

Прохоренко О.В.

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут». Україна, м. Київ

РОЗРАХУНОК ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ТЕПЛОВОЇ ПРАВКИ ЗАЛИШКОВОГО ПРОГИНУ
ОДНОМІРНИХ ЗВАРНИХ КОНСТРУКЦІЙ.
Повідомлення 2. КОНСТРУКЦІЇ ДРУГОГО ТИПУ

Анотація

Запропоновано наближений інженерний метод розрахунку засобами математичного пакета MathCAD технологічних параметрів теплового виправлення залишкового прогину, обумовленого зварюванням подовжених швів одномірних зварених конструкцій першого типу [1]. Метод має особливо важливе значення для одномірних зварених конструкцій зниженої твердості, є практично безвитратним, енергозберігаючим, прогнозованим за отриманими результатами, придатним для інженерного використання.

Abstract

The approximate engineering method for calculation technological parameters thermal correcting of residual flexure one-dimensional first type welded designs [1] by mathematical package MathCAD facilities is proposed. This method have important matter for one-dimensional welded designs with low rigidity and practically be inexpensive, energy efficient, forecast by the expecting results, comfortable in use.

В даній статті продовжується тема попередньої роботи [1], але стосовно одномірних зварних конструкцій (ОЗК) другого типу. За визначенням [1] до другого типу віднесені ОЗК з двома або більшою кількістю зон пластичних деформацій скорочення (ЗПДС), які у поперечному перерізі конструкції розташовані на одній з центральних осей перерізу або симетрично до неї, але в різних напівплощинах перерізу, утворених другою його центральною віссю. Прикладом таких конструкцій може бути зварний двотавр з полицями різної ширини, який нижче буде розглянутий як модельна задача з метою апробації запропонованого методу розрахунку технологічних параметрів теплової правки залишкового прогину, зумовленого приварюванням до стінки двох полиць загалом різної ширини.

При тепловій правці ОЗК нагріву піддається опукла сторона конструкції, яка завжди знаходиться зі сторони ширшої полиці. Тут же зосереджена частина сумарної ЗПДС всіх швів. Таким чином, нагрівання опуклої сторони конструкції буде створювати умови для розвитку пластичних деформацій видовження у розташованій з цієї сторони ЗПДС від зварювання, оскільки внаслідок теплового розпору буде збільшуватись, порівняно із

залишковим станом після зварювання, нахил площини повної залишкової деформації до площини поперечного перерізу ОЗК. Тому максимальні пружні деформації розтягу в ЗПДС з опуклої сторони на стадії нагрівання будуть залишатись на рівні ϵ_s , що відповідає межі текучості σ_s матеріалу ОЗК. В ЗПДС з увігнутої сторони пружні залишкові деформації розтягу від зварювання будуть зменшуватись, а пластичні – залишатись без зміни. Такий механізм пружно-пластичного деформування на стадії нагрівання при тепловій правці зумовлює появу декількох невідомих у вигляді нових значень ширини зони пластичного видовження в ЗПДС з опуклої сторони і для їх визначення є можливість скласти відповідну кількість рівнянь системи на основі умов пластичності для граничних точок зон пластичного видовження в конструктивних елементах перерізу ОЗК. Для симетричної задачі, окрім згаданих рівнянь, в систему будуть входити ще два базових рівняння (для осьової сили і згинального моменту в розрахунковому перерізі ОЗК), яких недостатньо для розв'язування задачі, оскільки кількість базових невідомих дорівнює трьом (параметри g і d повної деформації $\epsilon_{fp}(x) = g \cdot x + d$ розрахункового перерізу на стадії нагрівання при правці і ширина (або напівширина) S зони нагріву). Отже, на стадії нагрівання задача не може бути розв'язана.

