



Прохоренко В.М., Прохоренко О.В.

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

ЗАЛИШКОВИЙ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН ПРИ НАПЛАВЛЕННІ ШВА НА ПОВЕРХНЮ БРУСА

Розглянуто розв'язок методом скінчених елементів задачі механіки про залишковий напружено-деформований стан, зумовлений наплавленням симетричного зварного шва на поверхню бруса обмежених розмірів. Результати розв'язку проаналізовані з позиції впливу закріплень торців бруса на ступінь об'ємності напружено-деформованого стану, а також встановлений характер розподілу по товщині з'єднання компонентів тензорів залишкових напружень і пластичних деформацій.

Ключові слова: брус, напружено-деформований стан, метод скінчених елементів, зварювальні напруження та деформації.

Вступ

Науково-технічний прогрес постійно висуває нові вимоги до надійності і конкурентоспроможності машин і механізмів. Особливої уваги потребують питання забезпечення експлуатаційної надійності, довговічності та зменшення собівартості їх виготовлення. В багатьох випадках важкі специфічні умови експлуатації устаткування зумовлюють інтенсивне зношування і пошкодження деталей та робочих органів машин, а отже, і необхідність їх періодичної заміни. Поширеними причинами виходу з ладу робочих елементів деталей машин є зміна їх геометричних розмірів в результаті зношування і змінання, крихкого руйнування, утворення тріщин різного походження, пластичної деформації тощо. Відновлення первинної геометрії і параметрів працездатності зношених деталей і робочих поверхонь шляхом електродугового наплавлення, яке успішно застосовують для локального ремонту, дозволяє економити високоякісні матеріали, знижувати собівартість виготовлення і збільшувати ресурс експлуатації.

Інтенсивність і неоднорідність залишкового напружено-деформованого стану впливає на ефективність технологічних процесів наплавлення, якість наплавленого шару і точність геометричних розмірів деталей. Тому виникає необхідність у визначенні значень і характеру розподілу по товщині товстого листа параметрів напружено-деформованого стану (НДС), зумовленого наплавленням на поверхню товстого листа обмежених розмірів (бруса) зварного шва з урахуванням температурної за-

лежності теплофізичних і механічних характеристик, структурних перетворень, умов закріплення, температурних навантажень.

Розвиток методів розрахунку складного напружено-деформованого стану зварних виробів з урахуванням температурної залежності згаданих вище властивостей металу, виду напруженого стану та тривалості нагрівання є актуальною науково-технічною задачею, розв'язання якої дозволить одержати більш ефективні й обґрунтовані рішення при відновленні робочих поверхонь деталей. Інженерні методи розрахунку розглянуті в роботі [1].

Мета і задачі роботи

Метою роботи є визначення методом скінчених елементів значень залишкових напружень і пластичних деформацій, оцінка неоднорідності об'ємного залишкового напружено-деформованого стану бруса обмежених розмірів при наплавленні на його поверхню симетричного прямолінійного зварного шва.

Задачами роботи є розробка кінцево-елементної моделі бруса на основі його геометричної моделі, вибір вихідних даних стосовно параметрів джерела нагрівання та матеріалу бруса, вибір граничних умов по температурі і закріпленнях бруса під час наплавлення шва та подальшого охолодження, налаштування програми розрахунку, безпосередня реалізація у часі процесу розв'язання задачі, систематизація та візуалізація результатів розрахунку, обробка і аналіз результатів розрахунків, формулювання підсумкових висновків.

Основна частина

Задачу розв'язували для бруса завдовжки – 100 мм, завширшки – 40 мм і завтовшки – 20 мм. Геометрична модель бруса показана на рис. 1.

