

БУДІВЕЛЬНІ КОНСТРУКЦІЇ

УДК 624.072.002.2

**НЕСУЧА ЗДАТНІСТЬ СТИСНЕНИХ СКЛАДЕНИХ ЕЛЕМЕНТІВ
З ПРОКАТНИХ КУТИКІВ**

О. І. Голоднов, О. А. Кисіль

Обґрунтована необхідність регулювання залишкового напруженого стану в стиснутих складених елементах таврового перетину із прокатних кутиків. Викладені методичні підходи для визначення напружено-деформованого стану і несучої здатності таких елементів. Методика базується на припущеннях, що традиційно використовуються при вирішенні такого роду задач.

Обоснованная необходимость регулирования остаточного напряженного состояния в сжатых составных элементах таврового сечения из прокатных уголков. Изложены методические подходы для определения напряженно-деформированного состояния и несущей способности таких элементов. Методика базируется на предположениях, которые традиционно используются при решении такого рода задач.

Grounded necessity of adjusting of the remaining tense state for the compressed component elements of t-shaped section from rental corners. Methodical approaches are expounded for determination of the tense-deformed state and bearing strength of such elements. A method is based on suppositions which are traditionally used for a decision of such tasks.

Несуча здатність стиснених елементів залежить від наявності та розподілу у них залишкових напружень. Поява внутрішніх напружень виникає після прокату або виготовлення конструкцій з використанням зварювання як основного виду з'єднань металоконструкцій, або іншого нерівномірного нагрівання.

Вступ. Постановка проблеми

Стержні з прокатних рівнополічних кутиків знайшли широке використання як стиснуті елементи різних конструкцій. В ході виготовлення або підсилення з використанням зварювання або іншого високотемпературного локального нагрівання (вище критичної точки A_{c3}) виникає складний напружено-деформований стан (НДС). Цей стан неоднозначно впливає на поведінку конструкції під навантаженням. Як показали дослідження [1–4 та ін.], несуча здатність стиснутих елементів двотаврового та таврового з парних кутиків перерізу може як знижуватись, так і збільшуватись в залежності від виду залишкового напруженого стану (ЗНС). В нормативному документі [5] вплив напружень стиску на крайках полицок двотаврових елементів враховується введенням зменшених коефіцієнтів поздовжнього вигину. Для елементів таврового перерізу з парних кутиків пропозицій щодо врахування ЗНС не наведено.

Аналіз останніх досягнень і публікацій

Розрахунок, конструювання та виготовлення нових і підсилення існуючих конструкцій виконується з використанням зварювання. Це призводить до нерівномірного нагрівання окремих ділянок металоконструкцій і появи ЗНС. Оскільки напруження в окремих елементах конструкцій можуть бути такими, що дорівнюють межі текучості сталі, сама конструкція може досягти граничного стану при значно менших навантаженнях, ніж за відсутності ЗНС. Зменшити вплив ЗНС можна за рахунок регулювання шляхом нагрівання окремих ділянок конструкцій або наплавлення зварних швів.

Аналіз проведених досліджень стиснутих елементів таврового перерізу зі спарених кутиків показав, що вичерпання несучої здатності відбувалась внаслідок втрати місцевої стійкості полицок в місцях приварювання з'єднувальної пластини. Це пояснюється наявністю залишкових стискальних напружень на крайках полицок і раннім переходом металу в пластичний стан.

Мета роботи

Розроблення методики визначення несучої здатності стиснених елементів із прокатних кутиків з урахуванням впливу ЗНС.

Основна частина

Зв'язок між внутрішніми зусиллями і зовнішніми силами в розрахунковому перерізі (рис. 1) встановлений при розгляді умов рівноваги. З першого ($\sum X = 0$) і другого ($\sum M_0 = 0$) рівнянь отримані вирази для визначення зовнішніх поздовжніх зусиль (P_1 і P_2):