Проаналізуємо можливість розв'язання задачі шляхом попереднього розгляду залишкового стану після теплової правки. Однозначно відомо, що в цьому стані, за умови відсутності залишкового прогину, у поперечному перерізі ОЗК має бути рівномірно розподілена залишкова повна деформація $\epsilon_f = const$. У зв'язку з ймовірним пластичним видовженням на стадії охолодження після правки в ЗПДС з увігнутої сторони ОЗК, можуть з'явитись невідомі у вигляді нових значень ширини розповсюдження зони пластичного видовження в сторону від осі шва, кількість яких залежить від конкретної форми перерізу ОЗК і розподілу пружних та пластичних залишкових деформацій в згаданій ЗПДС. Всі ці питання необхідно відслідковувати і контролювати супутнім моніторингом процесу розрахунку при розв'язуванні конкретної задачі. Таким чином, якщо після зварювання маємо всього дві ЗПДС з центрами на центральній осі перерізу ОЗК, то для залишкового стану будемо мати такі невідомі: повну залишкову деформацію ϵ_f , ширину S зони нагріву для правки; одне або декілька, в залежності від конфігурації ЗПДС зварю-

вання, значень ширини зони деформацій пластичного видовження на стадії охолодження після правки і одне або декілька значень ширини зони деформацій пластичного видовження на стадії нагрівання для правки в ЗПДС з опуклої сторони ОЗК, які мали бути визначеними розв'язанням задачі лише на стадії нагрівання. Отже, попередній розгляд залишкового напружено-деформованого стану з метою його визначення також не може бути реалізованим.

Залишається єдиний вихід для побудови розв'язку задачі в цілому, який полягає у об'єднанні двох окремих систем рівнянь для стадії нагрівання і залишкового стану в одну замкнену систему з повною відповідністю кількості невідомих до кількості рівнянь об'єднаної системи.

Таким чином, для стадії нагрівання і залишкового стану загальна кількість базових невідомих дорівнює чотирьом – параметри g і d повної деформації розрахункового перерізу на стадії нагрівання при правці, ширина (або напівширина) S зони нагріву і значення повної деформації $\epsilon f = const$ у залишковому стані після правки. Для їх визначення у об'єднаній системі маємо відповідно чотири базові рівняння – по два для стадії нагрівання і залишкового стану, які складаються з рівнянь для осевої сили та згинального моменту розрахункового перерізу. Крім того, будемо мати ще певну кількість рівнянь у вигляді умов пластичності для граничних точок на межі зон пластичного видовження в ЗПДС швів, яке в ЗПДС з опуклої сторони ОЗК відбувається на стадії нагрівання, а в ЗПДС з увігнутої сторони – на стадії охолодження після теплової правки. Ця кількість рівнянь точно відповідає кількості невідомих у вигляді нових значень ширини зон пластичного видовження і завжди може бути складена.

З метою апробації розробленого методу розрахунку технологічних параметрів теплової правки ОЗК другого типу розглянемо в системі координат XOY (рис. 1) згадану вище модельну задачу стосовно розрахунку технологічних параметрів теплової правки залишкового прогину зварного двотавра з полицями різної ширини.

