

Прохоренко В.М., Прохоренко О.В.

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

ЗАСТОСУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ОСНАТКИ ДЛЯ ЗМЕНШЕННЯ ЗАЛИШКОВОГО ПРОГИНУ ПРИ ЗВАРЮВАННІ ПОЗДОВЖНИХ ШВІВ ОДНОМІРНИХ ЗВАРНИХ КОНСТРУКЦІЙ

Анотація

На прикладі смуги з подовжньою кромкою, що нагрівається, викладений алгоритм і узагальнені результати порівняльного розрахункового дослідження методом складних перетинів [1] залишкового напружено-деформованого стану одновимірних зварних конструкцій при зварці подовжніх швів із застосуванням технологічного оснащення, що перешкоджає вигину при нагріві і охолодженні конструкції, і без неї. Отримані результати свідчать про доцільність застосування технологічного оснащення даного типу з метою зменшення залишкового прогину подовжньої осі одновимірних зварних конструкцій при зварці подовжніх швів.

Abstract

By the example of bar with heating edge to set out the algorithm and generalized results of comparative calculated analysis by the method of non-planar section [1] of residual stress-deformation state one-dimensional welded construction at welding longitudinal seams with application machining attachments opposing the bend at heating and cooling construction and without she.

Finded results testify appropriateness of given type application machining attachments for the purpose residual bending deflection of one-dimensional welded construction longitudinal axis reducing at welding longitudinal seams.

Одномірні зварні конструкції (ОЗК) широко застосовуються у різних галузях промисловості. Поперечний переріз ОЗК (у подальшому просто переріз) переважно буває симетричним з однією чи двома осями симетрії, хоч може бути і несиметричним. В якості конструктивних елементів при виготовленні ОЗК використовуються металеві полоси, гнуті профілі та профільний прокат, які з'єднуються між собою в єдине ціле подовжніми швами.

В залежності від розмірів перерізу конструктивних елементів ОЗК, погонної енергії зварювання подовжніх швів та ексцентриситетів розташування у перерізі ОЗК в системі його головних осей центра сумарного залишкового об'єму подовжнього пластичного скорочення ОЗК можуть

вигинатись з утворенням значного за величиною прогину подовжньої осі. На стадії нагрівання при зварюванні прогин утворюється внаслідок дії розпірної сили, в залишковому стані – внаслідок дії усадочної сили. Розпірна сила від температурного навантаження при зварюванні і усадочна сила від залишкових подовжніх пластичних деформацій скорочення є осьовими силами, тобто такими, що діють вздовж осевої лінії ОЗК. Мірою жорсткості до утворення прогину ОЗК є так звана приведена площа перерізу ОЗК

$$F_{pr} = \frac{1}{\frac{1}{F} + \frac{y^2}{I_z} + \frac{z^2}{I_y}}, \quad (1)$$

де F – площа перерізу ОЗК; y і z – координати точки прикладення осевої сили у перерізі в системі центральних осей YZ симетричного перерізу; I_y , I_z – осьові моменти інерції перерізу ОЗК. У випадку несиметричних перерізів замість центральних осей перерізу YZ розглядаються головні осі перерізу UV і тоді

$$F_{pr} = \frac{1}{\frac{1}{F} + \frac{u^2}{I_v} + \frac{v^2}{I_u}}, \quad (2)$$

де значення координат u , v по осях U , V і осьових моментів I_u , I_v відносно осей UV аналогічні координатам y , z і моментам інерції I_z , I_y в осях YZ .

Кут β повороту головних осей перерізу UV відносно центральних осей YZ визначається залежністю

$$\beta = \frac{1}{2} \arctg \left(\frac{2I_{yz}}{I_z - I_y} \right), \quad (3)$$

де відцентровий момент інерції перерізу ОЗК

$$I_{yz} = \int_F yz dF. \quad (4)$$

Часто здатність ОЗК до утворення прогину при осьовому навантаженні характеризують так званою податливістю D , яка є оберненою величиною до приведеної площі, тобто

$$D = \frac{1}{F} + \frac{y^2}{I_z} + \frac{z^2}{I_y}, \quad (5)$$

або

$$D = \frac{1}{F} + \frac{u^2}{I_v} + \frac{v^2}{I_u} \quad (6)$$

З теорії напружено-деформованого стану при зварюванні [2] відомо, що технологічна оснастка впливає на кінетику пружно-пластичного деформування при зварюванні, причому вплив може бути як позитивним, так і негативним. У науковому відношенні дане питання до сьогодні залишається мало дослідженим, особливо з огляду на велику різноманітність зварних конструкцій та значення цього питання для розробки наукових принципів проектування технологічної оснастки з метою зменшення негативного впливу термомеханічних процесів при зварюванні на залишкові переміщення зварних виробів.

