



УДК 621.721.052:539.4.014

Прохоренко В.М., Прохоренко О.В., Зворикін К.О.

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

### РОЗРАХУНОК ЗАЛИШКОВОГО ПРОГИНУ ТА ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ТЕПЛОЇ ПРАВКИ КОРОБЧАСТИХ БАЛОК З ДВОМА ПОЗДОВЖНИМИ ШВАМИ З МЕТОЮ УСУНЕННЯ ПРОГИНУ

#### Анотація

Запропонований алгоритм розрахунку методом складних перетинів за допомогою математичного пакету MATHCAD залишкового прогину після зварки балок коробчастого перетину двома подовжніми швами і технологічних параметрів теплової правки балок з метою усунення залишкового прогину.

#### Abstract

The algorithm of calculation is offered by the method of complex sections by the mathematical package of MathCAD of the residual flexure after welding of beams with box-shaped cross section of two longitudinal welds and technological parameters of beams thermal correcting with the purpose of removal of residual flexure.

Підвищення точності виготовлення одномірних зварних конструкцій є однією з важливих проблем, від розв'язання якої залежить трудомісткість виробництва конструкцій, їх вартість та експлуатаційні характеристики. Під час виготовлення зварних конструкцій внаслідок термодформаційних процесів в них утворюються залишкові деформації, які спричиняють негативний вплив на працездатність, експлуатаційні показники та зовнішній вигляд.

Одномірні зварні конструкції (у подальшому стержні) коробчастого поперечного перерізу є поширеними конструктивними елементами багатьох зварних конструкцій і при понижений їх жорсткості в них можуть утворюватись від зварювання поздовжніх швів значні переміщення у вигляді прогину осевої лінії.

Технологічні рекомендації з метою зменшення такого виду залишкової деформації здебільшого зводяться до необхідності застосування після зварювання теплової правки за тією чи іншою схемою нагрівання. Обсяги теплової правки і відповідно трудомісткість такої технологічної операції суттєво залежать від норм допустимих відхилень контрольних розмірів конструкції та величини залишкових деформацій від зварювання.

З нашого погляду дана науково-технічна задача може бути успішно вирішена на основі розрахунку технологічних параметрів теплової правки.

Розглянемо в системі координат  $XOY$  по середній лінії контуру поперечний переріз коробчастої балки з однаковою товщиною полиць і стінок  $\delta \ll B, H$  показаний на рис 1.

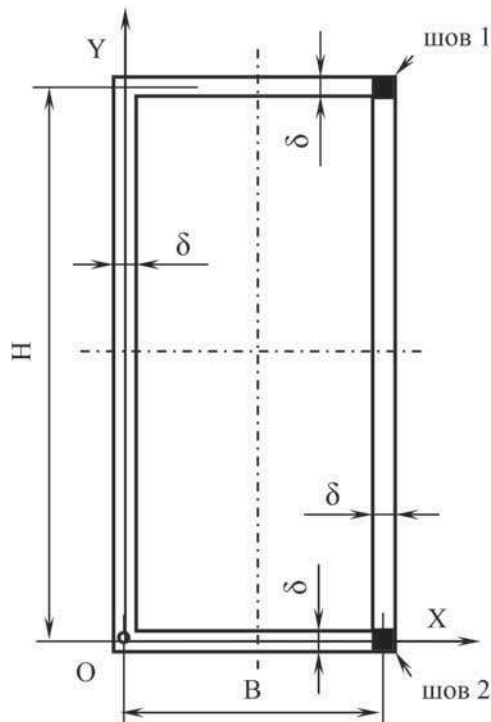


Рис. 1. Схема поперечного перерізу коробчастої балки з двома поздовжніми швами

Балка зібрана на прихватках і в силовому відношенні всі її конструктивні елементи у вигляді П-подібного та листового елементів являють собою одне ціле, тобто при зварюванні поздовжніх швів сприймають силові навантаження так, як це було б у випадку суцільного коробчастого перерізу.

В той же час вважаємо, що тепловий потік від зварювальної дуги не переходить з одного елемента на інший через не заварений стик. Приймаємо також припущення, що повна поздовжня деформація на стадії нагрівання у поперечних перерізах балки між тими двома крайніми з них, у котрих визначаються відрізки зони пластичних деформацій скорочення (ЗПДС) з обох боків шва,

практично є однаковою і відповідає закону площини, що підтверджується численними розрахунками ширини ЗПДС у зварюваних елементах. До того ж і координати вздовж осі шва згаданих вище крайніх поперечних перерізів, як правило, мало відрізняються між собою і мають деяку різницю  $\Delta$ . Оскільки балка розглядається як однорізна конструкція, будемо припускати, що максимальну пластичну деформацію скорочення в межах ширини ЗПДС на стадії нагрівання можна визначити не за складним алгоритмом, викладеним у роботі [1], а дещо в спрощеному вигляді як різницю між згаданою вище однаковою повною деформацією поперечних перерізів в межах відрізка  $\Delta$  і сумою температурної та пружної деформацій у точках кривої  $Gm$ , яка є проекцією на площину конструктивного елемента, що зварюється, рухомої квазістаціонарної кривої максимальних температур в межах ширини ЗПДС з обох боків шва.