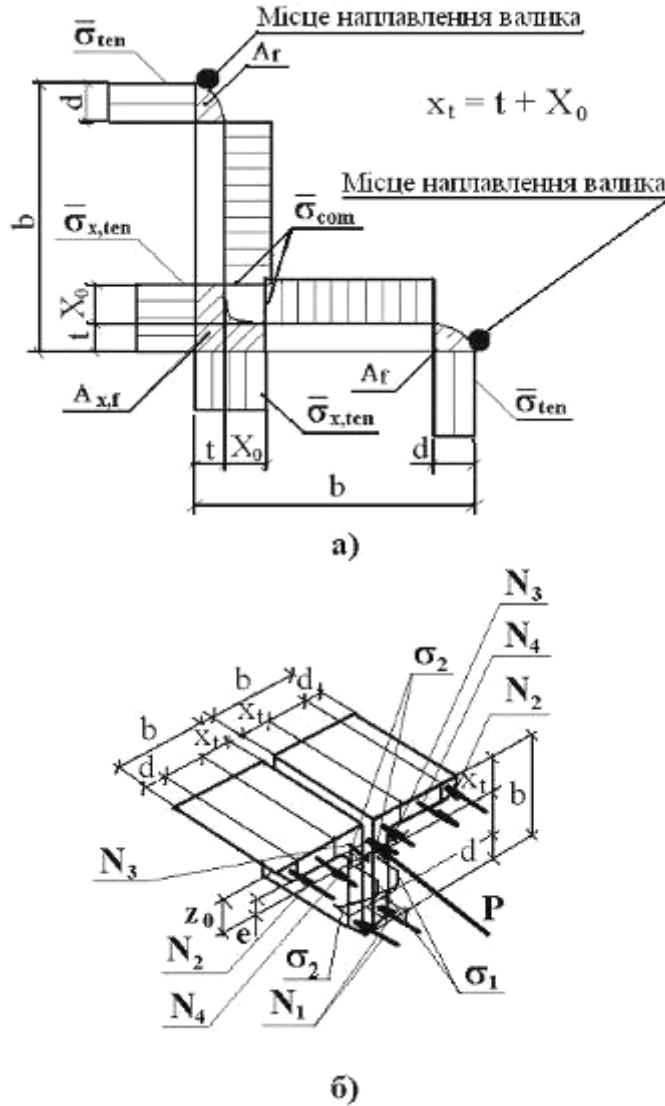


Рис. 1. Схема зусиль, що діють в перерізі складеного стиснутого таврового елемента:
 а) схема розподілу залишкових напружень;
 б) схема діючих зусиль

$$P_1 = 2 \cdot (N_4 - N_1 - N_2 - N_3) + (\sigma_1 - \sigma_2) \cdot t \cdot X + 2 \cdot \sigma_2 \cdot X \cdot t + 2 \cdot \sigma_1 \cdot \xi \cdot t; \quad (1)$$

$$P_2 = \{ -(\sigma_1 - \sigma_2) \cdot t \cdot X \cdot [X/3 + \xi + X_t - Z_0] + 2 \cdot \sigma_2 \cdot t \cdot X \cdot [(b_{com} + \xi)/2 + X_t - Z_0] + 2 \cdot (N_4 - N_2 - N_3) \cdot (Z_0 - t/2) + 2 \cdot N_1 \cdot (b - Z_0 - d/2) - 2 \cdot \sigma_1 \cdot \xi \cdot t \cdot (\xi/2 + X_t - Z_0) \} / (f + e), \quad (2)$$

де f – прогин від зовнішнього навантаження;
 N_1, N_2 – усереднені зусилля на крайках відповідно менш і більш стиснених полицок;
 N_3 – усереднене зусилля в полиці в зоні обушка;
 N_4 – усереднене зусилля в більш стисненій полиці;
 σ_1, σ_2 – відповідно більше і менше стискальне зусилля у вертикальній полиці;
 e – початковий ексцентриситет прикладеного навантаження.

Кривизна K і прогин f визначаються за такими формулами:

$$f = \frac{(L^2 \cdot K)}{\pi^2}; \quad (3)$$

$$K = \frac{1}{\rho}, \quad (4)$$

де L – приведена довжина;
 ρ – радіус кривизни
 K – кривизна «другого розрахункового перетину».

Зусилля $N_1, N_2, N_3, N_4, \sigma_1, \sigma_2$ розраховуються по наступних формулах (рис. 1):

$$\varepsilon_{11} = \varepsilon_1 + \frac{\bar{\sigma}_{\text{com}}}{E}; \quad (5)$$

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_{11} - K \cdot (b - t/2 - d); \quad (6)$$

$$N_1 = [(\varepsilon_2 - \frac{d \cdot K}{2}) \cdot E - \bar{\sigma}_{\text{ten}}] \cdot d \cdot t; \quad (7)$$

якщо $|N_1| > R_y \cdot d \cdot t$, $N_1 = \pm R_y \cdot d \cdot t$ (знак «плюс» приймається, коли $N_1 > 0$);

$$N_2 = (\varepsilon_{11} \cdot E - \bar{\sigma}_{\text{ten}}) \cdot d \cdot t; \quad (8)$$

якщо $N_2 > R_y \cdot d \cdot t$, $N_2 = R_y \cdot d \cdot t$;

$$N_3 = (\varepsilon_{11} \cdot E - \bar{\sigma}_{x,\text{ten}}) \cdot A_{x,f}; \quad (9)$$