Кафедра зварювального виробництва НТУУ "КПІ" упродовж останніх років плідно займається проблемою підвищення точності виготовлення ОЗК при зварюванні поздовжніх швів.

Дана наукова стаття започатковує новий цикл досліджень впливу технологічної оснастки на величину залишкового прогину ОЗК, особливо для випадків відносно невеликої їх жорсткості.

В статті розглядається найпростіша у математичному відношенні класична задача теорії напружень і деформацій при зварюванні, пов'язана з нагрівом однієї з поздовжніх крайок штаби деякої довжини з прямокутним поперечним перерізом. Можна сподіватись, що вичерпне дослідження даної задачі створить належне підґрунтя для продовження подібних досліджень інших задач, що відносяться до класу задач ОЗК.

В залежності від кількості ступенів свободи для переміщень ОЗК в технологічній оснастці при нагріванні та охолодженні в процесі зварювання оснастка може бути умовно поділена на декілька типів. Зокрема, у даній статті розглядається нагрівання і охолодження штаби в оснастці першого типу, яка не перешкоджає штабі при нагріванні та охолодженні змінювати свою довжину, але перешкоджає утворенню її прогину, тобто забезпечує як при нагріванні, так і при охолодженні рівномірність розподілу по перерізу штаби повної деформації.

Будемо вважати, що нагрівання крайки штаби відбувається за схемою потужного швидкорухомого лінійного джерела. Температура в штабі визначається відомою [2] в теорії теплових процесів при зварюванні залежністю

$$T(y, t) = \frac{q_n}{\delta \sqrt{\pi \lambda c \rho t}} \exp\left(-\frac{y^2}{4at} - bt\right), \quad (7)$$

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

корисної дії дуги; δ – товщина пластини; $c\rho$ – об'ємна теплоємність; λ – коефіцієнт теплопровідності; a – коефіцієнт температуропровідності; $b = 2\alpha_T/(c\rho\delta)$ – коефіцієнт температуровіддачі; α_T – коефіцієнт повної поверхневої тепловіддачі; t – час, що пройшов від моменту перетину джерелом нагрівання поперечного перерізу, в якому знаходиться точка штаби на відстані y від крайки, яка нагрівається.

Отже, розглянемо вертикально зорієнтовану штабу (рис. 1) завдовжки L , завширшки B і завтовшки δ , ліва крайка якої нагрівається знизу вверх рухомим джерелом з погонною енергією q_n , яке рухається зі швидкістю v .

Прямокутну систему координат XOY у площині штаби з початком O у точці розміщення джерела нагрівання обираємо так, щоб її осі X та Y відповідно були спрямовані вздовж штаби вверх та впоперек праворуч.

Розв'язування задачі виконаємо за методом складних перерізів [1], який серед відомих інших методів розрахунку лінійного напружено-деформованого стану забезпечує найбільшу точність

