та наскрізні. В порівнянні з колонами суцільного перерізу, наскрізні більш ефективні за матеріалоемністю та за можливістю забезпечення рівності стійкості у двох площинах, однак при виготовленні вони більш трудомісткі. При значних навантаженнях і відносно невеликих довжинах використовуються суцільні колони, а наскрізні – при великій довжині та менших навантаженнях [1].

Використання суцільних колон двотаврового перерізу, які відносяться до групи відкритих перерізів, дозволяє спростити вузли обпирання на них інших елементів. На відміну від прокатних двотаврів типу К, використання зварних двотаврових колон із трьох листів дозволяє забезпечити отримання більш економічного з точки зору витрат сталі перерізу. При цьому авторами роботи [1] зазначається, що більш раціональною з погляду мінімальної матеріалоемності буде колона, у якої площа поперечного перерізу буде мати мінімальне значення при якомога більшому значенні коефіцієнта стійкості (коефіцієнта

повздожнього згину) φ . У свою чергу коефіцієнт стійкості збільшується зі зростанням моменту інерції перерізу I , що вимагає зосереджувати основну масу матеріалу якнайдалі від центра ваги. Таким чином, переріз komponують із елементів мінімальної товщини і обов'язково стає необхідність забезпечення їх місцевої стійкості.

Постановка проблеми. При проектуванні колон суцільного перерізу за чинними нормами проектування [1-3] враховується наявність у них власних напружень від прокатування чи зварювання (рис. 1). Це зумовлено тим, що власні напруження в поєднанні з напруженнями від експлуатаційного навантаження впливають на несучу здатність елемента. У такому разі при розрахунку на стійкість зварних елементів суцільного перерізу використовуються занижені значення коефіцієнтів φ і до уваги береться залежність коефіцієнта повздожнього згину від умовної гнучкості стержнів для різних форм поперечних перерізів.

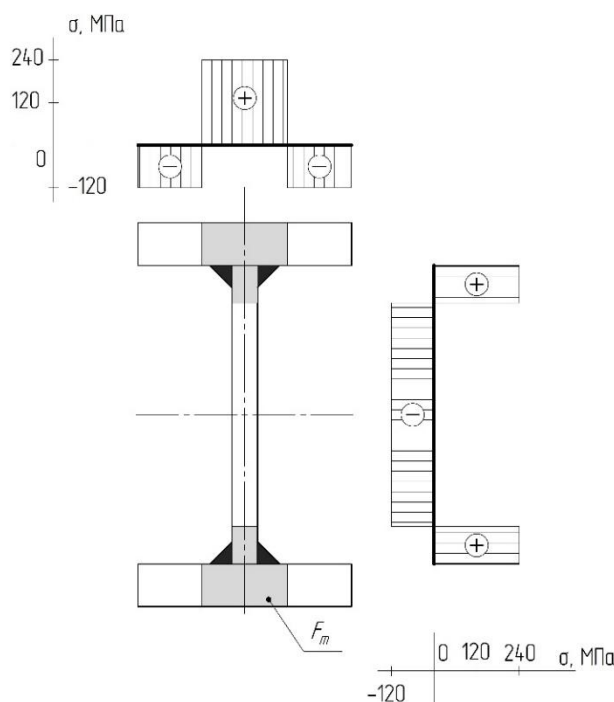


Рис. 1. Розподіл залишкових напружень у перерізі колони після зварювання

Як вказується у роботі [4], викликані зварюванням залишкові напруження стиску у перерізі елементів знижують стійкість та несучу здатність стиснутих зварних двотаврових колон Н-подібного перерізу, якщо залишкові напруження на кромках поясів перевищують 50 МПа. Це також стосується і прокатних двотаврів типу К з широкими поясами. Якщо шляхом спеціальних технологічних прийомів чи конструктивних заходів стискаючі напруження довести до величини не вище 50 МПа, то в розрахунку можуть використовуватися звичайні значення коефіцієнта φ , що може стати ефективним засобом зниження матеріалоємності виробу.

Вимога зниження коефіцієнта φ встановлена ще в роботі [5]. Проведені автором цієї роботи дослідження дозволили зробити такі висновки:

- залишкові напруження стиску в перерізі можуть суттєво знизити критичне навантаження;
- особливо помітний цей вплив при повздожньому згині у пружно-пластичній стадії в інтервалі гнучкості $50 < \lambda < 120$ при величині залишкових напружень стиску на кромках поясів на рівні 50 МПа;

- термічна обробка підвищує критичне навантаження Н-подібних елементів в інтервалі зазначених гнучкостей.

Однак призначення операції термообробки може істотно збільшити трудомісткість виготовлення виробу, особливо в умовах серійного виробництва.

У практиці проектування різноманітних конструкцій з метою зниження металоємності при збереженні несучої здатності прийнято використовувати попереднє напруження складових елементів. Як відмічається у роботі [6], в центрально- та позацентрово-стиснутих колонах в основному використовуються зварні двотаври з доволі товстими стінками ($\lambda_w \leq 60 \dots 70$) через необхідність забезпечення їх місцевої стійкості. Використання попереднього напруження підвищує ефективність колон: порівняно тонка стінка ($\lambda_w \leq 120 \dots 150$) попередньо нагрівається і зварюється із поясами зі сталі підвищеної міцності. Після охолодження стінка залишається розтягнутою, а пояси стиснутими. Під навантаженням стінка працює в області напружень $\sigma \leq \sigma_{ps} + \sigma_{cr}$ (σ_{ps} – попереднє напруження, σ_{cr} – критичне напруження для стінки). Завдяки попередньому напруженню витрати металу на колону можуть бути зменшені до 10%.