якщо $N_3 > R_y \cdot A_{x,f}$, $N_3 = R_y \cdot A_{x,f}$;

$$N_4 = \varepsilon_{11} \cdot E \cdot b_{\text{com}} \cdot t; \quad (10)$$

якщо $N_4 > R_y \cdot b_{\text{com}} \cdot t$, $N_3 = R_y \cdot b_{\text{com}} \cdot t$;

$$\sigma_1 = [\varepsilon_{11} - (\frac{t}{2} + X_0) \cdot \kappa] \cdot E; \quad (11)$$

якщо $\sigma_1 > R_y$; $\sigma_1 = R_y$;

$$\sigma_2 = \varepsilon_2 \cdot E; \quad (12)$$

якщо $|\sigma_2| > R_y$; $\sigma_2 = \pm R_y$;

$$X_1 = \frac{\varepsilon}{\kappa} [\varepsilon = \varepsilon_{11} - (\frac{t}{2} + X_0) \cdot \kappa, \text{ якщо } \sigma_1 \leq R_y; \varepsilon = \frac{R_y}{E}, \text{ якщо } \sigma_1 = R_y]; \quad (13)$$

$$X_2 = \frac{\varepsilon}{\kappa} (\varepsilon = \varepsilon_2, \text{ якщо } |\sigma_2| \leq R_y; \varepsilon = \frac{\sigma_2}{E}, \text{ якщо } \sigma_2 = \pm R_y); \quad (14)$$

$$\xi = X_1 \cdot \left\{ \frac{[\varepsilon_{11} - (\frac{t}{2} + X_0) \cdot \kappa] \cdot E}{R_y} - 1 \right\} \quad (\text{якщо } \xi < 0, \xi = 0); \quad (15)$$

$$b_{\text{com}} = b - d - X_t; \quad (16)$$

$$X = X_1 - X_2. \quad (17)$$

Розв'язування задачі визначення НДС в явному вигляді неможливе через наявність більшої кількості невідомих, ніж рівнянь рівноваги.

Завдання Розв'язується в такій послідовності.

1. Задаються початковими даними: геометричними розмірами перерізу елемента (b , t), міцнісними і деформативними характеристиками матеріалу (R_y , E), довжиною елемента і початковим ексцентриситетом (L , e).

2. Визначають ЗНС перерізів на ділянках з наплавленням валиків по крайках полицок або прогрівання крайок за окремо розробленою методикою.

3. Довжину елемента L розбивають на $n = 2 \cdot k$ ділянок (де k – будь-яке ціле число більше 3).

4. Для найбільш навантаженого j -го перерізу, (як правило, це переріз, розташований поблизу місця закінчення наплавлення або прогрівання) приймають величини радіусу кривизни $\rho = \rho_0$ і кроку по радіусу кривизни $\Delta\rho$.

5. Визначають значення величин кривизни в перерізах елемента, при цьому для перерізів $i = 1$ та $i = n + 1$ на першій ітерації приймають $\kappa_1 = \kappa_{n+1} = 0$ для j -го перерізу – $\kappa_j = 1/\rho$, а для решти перерізів - що змінюються після лінійного закону.

6. Знаходять прогини і кути повороту елемента в усіх точках за формулами:

$$y_i = y_1 + \varphi_1 \cdot L \cdot \frac{i-1}{n} + \frac{L^2}{6 \cdot n^2} \cdot [(3 \cdot i - 4) \cdot \kappa_1 + 6 \cdot \sum_{j=2}^{i-1} (i-j) \cdot \kappa_j + \kappa_i]; \quad (18)$$

$$\varphi_i = \varphi_1 + \frac{L}{2 \cdot n} \cdot (\kappa_1 + 2 \cdot \sum_{j=2}^{i-1} \kappa_j + \kappa_i), \quad (19)$$

7. Визначають величину поздовжньої сили P_q (де q – номер ітерації розрахунку) у найбільш завантаженому перерізі при заданій величині кривизни κ_j .

8. По відомій величині поздовжньої сили P_q визначають НДС і величини кривизни у всіх перерізах по довжині елемента (на ділянках з наплавленням і без наплавлення з прогріванням та без прогрівання). Розподіл величин кривизни показаний на рис. 2.

9. Виконують розрахунки по п.п. 6-8 алгоритму, поступово уточнюючи кривизни перерізів на кожній ітерації. Розрахунок вважається закінченим, якщо значення подовжніх сил на суміжних етапах розрахунку

$$\left| \frac{P_{k+1}^q - P_{k+1}^{q-1}}{P_{k+1}^q} \right| < \eta. \quad (20)$$

10. Змінюють величину радіуса кривизни для j -го перерізу $\rho^{m+1} = \rho^m - \Delta\rho$ і продовжують розрахунок за п.п. 6-9. Величинами кривизни в усіх точках задаються за наслідками розрахунку на попередній ітерації, тобто $\kappa_i^{m+1} = \kappa_i^m$ ($i = 1, \dots, j-1, j+1, \dots, n+1$) з подальшим їх уточненням на кожній ітерації за п. 8.

