



Прохоренко О.В.

Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут". Україна, Київ

## ЗАЛИШКОВИЙ ПРОГИН ХРЕБТОВОЇ БАЛКИ ВАГОНА ВІД ЗВАРЮВАННЯ ПОЗДОВЖНІХ ШВІВ

### Анотація

*Запропоновано алгоритм інженерного розрахунку на основі методу складних перерізів [1, 2] залишкового прогину поздовжньої осі хребтової балки вагону при зварюванні поздовжніх швів.*

### Abstract

*The engineering calculation algorithm of residual flexure long axis of carriage center sill beam based on method of complex section [1, 2] is proposed.*

### Вступ

Зварні балки широко використовуються у різних галузях техніки та будівництві як окремі зварні конструкції або у вигляді зварних вузлів інших конструкцій [3–8]. Як приклад, можна назвати хребтові балки вагонів, балки мостових кранів, прольотів залізничних та автодорожніх мостів, підземних переходів, балки міжповерхових перекриттів будівель, елементи набору в суднобудуванні тощо.

Поперечний переріз зварних балок може бути різноманітним і мати дві чи одну вісь симетрії або бути зовсім несиметричним. Здебільшого зварні балки виготовляють шляхом зварювання поздовжніми швами окремих елементів прямокутного перерізу у вигляді вертикальних стінок та горизонтальних полиць з використанням у багатьох випадках в якості таких елементів також і прокатного профілю (двотавр, тавр, швелер, зетовий профіль, кутник тощо).

Суттєвим недоліком при виготовленні зварних балок є утворення залишкового прогину осі балок від поздовжньої усадки металу зони пластичних деформацій скорочення при зварюванні поздовжніх швів, а також і від поперечної усадки поперечних зварних швів [9–15], якщо вони є. В даній роботі розглядається питання про визначення залишкового прогину поздовжньої осі хребтової балки лише від зварювання поздовжніх швів. Прогин поздовжньої осі зварних балок, як і багато інших видів залишкових зварювальних деформацій при виготовленні численних зварних конструкцій, є важливою науково-практичною проблемою для зварних конструкцій, яка на сьогодні ще остаточно не вирішена. Поступове розв'язання згаданої вище проблеми відбувається за двома основними напрямками: перший — розробка мето-

дів розрахунку зварювальних деформацій для тих чи інших зварних конструкцій, другий — розробка методів їх зменшення чи попередження. Дані питання досліджувались в роботах [16–21]. Зокрема, розроблено розрахунковий метод складних перерізів (МСП) для визначення функції усадки при зварюванні поздовжніх швів в одновимірних конструкціях за схемами потужного швидкодіючого лінійного джерела тепла [1] та рухомого лінійного джерела тепла [2]. Застосування МСП в роботах останніх років [16–21] забезпечило суттєве підвищення точності прогнозування залишкового прогину одновимірних зварних конструкцій порівняно з раніше розробленими розрахунковими методами [6–14].

До однієї з невирішених раніше частин загальної проблеми прогнозування шляхом розрахунку на основі МСП залишкового прогину одновимірних конструкцій при зварюванні поздовжніх швів відноситься питання адаптації МСП до конкретної геометрії поперечного перерізу одновимірної зварної конструкції, особливо коли він є несиметричним відносно однієї або двох головних осей координат. Справа полягає в тому, щоб знайти обґрунтовані можливості спрощеного визначення функції поздовжньої усадки металу зони пластичних деформацій скорочення з обох боків зварних швів, що є важливим фактором для складних поперечних перерізів, оскільки таке спрощення суттєво зменшує витрати часу на розрахунки. Час зменшується з причини прийняття спрощеного припущення про те, що максимальна ширина зони пластичних деформацій скорочення в усіх конструктивних елементах, що з'єднуються в одне ціле зварним швом, досягається на стадії нагрівання в одному і тому ж поперечному перерізі балки. Це дає можливість визначати пластичну деформацію скорочення в зоні пластичності з обох боків шва як різницю між повною деформацією поперечного перерізу з максимальною шириною зон пластичних деформацій і сумою температурної і пружної деформацій уздовж складного перерізу.

### Постановка задачі

Метою даної роботи є розробка алгоритму розрахунку за методом складних перерізів [1, 2] залишкового прогину поздовжньої осі хребтової балки вагону, зумовленого зварюванням за штатною технологією поздовжніх швів балки.

**Основна частина**

Типова хребтова балка вагона має довжину  $L = 12,7$  м і поперечний переріз, показаний на рис. 1. Використовуються два зетові профілі, які виготовляються відповідно до [22] та один двотавровий профіль № 19, який виготовляється відповідно до [23]. Обидва документа входять як складові частини до [24]. Координата по вертикалі центра ваги поперечного перерізу балки визначається за відомими [25] залежностями через статичні моменти двох Z-профілів та двотавра і площу поперечного перерізу балки.

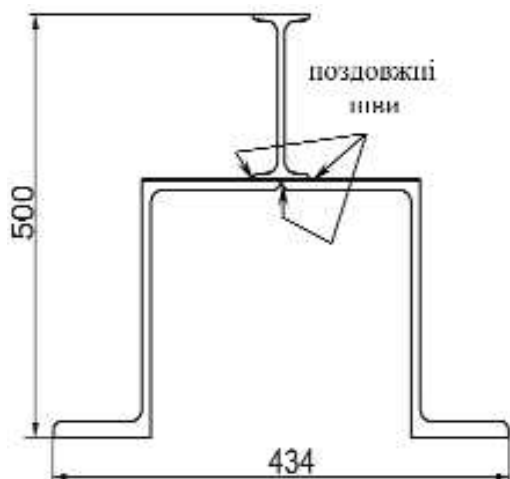


Рис. 1. Поперечний переріз хребтової балки вагона

Технологічна схема виготовлення балки передбачає її складання з названих вище конструктивних елементів (двох Z-профілів та двотавра) "на прихватках" з використанням відповідної оснастки і подальшим першочерговим одночасним механізованим зварюванням двох зовнішніх куткових швів (приварювання двотавра до Z-профілів) та наступним механізованим зварюванням поздовжнім внутрішнім швом двох Z-профілів між собою.

Розглядається технологічний варіант виготовлення балки, який не передбачає використання спеціалізованої оснастки для створення попереднього (перед зварюванням) "активного" навантаження балки, яке б могло за відповідним механізмом розвитку термодформаційних процесів під час зварювання і на стадії охолодження цілеспрямовано вплинути на величину залишкового прогину балки.

Для використання методу складних перерізів (скорочено МСП) [1], за яким необхідно на стадії нагрівання і в залишковому стані скласти визначальні системи рівнянь з метою визначення невідомих, спочатку потрібно спростити геометрію поперечного перерізу балки шляхом заміни реальної геометричної форми перерізу полиць і

стінок Z-профілів та двотавра на відповідні елементарні прямокутники, як показано на рис. 2. В системі центральних осей  $XOY$  перерізу балки визначаємо координати  $y_1 \dots y_4$  центрів горизонтальних полиць. Розміри відповідних полицям елементарних прямокутників визначаються за реальними геометричними розмірами Z-профілів та двотавра, вказаними у держстандарті на прокатний профіль. Надалі стоншенням товщини стінок і полиць конструктивних елементів перерізу балки переходимо до штрихової середньої лінії її контуру (рис. 2).