Аналіз технології виготовлення таких колон дозволяє зробити висновок про необхідність приділяти належну увагу забезпеченню місцевої стійкості полиць через те, що разом із напруженнями стиску від зварювання додатковий вплив на їх стійкість здійснюють усадочні явища при охолодженні стінки.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Роботи [7-11] розглядають роботу зварних елементів на стиск, але у більшій мірі присвячені методології комп'ютерного моделювання. Автори висвітлюють проблеми моделювання стійкості до вигину зварних колон, визначають відповідність прийнятих аналітичних рішень і результатів розрахунків методами скінченних елементів результатам проведених експериментальних досліджень, отримані результати використовують для розробки аналітичного формулювання кривих вигину, роблять висновки, що розрахунки необхідно проводити не тільки для випадків поширених сталей, а також і для інших видів сталі, особливо високоміцних сталей.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Дослідження, проведені як вітчизняними, так і закордонними вченими в різні роки [8], спрямовані, переважно, на моделювання та аналіз діаграм напружень та деформацій від зовнішнього навантаження для двотаврових перерізів із різним рівнем залишкових зварювальних напружень стиску. При цьому, в роботах майже відсутні дані стосовно технологічних засобів, спрямованих на зменшення напружень, що виникають у поясах конструкції (див. рис. 1).

Мета роботи. Встановити засоби зниження величини залишкових зварювальних напружень стиску у перерізах зварних двотаврових колон, визначити їхню ефективність та вплив на працездатність засобами комп'ютерного моделювання.

Виклад основного матеріалу. Робота виконувалась під час проектування виробничого комплексу з виготовлення металоконструкцій будівельного спрямування потужністю до 1000 т/рік у Чернігівській області.

Підбір перерізу суцільної колони складеного двотаврового перерізу з листової сталі С255, яка сприймає повздовжнє зусилля, виконано за методикою, наведеною в [1]. Величина зусилля $N = 1918,51 \text{ кН}$, опорна частина колони (база) жорстко защемлена, оголовок закріплено шарнірно. Відмітка верху колони +9,6 м, заглиблення бази -0,13 м. Коефіцієнт умов роботи $\gamma_c = 1,0$. Розрахунковий опір сталі $R_y = 240 \text{ МПа} = 24 \text{ кН/см}^2$. Модуль пружності сталі $E = 2,06 \cdot 10^5 \text{ МПа} = 2,06 \cdot 10^4 \text{ кН/см}^2$.

За такої схеми закріплення коефіцієнт розрахункової довжини $\mu = 0,7$, відповідно розрахункова довжина колони $l_{ef,x} = l_{ef,y} = \mu l = 0,7 \cdot (960 + 13) = 681,1 \text{ см}$.

З конструктивних міркувань приймаємо $b = h = 30 \text{ см}$, $l_{ef,x} = l_{ef,y}$, тому втрата стійкості двотавра відбувається відносно осі у-у (рис. 2).

Наближений радіус інерції перерізу відносно осі у-у:

$$i_y = 0,24 \cdot b_f = 0,24 \cdot 30 = 7,2 \text{ см.}$$

$$\text{Гнучкість стержня } \lambda_y = \frac{l_{ef,y}}{i_y} = \frac{681,1}{7,2} = 94,6.$$

$$\text{Умовна гнучкість } \bar{\lambda}_y = 94,6 \sqrt{\frac{24}{2,06 \cdot 10^4}} = 3,23.$$

За табл. Д.6.1 [1] $\varphi = 0,596$.

Необхідна площа перерізу:

$$A_{cal} = \frac{N}{\varphi R_y \gamma_c} = \frac{1918,51}{0,596 \cdot 24 \cdot 1,0} = 134,12 \text{ см}^2 \approx 134 \text{ см}^2.$$

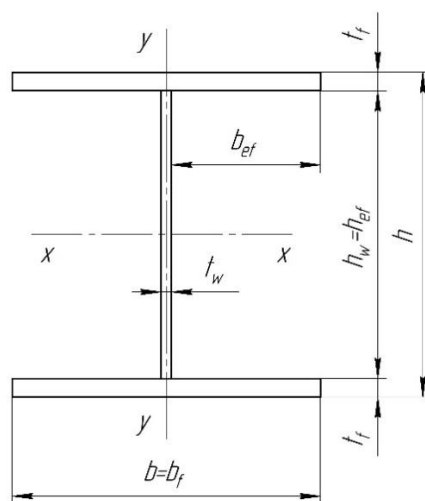


Рис. 2. Розрахункові розміри елементів перерізу

З використанням формул табл. 5.4 [1] для двотавра при $\bar{\lambda}_y = 3,23 > 2$ умовна гранична гнучкість стінки:

$$\bar{\lambda}_{iw} = 1,20 + 0,35 \bar{\lambda} = 1,20 + 0,35 \cdot 3,23 = 2,331 < 2,5.$$

Гранична гнучкість стінки:

$$\lambda_{iw} = 2,331 \sqrt{\frac{2,06 \cdot 10^4}{24}} = 68,29.$$

Приймаємо $h_w = 28 \text{ см}$. Тоді необхідна товщина стінки:

$$t_w \geq \frac{h_w}{\lambda_{iw}} = \frac{28}{68,29} = 0,41 \text{ см.}$$

Приймаємо $t_w = 1 \text{ см}$. Площа перерізу стінки у такому разі $A_w = 1 \cdot 28 = 28 \text{ см}^2$.

Площа перерізу поясу:

$$A_f = \frac{1}{2} (A_{cal} - A_w) = \frac{1}{2} (134 - 28) = 53 \text{ см}^2.$$

Необхідна товщина поясу:

$$t_f = \frac{A_f}{b_f} = \frac{53}{30} = 1,77 \text{ см} \approx 1,8 \text{ см.}$$

Виконуємо перевірку ширини звису за табл. 5.3 [1]:

$$\frac{b_{ef}}{t_f} \sqrt{\frac{R_y}{E}} = \frac{(b_f - t_w)}{2 \cdot t_f} \sqrt{\frac{R_y}{E}} = \frac{(30 - 1)}{2 \cdot 1,8} \sqrt{\frac{24}{2,06 \cdot 10^4}} = 0,275 < 0,36 + 0,1 \bar{\lambda}_y = 0,36 + 0,1 \cdot 3,23 = 0,683.$$

Отже місцева стійкість звису полиці забезпечується.