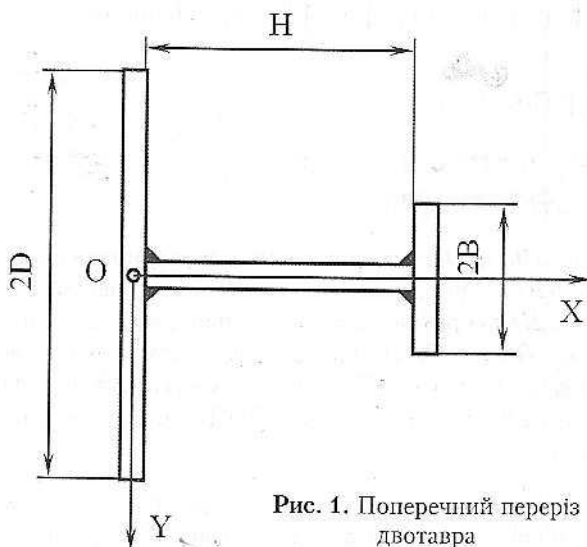


Рис. 1. Поперечний переріз двотавра

Нехай двотавр виготовляється з маловуглецевої сталі ВСт. 3сп ($\epsilon_s = 1,2 \cdot 10^{-3}$) при ширині полиць 44 см і 20 см, ширині ребра 20 см з однаковою їх товщиною $\delta = 1$ см і погонною енергією зварювання поздовжніх кутових швів $q_n = 1,36 \cdot 10^4$ Дж/см. Першочергово до ребра приварюється полиця меншої ширини, а потім більшої. За розрахунками на довжині 10 м, яка є меншою за критичну (17,86 м) для втрати стійкої форми рівноваги за Ейлером під дією сумарної усадочної сили, будемо мати залишковий прогин 1,163 см з опуклістю в сторону більш широкої полиці. З метою зменшення прогину треба збільшувати погонну енергію приварювання полиці більшої ширини, тобто швів другої черги. Оптимізація цієї погонної енергії за методом [2] показує, що її треба збільшити у 2,592 рази, порівняно з приварюванням полиці меншої ширини (параметр оптимізації $\psi = 2,592$). Таке занадто значне збільшення погонної енергії з технологічної точки зору є неприйнятним. З іншого боку, причини збільшення є зрозумілими. При більшій ширині однієї з полиць центр ваги перерізу двотавра суттєво зміщується в її сторону, а отже зменшується плече для усадочної сили в ЗПДС даної полиці та відповідний згинальний момент, який має зрівноважувати аналогічний момент в ЗПДС полиці меншої ширини. Тому треба створювати більшу площу ЗПДС в околі стиковки ширшої полиці з ребром, а отже необхідно збільшувати і погонну енергію зварювання для збільшення там усадочної сили. Крім того, треба мати на увазі, що більша ширина другої полиці значно збільшує момент інерції перерізу двотавра і тому для усунення навіть порівняно невеликого залишкового прогину у 1,163 см необхідно значно збільшити згинальний момент. Вочевидь, в таких випадках є доцільним застосування теплової правки конструкції шляхом зосереджено-рухомого нагріву в той чи інший спосіб вздовж всієї довжини конструкції визначених одного або декількох місць у поперечному перерізі конструкції з оптимально розрахованими технологічними параметрами нагрівання після зварювання поздовжніх швів.

Оскільки опуклість двотавра утворилась зі сторони полиці більшої ширини, то й нагрівати треба широкую полицю вздовж двох вільних її крайок. Як початкові дані, на основі розрахунку за методом складних перерізів [3] залишкового напружено-деформованого стану після приварювання обох полиць, маємо залежності для залишкових пластичних деформацій скорочення $\epsilon pr D2(y)$ у полиці завширшки $2D$, $\epsilon pr B2(y)$ у полиці завширшки $2B$ і $\epsilon pr H2(x)$ у ребрі завширшки H . З метою економії місця в даній статті конкретний вигляд залежностей для залишкових деформацій не наводимо. Розподіл повних, пружних і пластичних залишкових деформацій по ширині ребра і полиць показано на рис. 2–4.

Таким чином, для розв'язання задачі складаємо систему рівнянь, загальний вигляд якої буде таким:

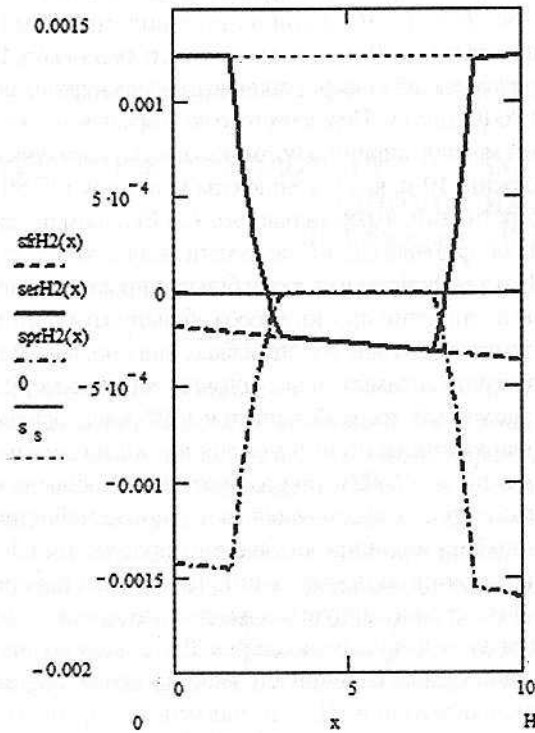


Рис. 2. Розподіл по ширині ребра повних $\epsilon_{fH2}(x)$, пружних $\epsilon_{eH2}(x)$ і пластичних $\epsilon_{prH2}(x)$ деформацій в залишковому стані