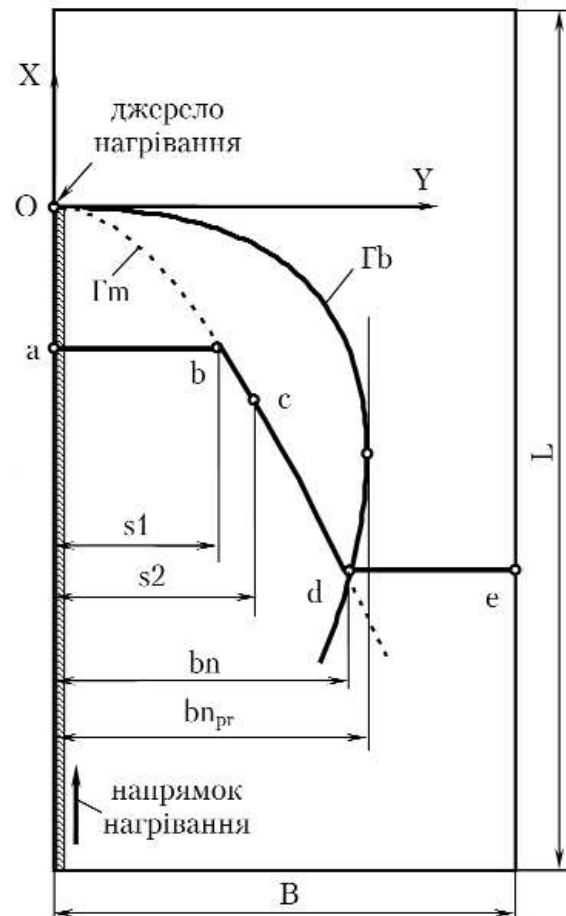


Рис. 1. Схема розміщення складного розрахункового перерізу $abcde$ при нагріванні лівої крайки довгої штаби прямокутного поперечного перерізу $B \times \delta$

розрахунків. На рис. 1 складний розрахунковий переріз позначено як *abcde*. Частково на ділянці *bcd* даний переріз співпадає з контуром Γ_m , який є проекцією на площину штаби рухомої квазістаціонарної просторової кривої максимальних температур. Там же показаний контур Γ_b , верхня частина якого від точки розміщення джерела нагрівання і до точки дотику з дотичною є геометричним місцем точок початку пластичного скорочення. Відстані s_1 та s_2 від нагрітої крайки відповідно визначають положення точок з максимальною температурою 600 та 500°C.

Точка *d* перетину контурів Γ_m та Γ_b визначає наближено ширину bn зони пластичних деформацій скорочення. Точне значення ширини цієї зони bn_{pr} визначається точкою дотику дотичної до контуру Γ_b , але, як показують численні розрахунки для різних геометричних розмірів штаби та режимів нагріву її крайки, різниця між bn та bn_{pr} не перевищує 0,5%, а розрахунок bn набагато простіший за розрахунок bn_{pr} . На стадії нагрівання крайки пружна деформація на лінії *ab* дорівнює нулю з причини втрати металом пружних властивостей, оскільки температура в точках лінії *ab* не нижче 600°C (мова йде про конструкційні низько вуглецеві та низько леговані сталі). На лінії *bc* пружна деформація відповідає температурній залежності межі текучості і за діаграмою Прандтля [2] лінійно змінюється від нуля при 600°C (точка *b*) до максимального значення при 500°C (точка *c*). На ділянці *cd* пружна деформація скорочення дорівнює $-\epsilon_s$, що відповідає значенню межі текучості $-\sigma_s$ матеріалу штаби. На лінії *de* пружна деформація $\epsilon eh_{очн}(y)$ визначається різницею між повною $\epsilon fh_{очн} = \text{const}$ та температурною $\epsilon t(y)$ деформаціями, тобто $\epsilon eh_{очн}(y) = \epsilon fh_{очн} - \epsilon t(y)$.

Таким чином, для складного перерізу *abcde* на стадії нагрівання можна записати в загальному вигляді систему рівнянь (8), розв'язання якої визначає температурні, пружні і пластичні деформації у точках складного перерізу, а також і повну деформацію у перерізі визначення $bn_{очн}$ та значення ширини bn зони пластичних деформацій скорочення:

$$\left. \begin{aligned} \int_0^B \epsilon eh_{очн}(y) dy &= 0, \\ \epsilon eh_{очн}(bn) + \epsilon_s &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Розгорнутий вигляд системи (8):

$$\left. \begin{aligned} \int_{s_1}^{s_2} \left(-\epsilon_s \cdot \frac{y-s_1}{s_2-s_1} \right) dy + \int_{s_2}^{bn} (-\epsilon_s) dy + \int_{bn}^B [\epsilon fh_{очн} - \epsilon t(y)] dy &= 0, \\ \epsilon fh_{очн} - \epsilon t(bn) + \epsilon_s &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

де

$$\epsilon t(y,t) = \frac{\alpha q_n}{\delta \sqrt{\pi \lambda c \rho t}} \cdot \exp\left(-\frac{y^2}{4at}\right),$$

$$t = \frac{1}{\omega} \left(\sqrt{a^2 + \omega \cdot y^2} - a \right) \quad \omega = 4ab, \quad \alpha - \text{коефіцієнт}$$

лінійного розширення матеріалу штаби.