Виконаємо перевірку перерізу. Загальна площа поперечного перерізу при прийнятих розмірах стінки та полиць:

$$A = A_w + 2A_f = 28 + 2 \cdot 30 \cdot 1,8 = 136 \text{ см}^2.$$

Момент інерції перерізу бруто відносно осі y - y :

$$I_y = 2 \frac{1,8 \cdot 30^3}{12} = 8100 \text{ см}^4.$$

Радіус інерції перерізу відносно осі y - y :

$$i_y = \sqrt{\frac{I_y}{A}} = \sqrt{\frac{8100}{136}} = 7,72 \text{ см}.$$

Умовна гнучкість стержня:

$$\bar{\lambda}_y = \frac{l_{ef}}{i_e} \sqrt{\frac{R_y}{E}} = \frac{681,1}{7,72} \sqrt{\frac{24}{2,06 \cdot 10^4}} = 3,01.$$

За табл. Д.6.1 [1] $\varphi = 0,641$.

$$\sigma = \frac{N}{\varphi A} = \frac{1981,51}{0,641 \cdot 136} = 22,01 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2} < R_y \gamma_c = 24 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2}.$$

Загальна стійкість колони забезпечується.

Переріз колони та його основні розміри представлені на рис. 3.

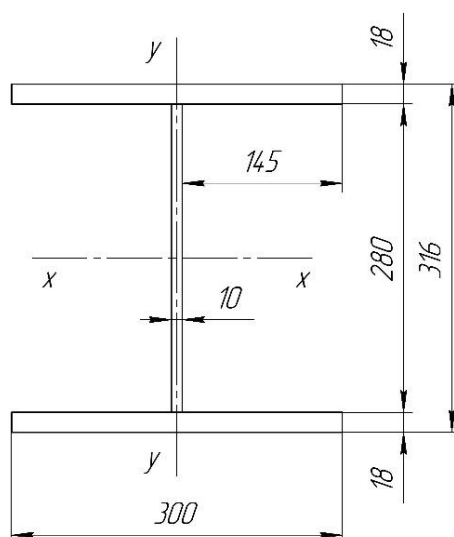


Рис. 3. Прийнятий переріз колони

При розрахунку стиснутих елементів треба враховувати впливи першого і другого порядку. Впливом першого порядку є випадковий ексцентриситет, який за нормами, наприклад, EN-1992-1-1 рекомендовано приймати:

$$e_y = \frac{l_{ef,y}}{400}. \quad (1)$$

Звідси

$$e_y = \frac{681,1}{400} = 1,7 \text{ см.}$$

Розрахунок на міцність позацентрово-стиснутих колон, які виконані із сталі з нормативною границею текучості R_{yn} до 440 МПа і не сприймають безпосередніх динамічних навантажень, при $\tau \leq 0,5R_s$ і $\frac{N}{A_n R_y} > 0,1$ слід виконувати з урахуванням обмежених пластичних деформацій [2]:

$$\frac{N}{A_n R_y \gamma_c} + \frac{M}{c_y W_{yn, \min} R_y \gamma_c} \leq 1, \quad (2)$$

де A_n – площа поперечного перерізу нетто;

M – згинальний момент, $M = Ne_y$;

c_y – коефіцієнт, що залежить від типу перерізу, $c_y = 1,47$ [2];

$W_{yn, \min}$ – мінімальний момент опору перерізу нетто відносно осі y – y .

$$\frac{N}{A_n R_y} = \frac{1981,51}{136 \cdot 24} = 0,607 > 0,1.$$

$$W_{yn, \min} = 2 \frac{1,8 \cdot 30^2}{6} = 540 \text{ см}^3.$$

Тоді

$$\frac{1981,51}{136 \cdot 24 \cdot 1} + \frac{1981,51 \cdot 1,7}{1,47 \cdot 540 \cdot 24 \cdot 1} = 0,784 \leq 1.$$

Умова виконується.

Отримані проектні значення геометричних параметрів та навантажень були використані для моделювання напружено-деформованого стану конструкції колони за допомогою програмного комплексу SolidWorks. Для коректного порівняння результатів розрахунків використовувалась однакова сітка скінченних елементів. Поля напружень у місцях приєднання оголовка та бази до колони до уваги не приймалися.

За умови, що колона суцільного двотаврового перерізу з розмірами, представленими на рис. 3, буде не зварною, а монолітною, величина напружень на стиснутих кромках полиць буде досягати значення 175,4 МПа (рис. 4, а), максимальна величина деформації по вертикалі складатиме значення 7,75 мм (рис. 4, б), по горизонталі – 7,91 мм (рис. 4, в).

Усадка швів після зварювання викликає як повздовжні, так і поперечні напруження. З погляду працездатності зварної колони визначальними будуть повздовжні напруження.

Величина та характер розподілу цих напружень залежать від матеріалу, параметрів режиму зварювання та умов, у яких проводилося зварювання (зварювання у закріпленнях, у вільному стані, з використанням вигинів тощо). Утворення залишкових напружень після зварювання пов'язане з пластичною деформацією металу при нагріванні та охолодженні. Пластичні деформації прийнято вважати рівномірно розподіленими у межах зони пружно-пластичних деформацій F_m (див. рис. 1). Напруження у цій зоні досягають границі текучості [12]. За межами цієї зони діють зрівноважувальні напруження, а їх величина та розподіл визначаються умовами рівноваги.

У нашому випадку при зварюванні низьковуглецевої сталі зміна режиму зварювання впливає тільки на ширину цієї зони.

Визначення величини зони пружно-пластичних деформацій проведемо за умови, що поясні шви виконуються автоматичним дуговим зварюванням під шаром флюсу.