Складний розрахунковий переріз в околі шва, що заварюється в даний момент, в межах ЗПДС проходить по кривих  $Gm$  до точок на відстані  $s1$  від осі шва з обох його боків, в яких температура досягає  $600^{\circ}\text{C}$ . Точки з даною температурою розташовані у відповідному поперечному перерізі і з'єднуються між собою відрізком  $2 \cdot s1$ . За межами ЗПДС розрахунковий переріз в загальному випадку проходить по двох різних поперечних перерізах стержня, починаючи від точок перетину кривих  $Gm$  та  $Gb$  [1] на межі ЗПДС з обох сторін шва і закінчуються на ребрі коробчастого стержня балки, діагонально протилежному до шва, що заварюється в даний момент або на ребрі з не завареним швом при зварюванні шва 1. Криві  $Gb$  з обох боків шва є геометричним місцем точок у зварюваних даним швом конструктивних елементах, в яких починається поздовжня пластична деформація скорочення. Між кінцями розрахункового перерізу на діагонально протилежному ребрі, або на ребрі з не завареним швом 2 утворюється сходинка заввишки  $\Delta$ , вздовж якої необхідно з'єднати кінці згаданого розрахункового перерізу, перетворивши в такий спосіб його контур на бічній поверхні коробчастого стержня у замкнену ламано-криволінійну лінію.

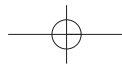
Таким чином, маємо два поздовжніх шва, при зварюванні кожного з яких для визначення напружено-деформованого стану стержня балки необхідно скласти і розв'язувати по дві системи нелінійних рівнянь відповідно для стадії нагрівання та залишкового стану, складених із рівнянь рівноваги для осьових сил і моментів та умов пластичності для точок на межі тих чи інших пластичних зон, що утворюються в околі заварених швів. При складанні систем рівнянь необхідно мати уявлення відносно механізму пружно-пластичного деформування полиць і стінок стержня балки при

зварюванні кожного з двох швів. Хоч у багатьох випадках зварювання коробчастих стержнів різних розмірів і на різних режимах повністю уникнути в такий спосіб можливих неточностей у згаданому механізмі деформування важко, все-таки обсяг роботи по корекції окремих рівнянь системи, при пробному розрахунку в порядку моніторингу алгоритму розрахунку, значною мірою буде зменшено.

Наведемо в загальних рисах опис механізму пружно-пластичного деформування стержня балки при зварюванні кожного з двох швів для даного випадку поперечного перерізу балки.

**Шов 1, стадія нагрівання.** При зварюванні шва 1 в його околі у поперечному перерізі стержня до високих температур нагріваються верхня полиця (позначення  $U$ ) та права стінка (позначення  $R$ ), де утворюються ЗПДС завширшки відповідно  $bnU1$  та  $bnR1$  (цифри 1 вказують на утворення даних параметрів при зварюванні шва 1). В межах інтервалів  $[bnU1, s2]$  та  $[bnR1, s2]$  на кривих  $Gm$  з обох боків шва 1, тобто на верхній полиці і правій стінці, пружна деформація скорочення дорівнює  $\epsilon_s$ , що відповідає межі текучості  $\sigma_s$  матеріалу стержня. Для ближчих до шва з обох його боків точок кривої  $Gm$  в межах інтервалів  $[s2, s1]$  пружна деформація скорочення зменшується від  $\epsilon_s$  до нуля за лінійним законом. За межами ЗПДС як для полиці, так і для стінки пружна деформація визначається різницею між повною і температурною деформаціями. В цілому на стадії нагрівання стержень видовжується і вигинається з утворенням повної поздовжньої деформації відповідно до закону площини з прогином випуклістю в сторону шва 1, який заварюється на даному етапі.