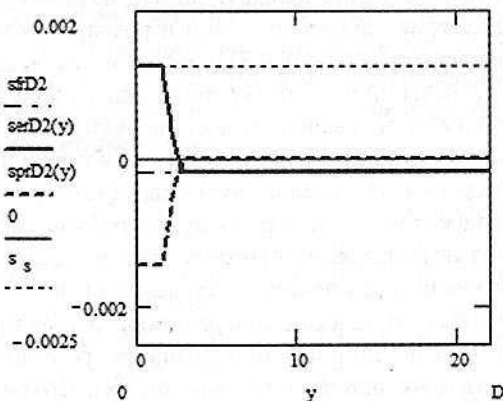


Рис. 3. Розподіл по ширині другої полиці повних $\epsilon_{fD2}(y)$, пружних $\epsilon_{eD2}(y)$ і пластичних $\epsilon_{prD2}(x)$ деформацій в залишковому стані

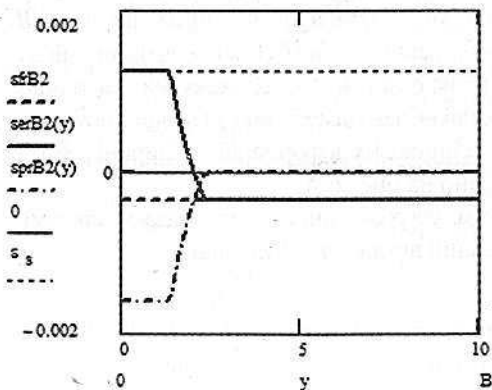


Рис. 4. Розподіл по ширині першої полиці повних $\epsilon_{fB2}(y)$, пружних $\epsilon_{eB2}(y)$ і пластичних $\epsilon_{prB2}(x)$ деформацій в залишковому стані