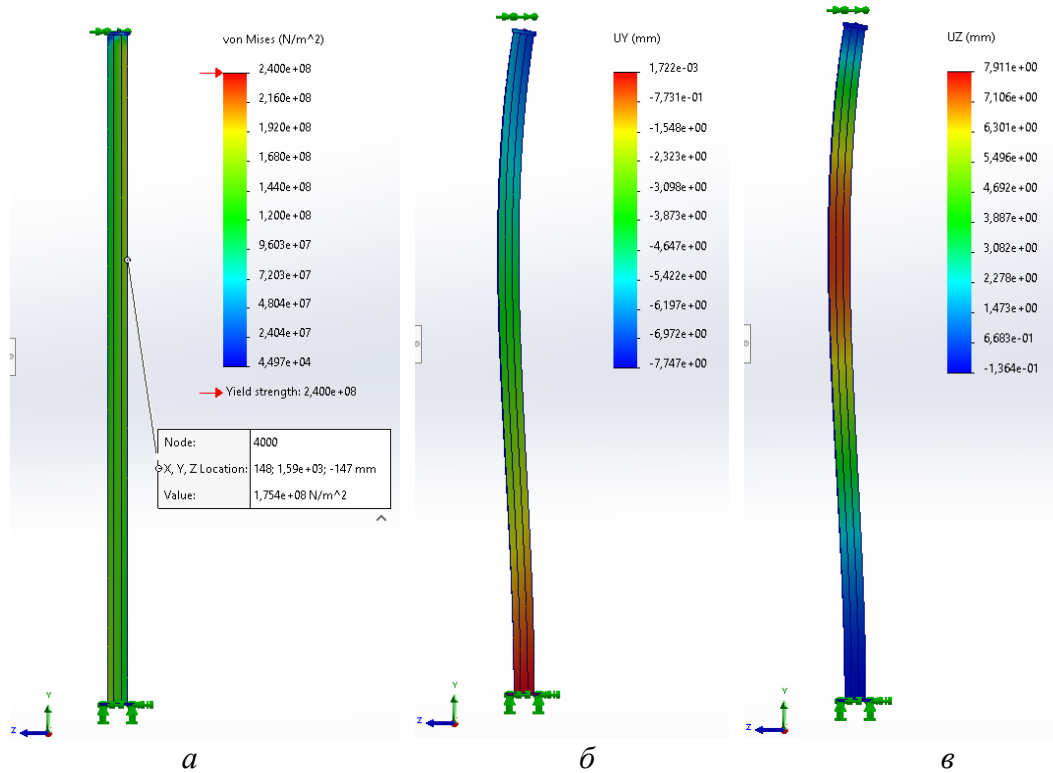


Рис. 4. Моделювання напруженого стану та деформування монолітної колони прийнятого двотаврового перерізу

Розглядаємо таврове з'єднання типу ТЗ з двосторонніми швами катетом $k = 10$ мм (рис. 5).

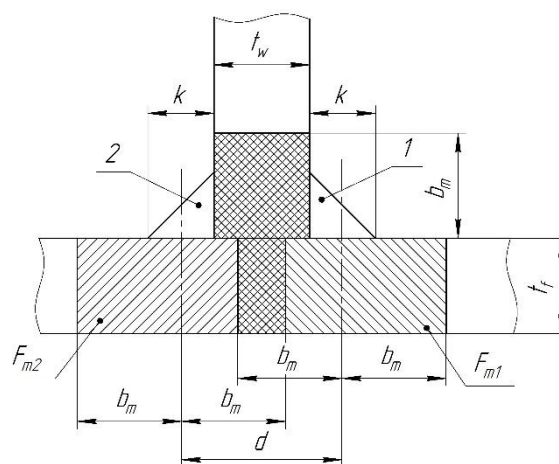


Рис. 5. Розміри зони пружно-пластичних деформацій таврового з'єднання ТЗ [12]

Розрахунок параметрів режиму зварювання виконано за методикою, наведеною в [13]: діаметр електродного дроту $d_{ел} = 5$ мм; зварювальний струм $I_{зв} = 700$ А; швидкість зварювання $V_{зв} = 27$ м / год $= 0,75$ см / с; теплова потужність дуги $q = 4700$ кал / с.

Погонна енергія при зварюванні:

$$q_n = \frac{q}{V_{зв}} = \frac{4700}{0,75} = 6266,7 \text{ кал / см} = 26257,47 \text{ Дж / см.}$$

Для низьковуглецевої сталі площа пружно-пластичної зони F_m визначається за виразом [12]:

$$F_m = \frac{1}{\left(\frac{1}{A_n} + \frac{y^2}{I_x} + \frac{1200}{q_n} \right)}, \quad (3)$$

де I_x – момент інерції перерізу відносно власної осі, перпендикулярної до осі вигину, см^4 ;
 y – відстань від осі шва до нейтральної осі зварної колони, см .

Момент інерції перерізу:

$$I_x = \frac{1 \cdot 28^3}{12} + 2 \left[\frac{30 \cdot 1,8^3}{12} + (14 + 0,9)^2 \cdot 30 \cdot 1,8 \right] = 25835,6 \text{ см}^4.$$

Тоді при симетричному двотавровому перерізі при виконанні першого шва

$$F_{m1} = \frac{1}{\left(\frac{1}{136} + \frac{0^2}{25835,6} + \frac{1200}{26257,47} \right)} = 18,85 \text{ см}^2.$$

Після виконання другого шва на тому ж режимі зона пружно-пластичних деформацій F_{m2} буде частково перекривати зону F_{m1} . Загальна площа зони при двосторонніх швах таврового з'єднання:

$$F_{m1,2} = m_{1,2} F_{m1}, \quad (4)$$

$$\text{де } m_{1,2} = 1 + \frac{(t_w + k)t_f}{F_{m1}} = 1 + \frac{(1+1)1,8}{18,85} = 1,191.$$

Звідси

$$F_{m1,2} = 1,191 \cdot 18,85 = 22,45 \text{ см}^2.$$

Відстань між осями швів:

$$d = t_w + k = 1 + 1 = 2 \text{ см.}$$

Протяжність зони на усі сторони:

$$b_m = \frac{F_{m1}}{t_w + 2t_f} = \frac{18,85}{1 + 2 \cdot 1,8} = 4,1 \text{ см.}$$

Отримані дані використали для моделювання напружено-деформованого стану колони при дії повздовжнього зусилля з урахуванням розподілення залишкових зварювальних напружень розтягу та стиску від виконання поясних швів (див. рис. 1). В пружно-пластичній зоні величина напружень розтягу досягає 240 МПа , на звисах полиць напруження стиску мають значення -120 МПа . Аналогічним чином залишкові напруження розподіляються у стінці колони.