Результатом розв'язання системи (9) є значення невідомих $\epsilon fh_{очн} = \text{const}$ та $bn_{очн}$.

Залежності для деформацій у точках перерізу *abcde* на стадії нагрівання:

$$\epsilon fh_{очн} = \text{const}, \quad bn_{очн} \leq y \leq B \quad (10)$$

$$\epsilon t(y) = \begin{cases} \alpha 600, & 0 \leq y \leq s_1 \\ \frac{\alpha q_n \sqrt{\omega}}{\delta \sqrt{\pi \lambda c \rho}} \cdot [F1(y) + F2(y)], & s_1 \leq y \leq bn_{очн}, \\ \frac{\alpha q_n}{\delta \sqrt{\pi \lambda c \rho t}} \cdot \exp\left(-\frac{y^2}{4at} - bt\right), & bn_{очн} \leq y \leq B \end{cases} \quad (11)$$

$$\epsilon eh_{очн}(y) = \begin{cases} 0, & 0 \leq y \leq s_1 \\ -\epsilon_s \cdot \frac{y-s_1}{s_2-s_1}, & s_1 \leq y \leq s_2 \\ -\epsilon_s, & s_2 \leq y \leq bn_{очн} \\ \epsilon fh_{очн} - \frac{\alpha q_n}{\delta \sqrt{\pi \lambda c \rho t}} \cdot \exp\left(-\frac{y^2}{4at} - bt\right), & bn_{очн} \leq y \leq B \end{cases} \quad (12)$$

$$\epsilon ph_{очн}(y) = \begin{cases} \epsilon fh_{очн} - \alpha 600, & 0 \leq y \leq s_1 \\ \epsilon fh_{очн} - \frac{\alpha q_n \sqrt{\omega}}{\delta \sqrt{\pi \lambda c \rho}} \cdot [F1(y) + F2(y)] + \epsilon_s \cdot \frac{y-s_1}{s_2-s_1}, & s_1 \leq y \leq s_2 \\ \epsilon fh_{очн} - \frac{\alpha q_n \sqrt{\omega}}{\delta \sqrt{\pi \lambda c \rho}} \cdot [F1(y) + F2(y)] + \epsilon_s, & s_2 \leq y \leq bn_{очн} \\ 0, & bn_{очн} \leq y \leq B \end{cases} \quad (13)$$

$$F1(y) = \frac{\exp\left[\frac{1}{2} - \frac{2by^2}{f(y)}\right]}{[f(y)]^{0.5}},$$

$$F2(y) = \frac{\exp\left[\frac{1}{2} - \frac{2b(2B-y)^2}{f(2B-y)}\right]}{[f(2B-y)]^{0.5}},$$

$$f(y) = \left(\sqrt{a^2 + \omega \cdot y^2} - a \right) \omega^{-1},$$

$$f(2B-y) = \left(\sqrt{a^2 + \omega \cdot (2B-y)^2} - a \right) \omega^{-1}.$$



Охолодження штаби відбувається в технологічній оснастці. Далі необхідно розглянути напружено-деформований стан штаби, коли вона ще знаходиться у оснастці. Для цього складаємо відповідну систему рівнянь. В залишковому стані всі перерізи ОЗК є однаковими з точки зору розподілу в них залишкових деформацій. Тому розрахункова система рівнянь не відноситься до якогось конкретного перерізу, а є єдиною для будь-якого перерізу.

На стадії охолодження в деякій зоні завширшки $sn_{очн} < bn_{очн}$ зі сторони крайки, яка нагрівалась, відбуваються пластичні деформації видовження. Тому ширина $sn_{очн}$ зони пластичного видовження на стадії охолодження є одним з двох невідомих, які мають бути визначені шляхом розв'язання системи з двох рівнянь. Другим невідомим є значення повної залишкової деформації $\epsilon fr_{очн} = \text{const}$ скорочення у перерізі штаби. У загальному вигляді система рівнянь має вигляд:

$$\left. \begin{aligned} \int_0^B \epsilon er_{очн}(y) dy &= 0, \\ \epsilon er_{очн}(sn_{очн}) - \epsilon_s &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