$$\begin{aligned}
 & 2 \left\{ \int_0^{sDh} (\epsilon_s) dy + \int_{sDh}^{bnD} [d - \epsilon_{prD2}(y)] dy + \int_{bnD}^{D-S} (d) dy + \right. \\
 & + \int_{D-S}^D (-\epsilon_s) dy \left. \right\} + \int_0^{sHDh} (\epsilon_s) dx + \int_{sHDh}^{bnH2} [gx + d - \epsilon_{prH2}(x)] dx + \\
 & + \int_{bnH2}^{H-bnH1} (gx + d) dx + \int_{H-bnH1}^H [gx + d - \epsilon_{prH2}(x)] dx + \\
 & 2 \left\{ \int_0^{bnB} [gH + d - \epsilon_{prB2}(x)] dy + \int_{bnB}^B (gH + d) dy \right\} = 0, \\
 & \int_0^{sHDh} \epsilon_s x dx + \int_{sHDh}^{bnH2} [gx + d - \epsilon_{prH2}(x)] x dx + \\
 & + \int_{bnH2}^{H-bnH1} (gx + d) x dx + \int_{H-bnH1}^H [gx + d - \epsilon_{prH2}(x)] x dx + \\
 & + 2 \left\{ \int_0^{bnB} [gH + d - \epsilon_{prB2}(x)] dy + \int_{bnB}^B (gH + d) dy \right\} H = 0, \\
 & d - \epsilon_{prD2}(sDh) - \epsilon_s = 0, \\
 & g \cdot sHDh + d - \epsilon_{prH2}(sHDh) - \epsilon_s = 0, \\
 & 2 \left\{ \int_0^{sDh} [\epsilon_f - (d - \epsilon_s)] dy + \int_{sDh}^{bnD} [\epsilon_f - \epsilon_{prD2}(y)] dy + \right. \\
 & + \int_{bnD}^{D-S} (\epsilon_f) dy + \int_{D-S}^D \epsilon_s dy \left. \right\} + \int_0^{sHDh} [\epsilon_f - (g \cdot x + d - \epsilon_s)] dx + \\
 & + \int_{sHDh}^{bnH2} [\epsilon_f - \epsilon_{prH2}(x)] dx + \int_{bnH2}^{H-bnH1} (\epsilon_f) dx + \\
 & + \int_{H-bnH1}^{H-sHB} [\epsilon_f - \epsilon_{prH2}(x)] dx + \int_{H-sHB}^H \epsilon_s dx + \\
 & + 2 \left\{ \int_0^{sB} (\epsilon_s) dy + \int_{sB}^{bnB} [\epsilon_f - \epsilon_{prB2}(y)] dy + \int_{bnB}^B (\epsilon_f) dy \right\} = 0, \\
 & \int_0^{sHDh} [\epsilon_f - (g \cdot x + d - \epsilon_s)] x dx + \int_{sHDh}^{bnH2} [\epsilon_f - \epsilon_{prH2}(x)] x dx + \\
 & + \int_{bnH2}^{H-bnH1} (\epsilon_f) x dx + \int_{H-bnH1}^{H-sHB} [\epsilon_f - \epsilon_{prH2}(x)] x dx + \\
 & + \int_{H-sHB}^H (\epsilon_s) x dx + 2 \left\{ \int_0^{sB} (\epsilon_s) dy + \int_{sB}^{bnB} [\epsilon_f - \epsilon_{prB2}(y)] dy + \right. \\
 & + \left. \int_{bnB}^B (\epsilon_f) dy \right\} H = 0, \\
 & \epsilon_f - \epsilon_{prH2}(H - sHB) - \epsilon_s = 0, \\
 & \epsilon_f - \epsilon_{prB2}(sB) - \epsilon_s = 0.
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

де $sDh, sHDh$ – ширина зони пластичного видовження на стадії нагрівання для правки відповідно для полиці $2D$ і ребра H в межах ЗПДС приварювання полиці $2D$ до ребра H ; sHB, sB – ширина зони пластичного видовження на стадії охолодження після правки відповідно для полиці $2B$ і ребра H в межах ЗПДС приварювання полиці

2B до ребра H. Результатом розв'язання системи (1) у математичному пакеті MathCAD є такі значення невідомих $g = -3,457 \cdot 10^{-5}$, $d = -2,492 \cdot 10^{-5}$, $sDh = 1,691$ см, $sHDh = 1,675$ см, $sHB = 1,422$ см, $sB = 1,366$ см, $\epsilon f = -3,469 \cdot 10^{-4}$ см, $S = 2,693$ см.

На заключному етапі розрахунків визначаємо оптимальну температуру одночасного нагріву двох поздовжніх крайок ширшої полиці 2D на ширині $\sim S = 2,7$ см. Оскільки повна деформація полиці 2D на стадії нагрівання для правки є однаковою по ширині 2D і визначається параметром $d = -2,492 \cdot 10^{-5}$, це означає, що і температура T нагріву для правки теж буде однаковою по ширині S і її можна визначити за залежністю

$$T = \frac{1}{\alpha} (d + 2\epsilon_s - \epsilon f), \quad (2)$$

де α – коефіцієнт лінійного розширення.

За розрахунками $\sim T = 235^\circ\text{C}$. Розподіл повної, пружної і пластичної деформацій у полицях та ребрі двотавра в залишковому стані після правки показано на рис. 5–7.