Погонна енергія зварювання  $q_n$  визначається за відомою формулою  $q_n = IU\eta$ , де  $I$  – струм зварювання,  $U$  – напруга на дузі,  $\eta$  – коефіцієнт корисної дії дуги. Температуру в точках складного розрахункового перерізу будемо визначати відповідно до схеми потужного швидкодіючого лінійного джерела нагрівання, яким є зварювальна дуга, за формулою Рикаліна М.М. [26]

$$T(y, t) = \frac{q_n}{\delta_n \sqrt{\pi \lambda c \rho t}} \exp\left(-\frac{y^2}{4 \lambda c t} - \frac{h y}{\lambda c t}\right)$$

де  $q_n = IU\eta/v$  – погонна енергія зварювання;  $v$  – швидкість зварювання;  $I$  – струм зварювання;  $U$  – напруга на дузі;  $\eta$  – ефективний коефіцієнт

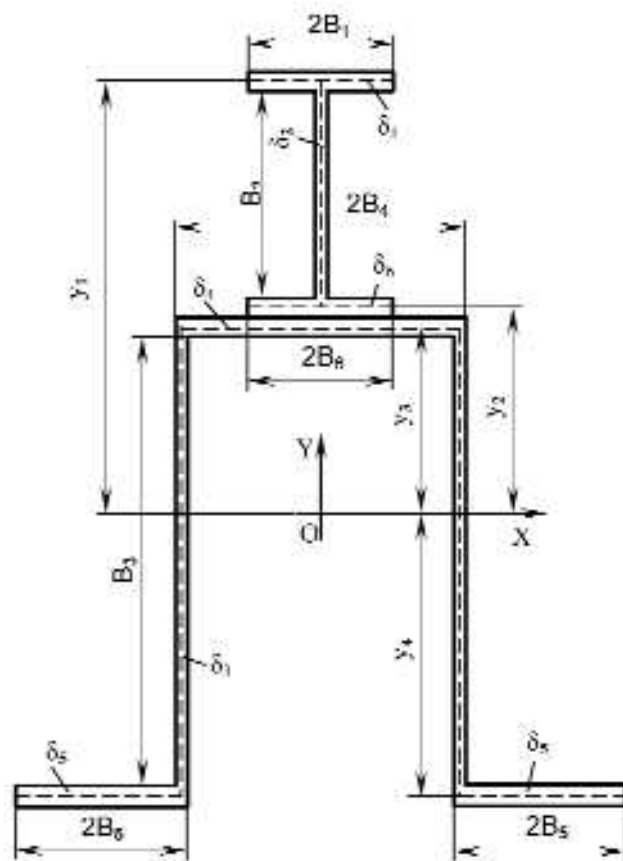


Рис. 2. Поперечний переріз хребтової балки вагона в системі центральних осей координат  $XOY$

корисної дії дуги;  $\delta_0 = \Sigma\delta$  — приведена товщина зварюваних швом конструктивних елементів перерізу балки, у які розповсюджується тепло дуги у поперечних напрямках від осі шва;  $\lambda$  — коефіцієнт теплопровідності;  $a$  — коефіцієнт температуропровідності;  $c_p$  — об'ємна теплоємність металу;  $b = 2\alpha_T/(c_p\delta)$  — коефіцієнт температуровіддачі;  $\alpha_T$  — коефіцієнт повної поверхневої тепловіддачі;  $t$  — час, який минув з моменту перетину зварювальною дугою поперечного перерізу, в якому знаходиться точка на відстані  $y$  від осі шва.

Попередньо приймемо деякі припущення з метою спрощення систем рівнянь. Зокрема будемо вважати, що тепло не розповсюджується від одного джерела нагрівання до іншого при приварюванні двотавра до Z-профілів через місце контакту Z-профілів між собою під нижньою полицею двотавра, оскільки внутрішній шов зварюється у другу чергу і тому це місце фізично не пропускає теплового потоку. В той же час температуру у полиці двотавра будемо визначати як суму температур від двох джерел тепла (одночасне заварювання двох швів при приварюванні нижньої полиці двотавра до Z-профілів), оскільки ширина полиці двотавра невелика (всього лише 75 мм) і тому такий підхід є обґрунтованим. Крім того, з причини значної жорсткості балки на поперечний вигин можна припускати (з подальшою перевіркою припущення), що максимальне значення ширини зони пластичних деформацій скорочення в обидва боки від шва у верхніх полицях Z-профілів і в один бік від шва у нижній полиці двотавра настає майже в одному поперечному перерізі балки і є приблизно однаковою. Відстань від дуги до даного поперечного перерізу визначається значенням часу  $t$ , що входить до розв'язку системи рівнянь для стадії нагрівання.

Безвідносно до конструктивного елемента балки уведемо такі позначення для деформацій:  $\varepsilon_{fh}$ ,  $\varepsilon_{eh}$ ,  $\varepsilon_{ph}$  — відповідно повна, пружна і пластична деформація на стадії нагрівання (літера  $h$ );  $\varepsilon_{fr}$ ,  $\varepsilon_{er}$ ,  $\varepsilon_{pr}$  — відповідно повна, пружна і пластична деформація в залишковому стані (літера  $r$ ); температурну деформацію позначатимемо  $\varepsilon\theta$ ;  $\varepsilon_{fh1}$ ,  $\varepsilon_{\theta1}$ ,  $\varepsilon_{eh1}$ ,  $\varepsilon_{ph1}$ ,  $\varepsilon_{fr1}$ ,  $\varepsilon_{er1}$ ,  $\varepsilon_{ph1}$  — при приварюванні двотавра до Z-профілів (цифра 1 позначає першу чергу заварювання швів);  $\varepsilon_{fh2}$ ,  $\varepsilon_{\theta2}$ ,  $\varepsilon_{eh2}$ ,  $\varepsilon_{ph2}$ ,  $\varepsilon_{fr2}$ ,  $\varepsilon_{er2}$ ,  $\varepsilon_{ph2}$  — при зварюванні Z-профілів між собою (цифра 2 позначає другу чергу заварювання швів). Для позначення тієї чи іншої деформації у конкретному конструктивному елементі балки, поданому у вигляді відповідного елементарного прямокутника, будемо додавати після цифри позначення довжини даного прямокутника, наприклад,  $\varepsilon_{eh1B3}$ ,  $\varepsilon_{\theta2B6}$ ,  $\varepsilon_{pr1B4}$ ,  $\varepsilon_{fr2B5}$  тощо. Для позначення залежності деформації від координат системи  $XOY$  будемо до згаданих вище

позначень додавати в дужках відповідні координати, наприклад,  $\varepsilon_{eh1}(x, y)$ ,  $\varepsilon_{er1}(x, y)$ ,  $\varepsilon_{eh2}(x, y)$ ,  $\varepsilon_{er2}(x, y)$ ,  $\varepsilon_{fh1B3}(y)$ ,  $\varepsilon_{pr2B4}(x)$  тощо.

Стадія нагрівання при одночасному приварюванні двома швами двотавра до Z-профілів. За методом складних перерізів [1] у загальному вигляді систему визначальних рівнянь можна подати у вигляді:

$$\left. \begin{aligned} \int_F \varepsilon_{eh1}(x, y) dF &= 0; \\ \int_F \varepsilon_{eh1}(x, y) y dF &= 0; \\ \varepsilon_{eh1B4}(x = B6 + bn4) + \varepsilon_x &= 0; \\ \varepsilon_{eh1B6}(x = B6 - bn6) - \varepsilon_x &= 0; \\ t1 - \frac{1}{\omega} (\sqrt{a^2 + \omega \cdot bn6^2} - a) &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

де  $bn4$ ,  $bn6$  — ширина зони пластичних деформацій скорочення з кожного боку шва відповідно у верхніх полицях Z-профілів та нижній полиці двотавра;  $\varepsilon_x$  — пружна деформація на рівні межі текучості металу;  $t1$  — час, що минув з моменту перетину дугою поперечного перерізу балки, в якому розміщені зони  $bn4$  та  $bn6$ ; параметр  $\omega = 4ab$ .

Останнє рівняння в (1) можна записати із заміною  $bn4$  на  $bn6$ . В такий спосіб при розв'язуванні задачі перевіряється попередньо прийняте з метою спрощення розрахунків припущення про незначну відстань між двома поперечними перерізами балки, в кожному з яких досягається значення  $bn4$  або  $bn6$ .

При алгебризації системи (1) перед її розв'язуванням у обраному обчислювальному середовищі (наприклад, MathCAD) повну деформацію всього поперечного перерізу балки, в якому ширина зони пластичних деформацій скорочення досягає максимальних значень ( $bn4$  та  $bn6$ ), відповідно до гіпотези плоских перерізів та з огляду на симетричність перерізу балки відносно осі  $y$  треба подавати як функцію координати  $y$ , тобто у вигляді  $\varepsilon_{fh1}(y) = g \cdot y + d$ . Параметри  $g$  та  $d$  входять до числа невідомих системи (1). Тоді для елементарних прямокутників перерізу балки 1, 2, ..., 6 відповідно можна записати  $\varepsilon_{fh1B1} = g \cdot y1 + d$ ,  $\varepsilon_{fh1B2}(y) = g \cdot y + d$ ,  $\varepsilon_{fh1B3}(y) = g \cdot y + d$ ,  $\varepsilon_{fh1B4} = g \cdot y3 + d$ ,  $\varepsilon_{fh1B5} = g \cdot y4 + d$ ,  $\varepsilon_{fh1B6} = g \cdot y2 + d$ .