**Шов 1, залишковий стан.** Після охолодження шва 1 напружено-деформований стан у всіх поперечних перерізах стержня по його довжині вважаємо однаковим, прикінцеві ділянки поблизу торців до уваги не приймаємо. Отже, в поперечному перерізі матимемо повну поздовжню деформацію скорочення теж за законом площини, але з вигином протилежного напрямку, тобто випуклістю в сторону ребра, діагонально протилежного шву 1. Пластична деформація скорочення на стадії нагрівання в межах  $bnU1$  та  $bnR1$  зумовлює в залишковому стані утворення деформації видовження, яка досягає величини межі текучості  $\epsilon_s$  на відстанях від осі шва  $bV$  та  $bH$  відповідно для верхньої полиці та правої стінки. На інтервалах  $[bnB1, bV]$  та  $[bnR1, bH]$  залишкова пружна деформація визначається різницею між залишковими повною та пластичною деформаціями, причому залишкова пластична деформація дорівнює максимальній пластичній деформації



скорочення для стадії нагрівання у відповідних точках кривих  $\Gamma t$ . Для лівої стінки і нижньої полиці в залишковому стані пружна деформація дорівнює повній залишковій деформації для даних конструктивних елементів стержня. В межах  $bnU1$  та  $bnR1$  залишкова пластична деформація скорочення визначається різницею між залишковими повною та пружною деформаціями.

**Шов 2, стадія нагрівання.** При зварюванні шва 2 з'єднуються між собою нижня полиця (позначення  $D$ ) та права стінка (позначення  $R$ ), в яких в околі шва 2 утворюються ЗПДС завширшки відповідно  $bnD2$  та  $bnR2$ . Процес деформування стержня на стадії нагрівання при зварюванні шва 2 в цілому є подібним до описаного вище при зварюванні шва 1, але необхідно враховувати наявність залишкової пластичної деформації скорочення в зонах  $bnU1$  та  $bnR1$  при визначенні в них пружної деформації на стадії нагрівання в процесі зварювання шва 2, де пружна деформація в загальному випадку дорівнює різниці між повною та сумою температурної (від шва 2) і залишкової пластичної (від шва 1) деформації за умови, що величина пружної деформації при цьому не перевищує  $\varepsilon_s$ . Якщо для точок деякого інтервалу формально визначена в такий спосіб пружна деформація перевищує рівень  $\varepsilon_s$ , що можна з'ясувати побудовою відповідного графіка для пружної деформації в даному конструктивному елементі стержня, то на цьому інтервалі її треба прийняти рівною  $\varepsilon_s$  і зробити відповідну корекцію в рівняннях системи, яку склали перед цим з метою розв'язування задачі. Після розв'язування системи рівнянь для стадії нагрівання визначаємо для цієї стадії пластичну деформацію скорочення у точках всіх утворених ЗПДС в перерізі стержня, що є необхідним при складанні наступної системи рівнянь для знаходження залишкового стану після зварювання шва 2. Якщо  $H < B$ , то можна очікувати, що при нагріванні шва 2 лінія повної деформації для правої стінки більшою мірою буде зміщуватись вгору, аніж повертатись, створюючи в такий спосіб умови для пластичного видовження в ЗПДС шва 1 і збільшуючи довжину відрізків  $bB$  та  $bH$  відповідно до довжини  $wB$  та  $wH$ .

**Шов 2, залишковий стан.** Після зварювання шва 2 в ЗПДС  $bnD2$  та  $bnR2$  утворюються залишкові пружні деформації розтягу, які відповідно на відстанях  $tD$  та  $tR$  від осі шва 2 досягають межі  $\varepsilon_s$  і залишаються такими для всіх точок відрізків  $tD$  та  $tR$ . На інтервалах  $[bnD2, tD]$  та  $[bnR2, tR]$ , а також в межах  $bnU1$  та  $bnR1$  пружна залишкова деформація визначається різницею між повною та пластичною залишковими деформаціями після зварювання шва 2, причому пластична залишкова деформація на цих інтервалах дорівнює пластичній деформації для стадії нагрівання при зварю-

ванні шва 2. Для решти площі поперечного перерізу обох полиць та правої стінки поза межами названих інтервалів, а також лівої стінки пружна залишкова деформація дорівнює повній залишковій деформації для згаданих конструктивних елементів.