Розгорнутий вигляд системи (14):

$$\left. \begin{aligned} \int_0^{sn} (\epsilon_s) dy + \int_{sn}^{bn} \left\{ \epsilon fr_{очн} - \left(\epsilon fh_{очн} - \frac{\alpha q_n \sqrt{\omega}}{\delta \sqrt{\pi \lambda c \rho}} \times \right. \right. \\ \left. \left. \times [F1(y) + F2(y)] + \epsilon_s \right\} dy + \int_{bn}^B (\epsilon fr_{очн}) dy &= 0, \\ \epsilon fr_{очн} - \left(\epsilon fh_{очн} - \frac{\alpha q_n \sqrt{\omega}}{\delta \sqrt{\pi \lambda c \rho}} \times \right. \\ \left. \times [F1(sn_{очн}) + F2(sn_{очн})] + \epsilon_s \right) - \epsilon_s &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

Залежності для деформацій у точках перерізу в залишковому стані без звільнення з оснастки:

$$\epsilon fr_{очн} = \text{const}, \quad (16)$$

$$\epsilon er_{очн}(y) =$$

$$= \begin{cases} \epsilon_s, 0 \leq y \leq sn_{очн} \\ \epsilon fr_{очн} - \left(\epsilon fh_{очн} - \frac{\alpha q_n \sqrt{\omega}}{\delta \sqrt{\pi \lambda c \rho}} \cdot [F1(y) + F2(y)] + \epsilon_s \right), \\ sn \leq y \leq bn_{очн} \\ \epsilon fr_{очн}, bn_{очн} \leq y \leq B \end{cases} \quad (17)$$

$$\epsilon pr_{очн}(y) =$$

$$= \begin{cases} \epsilon fr_{очн} - \epsilon_s, 0 \leq y \leq sn_{очн} \\ \epsilon fh_{очн} - \frac{\alpha q_n \sqrt{\omega}}{\delta \sqrt{\pi \lambda c \rho}} \cdot [F1(y) + F2(y)] + \epsilon_s, \\ sn_{очн} \leq y \leq bn_{очн} \\ 0, bn_{очн} \leq y \leq B \end{cases} \quad (18)$$

Насамкінець, запишемо систему рівнянь для визначення необхідних параметрів напружено-деформованого стану штаби після звільнення її з оснастки та кінцеві залежності для деформацій у перерізі штаби.

Залишкова пластична деформація скорочення на ширині bn створює позacentрову усадочну силу, згинальний момент якої призводить до утворення прогину поздовжньої осі штаби. Повна деформація при цьому $\epsilon fr_{зв_очн}(y) = m \cdot y + n$ хоч і відповідає гіпотезі плоских перерізів, але не є рівномірно розподіленою по перерізу штаби. Після звільнення штаби з оснастки за рахунок прогину штаби відбувається перерозподіл пружних і повних деформацій, а в окремих випадках при відповідних співвідношеннях геометричних розмірів штаби і значеннях параметрів термомеханічної задачі може змінюватись і розподіл пластичних деформацій. Наявність такої можливості з'ясовується побудовою графіків розподілу пружних деформацій у перерізі штаби після звільнення її з оснастки. Якщо така ситуація має місце, необхідна відповідна корекція системи рівнянь для даного стану штаби. Отже, така система рівнянь має такий загальний вигляд:

$$\left. \begin{aligned} \int_0^B \epsilon er_{зв_очн}(y) \cdot dy &= 0, \\ \int_0^B \epsilon er_{зв_очн}(y) \cdot y \cdot dy &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

Розгорнутий вигляд системи (19):

$$\left. \begin{aligned} \int_0^{sn_{очн}} [m \cdot y + n - (\epsilon fr_{очн} - \epsilon_s)] dy + \\ + \int_{sn_{очн}}^{bn_{очн}} \left\{ m \cdot y + n - \left(\epsilon fh_{очн} - \frac{\alpha q_n \sqrt{\omega}}{\delta \sqrt{\pi \lambda c \rho}} \times \right. \right. \\ \left. \left. \times [F1(y) + F2(y)] + \epsilon_s \right\} dy + \int_{bn_{очн}}^B (m \cdot y + n) dy &= 0, \\ \int_0^{sn_{очн}} [m \cdot y + n - (\epsilon fr_{очн} - \epsilon_s)] y dy + \\ + \int_{sn_{очн}}^{bn_{очн}} \left\{ m \cdot y + n - \left(\epsilon fh_{очн} - \frac{\alpha q_n \sqrt{\omega}}{\delta \sqrt{\pi \lambda c \rho}} \times \right. \right. \\ \left. \left. \times [F1(y) + F2(y)] + \epsilon_s \right\} y dy + \int_{bn_{очн}}^B (m \cdot y + n) y dy &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