Величина напружень на стиснутих кромках полиць буде досягати значення $176,6 \text{ МПа}$ (рис. 6, а), максимальна величина деформації по вертикалі складатиме значення $7,86 \text{ мм}$ (рис. 6, б), по горизонталі – $7,90 \text{ мм}$ (рис. 6, в).

У роботі [14] проведено узагальнення даних щодо забезпечення місцевої та загальної стійкості стиснутих елементів. У роботі вказується, що загальна стійкість залежить не стільки від величини зварювальних напружень стиску у перерізі, скільки від того, наскільки далі від осі, відносно якої імовірна втрата стійкості, знаходяться зони з напруженнями розтягу. Найпростіше, як вказується в роботі [5], це досягається за рахунок наплавлення на кромки полиць зварних валиків.

Розмір зони з напруженнями розтягу на кромках буде залежати від величини погонної енергії при зварюванні та геометричних характеристик її перерізу.

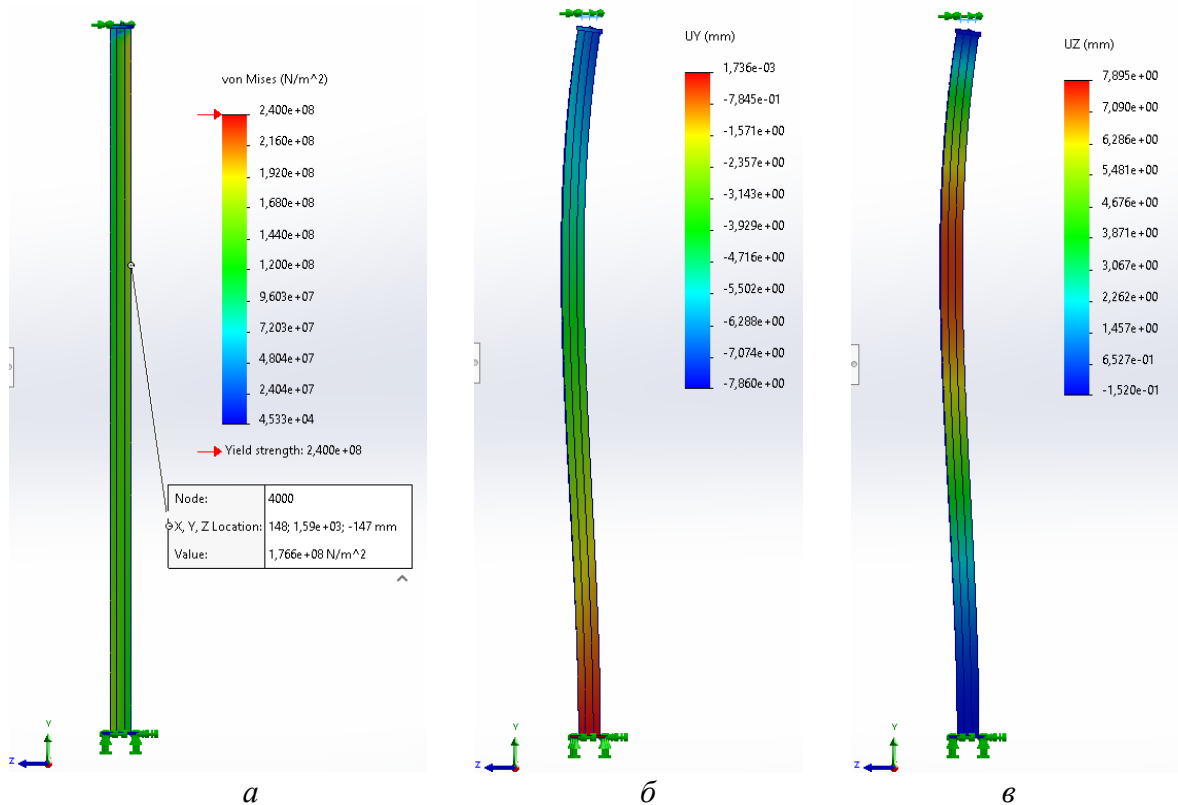


Рис. 6. Напружено-деформований стан колони з урахуванням залишкових зварювальних напружень

Припустимо, що наплавлення виконується на режимі з величиною погонної енергії 12000 Дж/см. За виразом (3) при симетричному розташуванні наплавлених на обидві кромки полиць валиків

$$F_m = \frac{1}{\left(\frac{1}{54} + \frac{12000}{12000}\right)} = 8,44 \text{ см}^2.$$

Протяжність зони пружно-пластичних деформацій по кромці полиці:

$$b_m = \frac{F_m}{t_f} = \frac{8,44}{1,8} = 4,7 \text{ см.}$$

Розподілення залишкових напружень після наплавлення валиків на кромки полиць у перерізі матиме вигляд, зображений на рис. 7.

У такому разі величина напружень на стиснутих кромках полиць знизиться до величини 156,2 МПа (рис. 8, а), максимальна величина деформації у вертикальній площині складатиме значення 6,46 мм (рис. 8, б), а у горизонтальній площині – 7,89 мм (рис. 8, в).

У відсотковому відношенні величина напружень на кромках полиць знижується на 11,6 % порівняно з їхньою величиною без наплавлення валиків. У свою чергу такий результат відкриває можливості для зниження матеріалоемності колони.