Таким чином, описаний вище більш-менш детально механізм пружно-пластичного деформування стержня симетричного коробчастого поперечного перерізу з двома поздовжніми швами при послідовному їх зварюванні дає можливість записати в загальному вигляді такі чотири системи рівнянь:

$$\begin{cases} N_{1h} = 0, & Mx_{1h} = 0, & My_{1h} = 0, \\ \varepsilon_{eh}U1(x = B - bnU1) + \varepsilon_s = 0, \\ \varepsilon_{eh}R1(y = H - bnR1) + \varepsilon_s = 0. \end{cases}, \quad (1)$$

$$\begin{cases} N_{1r} = 0, & Mx_{1r} = 0, & My_{1r} = 0, \\ \varepsilon_{er}U1(x = B - bB) - \varepsilon_s = 0, \\ \varepsilon_{er}R1(y = H - bH) - \varepsilon_s = 0. \end{cases}, \quad (2)$$

$$\begin{cases} N_{2h} = 0, & Mx_{2h} = 0, & My_{2h} = 0, \\ \varepsilon_{eh}D2(x = B - bnD2) + \varepsilon_s = 0, \\ \varepsilon_{eh}R2(y = bnR2) + \varepsilon_s = 0, \\ \varepsilon_{eh}U2(x = B - wB) - \varepsilon_s = 0, \\ \varepsilon_{eh}R2(y = H - bH) - \varepsilon_s = 0. \end{cases}, \quad (3)$$

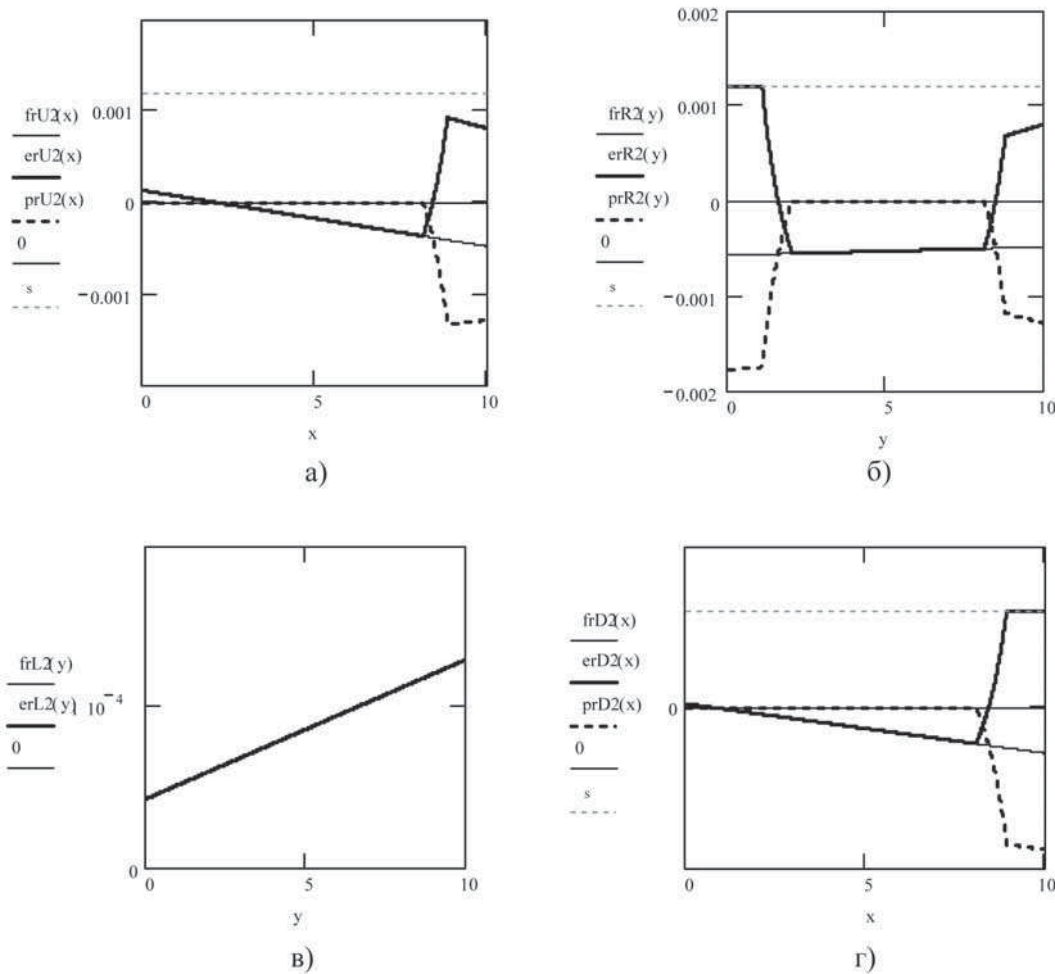
$$\begin{cases} N_{2r} = 0, & Mx_{2r} = 0, & My_{2r} = 0, \\ \varepsilon_{er}D2(x = B - tD) - \varepsilon_s = 0, \\ \varepsilon_{er}R2(y = tR) - \varepsilon_s = 0. \end{cases}. \quad (4)$$

Розгорнута форма систем (1)...(4) в роботі не наводиться у зв'язку з їх громіздким виглядом.