Пружну деформацію на стадії нагрівання для точок за межами пластичної зони необхідно визначати за загальною залежністю

$$\varepsilon_{eh} = \varepsilon_{fh} - \varepsilon\theta.$$

Для точок в межах пластичної зони з температурою менше  $500^\circ\text{C}$   $\varepsilon_{eh} = \varepsilon_s$ , для точок з температурою  $500...600^\circ\text{C}$   $\varepsilon_{eh} = \varepsilon_s(T)$  відповідно до схематизованої залежності  $\varepsilon_s(T)$  [8], для точок з температурою більше  $600^\circ\text{C}$   $\varepsilon_{eh} = 0$ .

Зважаючи на порівняно невелику погонну енергію зварювання балки за штатною технологією попередньо прийємо припущення з послідуною перевіркою після розрахунків, що тепловий потік від одночасно діючих двох джерел тепла при приварюванні двотавра до Z-профілів не розповсюджується у стінки Z-профілів і стінку двотавра.

Температурну деформацію у точках складних перерізів верхніх полиць Z-профілів  $\varepsilon\theta 1B4(x)$  і нижньої полиці двотавра  $\varepsilon\theta 1B6(x)$ , обмежену значенням  $\alpha 600^\circ\text{C}$  в межах зони знеміцнення металу з причини високих (понад  $600^\circ\text{C}$ ) в околі зварних швів відповідно до [6] можна подати у вигляді залежностей:

$$\varepsilon\theta 1B4(x) = \begin{cases} F1(q_n) \cdot L1(x), & B4 \leq x \leq (B1 + bn4); \\ F(q_n) \cdot LI\Gamma(x), & -(B1 - bn4) < x < -(B1 + s14); \\ \alpha 600, & (B1 + s14) \leq x \leq (B1 - s14); \\ F(q_n) \cdot LI\Gamma(x), & -(B1 - s14) < x < -(B1 - bn4); \\ F1(q_n) \cdot L1(x), & (B1 - bn4) \leq x \leq 0; \\ F1(q_n) \cdot RI\Gamma(x), & 0 < x < B1 - bn4; \\ F(q_n) \cdot RII(x), & (B1 - bn4) \leq x \leq B1 - s14; \\ \alpha 600, & B1 - s14 < x < B1 + s14; \\ F(q_n) \cdot RII(x), & B1 + s14 \leq x \leq B1 + bn4; \\ F1(q_n) \cdot RI(x), & B1 + bn4 < x < B4; \end{cases} \quad (2)$$

$$\varepsilon\theta 1B6(x) = \begin{cases} \alpha 600, & B1 \leq x \leq (B1 + s16); \\ F(q_n) \cdot LI(x), & -(B1 - s16) < x < -(B1 - bn6); \\ F1(q_n) \cdot [LI(x) + RI(x)], & -(B1 - bn6) \leq x \leq B1 - bn6; \\ F(q_n) \cdot RII(x), & B1 - bn6 \leq x \leq B1 + s16; \\ \alpha 600, & B1 + s16 \leq x \leq B1; \end{cases} \quad (3)$$

де

$$F(q_n) = \frac{\alpha q_n \sqrt{\omega}}{\delta_n \sqrt{\pi \lambda c_p}}; \quad F1(q_n) = \frac{\alpha q_n \sqrt{\omega}}{\delta_n \sqrt{\pi \lambda c_p} \cdot t1}$$

$$\omega = 4ab; \quad t1 = \frac{1}{\omega} \left( \sqrt{a^2 + \omega \cdot bn6^2} - a \right);$$

$$L1(x) = \exp \left[ \frac{(x + B1)^2}{4a \cdot t1} - b \cdot t1 \right];$$

$$RI(x) = \exp \left[ \frac{(x - B1)^2}{4a \cdot t1} - b \cdot t1 \right];$$

$$LI\Gamma(x) = \frac{\exp \left[ \frac{1}{2} \frac{2b(x - B1)^2}{\sqrt{a^2 + \omega(x - B1)^2} - a} \right]}{\left[ \sqrt{a^2 + \omega(x - B1)^2} - a \right]^2};$$

$$RII(x) = \frac{\exp \left[ \frac{1}{2} \frac{2b(x - B1)^2}{\sqrt{a^2 + \omega(x - B1)^2} + a} \right]}{\left[ \sqrt{a^2 + \omega(x - B1)^2} + a \right]^2}.$$

Як приклад, наведемо результати розв'язування задачі для випадку значення погонної енергії зварювання при приварюванні двотавра  $q_n = 1 \times 10^4$  Дж/см ( $I = 200$  А,  $U = 200$  В,  $\eta = 0,6$ ,  $v = 0,3$  см/с) та значення деформації матеріалу балки на рівні межі текучості  $\varepsilon_s = 1,2 \cdot 10^{-3}$ . Розраховані значення невідомих системи (1):  $g = 9,68 \times 10^{-6}$ ,  $d = 1,694 \times 10^{-4}$ ,  $bn4 = 2,013$  см,  $bn6 = 2,066$  см,  $t1 = 23,516$  с.

Згідно з МСП [1] залежності для пружної і пластичної деформації у складних перерізах нижньої полиці двотавра ( $\varepsilon\theta 1B6(x)$ ,  $\varepsilon eh1B6(x)$ ,  $\varepsilon ph1B6(x)$ ) і верхніх полиць Z-профілів ( $\varepsilon\theta 1B4(x)$ ,  $\varepsilon eh1B4(x)$ ,  $\varepsilon ph1B4(x)$ ) мають вигляд:

$$\varepsilon eh1B6(x) = \begin{cases} [0, -B1 \leq x \leq -(B1 - s16); \\ -\varepsilon_s \cdot \frac{x - B1 - s16}{s26 - s16}, & -(B1 - s16) \leq x \leq -(B1 - s26); \\ -\varepsilon_s, & -(B1 - s26) \leq x \leq -(B1 - bn6); \\ \varepsilon_s \cdot \frac{x - B1 + s16}{s26 - s16}, & B1 - s26 \leq x \leq B1 - s16; \\ [0, B1 - s16 \leq x \leq B1; \end{cases} \quad (4)$$



$$\varepsilon_{h1B4}(x) = \begin{cases} \varepsilon_{h1B4} - F1(q_n) \cdot L1(x), & -B4 \leq x \leq -(B1 + bn4); \\ -\varepsilon_s, & -(B1 + bn4) \leq x \leq -(B1 + s14); \\ \varepsilon_s \cdot \frac{x + B1 + s14}{s24 - s14}, & -(B1 + s24) \leq x \leq -(B1 + s14); \\ 0, & -(B1 + s14) \leq x \leq -(B1 - s14); \\ -\varepsilon_s \cdot \frac{x + B1 - s14}{s24 - s14}, & -(B1 - s14) \leq x \leq -(B1 - s24); \\ -\varepsilon_s, & -(B1 - s24) \leq x \leq -(B1 - bn4); \\ \varepsilon_{h1B4} - F1(q_n) \cdot L1(x), & -(B1 - bn4) \leq x \leq 0; \\ \varepsilon_{h1B4} - F1(q_n) \cdot R1(x), & 0 \leq x \leq B1 - bn4; \\ -\varepsilon_s, & B1 - bn4 \leq x \leq B1 - s24; \\ -\varepsilon_s \cdot \frac{B1 - x - s14}{s24 - s14}, & B1 - s24 \leq x \leq B1 - s14; \\ 0, & B1 - s14 \leq x \leq B1 + s14; \\ \varepsilon_s \cdot \frac{B1 - x + s14}{s24 - s14}, & B1 + s14 \leq x \leq B1 + s24; \\ -\varepsilon_s, & B1 + s24 \leq x \leq B1 + bn4; \\ \varepsilon_{h1B4} - F1(q_n) \cdot R1(x), & B1 + bn4 \leq x \leq B4; \end{cases}, \quad (5)$$

$$\varepsilon_{ph1B4}(x) = \varepsilon_{fh1B4}(x) - \varepsilon_{\theta1B4}(x) - \varepsilon_{eh1B4}(x), \quad (6)$$

$$\varepsilon_{ph1B6}(x) = \varepsilon_{fh1B6}(x) - \varepsilon_{\theta1B6}(x) - \varepsilon_{eh1B6}(x). \quad (7)$$

Розподіл деформацій, розрахованих за залежностями (2)...(7) показано на рисунках 3...8.