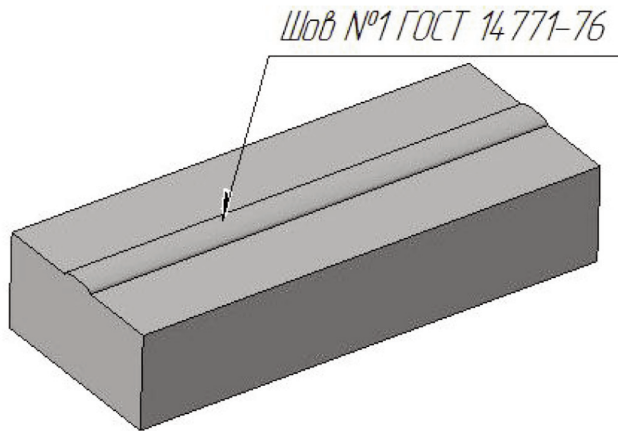


Рис. 1. Геометрична модель бруса

модель бруса з нерегулярною сіткою (рис. 2). В місці виконання зварного шва щільність сітки збільшена. Модель складається з 17050 елементів, в тому числі лінійних елементів 1D для моделювання траєкторії зварювання – 50, плоских 2D для моделювання поверхні тепловіддачі – 2000 і об'ємних 3D для моделювання самого бруса – 15000. Обраний варіант граничних умов: під час наплавлення торці бруса жорстко закріплені (відсутні переміщення вузлів сітки уздовж трьох осей координат), через 300 секунд (5 хв.) після завершення наплавлення жорстке закріплення торців бруса знімається і подальше охолодження бруса відбувається у вільному стані. Часовий інтервал визначення параметрів НДС прийнятий в межах 0...1200 секунд. Після 1200 секунди температура бруса майже однакова по всьому об'єму, незначна за величиною, тому параметри НДС набувають залишкових значень і в процесі подальшого охолодження практично не змінюються.

За результатами розв'язку задачі можна оцінити ступінь неоднорідності напружено-деформованого стану і визначити розподіл поздовжніх, поперечних

Таблиця 1.

Режим зварювання і параметри еліпсоїдного джерела тепла

Режим зварювання	Струм, А	I	240	Швидкість зварювання, мм/сек	ν	5
	Напруга, В	U	26			
	ККД	η	0,68			
Час зварювання, с		t	20	Частка тепла, внесена в передню частину джерела тепла	r_f	0,667
Початкова температура, °С		T_0	20	Частка тепла, внесена в задню частину джерела тепла	r_b	1,333
Погонна енергія зварювання, Дж/мм		Q	849	Параметри еліпсоїдного джерела тепла, мм	a_h	4
					b_h	2
					c_{hf}	3,33
					c_{hb}	6,66

Рухоме джерело тепла при наплавленні приймаємо за моделлю Голдака [2]. Об'ємна щільність енергії, що генерується у кінцевих елементах уздовж траєкторії зварювання, задається в якості вхідних даних. Режим зварювання і параметри еліпсоїдного джерела тепла наведені у табл. 1.

Матеріал бруса – сталь 08X18H10T. Механічні і теплофізичні властивості сталі в залежності від температури наведені у табл. 2.

Для розв'язання даної задачі на основі геометричної моделі бруса розроблена кінцево-елементна

та в напрямку товщини бруса залишкових напружень та пластичних деформацій у всьому його об'ємі.

Основні узагальнені уявлення про залишковий НДС бруса після звільнення його торців від закріплення можна отримати з розгляду параметрів залишкового НДС для вузлів сітки, розташованих по товщині бруса уздовж лінії симетрії трьох його поперечних перерізів, а саме одного середнього по довжині бруса (переріз С) і двох торцевих – на початку зварювання (переріз П) і в кінці зварювання (переріз К).

Таблица 2.

Механічні і теплофізичні характеристики сталі 08X18H10T в залежності від температури

Температура, °С	Межа текучості, МПа	Модуль Юнга, МПа	Тепло-провідність, Вт/м °С	Коефіцієнт лінійного розширення, 1/°С	Питома теплоємність, Дж/кг °С
20	286	1,97×10 ⁵	14	1,57×10 ⁻⁵	450
20	460	1,92×10 ⁵	15	1,61×10 ⁻⁵	487,5
100	230	1,84×10 ⁵	17	1,66×10 ⁻⁵	526,25
200	197	1,77×10 ⁵	17,9	1,71×10 ⁻⁵	536,25
300	181	1,68×10 ⁵	19,2	1,75×10 ⁻⁵	552,5
400	167	1,6×10 ⁵	20,6	1,79×10 ⁻⁵	553,75
500	157	1,52×10 ⁵	21,8	1,83×10 ⁻⁵	562,5
600	153	1,43×10 ⁵	23,1	1,87×10 ⁻⁵	572,5
700	146	1,3×10 ⁵	24,5	1,91×10 ⁻⁵	597,75
800	136	1,08×10 ⁵	26	1,94×10 ⁻⁵	625
900	115	0,82×10 ⁵	27,3	1,98×10 ⁻⁵	625
1000	80	0,32×10 ⁵	28,9	2,01×10 ⁻⁵	625
1100	35	0,07×10 ⁵	30	2,04×10 ⁻⁵	625
1200	10	—	14	1,57×10 ⁻⁵	450