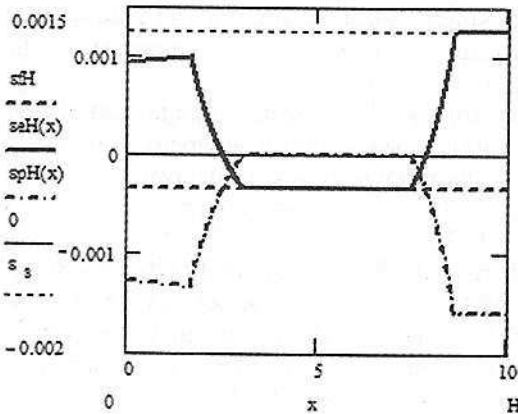


Рис. 5. Розподіл по перерізу ребра залишкових повної ϵf , пружної $\epsilon eH(x)$ і пластичної $\epsilon pH(x)$ деформацій після теплової правки

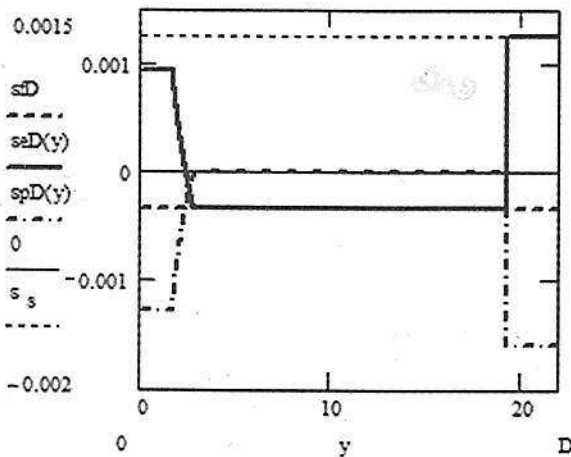


Рис. 6. Розподіл по перерізу широкої полиці залишкових повної ϵf , пружної $\epsilon eD(y)$ і пластичної $\epsilon pD(y)$ деформацій після теплової правки

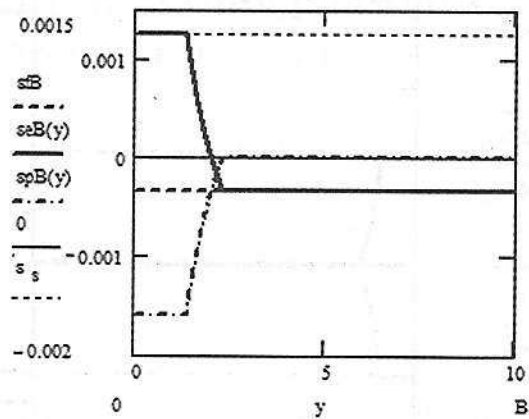


Рис. 7. Розподіл по перерізу вузької полиці залишкових повної ϵf , пружної $\epsilon eB(y)$ і пластичної $\epsilon pB(y)$ деформацій після теплової правки

В залишковому стані після правки сумарна усадочна сила від зварювання і правки дорівнює 535,5 кН, залишковий прогин $-5,941 \cdot 10^{-4}$ см, тобто практично дорівнює нулю.

Розподіл повної $\epsilon fhH(x)$, пружної $\epsilon ehH(x)$ і пластичної $\epsilon phH(x)$ деформацій у ребрі двотавра на стадії нагрівання при правці показано на рис. 8. Там же з метою порівняння показані повна $\epsilon fh2(x)$ та пластична $\epsilon ph2(x)$ деформації для залишкового стану після приварювання обох полиць.

Розподіл температурної $\epsilon T(y)$, повної $\epsilon fhD(y)$, пружної $\epsilon ehD(y)$ і пластичної $\epsilon phD(y)$ деформацій у широкій полиці, яка нагрівалась при правці двотавра, показано на рис. 9. На рис. 10 показано для стадії нагрівання при правці розподіл повної ϵfhB , пружної $\epsilon ehB(y)$ і пластичної $\epsilon phB(y)$ деформацій у вузькій полиці.