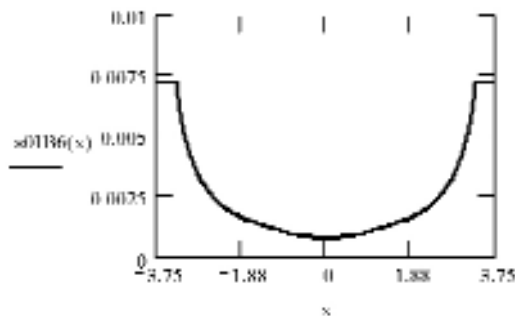


Рис. 3. Розподіл температурної деформації  $\varepsilon_{\theta1B6}(x)$  у складному перерізі нижньої полиці двотавра

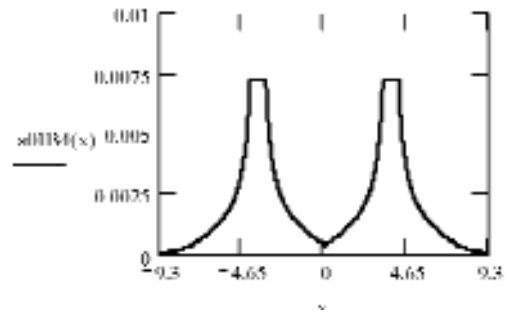


Рис. 4. Розподіл температурної деформації  $\varepsilon_{\theta1B4}(x)$  у складному перерізі верхніх полиць Z-профілів

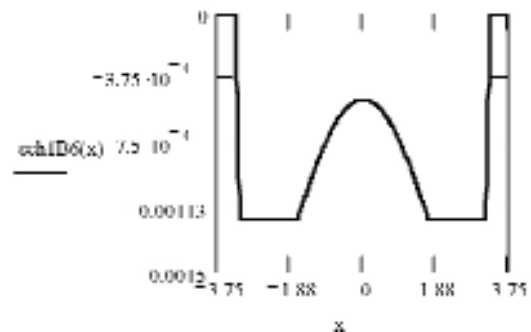


Рис. 5. Розподіл пружної деформації  $\varepsilon_{eh1B6}(x)$  у складному перерізі нижньої полиці двотавра

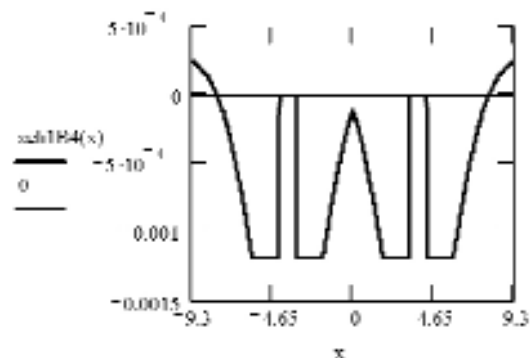


Рис. 6. Розподіл пружної деформації  $\varepsilon_{eh1B4}(x)$  у складному перерізі верхніх полиць Z-профілів

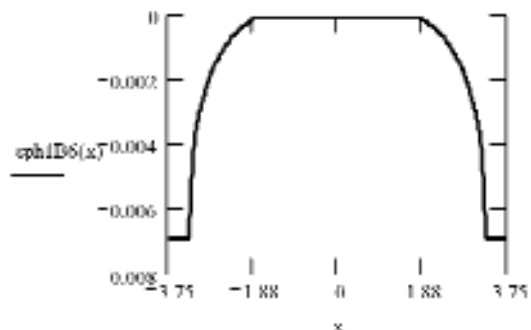


Рис. 7. Розподіл пластичної деформації  $\varepsilon_{ph1B6}(x)$  у складному перерізі нижньої полиці двотавра

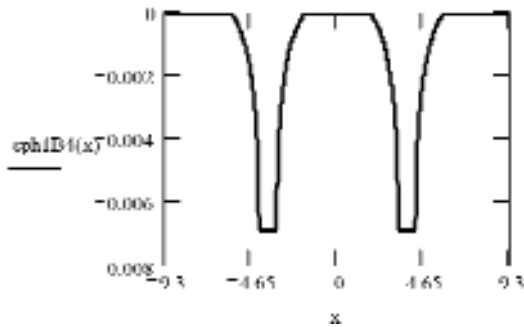


Рис. 8. Розподіл пластичної деформації  $\varepsilon_{ph1B4}(x)$  у складному перерізі верхніх полиць Z-профілів

Залишковий стан після одночасного приварювання двома швами двотавра до Z-профілів. Система рівнянь для даного залишкового стану деякою мірою подібна до системи (1) для стадії нагрівання і за методом складних перерізів [1] у загальному вигляді її можна подати так:

$$\left. \begin{aligned} \int_{\Gamma} \varepsilon_{er1}(x, y) dF &= 0; \\ \int_{\Gamma} \varepsilon_{er1}(x, y) y dF &= 0; \\ \varepsilon_{er1B4}(x - B6 + \chi n4) - \varepsilon_s - \psi; \\ \varepsilon_{er1B6}(x - B6 - \chi n6) - \varepsilon_s - 0. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

де  $\chi n4$ ,  $\chi n6$  — ширина зони пластичних деформацій видовження на стадії охолодження з кожного боку шва відповідно у верхніх полицях Z-профілів та нижній полиці двотавра;  $\varepsilon_s$  — пружна деформація на рівні межі текучості металу.

У залишковому стані всі поперечні перерізи уздовж балки з точки зору розподілу в них пружних, пластичних і повних деформацій є однаковими. Тому визначальна система рівнянь для залишкового стану не має прив'язки до якогось конкретного поперечного перерізу. При алгебризації системи (8) перед її розв'язуванням у обраному обчислювальному середовищі повну деформацію поперечного перерізу балки відповідно до гіпотези плоских перерізів треба розглядати як функцію координати  $y$ , тобто у вигляді  $\varepsilon_{r1}(y) = m \cdot y + n$ , оскільки переріз не тільки рівномірно переміщується уздовж балки, але ще і повертається на деякий кут. Параметри  $m$  та  $n$  входять до числа невідомих системи (8). Тоді для елементарних прямокутників перерізу балки 1, 2, ..., 6 відповідно можна записати такі залежності для повної деформації:  $\varepsilon_{r1B1} = m \cdot y1 + n$ ,  $\varepsilon_{r1B2}(y) = m \cdot y + n$ ,  $\varepsilon_{r1B3}(y) = m \cdot y + n$ ,  $\varepsilon_{r1B4} = m \cdot y3 + n$ ,  $\varepsilon_{r1B5} = m \cdot y4 + n$ ,  $\varepsilon_{r1B6} = m \cdot y2 + n$ . Пружну деформацію на стадії нагрівання для точок за межами пластичної зони необхідно визначати за загальною залежністю

$$\varepsilon_{er} = \varepsilon_{fr} - \varepsilon_{ph}.$$

Для точок у межах пластичної зони, в яких не утворювалась на стадії охолодження пластична деформація видовження і завдяки цьому  $\varepsilon_{pr} = \varepsilon_{ph}$ ,

пружну залишкову деформацію необхідно визначати за залежністю

$$\varepsilon_{er} = \varepsilon_{fr} - \varepsilon_{ph}.$$

Для точок у межах пластичної зони, в яких на стадії охолодження відбувалась пластична деформація видовження,

$$\varepsilon_{er} = \varepsilon_s.$$

Наведемо результати розв'язування задачі для залишкового стану. Розраховані значення невідомих системи (8):  $m = -3,879 \times 10^{-6}$ ,  $n = -6,883 \times 10^{-5}$ ,  $\chi n4 = 1,115$  см,  $\chi n6 = 1,11$  см.