Невідомими в системі (20) є параметри m та n повної залишкової деформації після звільнення з оснастки. Залежності для залишкових деформацій після звільнення штаби з оснастки:

$$\varepsilon fr_{зв_осн}(y) = m \cdot y + n, \quad 0 \leq y \leq B, \quad (21)$$

$$\varepsilon er_{зв_осн}(y) = \begin{cases} m \cdot y + n - (\varepsilon fr - \varepsilon_s), & 0 \leq y \leq sn_{осн} \\ m \cdot y + n - \left(\varepsilon fh_{осн} - \frac{\alpha q_n \sqrt{\omega}}{\delta \sqrt{\pi \lambda c \rho}} \cdot [F1(y) + F2(y)] + \varepsilon_s \right), & sn_{осн} \leq y \leq bn_{осн} \\ m \cdot y + n, & bn_{осн} \leq y \leq B \end{cases} \quad (22)$$

$$\varepsilon pr_{зв_осн}(y) = \begin{cases} \varepsilon fr_{осн} - \varepsilon_s, & 0 \leq y \leq sn_{осн} \\ \varepsilon fh_{осн} - \frac{\alpha q_n \sqrt{\omega}}{\delta \sqrt{\pi \lambda c \rho}} \cdot [F1(y) + F2(y)] + \varepsilon_s, & sn_{осн} \leq y \leq bn_{осн} \\ 0, & bn_{осн} \leq y \leq B \end{cases} \quad (23)$$

За викладеним вище алгоритмом проведені розрахунки напружено-деформованого стану при нагріванні крайки штаби для двох випадків — із застосуванням згаданої вище технологічної оснастки і без її застосування, тобто нагрівання крайки у вільному стані штаби. Розглядалась конкретна числова модельна задача для штаби з розмірами $L = 1000$ см, $B = 20$ см, $\delta = 1$ см із сталі ВСт. Зсп. Механічні та теплофізичні властивості даної сталі: пружна деформація на рівні межі текучості $\varepsilon_s = 1,2 \times 10^{-3}$, коефіцієнт термічного розширення $\alpha = 1,2 \times 10^{-5} 1/^\circ\text{C}$, модуль пружності $E = 2,1 \times 10^5$ МПа, коефіцієнт поверхневої тепловіддачі $\alpha_T = 6 \times 10^{-3}$ Дж/(сек \cdot см 2 \cdot $^\circ\text{C}$), коефіцієнт теплопровідності $\lambda = 0,42$ Дж/(см \cdot сек \cdot $^\circ\text{C}$), коефіцієнт температуропровідності $a = 0,081$ см 2 /сек, об'ємна теплоємність $cr = 5,2$ Дж/(см 3 \cdot $^\circ\text{C}$).

Режим нагріву крайки штаби: струм $I = 800$ А, напруга на дузі $U = 34$ В, к. к. д. дуги $\eta = 0,85$, швидкість руху джерела $v = 1$ см/с, що відповідає погонній енергії $q_n = 2,312 \times 10^4$ Дж/см.

Розв'язання систем рівнянь (9), (15) та (20) відповідно для стадії нагрівання, залишкового стану в оснастці та залишкового стану після звільнення з оснастки дає такі значення невідомих: $bn_{осн} = 7,356$ см, $\varepsilon fh_{осн} = 8,605 \times 10^{-4}$, $sn_{осн} = 5,1$ см, $\varepsilon fr_{осн} = -5,258 \times 10^{-4}$, $\varepsilon fr_{зв_осн}(y) = 1,091 \times 10^{-4} \cdot y - 1,617 \times 10^{-3}$.

При зварюванні без оснастки: $\varepsilon fh_{осн} = -2,433 \times 10^{-4} \cdot y + 3,81 \times 10^{-3}$, $bn_{без_осн} = 5,109$ см, $\varepsilon fr_{без_осн}(y) = 1,384 \times 10^{-4} \cdot y - 1,962 \times 10^{-3}$, $sn_{без_осн} = 3,265$ см.