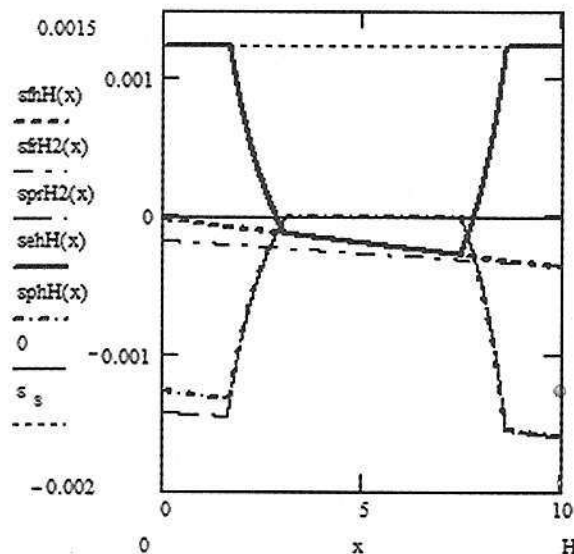


Рис. 8. Розподіл деформацій ширині ребра двотавра

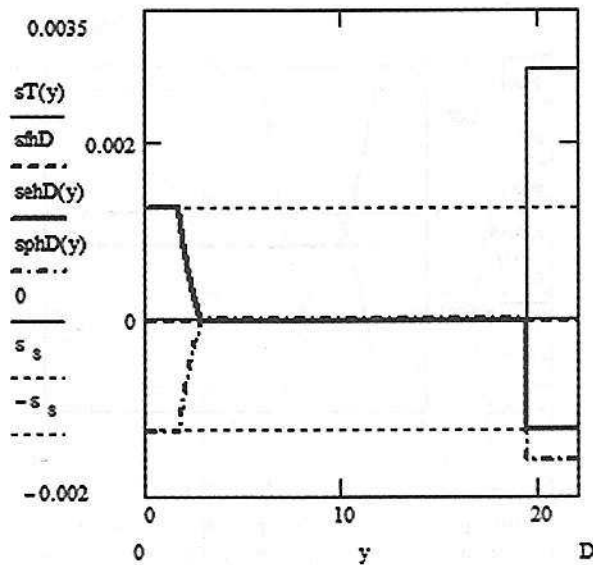


Рис. 9. Розподіл деформацій у широкій полиці двотавра на стадії нагрівання при тепловій правці

Таким чином, запропонований наближений інженерний метод розрахунку технологічних параметрів теплової правки залишкового прогину ОЗК другого типу, такою ж мірою, як і аналогічний метод для ОЗК першого типу [1], є достатньо простим і зручним для застосування у практичній діяльності інженерно-технічних працівників зварювального виробництва при виготовленні згаданих конструкцій.

Література

1. Прохоренко О.В. Розрахунок технологічних параметрів теплової правки залишкового прогину одномірних

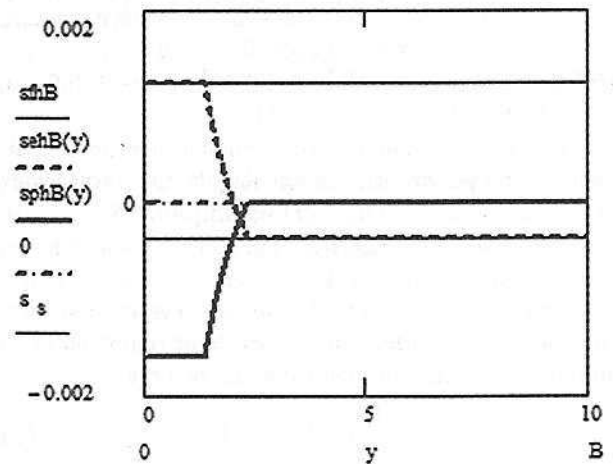


Рис. 10. Розподіл деформацій у широкій полиці двотавра на стадії нагрівання при тепловій правці

зварних конструкцій. Повідомлення 1. Конструкції першого типу // Технологические системы. – 2006. – №2. – С. 55–59.

2. Прохоренко О.В. Оптимізація погонної енергії зварювання поздовжніх швів одномірних зварних конструкцій за критерієм відсутності деформації залишкового прогину // Технологические системы. – 2006. – №1. – С. 62–71.

3. 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.