З метою перевірки працездатності розробленого алгоритму розрахунку розв'язували модельну задачу при таких початкових даних: розміри поперечного перерізу стержня по середній лінії контуру —  $B = 10$  см,  $H = 10$  см, товщина полиць і стінок  $\delta = 0,5$  см,  $\varepsilon_s = 1,2 \cdot 10^{-3}$ ,  $\alpha = 12 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$ ,  $a = 0,081$  см<sup>2</sup>/сек,  $q_n = 3,6 \cdot 10^3$  Дж/см<sup>2</sup>·сек<sup>2</sup>·°C, погонна енергія зварювання швів 1 і 2  $\lambda = 0,42$  Дж/см. Результати розрахунку деформацій в залишковому стані після зварювання обох швів наведені на рис 2.

Порівнюючи рис. 2, а з рис. 2, з і зіставляючи їх з рис. 2, б, можна зробити висновок, що в залишковому стані після зварювання обох швів площина вигину стержня практично співпадає з головною віссю  $X_0$  поперечного перерізу стержня, оскільки повна залишкова деформація правої стінки майже рівномірно розподілена по ширині стінки. Це означає, що для теплової правки залишкового прогину треба симетрично відносно





**Рис. 2.** Деформації в залишковому стані після зварювання шва 2:  
 а – пояс верхній; б – стінка права; в – стінка ліва; г – пояс нижній

Позначення деформацій на рис. 2

Деформація	Верхній пояс	Нижній пояс	Стінка ліва	Стінка права
Повна	$\varepsilon frU2(x)$	$\varepsilon frD2(x)$	$\varepsilon frL2(x)$	$\varepsilon frR2(x)$
Пружна	$\varepsilon erU2(x)$	$\varepsilon erD2(x)$	$\varepsilon erL2(x)$	$\varepsilon erR2(x)$
Пластична	$\varepsilon prU2(x)$	$\varepsilon prD2(x)$	$\varepsilon prL2(x)$	$\varepsilon prR2(x)$

осі  $X_0$  нагрівати зосереджено-рухомим джерелом зону деякої ширини  $bL$  на лівій стінці стержня вздовж всієї його довжини до необхідної температури, однакової по всій ширині  $bL$ . Залишкова сумарна усадочна сила від зварювання двох швів

$$P_{ycSum} = \delta E \left( \int_0^B \varepsilon prU2(x) dx + \int_0^B \varepsilon prD2(x) dx + \int_0^H \varepsilon prR2(y) dy \right) = -9,289 \cdot 10^3 \text{ кН.}$$

Координата по осі  $X$  в системі  $XOY$  точки прикладення  $P_{ycSum}$

$$xP_{ycSum} = \frac{\int_0^B \varepsilon prU2(x) x dx + \int_0^B \varepsilon prD2(x) x dx + B \int_0^H \varepsilon prR2(y) dy}{\int_0^B \varepsilon prU2(x) dx + \int_0^B \varepsilon prD2(x) dx + \int_0^H \varepsilon prR2(y) dy} = -9,632 \text{ см.}$$



Координата в системі  $XOY$  центра перерізу стержня  $xF = 0,5B = 5$  см, момент інерції відносно осі  $Y_0$  перерізу стержня  $I_{Y_0} = 333,542$  см<sup>4</sup>. Ексцентриситет  $e$  прикладення  $P_{ycSum}$  по відношенню до центра перерізу стержня  $e = xF - xP_{ycSum} = -4,632$  см.

Залишковий прогин стержня після зварювання двох швів на довжині  $L = 1000$  см.

$$f_{res} = \frac{P_{ycSum} \cdot \Delta \cdot L^2}{8 \cdot E \cdot I_{Y_0}} = 11,43 \text{ см.}$$

Як бачимо з розрахунків, прогин балки внаслідок зварювання швів є занадто великим, запобігти його утворенню оптимізацією режимів зварювання в даному випадку принципово неможливо з причини розташування обох швів у правій від осі  $Y_0$  напівплощині перерізу стержня і тому зарадити справі можна лише тепловою правкою, розрахувавши попередньо значення технологічних параметрів правки.