Для залишкового стану після звільнення з оснастки або при зварюванні без оснастки величина усадочної сили P , координата yP точки прикладення усадочної сили до торців штаби, ексцентриситет eP прикладення усадочної сили по відношенню до центра перерізу штаби, згинальний момент M усадочної сили, момент інерції I_z перерізу штаби, максимальний прогин f штаби на довжині L визначаються такими залежностями:

$$P = \left| \delta \cdot E \int_0^{bn} \varepsilon pr(y) dy \right|,$$

$$yP = \left(\int_0^{bn} \varepsilon pr(y) \cdot y dy \right) \cdot \left(\int_0^{bn} \varepsilon pr(y) dy \right)^{-1},$$

$$eP = 0,5 \cdot B - yP, M = P \cdot eP,$$

$$I_z = \frac{\delta \cdot B^3}{12}, f = \frac{M \cdot L^2}{8 \cdot E \cdot I}.$$

Момент інерції перерізу штаби $I_z = 666,667$ см 4 .

За виконаними розрахунками отримано такі дані: $P_{зв_осн} = 220,9$ кН, $yP_{зв_осн} = 3,081$ см, $eP_{зв_осн} = 6,92$ см, $M_{зв_осн} = 1528,0$ кН \cdot см, $f_{зв_осн} = 13,645$ см, $P_{без_осн} = 245,1$ кН, $yP_{без_осн} = 1,99$ см, $eP_{без_осн} = 8,01$ см, $M_{без_осн} = 1963,0$ кН \cdot см, $f_{без_осн} = 17,528$ см. На рис. 2...7 показані графіки розподілу деформацій у перерізі штаби для випадків нагрівання крайки

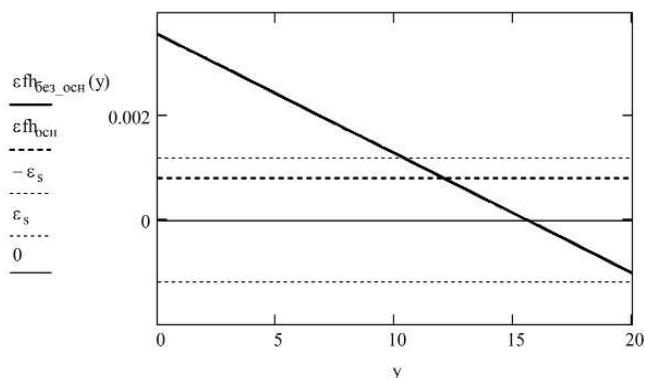


Рис. 2. Розподіл повних деформацій по ширині штаби на стадії нагрівання у поперечному перерізі по лінії de

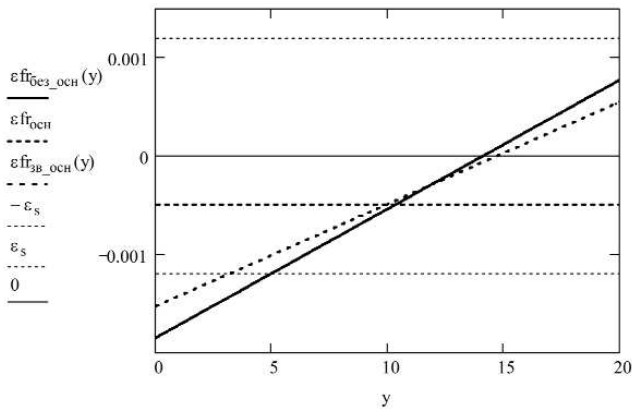


Рис. 3. Розподіл повних деформацій по ширині штаби в залишковому стані у будь-якому поперечному перерізі

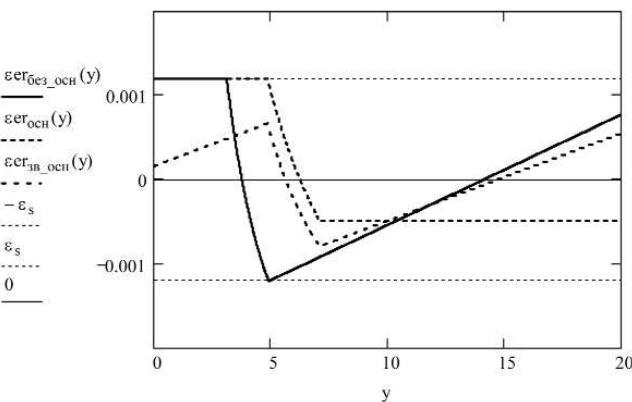


Рис. 5. Розподіл пружних деформацій по ширині штаби в залишковому стані у будь-якому поперечному перерізі

Висновки

1. При нагріванні крайки штаби в оснастці по відношенню до нагрівання без оснастки ширина зони залишкових пластичних деформацій скорочення збільшується на 44,362%, усадочна сила зменшується на 8,887%, ексцентриситет прикладення усадочної сили по відношенню до центра перерізу штаби зменшується на 12,845%, залишковий прогин штаби зменшується на 20,591%.