Залежності для деформацій у поперечному перерізі балки у залишковому стані після приварювання двотавра до верхніх полиць Z-профілів мають вигляд:

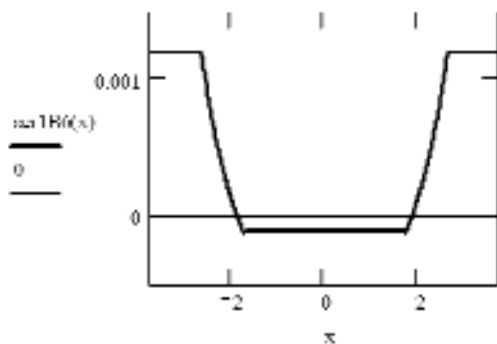
$$\varepsilon_{er1B6}(x) = \begin{cases} \varepsilon_s, & -B1 \leq x \leq -(B1 - \chi n6); \\ m \cdot y2 + n - \varepsilon_{ph1B6}(x), & (B1 - \chi n6) \leq x \leq (B1 - b n6); \\ m \cdot y2 + n, & \\ -(B1 - b n6) < x < B1 - b n6; \\ m \cdot y2 + n - \varepsilon_{ph1B6}(x), & \\ B1 - b n6 \leq x \leq B1 - \chi n6; \\ \varepsilon_s, & B1 - \chi n6 < x < B1. \end{cases} \quad (9)$$

$$\varepsilon_{pr1B6}(x) = \begin{cases} m \cdot y2 + n - \varepsilon_s, & \\ B1 \leq x \leq (B1 - \chi n6); \\ \varepsilon_{ph1B6}(x), & \\ (B1 - \chi n6) \leq x \leq (B1 - b n6); \\ 0, & -(B1 - b n6) \leq x \leq B1 - b n6; \\ \varepsilon_{ph1B6}(x), & \\ B1 - b n6 \leq x \leq B1 - \chi n6; \\ m \cdot y2 + n - \varepsilon_s, & \\ B1 - \chi n6 \leq x \leq B1. \end{cases} \quad (10)$$

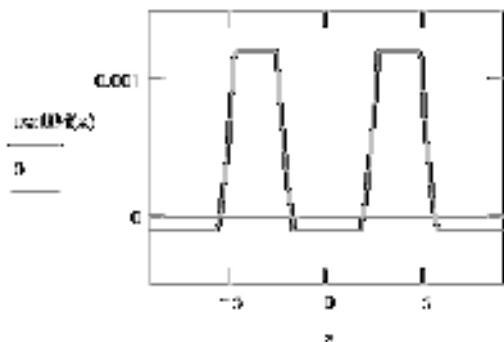
$$\varepsilon_{er1B4}(x) = \begin{cases} m \cdot y3 + n, & \\ -B4 \leq x \leq -(B1 + b n4); \\ m \cdot y3 + n - \varepsilon_{ph1B4}(x), & \\ -(B1 + b n4) \leq x \leq -(B1 + \chi n4); \\ \varepsilon_s, & -(B1 + \chi n4) \leq x \leq -(B1 - \chi n4); \\ m \cdot y3 + n - \varepsilon_{ph1B4}(x), & \\ -(B1 - \chi n4) \leq x \leq -(B1 - b n4); \\ m \cdot y3 + n, & \\ -(B1 - b n4) \leq x \leq B1 - b n4; \\ m \cdot y3 + n - \varepsilon_{ph1B4}(x), & \\ B1 - b n4 \leq x \leq B1 - \chi n4; \\ \varepsilon_s, & B1 - \chi n4 \leq x \leq B1 + \chi n4; \\ m \cdot y3 + n - \varepsilon_{ph1B4}(x), & \\ B1 + \chi n4 \leq x \leq B1 + b n4; \\ m \cdot y3 + n, & B1 + b n4 \leq x \leq B4. \end{cases} \quad (11)$$

$$\varepsilon_{pr1B4}(x) = \begin{cases} 0, & B4 < x < (B1 + bn4); \\ \varepsilon_{ph1B4}(x), & -(B1 + bn4) \leq x \leq -(B1 + \chi n4); \\ m \cdot y^3 + n - \varepsilon_1, & -(B1 + \chi n4) \leq x \leq -(B1 - \chi n4); \\ \varepsilon_{ph1B4}(x), & (B1 - \chi n4) < x < (B1 - bn4); \\ 0, & (B1 - bn4) < x < B1 - bn4; \end{cases} \quad (12)$$

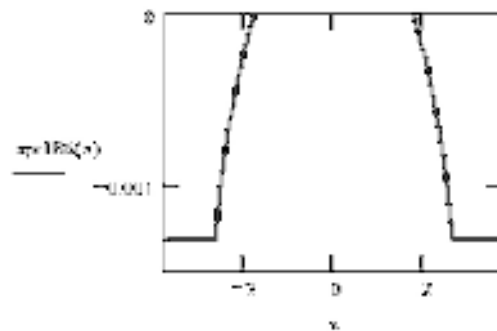
Розподіл деформацій за формулами (9)...(12) показано на рисунках 9...12.



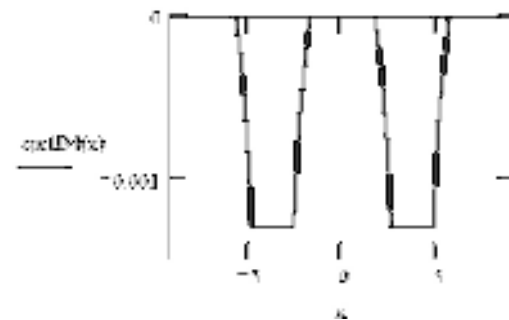
**Рис. 9.** Розподіл пружної деформації  $\varepsilon_{pr1B6}(x)$  у нижній полиці двотавра у залишковому стані після приварювання його до Z-профілів



**Рис. 10.** Розподіл пружної деформації  $\varepsilon_{pr1B4}(x)$  у верхніх полицях Z-профілів у залишковому стані після приварювання до них двотавра



**Рис. 11.** Розподіл пластичної деформації  $\varepsilon_{pr1B6}(x)$  у нижній полиці двотавра у залишковому стані після приварювання його до Z-профілів



**Рис. 12.** Розподіл пластичної деформації  $\varepsilon_{pr1B4}(x)$  у верхніх полицях Z-профілів у залишковому стані після приварювання до них двотавра

Стадії нагрівання при зварюванні шва другої черги для з'єднання двох Z-профілів між собою. Особливістю алгоритму розрахунку напружено-деформованого стану балки для даної стадії є необхідність урахування залишкової пластичної деформації скорочення у сполучених між собою полицях двотавра і Z-профілів, зумовленої зварюванням швів першої черги. Важливе значення має достовірне уявлення про механізм пружно-пластичного деформування в межах пластичних зон раніше зварених швів під час нагрівання і охолодження при зварюванні Z-профілів між собою. З однієї сторони за рахунок теплового розпору при зварюванні шва другої черги периферійні до нього ділянки перерізу балки, в тому числі і зони пластичних деформацій скорочення від швів першої черги, будуть видовжуватись і з цієї причини можна було б очікувати зменшення залишкової пластичної деформації в зонах пластичності швів першої черги. Але з іншого боку, таке видовження не є значним з причини великої жорсткості балки. Крім того, в околі шва другої черги має місце значна температурна деформація металу, яка певною мірою поширюється і на зони пластичних деформацій від швів приварювання

двотавра, особливо це треба враховувати для пластичних зон у полиці Z-профілів. Стосовно полиці двотавра можна вважати, що тепловий потік від шва другої черги через перемичку метала у вигляді кутового шва у полицю двотавра не розповсюджується. Таким чином, пластичного видовження в зонах пластичності швів першої черги у полиці Z-профілів може не бути, в той час як у зоні пластичності полиці двотавра невелике пластичне видовження може бути. Виявити за яким саме механізмом відбувається деформування пластичних зон від швів першої черги можливо лише виконанням розрахунків за алгоритмом даної роботи в такій послідовності: спочатку припускаємо, що в згаданих зонах пластичності Z-профілів при заварюванні другого шва пластична деформація не змінюється за рахунок її компенсації температурною деформацією, а в зоні пластичності полиці двотавра деяке пластичне видовження має місце. За такого припущення виконуємо розрахунок на стадії нагрівання від шва другої черги і будемо графіки розподілу пружних деформацій у сполучених полицях двотавра і Z-профілів. Якщо при цьому пружні деформації в зонах пластичності від швів першої черги не перевищують значення  $\varepsilon_s$ , можна вважати, що механізм деформування був передбачений вірно. В іншому випадку, при перевищенні пружною деформацією значення  $\varepsilon_s$ , необхідно відповідним чином зробити корекцію рівнянь визначальної системи і повторити розрахунок. Отже, відповідно до МСП у загальному вигляді систему визначальних рівнянь для даної стадії нагрівання, з припущенням про відсутність зміни залишкової пластичної деформації в зонах пластичності Z-профілів і про наявність незначного пластичного видовження в зоні пластичності двотавра від швів першої черги, можна подати у вигляді:

$$\begin{cases} \int_{\sigma} \varepsilon_{sh2}(x, y) dF = 0; \\ \int_{\sigma} \varepsilon_{sh2}(x, y) y dF = 0; \\ \varepsilon_{sh2B4}(x = bnZ) - \varepsilon_s = 0; \\ \varepsilon_{sh2B6}(x = B6 - snhZ6) - \varepsilon_s = 0; \\ t2 - \frac{1}{\omega} (\sqrt{a^2 + \omega \cdot bnZ^2} - a) = 0. \end{cases} \quad (13)$$