Повна деформація на правій стінці (рис. 2, б) після зварювання швів розподілена по її ширині дещо нерівномірно. Це означає, що зону нагрівання завширшки  $bL$  для правки на лівій стінці необхідно на деяку величину зміщувати з осьової лінії лівої стінки (вісь  $X_0$ ) вгору в сторону додатного напрямку осі  $Y_0$ . Координату по осі  $Y$  центра зони нагрівання для правки на лівій стінці в системі  $XOY$  позначимо  $S$ . Оскільки нагрів для правки спричиняє подальший поворот площини повної деформації стержня в сторону заварених швів, не варто очікувати при цьому зміни залишкової пластичної деформації в ЗПДС швів 1 і 2. В залишковому стані після правки повна деформація перерізу стержня має бути рівномірно розподіленою і позначимо її як  $nr$ . Максимальна пружна залишкова деформація розтягу після правки в ЗПДС швів зазвичай обмежується величиною  $\varepsilon_s$ . На стадії охолодження після правки в ЗПДС швів теоретично має відбуватись пластична деформація видовження (принаймні в ЗПДС шва 2). З цієї причини в залишковому стані з'являється чотири невідомих, а саме значення ширини  $sUr$ ,  $sDr$ ,  $sRUr$ ,  $sRDr$  зони пластичного видовження в сторону від осі шва відповідно для верхнього та нижнього поясів, а також зверху та знизу для правої стінки. Крім названих є ще три невідомих:  $bL$  — ширина зони нагрівання для правки на лівій стінці,  $S$  — координата центру зони нагрівання для правки,  $nr$  — повна залишкова деформація після правки. Отже, визначальна система рівнянь буде складатись із семи рівнянь: трьох рівнянь рівноваги — для осьової сили та згинальних моментів відносно осей  $X$  і  $Y$  та чотирьох рівнянь для умов пластичності на межі зон пластичного видовження на стадії охолод-

ження після правки. Детальний і конкретний запис системи рівнянь принципів ускладнень не містить, але є досить громіздким і тому в роботі не приводиться. Система розв'язується в математичному пакеті MathCAD. Результати розв'язування представлені на рис. 3.

Після розв'язування задачі для залишкового стану розв'язуємо задачу для стадії нагрівання при теплової правці. В координатах  $XOY$  із системи трьох рівнянь рівноваги для осьової сили та двох згинальних моментів знаходимо параметри  $cr$ ,  $dr$ ,  $er$  повної деформації для поясів —  $\varepsilon_{fhr}U(x) = er + (dr - cr) \cdot B \cdot x^{-1}$ ,  $\varepsilon_{fhr}D(x) = cr + (dr - cr) \cdot B \cdot x^{-1}$  та стінок —  $\varepsilon_{fhr}R(y) = dr + (er - cr) \cdot H \cdot y^{-1}$ ,  $\varepsilon_{fhr}L(y) = cr + (er - cr) \cdot H \cdot y^{-1}$  розрахункового перерізу стержня. Для трьох невідомих  $cr$ ,  $dr$ ,  $er$ . Результати розв'язування подані на рис. 4.

Далі визначаємо температуру нагрівання для правки на ширині зони  $bL$ . Записуємо залежність для температурної деформації в зоні нагрівання для правки у вигляді:

$$\varepsilon_{TL}(y) = cr + \frac{er - cr}{H} \cdot y - (-\varepsilon_s) - (nr - \varepsilon_s). \quad (9)$$

Поділивши праву частину (9) на коефіцієнт  $\alpha$ , отримаємо залежність для температури нагрівання:

$$T(x) = \frac{1}{\alpha} \left( cr + \frac{er - cr}{H} \cdot y + 2\varepsilon_s - nr \right). \quad (10)$$

За розрахунками для нашої задачі на інтервалі  $bL$  температура змінюється за лінійним законом від  $\sim 309^\circ\text{C}$  до  $\sim 324^\circ\text{C}$ . Середня температура становить близько  $\sim 316^\circ\text{C}$ . Величина сумарної усадочної сили  $P_{yc}$  після теплової правки становить  $-17,27$  кН, а залишковий прогин  $f_r$  на критичній довжині стержня  $L_{кр} = 8,94$  м дорівнює  $0,022$  см, що практично означає повну його відсутність.

Таким чином, задача теплової правки прогину остаточно розв'язана.