2. Позитивний ефект з точки зору зменшення залишкового прогину при зварюванні в оснастці досягається в основному за рахунок зменшення ексцентриситету у прикладенні усадочної сили у перерізі штаби, хоч сама усадочна сила зменшується не суттєво.

3. Максимальні залишкові пластичні деформації скорочення при зварюванні в оснастці менші за величиною, як видно з рис. 6, хоч ширина зони їх розподілу більша. Площі криволінійних трапецій розподілу згаданих деформацій по ширині штаби, яким пропорційні усадочні сили, відрізняються між собою на 8,887%.

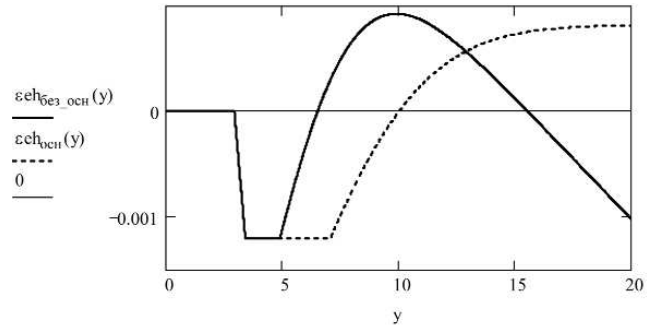


Рис. 4. Розподіл пружних деформацій у складному розрахунковому перерізі *abcde* на стадії нагрівання

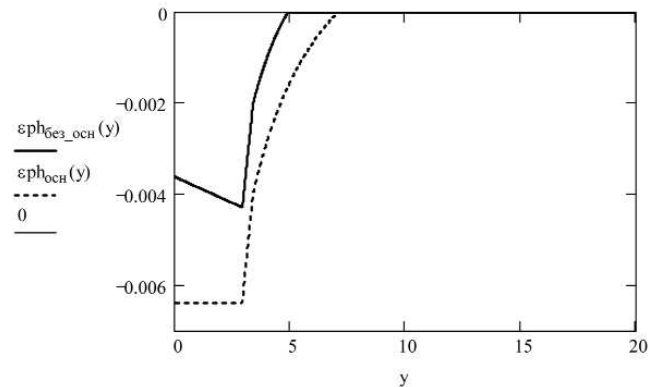


Рис. 6. Розподіл пластичних деформацій у складному розрахунковому перерізі *abcde* на стадії нагрівання

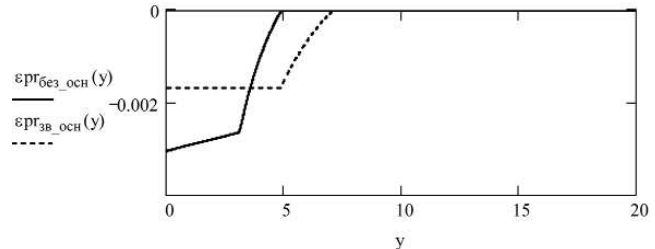


Рис. 7. Розподіл пластичних деформацій по ширині штаби в залишковому стані у будь-якому поперечному перерізі

4. Технологічна оснастка сприяє на стадії охолодження більш суттєвому поздовжньому пластичному видовженню металу в зоні пластичного скорочення, сформованого при нагріванні, що загалом і створює позитивний ефект.

Література

1. Прохоренко В.М., Карпенко А.С., Прохоренко Д.В. Расчет функции усадки при сварке одномерных конструкций. Сообщение 1. Нагрев мощным быстродвижущимся линейным источником. // Технологические системы, 2005. — № 4. — С. 49–55.
2. Касаткин Б.С., Прохоренко В.М., Чертов И.М. Напряжения и деформации при сварке. — К.: Вища шк., 1987. — 246 с.