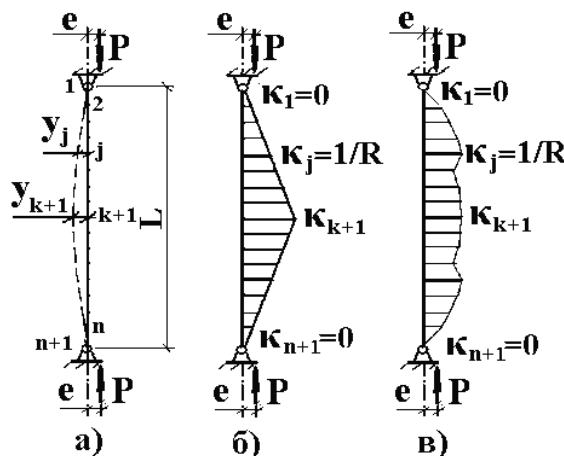


Рис. 2. Схеми деформації і зміни величин кривизни перерізів по довжині стиснутого елемента:

- а) схема додавання зусиль і вигину;
- б) умовна схема розподілу величин кривизни;
- в) фактична схема розподілу величин кривизни

11. Порівнюють величини поздовжніх сил, отримані на суміжних ($m, m-1$) етапах розрахунку

$$P^m - P^{m-1} > 0: \quad (21)$$

- якщо умова задовольняється, продовжують розрахунок за п. 10;
- якщо умова не задовольняється, виконують розрахунок за п. 12.

12. Повертаються на попереднє значення радіуса кривизни $\rho^m = \rho^{m+1} + \Delta\rho$ змінюють крок за радіусом кривизни $\Delta\rho = 0,5 \cdot \Delta\rho$ і продовжують розрахунок по п. 10.

13. Досягши максимального значення R_{\max}^m при заданій точності розрахунок вважається закінченим. Подальше зменшення радіуса кривизни і, відповідно, розрахунки за п.п. 6-12 дозволять отримати точки кривої стану «P-f» в закритичній області.

За результатами виконаних розрахунків будують графіки функцій «P-f» елемента.

Висновки

- Залишкові напруження виникають в елементах металевих конструкцій під час виготовлення з використанням локального нагрівання, в т.ч. і з використанням зварювання. Оскільки величини цих напружень можуть бути сумірними з межею текучості сталі, їх наявність необхідно враховувати при розрахунках конструкцій.
- Розроблена методика визначення НДС і несучої здатності стиснених елементів таврового перетину з парних кутиків. Методика базується на відомих припущеннях, які зазвичай застосовуються при вирішенні такого роду задач. ЗНС, що виникає в таких перетинах при виготовленні, розраховується за спеціально розробленими методиками.

Використана література

1. Голоднов А. И. Регулирование остаточных напряжений в сварных двутавровых колоннах и балках : Монографія. / А. И. Голоднов – К.: Изд-во «Сталь», 2008. – 150 с.
2. Голоднов А. И. О необходимости учета остаточных напряжений при проектировании металлических конструкций / А. И. Голоднов // Метал. конструкции: взгляд в прошлое и будущее: Сб. докл. VIII Укр. науч.-техн. конф. – Ч. 1. – К.: Изд-во «Сталь», 2004. – С. 314-323.
3. Голоднов А. И. Остаточное напряженное состояние и его влияние на устойчивость сварных двутавровых колонн / А. И. Голоднов // Дороги і мости: Зб. наук. праць. В 2-х томах: Т. 1. – К.: ДерждорНДІ, 2007. – Вип. 7. – С. 110–118.
4. Козлов С. В. Экспериментальные исследования сжатых элементов из уголков после наплавки сварных швов / С. В. Козлов, А. П. Иванов, А. И. Голоднов // Метал. конструкции: взгляд в прошлое и будущее: Сб. докл. VIII Укр. науч.-техн. конф. – Ч. 1. – К.: Изд-во «Сталь», 2004. – С. 554-560.
5. ДБН В.2.3-14:2006. Споруди транспорту. Мости та труби. Правила проектування / Мінбуд України. – К.: Мінбуд України, 2006. – 359 с.

Голоднов Олександр Іванович – д.т.н., с.н.с., вчений секретар ВАТ Укрндіпроектстальконструкція ім. В. М. Шимановського.

Кисіль Олександр Анатолійович – аспірант, асистент кафедри промислового та цивільного будівництва Вінницького національного технічного університету.