де  $bnZ$  — ширина зони пластичних деформацій скорочення з кожного боку шва другої черги у верхніх полицях Z-профілів;  $snhZ6$  — ширина зони пластичного видовження у зоні пластичності нижньої полиці двотавра;  $\varepsilon_s$  — пружна деформація на рівні межі текучості метала;  $t2$  — час, що минув з моменту перетину дугою поперечного перерізу

балки, в якому розміщені зони  $bnZ$ ; параметр  $\omega = 4ab$ . Повну деформацію поперечного перерізу балки, в якому зона  $bnZ$  досягає максимального значення будемо подавати у вигляді  $\varepsilon_{sh2}(y) = u \cdot y + r$ . Параметри  $u$  та  $r$  входять до числа невідомих системи (13). Тоді для елементарних прямокутників перерізу балки 1, 2, ..., 6 відповідно можна записати  $\varepsilon_{sh2B1} = u \cdot y1 + r$ ,  $\varepsilon_{sh2B2}(y) = u \cdot y + r$ ,  $\varepsilon_{sh2B3}(y) = u \cdot y + r$ ,  $\varepsilon_{sh2B4} = u \cdot y3 + r$ ,  $\varepsilon_{sh3B5} = u \cdot y4 + r$ ,  $\varepsilon_{sh2B6} = u \cdot y2 + r$ . Алгебризований вигляд системи (13) в роботі не наводиться у зв'язку з її громіздкістю. Результати розв'язування системи (13):  $u = -7,485 \times 10^{-7}$ ,  $r = -1,178 \times 10^{-5}$ ,  $bnZ = 2,262$  см,  $snhZ6 = 1,149$  см,  $t2 = 27,662$  с.

Залежності для деформацій на стадії нагрівання при зварюванні Z-профілів:

$$\begin{cases} \varepsilon_s, -B1 < x < -(B1 - snhZ6); \\ \varepsilon_{sh2B6} - \varepsilon_{pr1B6}(x), \\ \varepsilon_{sh2B6}(x) - \varepsilon_s, -(B1 - snhZ6) \leq x \leq B1 - snhZ6; \\ \varepsilon_s, B1 - snhZ6 \leq x \leq B1; \end{cases} \quad (14)$$

$$\begin{cases} \varepsilon_{sh2B6} - \varepsilon_s, \\ -B1 < x < -(B1 - snhZ6); \\ \varepsilon_{pr1B6}(x), \\ \varepsilon_{sh2B6}(x) - \varepsilon_s, (B1 - snhZ6) < x \leq B1 - snhZ6; \\ \varepsilon_{sh2B6} - \varepsilon_s, B1 - snhZ6 \leq x \leq B1. \end{cases} \quad (15)$$

$$\varepsilon_{sh2B4}(x) = \begin{cases} \varepsilon_{sh2B4} - F2(q_n) \cdot H(x) - \varepsilon_{pr1B4}(x), \\ -B4 \leq x \leq -bnZ; \\ \varepsilon_s, -bnZ \leq x \leq -s2Z; \\ \varepsilon_s \cdot \frac{x - s1Z}{s2Z - s1Z}, \\ s2Z \leq x \leq s1Z; \\ 0, s1Z \leq x \leq s1Z; \\ -\varepsilon_s \cdot \frac{x - s1Z}{s2Z - s1Z}, \\ s1Z \leq x \leq s2Z; \\ \varepsilon_s, s2Z \leq x \leq bnZ; \\ \varepsilon_{sh2B4} - F2(q_n) \cdot H(x) - \varepsilon_{pr1B4}(x), \\ bnZ \leq x \leq B4. \end{cases} \quad (16)$$



$$\varepsilon_{ph2B4}(x) = \begin{cases} \varepsilon_{pr1B4}(x), & -B4 \leq x \leq -bnZ; \\ \varepsilon_{fh2B4} - F2(q_n) \cdot H(x) - (-\varepsilon_s), & -bnZ \leq x \leq -s2Z; \\ \varepsilon_{fh2B4} - F2(q_n) \cdot H(x) - \left( -\varepsilon_s \cdot \frac{x + s1Z}{s2Z - s1Z} \right), & -s2Z \leq x \leq -s1Z; \\ \varepsilon_{fh2B4} - \alpha 600, & -s1Z \leq x \leq s1Z; \\ \varepsilon_{fh2B4} - F2(q_n) \cdot H(x) - \left( -\varepsilon_s \cdot \frac{x + s1Z}{s2Z - s1Z} \right), & s1Z \leq x \leq s2Z; \\ \varepsilon_{fh2B4} - F2(q_n) \cdot H(x) - (-\varepsilon_s), & s2Z \leq x \leq bnZ; \\ \varepsilon_{pr1B4}(x), & bnZ \leq x \leq B4. \end{cases} \quad (17)$$

Розподіл пружної  $\varepsilon_{eh2B4}(x)$  і пластичної  $\varepsilon_{ph2B4}(x)$  деформації у верхніх полицях Z-профілів за залежностями (16) і (17) показано на рис. 13 і 14, а пружної  $\varepsilon_{eh2B6}(x)$  і пластичної

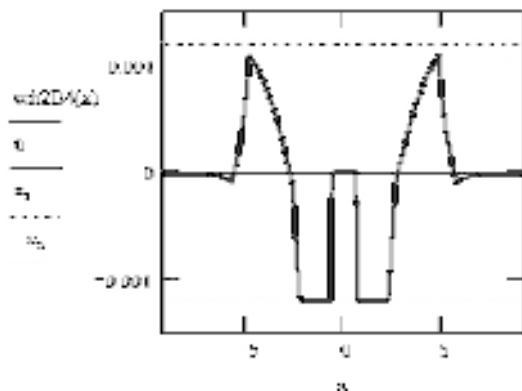


Рис. 13. Розподіл пружної деформації  $\varepsilon_{eh2B4}(x)$  у складних перерізах верхніх полиць Z-профілів

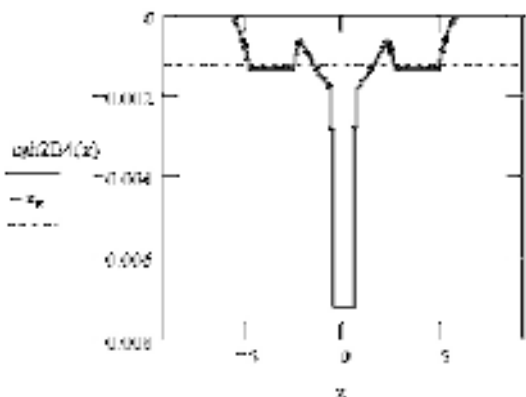


Рис. 14. Розподіл пластичної деформації  $\varepsilon_{ph2B4}(x)$  у складних перерізах верхніх полиць Z-профілів

$\varepsilon_{ph2B6}(x)$  за залежностями (14) і (15) у нижній полиці двотавра — на рис. 15 і 16.

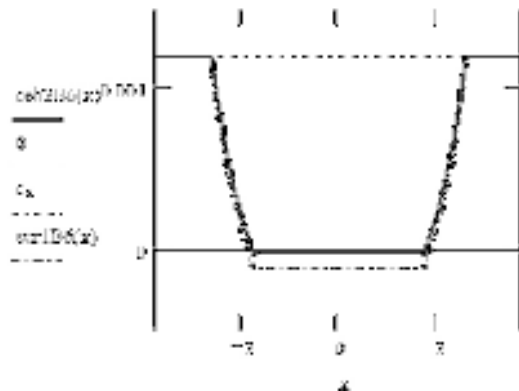


Рис. 15. Розподіл пружної деформації  $\varepsilon_{eh2B6}(x)$  у складному перерізі нижньої полиці двотавра

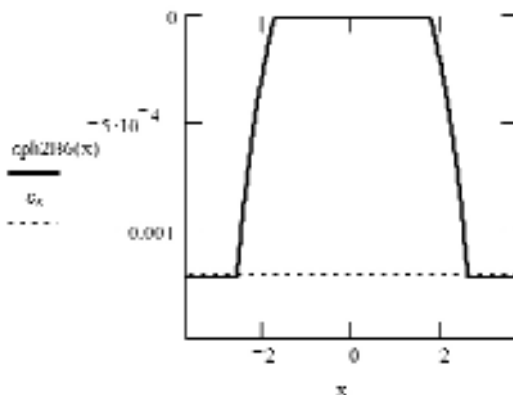


Рис. 16. Розподіл пластичної деформації  $\varepsilon_{ph2B6}(x)$  у складному перерізі нижньої полиці двотавра

На рис. 15 приведена також крива  $\varepsilon_{er1B6}(x)$  розподілу у нижній полиці двотавра залишкової пружної деформації після приварювання його до полиць Z-профілів. Зіставлення кривих пружних деформацій на рис. 15 показує, що деяка незначна деформація видовження на стадії нагрівання у нижній полиці двотавра є і тому прийняті вище припущення стосовно механізму пружно-пластичного деформування у зонах пластичності від швів першої черги при нагріванні під час зварювання шва другої черги є обґрунтованими і цілком виправданими. У зонах пластичності швів першої черги у верхніх полицях Z-профілів зміни залишкової пластичної деформації скорочення, утвореної після зварювання і повного охолодження, не було під час нагрівання при зварюванні Z-профілів, що переконливо видно з рис. 13.