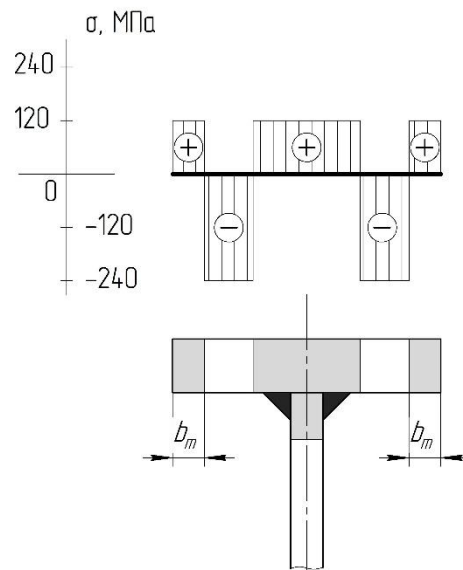


Рис. 7. Розподіл залишкових напружень у перерізі після наплавлення валиків на кромки полиць

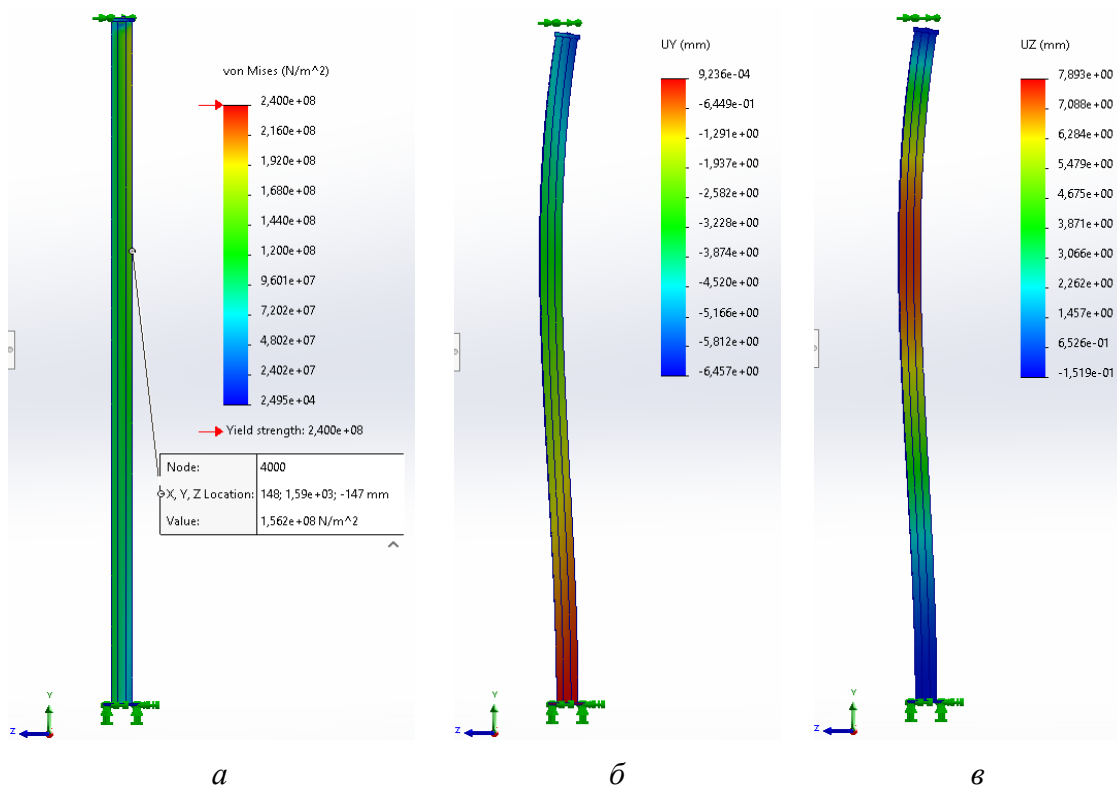


Рис. 8. Напружено-деформований стан колони після наплавлення валиків на кромки полиць

Нижче представлені результати моделювання напруженого стану у поперечному перерізі колони, у якій товщина полиць прийнята 16 мм. Прийнято ті самі параметри режиму зварювання кутових поясних швів та наплавлення валиків на кромки полиць. Зміна товщини полиць, відповідних геометричних характеристик перерізу та розмірів зон з напруженнями розтягу та стиску були враховані при моделюванні.

Так, у випадку прийнятої товщини полиці 18 мм без наплавлення валиків на кромки величина напружень стиску складає 176,3 МПа (рис. 9, а), а у випадку колони з товщиною полиці 16 мм з наплавленням валиків на кромки – 174,3 МПа (рис. 9, б).