### Висновки

1. На основі методу складних перерізів [1] для визначення залишкового напружено-деформованого стану при зварюванні поздовжніх швів односторонніх зварних конструкцій вперше розроблено алгоритм розрахунку залишкового прогину балок коробчастого поперечного перерізу від зварювання двох поздовжніх швів, а також технологічних параметрів теплової правки балок з метою усунення залишкового прогину. Характерною особливістю розробленого алгоритму є супутній моніторинг результатів розрахунку кінетики

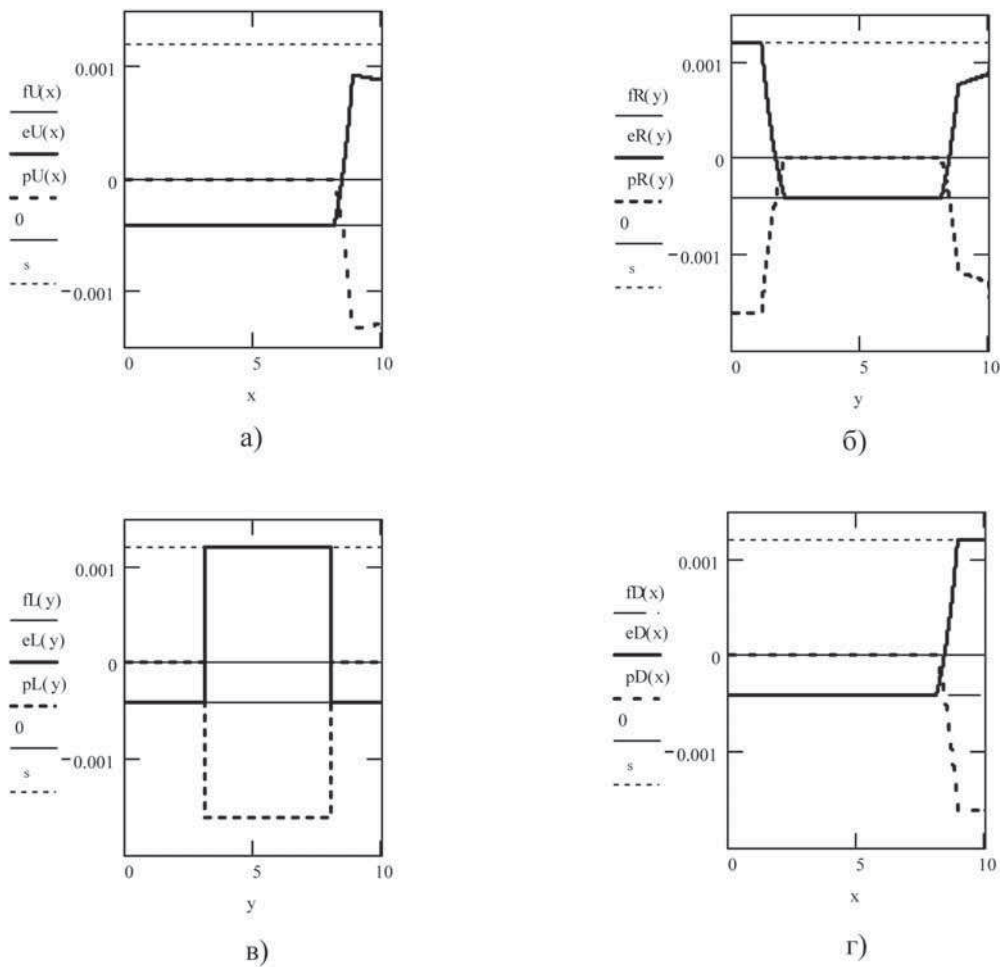


Рис. 3. Деформації в залишковому стані після теплової правки:  
 а – пояс верхній; б – стінка права; в – стінка ліва; г – пояс нижній