Залишковий стан після зварювання всіх швів балки. Система рівнянь для залишкового стану має такий загальний вигляд:

$$\left. \begin{aligned} \int_{\Gamma} \varepsilon_{\text{er}2}(x, y) d\Gamma &= 0; \\ \int_{\Gamma} \varepsilon_{\text{er}2}(x, y) y d\Gamma &= 0; \\ \varepsilon_{\text{er}2B4}(x - \text{snr}Z4) - \varepsilon_x &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

де  $\text{snr}Z4$  – ширина зони пластичних деформацій видовження на стадії охолодження з кожного боку шва у верхніх полицях Z-профілів;  $\varepsilon_s$  – пружна деформація на рівні межі текучості металу.

Повну залишкову деформацію будь-якого поперечного перерізу балки записуємо у вигляді  $\varepsilon_{\text{fr}2}(y) = mr \cdot y1 + nr$ . Параметри  $mr$  та  $nr$  входять до числа невідомих системи (18). Тоді для елементарних прямокутників перерізу балки 1, 2, ..., 6 відповідно можна записати  $\varepsilon_{\text{fr}2B1} = mr \cdot y1 + nr$ ,  $\varepsilon_{\text{fr}2B2}(y) = mr \cdot y + nr$ ,  $\varepsilon_{\text{fr}2B3}(y) = mr \cdot y + nr$ ,  $\varepsilon_{\text{fr}2B4} = mr \cdot y3 + nr$ ,  $\varepsilon_{\text{fr}3B5} = mr \cdot y4 + nr$ ,  $\varepsilon_{\text{fr}2B6} = m \cdot y2 + nr$ . Алгебризований вигляд системи (18) в роботі не наводиться у зв'язку з її громіздкістю.

Результати розв'язування системи (18):  $mr = -4,99 \times 10^{-6}$ ,  $nr = -8,763 \times 10^{-5}$ ,  $\text{snr}Z4 = 1,373$  см.

Залежності для залишкових деформацій у будь-якому поперечному перерізі балки після зварювання всіх поздовжніх швів мають вигляд:

$$\varepsilon_{\text{er}2B4}(x) = \begin{cases} mr \cdot y3 + nr - \varepsilon_{\text{ph}2B4}(x), & -B4 \leq x \leq -\text{snr}Z4; \\ \varepsilon_s, & -\text{snr}Z4 \leq x \leq \text{snr}Z4; \\ mr \cdot y3 + nr - \varepsilon_{\text{ph}2B4}(x), & \text{snr}Z4 \leq x \leq B4. \end{cases} \quad (19)$$

$$\varepsilon_{\text{pr}2B4}(x) = \begin{cases} \varepsilon_{\text{ph}2B4}(x), & -B4 < x < -\text{snr}Z4; \\ mr \cdot y3 + nr - \varepsilon_s, & -\text{snr}Z4 \leq x \leq \text{snr}Z4; \\ \varepsilon_{\text{ph}2B4}(x), & \text{snr}Z4 \leq x \leq B4. \end{cases} \quad (20)$$

$$\varepsilon_{\text{er}2B6}(x) = mr \cdot y2 + nr - \varepsilon_{\text{ph}2B4}(x), \quad (21)$$

$$\varepsilon_{\text{pr}2B6}(x) = \varepsilon_{\text{ph}2B6}(x), \quad (22)$$

Розподіл за залежностями (19) і (20) залишкової пружної  $\varepsilon_{\text{er}2B4}(x)$  і пластичної  $\varepsilon_{\text{pr}2B4}(x)$  деформації у верхніх полицях Z-профілів показано на рис. 17 і 18, а пружної  $\varepsilon_{\text{er}2B6}(x)$  і пластичної  $\varepsilon_{\text{pr}2B6}(x)$  за залежностям (21) і (22) у нижній полиці двотавра – на рис. 19 і 20.

Для порівняльного аналізу і формулювання висновків на рис. 17...20 показано також розподіл відповідних деформацій у балці в залишковому стані після приварювання двотавра до Z-профілів.

*Розрахунок залишкового прогину балки після зварювання всіх поздовжніх швів. Усадкова сила від сумарного відносного об'єму поздовжнього*

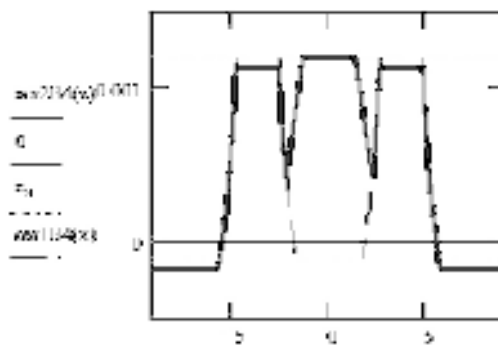


Рис. 17. Розподіл залишкової пружної деформації  $\varepsilon_{\text{er}2B4}(x)$  у поперечних перерізах верхніх полиць Z-профілів

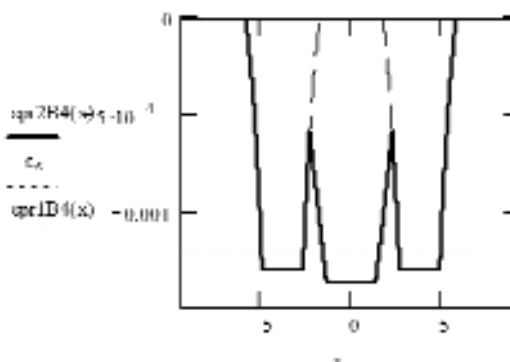


Рис. 18. Розподіл залишкової пластичної деформації  $\varepsilon_{\text{pr}2B4}(x)$  у поперечних перерізах верхніх полиць Z-профілів

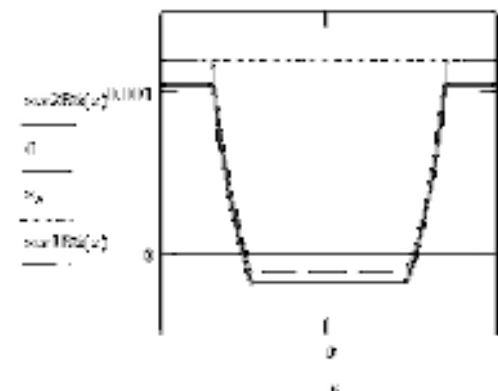


Рис. 19. Розподіл залишкової пружної деформації  $\varepsilon_{\text{er}2B6}(x)$  у поперечних перерізах нижньої полиці двотавра

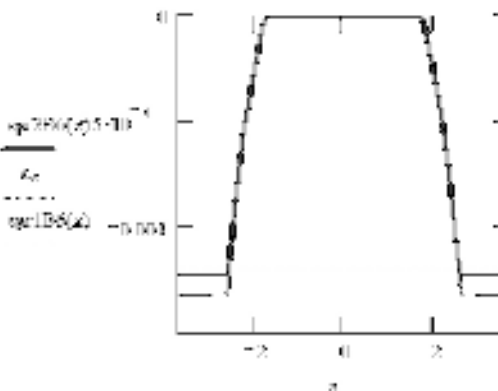


Рис. 20. Розподіл залишкової пластичної деформації  $\varepsilon_{\text{pr}2B6}(x)$  у поперечних перерізах нижньої полиці двотавра