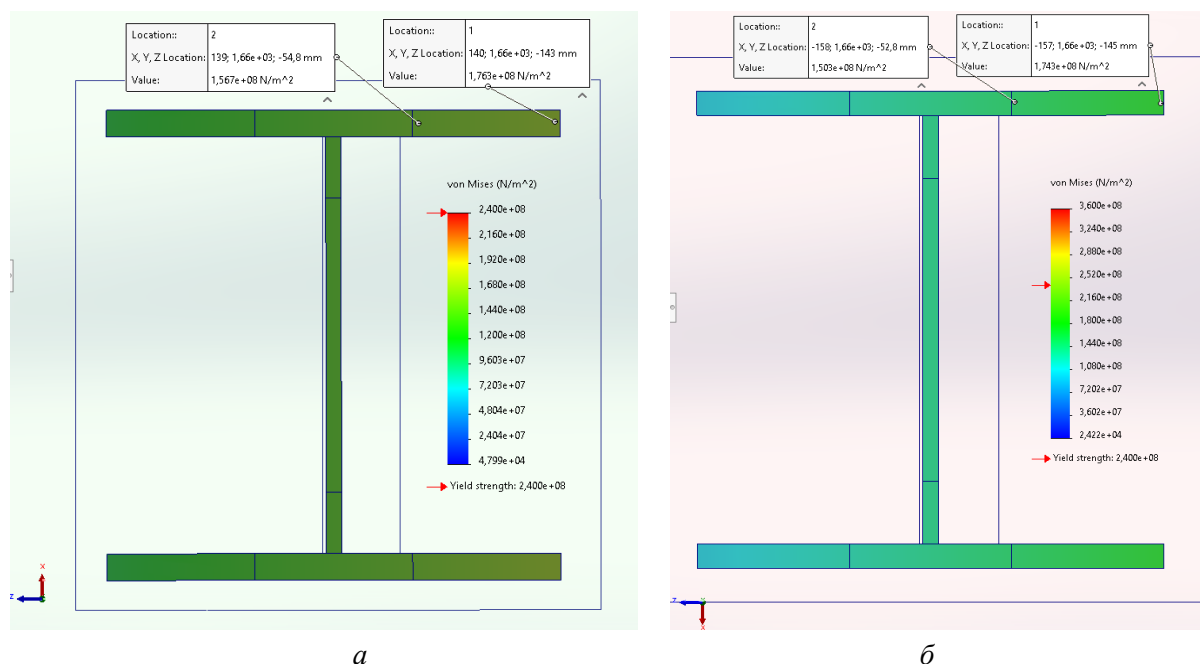


Рис. 9. Напруження на кромках полиць товщиною 18 мм без наплавлення валиків (а) та товщиною 16 мм з наплавленням валиків (б)

Таким чином при товщині полиць 16 мм витрати металу на колону можуть бути зменшені до 8,8 %.

Висновки. Отримані результати дозволяють розглядати наплавлення валиків на кромки полиць як ефективний засіб підвищення загальної стійкості колон та зниження їх матеріалоемності зі збереженням несучої здатності при заданих навантаженнях.

При відпрацюванні технології виготовлення колони поряд з використанням дугового наплавлення стосовно впливу на розподіл напружень у перерізі ретельного аналізу потребують термічні джерела з різним ступенем концентрації теплової енергії у точці нагріву.

Для оцінки ефективності обраної технології виготовлення зварної двотаврової колони необхідно провести техніко-економічне обґрунтування варіантів виробництва колони на основі таких вихідних даних, як вартість матеріалів та енергетичних ресурсів, трудомісткість процесів, подовження термінів виготовлення одиниці продукції тощо.

Список використаних джерел

- Нілов, О. О. Металеві конструкції. Балки. Колони : навч. посіб. для вищих навчальних закладів / О. О. Нілов, Т. О. Нілова. – Видання 2-е, перероблене і доповнене. – Київ : Логос, 2013. – 240 с.
- Металеві конструкції : Т. 2. Конструкції металевих каркасів промислових будівель : Підручник для вищих навчальних закладів / С. І. Білик, О. В. Шимановський, О. О. Нілов [та ін.] ; за ред. О. В. Шимановського, С. І. Білика, О. О. Нілова. – Кам'янець-Подільський : ТОВ «Друкарня «Рута», 2021. – 448 с.
- ДБН В.2.6-198:2014. Зі зміною №1. Сталеві конструкції. Норми проектування. – Київ : Мінрегіон України, 2022. – 223 с.
- Окерблом, Н. О. Конструктивно-технологическое проектирование сварных конструкций / Н. О. Окерблом. – М.–Л. : «Машиностроение», 1964. – 420 с.
- Шелестенко, Л. П. Влияние собственных остаточных напряжений на общую устойчивость сжатых сварных Н-образных элементов / Л. П. Шелестенко // Железнодорожное строительство. – 1954. – № 2. – С. 22-24.

6. Металлические конструкции : в 3 т. Т. 2. Стальные конструкции зданий и сооружений. (Справочник проектировщика) / под общ. ред. В. В. Кузнецова. – М. : Изд-во АСВ, 1998. – 512 с.
7. Zheng, B. Test and design of stainless steel welded i-columns / B. Zheng, G. Shu, X. Shen // *Advanced Steel Construction*. – 2015. – Vol. 11(4). – Pp. 427-440.
8. Szczerba, Radosław. On modelling of the buckling resistance of welded I-section columns / R. Szczerba, M. Gajewski, M. Giżejowski // *MATEC Web of Conferences*. – 2018. – Vol. 219.
9. Yidu Bu Finite element modelling and design of welded stainless steel I-section columns / Yidu Bu, Leroy Gardner // *Journal of Constructional Steel Research*. – 2019. – Vol. 152. – Pp. 57-67.
10. Kollár, Dénes Experimental and numerical simulation of welded columns / Kollár, Dénes, B. Kövesdi // *Conference: 41st International Conference ZAVARIVANJE – WELDING 2016, CWS2016 At: Opatija, Croatia, June 2016*.
11. Xiang Yun. Welded steel I-section columns: Residual stresses, testing, simulation and design / Xiang Yun, Yufei Zhu, Xin Meng, Leroy Gardner // *Engineering Structures*. – 2023. – Vol. 282.
12. Напруження та деформації при зварюванні і паянні : підручник / Л. М. Лобанов, Г. В. Єрмолаєв, В. В. Квасницький [та ін.] ; за заг. ред. Л. М. Лобанова. – Миколаїв : НУК, 2016. – 248 с.
13. Проектування технологічних процесів зварювального виробництва : метод. вказівки до практ. занять для здобувачів вищ. освіти другого (магістер.) рівня спец. 131 «Прикладна механіка» за освіт.-проф. програмою «Технології та устаткування зварювання» / уклад. : С. В. Олексієнко, С. М. Ющенко. – Чернігів : НУ «Чернігівська політехніка», 2021. – 48 с.
14. Новомлинець, О. О. Проектування технологічних процесів зварювального виробництва : навч. посіб. / О. О. Новомлинець, С. В. Олексієнко, С. М. Ющенко. – Чернігів : НУ «Чернігівська політехніка», 2023. – 130 с.