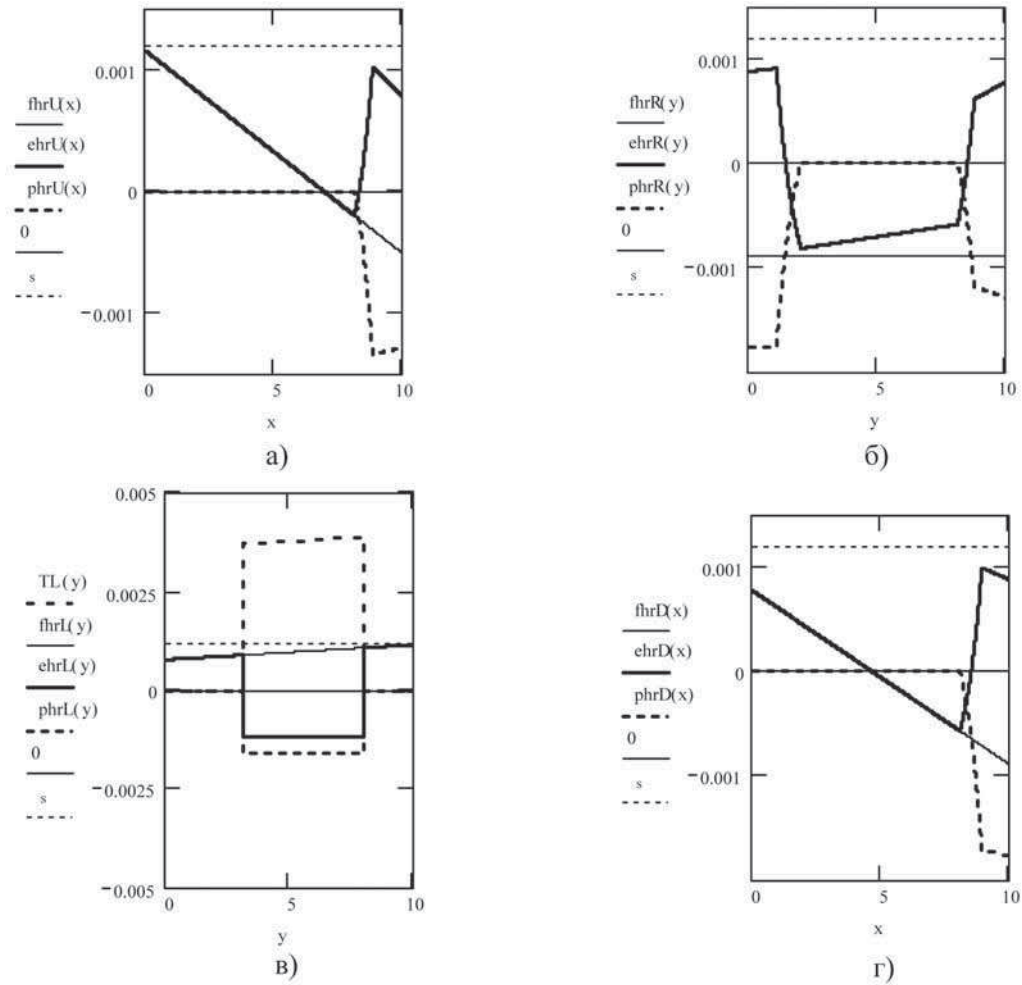
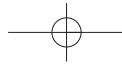
Позначення деформацій на рис. 3

Деформація	Верхній пояс	Нижній пояс	Стінка ліва	Стінка права
Повна	$\epsilon_{fr}U(x)$	$\epsilon_{fr}D(x)$	$\epsilon_{fr}L(x)$	$\epsilon_{fr}R(x)$
Пружна	$\epsilon_{er}U(x)$	$\epsilon_{er}D(x)$	$\epsilon_{er}L(x)$	$\epsilon_{er}R(x)$
Пластична	$\epsilon_{pr}U(x)$	$\epsilon_{pr}D(x)$	$\epsilon_{pr}L(x)$	$\epsilon_{pr}R(x)$

пружно-пластичних деформацій при зварюванні кожного шва, що дає можливість уникати, в межах точності метода складних перерізів [1], помилок у процесі розрахунку.

2. При алгебраїзації різних систем рівнянь алгоритму розрахунку одномірних зварних конструкцій конкретних поперечних перерізів типовою помилкою початкової версії уявлене про механізм пружно-пластичного деформування при зварюванні послідовних (після першого) зварних швів є неврахування додаткової пластичної деформації

в деяких зонах пластичних деформацій скорочення попередньо зварених швів і, як наслідок, перевищення залишковою пружною деформацією в цих зонах межі  $\epsilon_s$  після охолодження наступного поточного шва. Наявність помилки рекомендується контролювати поточним моніторингом розподілу пружних деформацій в елементах стержня при зварюванні швів і за необхідності перед остаточною розрахунком помилка оперативно усувається відповідною корекцією окремих рівнянь розрахункових систем.



**Рис. 4.** Деформації на стадії нагрівання при тепловій правці:  
*a* – пояс верхній; *b* – стінка права; *v* – стінка ліва; *z* – пояс нижній

Позначення деформацій на рис. 4

Деформація	Верхній пояс	Нижній пояс	Стінка ліва	Стінка права
Температурна	—	—	$\varepsilon_{TL}(y)$	—
Повна	$\varepsilon_{fhrU}(x)$	$\varepsilon_{fhrD}(x)$	$\varepsilon_{fhrL}(x)$	$\varepsilon_{fhrR}(x)$
Пружна	$\varepsilon_{ehrU}(x)$	$\varepsilon_{ehrD}(x)$	$\varepsilon_{ehrL}(x)$	$\varepsilon_{ehrR}(x)$
Пластична	$\varepsilon_{phrU}(x)$	$\varepsilon_{phrD}(x)$	$\varepsilon_{phrL}(x)$	$\varepsilon_{phrR}(x)$

**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.