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ НОВЫХ ПРОЦЕССОВ, МАТЕРИАЛОВ, ИЗДЕЛИЙ

пластичного скорочення металу в зонах пластичності в околі зварних швів визначається за залежністю

$$P_{yc} = E \left( \delta_4 \int_{-y_1}^{y_1} \varepsilon_{pr} 2B_1(x) dx - \delta_6 \int_{-y_2}^{y_2} \varepsilon_{pr} 2B_1(x) dx \right) -$$

$$= 4,238 \cdot 10^4 \text{ н}$$

Очевидно, що відносний об'єм поздовжнього пластичного скорочення у верхніх полицях Z-профілів є набагато більший за аналогічний об'єм у нижній полиці двотавра. Співвідношення згаданих об'ємів дорівнює

$$\frac{\delta_4 \int_{-y_1}^{y_1} \varepsilon_{pr} 2B_1(x) dx}{\delta_6 \int_{-y_2}^{y_2} \varepsilon_{pr} 2B_1(x) dx} = 5,109$$

і це дає право прийняти припущення, що сумарна усадкова сила прикладена до перерізу балки на осі Y у точці її перетину з середньою лінією контуру верхніх полиць Z-профілів, тобто її координатою по відношенню до центра ваги перерізу балки є  $y_2$ . Отже усадкова сила створює згинальний момент

$$M = P_{yc} \cdot y_2 = -5,888 \cdot 10^5 \text{ н} \cdot \text{см.}$$

Таким чином, залишковий прогин балки дорівнює

$$f = \frac{P_{yc} \cdot y_2 \cdot L^3}{8EI_x} = 1,33 \text{ см.}$$

### Висновки

1. Здійснена адаптація загальних положень розробленого раніше авторами методу складних перерізів [1] і запропоновано новий алгоритм розрахунку прогину від зварювання поздовжніх швів такої одновимірної зварної конструкції зі складною геометрією поперечного перерізу як хребтова балка вагона.

2. Показано, що основний об'єм відносного пластичного скорочення від зварювання поздовжніх швів зосереджений у верхніх полицях Z-профілів і він перевищує аналогічний об'єм у нижній полиці двотавра більше ніж у 5 разів.

3. Показано, що 60% площі верхніх полиць Z-профілів у залишковому стані після зварювання балки охоплено зоною залишкової пластичності від зварювання і після зварювання метал в цій зоні має залишкові розтягуювальні напруження на рівні межі текучості.

4. Показано, що при зварюванні Z-профілів пластичне видовження в зоні залишкової пластичності зварних швів першої черги (приварювання двотавра) у верхніх полицях Z-профілів не відбувається. В зонах пластичності нижньої полиці двотавра має місце незначне пластичне видовжен-

ня, що зумовлює там залишкові напруження після зварювання всіх швів балки на 11,17% менші за межу текучості металу.

### Завдання для подальших досліджень

На думку автора заслугоує на увагу розробка методу розрахунку параметрів попереднього перед зварюванням активного механічного навантаження складеної "на прихватках" балки, яке забезпечувало б необхідний рівень зменшення усадочної сили і відповідно залишкового прогину балки. Це є альтернативний до методу теплової правки підхід зменшення залишкового прогину і підвищення точності виготовлення балки.

### Література

1. Прохоренко В.М., Карпенко А.С., Прохоренко Д.В. Расчет функции усадки при сварке одномерных конструкций. Сообщение 1. Нагрев мощным быстро движущимся линейным источником. // Технологические системы, 2005. — № 4. — С. 49–55.
2. Прохоренко В.М., Карпенко А.С., Прохоренко Д.В. Расчет функции усадки при сварке одномерных конструкций. Сообщение 2. Нагрев движущимся линейным источником. // Технологические системы, 2005. — № 5–6(31–32). — С. 46–49.
3. Муханов К.К. Металлические конструкции. — М.: Стройиздат, 1978. — 576 с.
4. Сварные строительные конструкции. Основы проектирования конструкций: Справочник / Под ред. чл.- корр. НАН Украины Л.М. Лобанова, Т. 1. — К.: Наукова думка, 1993. — 416 с.
5. Сварные строительные конструкции. Типы конструкций: Справочник / Под ред. чл.- корр. НАН Украины Л.М. Лобанова, Т. 2. — К.: ИЭС им. Е.О. Патона, 1997. — 680 с.
6. Николаев Г.А., Куркин С.А., Винокуров В.А. Сварные конструкции, Т. 1. — М.: Высшая школа, 1982. — 272 с.
7. Николаев Г.А., Куркин С.А., Винокуров В.А. Сварные конструкции, Т. 2. — М.: Высшая школа, 1983. — 344 с.
8. Винокуров В.А. Сварочные деформации и напряжения. — М.: Машиностроение, 1968. — 236 с.
9. Винокуров В.А., Григорьянц А.Г. Теория сварочных деформаций и напряжений. — М.: Машиностроение, 1984. — 280 с.
10. Троцун И.П. Внутренние усилия и деформации при сварке. — М.: Машгиз, 1964. — 247 с.
11. Кузьминов С.А. Расчетный метод определения общих деформаций конструкций от сварки. // Вестник машиностроения, 1954. — № 9. — С. 70–75.
12. Кузьминов С.А. Сварочные деформации судовых корпусных конструкций. — Л.: Изд. "Судостроение", 1974. — 286 с.

13. *Гатовский К.М., Кархин В.А.* Теория сварочных деформаций и напряжений. Учеб. пос. Ленингр. кораблестр. ин-т, 1980. — 331 с.

14. *Касаткин Б.С., Прохоренко В.М., Чертов И.М.* Напряжения и деформации при сварке. — К.: Вища шк., 1987. — 246 с.

15. *Прохоренко В.М., Прохоренко О.В.* Напряжения та деформації у зварних з'єднаннях і конструкціях. — К.: НТУУ "КПІ", 2009. — 268 с.

16. *Прохоренко О.В.* Алгоритми розрахунку деформацій методом складних перерізів при нагріванні поздовжнього крайка штаби. // Вісник Східно-українського національного університету імені Володимира Даля. — 2006. — № 6(100), частина 1 — С. 32—36.

17. *Прохоренко О.В.* Метод розрахунку погонного об'єму поздовжнього пластичного скорочення при термічній правці прогину зварних балок. // Вісник Східноукраїнського національного університету ім. Володимира Даля. — 2003. — № 11(69). — С. 222—232.

18. *Прохоренко В.М., Карпенко А.С., Прохоренко О.В.* Термічна правка поздовжнього прогину зварних балок локальним лінійним нагрівом. // Наукові вісті НТУУ "КПІ". — 2003. — № 3. — С. 107—110.

19. *Прохоренко О.В.* Оптимізація погонної енергії зварювання поздовжніх швів одномірних звар-

них конструкцій за критерієм відсутності деформації залишкового прогину. // Технологические системы, 2006. — № 1(33). — С. 62—71.

20. *Прохоренко О.В.* Розрахунок технологічних параметрів теплової правки залишкового прогину одномірних зварних конструкцій. Повідомлення 1. Конструкції першого типу. // Технологические системы, 2006. — № 2(34). — С. 55—59.

21. *Прохоренко О.В.* Розрахунок технологічних параметрів теплової правки залишкового прогину одномірних зварних конструкцій. Повідомлення 2. Конструкції другого типу. // Технологические системы, 2006. — № 3(35). — С. 26—30.

22. *ГОСТ 5267.2-90.* Профиль зетовый. Сортамент [Текст]. — Введ. 1990-06-25. — М.: Изд-во стандартов, 1990. — IV, 27 с.: ил.; 29 см.

23. *ГОСТ 5267.5-90.* Профиль двутавровый N 19 для хребтовой балки. Сортамент [Текст]. — Введ. 1990-06-25. — М.: Изд-во стандартов, 1990. — IV, 27 с.: ил.; 29 см.

24. *ГОСТ 5267.0-90 — ГОСТ 5267.13-90.* Профили горячекатаные для вагоностроения. Общие технические условия [Текст]. — Введ. 1991-07-01. — М.: Изд-во стандартов, 1990. — IV, 27 с.: ил.; 29 см.

25. *Рыкалин Н.Н.* Расчеты тепловых процессов при сварке. — М.: Машгиз, 1951. — 296 с.

26. *Феодосьев В.И.* Сопrotивление материалов. — М.: Наука, 1986. — 560 с.