References

1. Nilov, O.O. (2013). *Metalevi konstruktyi. Balky. Kolony : navchalnyi posibnyk dlya vyshchyykh navchsl'nykh zakladiv [Metal structures. Beams. Columns : textbook for higher education institution]*. Logos.
2. Bilyk, S.I., Shymanovskyi, O.V., Nilov, O.O. et al. (2021). *Metalevi konstruktyi: T. 2. Konstruktyi metalevykh kerkasiv promyslovykh budivel [Metal structures : Vol. 2. Structures of metal frameworks of industrial buildings]*. TOV «Drukarnia “Ruta”».
3. DBN V.2.6-198:2014. Zi zminoiu №1 (2014). *Stalevi konstruktsii. Normy proektuvannia [Steel structures. Design standarts]*.
4. Okerblom, N.O. (1964). *Konstruktivno-tekhnologicheskoe proektirovanie svarnykh konstruktsii [Constructive and technological designing of welded structures]*. Mashinostroenie.
5. Shelestenko, L.P. (1954). Vliyanie sobstvennykh ostatochnykh napryazhenii na obshchuiu ustoichivost szhatykh svarnykh H-obraznykh elementov [The influence of own residual stresses on the overall sustainability of compressed welded H-shaped elements]. *Zheleznodorozhnoie stroitelstvo – Railway construction*, (2), 22-24.
6. Kuznetsov, V. V. (Ed.). (1988). *Metallicheskie konstruktsii. T. 2. Stalnie konstruktsii zdaniy i sooruzhenii (Spravochnik proektirovshchika) [Metal structures. Vol. 2. Steel constructions of buildings and structures (The handbook for designer)]*. Izd-vo ASV.
7. Zheng, B., Shu, G., & Shen, X. (2015). Test and design of stainless steel welded I-columns, *Advanced Steel Construction*, Vol. 11(4), 427-440.
8. Szczerba, R., Gajewski, M. & Giżejowski, M. (2018). On modelling of the buckling resistance of welded I-section columns, *MATEC Web Conf.*, 219.
9. Bu, Yidu, & Gardner, Leroy (2019). Finite element modelling and design of welded stainless steel I-section columns, *Journal of Constructional Steel Research*, 152, 57-67.
10. Kollár, D., & Kövesdi, B. (2016). Experimental and numerical simulation of welded columns. *Conference: 41st International Conference ZAVARIVANJE – WELDING 2016, CWS2016*.
11. Yun, Xiang, Zhu, Yufei, Meng, Xin, & Gardner, Leroy. (2023). Welded steel I-section columns: Residual stresses, testing, simulation and design. *Engineering Structures*, 282.
12. Lobanov, L. M., Yermolaiev, G. V., Kvasnytskyi, V. V. et al. Ed. by Lobanov, L. M. (2016). *Napruzhennia ta deformatsii pry zvariuvanni i paianni [Stresses and strains during welding and soldering]*. NUK.
13. Oleksienko, S.V., & Yushchenko, S.M. (2021). *Proiektuvannia tekhnolohichnykh protsesiv zvariuvannoho vyrobnytstva: metodychni vказivky [Design of welding production processes: methodical instructions]*. NU “Chernihivska politekhnika”.

14. Novomlynets, O.O., Oleksienko, S.V., & Yushchenko, S.M. (2023). *Proiektuvannia tekhnolohichnykh protsesiv zvariuvalnogo vyrobnytstva: metodychni vkazivky [Design of welding production processes: methodical instructions]*. NU "Chernihivska politekhnika".

Отримано 21.12.2024

UDC [624.075.23:621.79]:004.94

**Serhii Oleksienko¹, Mykhailo Rudenko², Svitlana Yushchenko³,
Maksym Bolotov⁴, Mykola Korzachenko⁵**

¹PhD in Technical Sciences, Associate Professor
Associate Professor of Welding Technologies and Construction Department
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)
E-mail: sv.oleks@stu.cn.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-5475-4439>
ResearcherID: F-8197-2014. **SCOPUS Author ID:** 57190370561

²Senior Lecturer of Welding Technologies and Construction Department
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)
E-mail: m.rudenko@stu.cn.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-9542-7792>
ResearcherID: G-6235-2014. **SCOPUS Author ID:** 57190378153

³PhD in Technical Sciences, Associate Professor
Associate Professor of Welding Technologies and Construction Department
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)
E-mail: rasssveta@stu.cn.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-0863-9020>
ResearcherID: F-7741-2014. **SCOPUS Author ID:** 57190373626

⁴PhD in Technical Sciences, Associate Professor
Associate Professor of Welding Technologies and Construction Department
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)
E-mail: m.bolotov@stu.cn.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-0915-4132>
ResearcherID: AAJ-6633-2020. **SCOPUS Author ID:** 57190377278

⁵PhD in Technical Sciences, Associate Professor of Welding Technologies and Construction Department
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)
E-mail: korzachenko_87@stu.cn.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-5674-8662>
ResearcherID: F-5177-2016. **SCOPUS Author ID:** 57330883100

**CAE ANALYSIS OF EXPLOITATION OF I-BEAM COLUMN
WITH THE REGULATED FIELD OF RESIDUAL STRESSES
IN ITS CROSS-SECTION**

Columns are vertical elements that support the structures on them, perceive the loads and transfer them to the basement. Relatively long elements, the length of which is several times higher rather than its cross-section dimensions, lose their bearing capacity because of stability loss at the stresses that are significantly less than the yield strength of the steel itself. Critical stresses in such elements in each specific case are determined using the longitudinal bending coefficient.

The underestimated values of longitudinal bending coefficients are used while calculating the stability of welded elements of solid sections. Residual compressive welding stresses from the belt joints of welded I-beam H-section columns reduce their stability and load-bearing capacity if the residual stresses at the edges of the flanges exceed critical values. If the compressive stresses at the edges of the shelves are reduced by special technological or design means, so then the usual values of the longitudinal bending coefficient can be used in the calculation, which can be an effective means of reducing the material consumption of the product.

This paper establishes that the overall stability of compressed elements depends not so much on the magnitude of the welding compressive stresses as on how far from the axis to which the loss of stability is more likely the tensile stress zones are located.

Using computer modeling of the stress-strain state that occurs during the operation of welded I-beam columns, the effectiveness of the application of the welding rollers on the edges of the shelves was established. The latter provides for increasing the overall stability of the columns, which has been determined. The zones with tensile stresses are formed on the edges of the shelves after welding of the rollers, and their size will depend on the amount of direct energy during welding. The possibility of reducing the material consumption of columns has been established.

Keywords: welded column; solid cross-section; stability; residual stresses; material consumption.

Fig.: 9. **References:** 14.