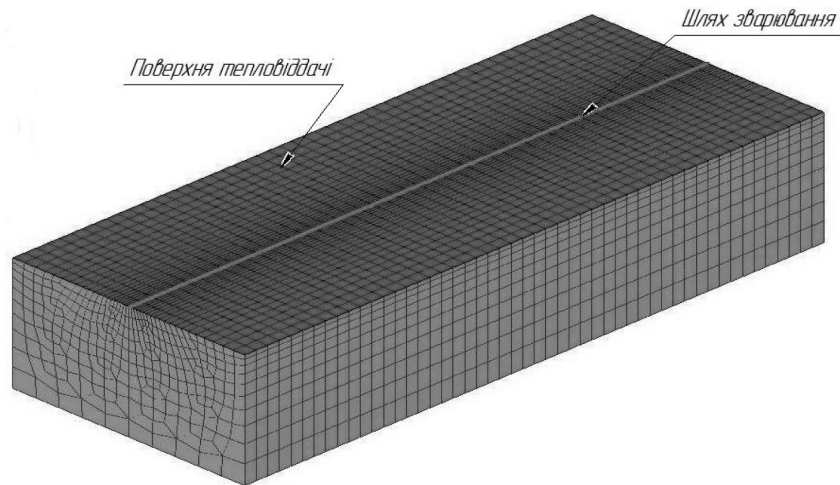


Рис. 2. Кінцево-елемента модель бруса

Розподіл залишкових напружень

Для перерізів П, С і К на рис. 3...5 відповідно показаний розподіл по товщині бруса залишкових поздовжніх σ_{xx} , поперечних σ_{yy} і в напрямку товщини бруса σ_{zz} напружень.

Як видно з рис. 3, за умови звільнення торців бруса через 5 хвилин після наплавлення, максимальне значення +290 МПа поздовжніх напружень досягається у поперечному перерізі С на глибині ~ 7 мм від поверхні наплавлення, а на глибині ~ 14 мм утворюється область стиснення,

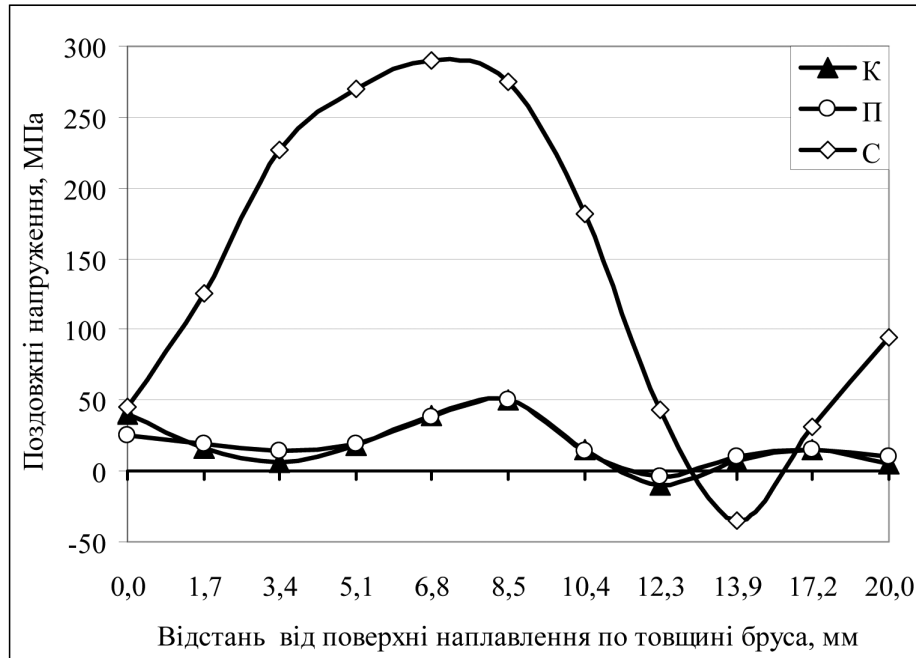


Рис. 3. Розподіл залишкових поздовжніх напружень σ_{xx} по товщині бруса

в якій значення напружень становить близько – 35 МПа.

Значення напружень у торцевих поперечних перерізах (на рис. 3 позначені як початок (П) і кінець (К) наплавлення) коливається в межах від -5 до +50 МПа. Теоретично на торцях бруса після знаття закріплень поздовжні залишкові напруження мають бути нульовими. За розрахунками вони

можуть відрізнятися від нульових значень з різних причин і, перш за все, це пов'язано з розмірами скінчених елементів сітки при наближенні до торців бруса, які мають зменшуватись до нуля. Однак, така умова не виконується.

Залежність поперечних напружень по товщині бруса у перерізах П, С і К показана на рис. 4. З рисунка видно, що звільнення торців бруса від

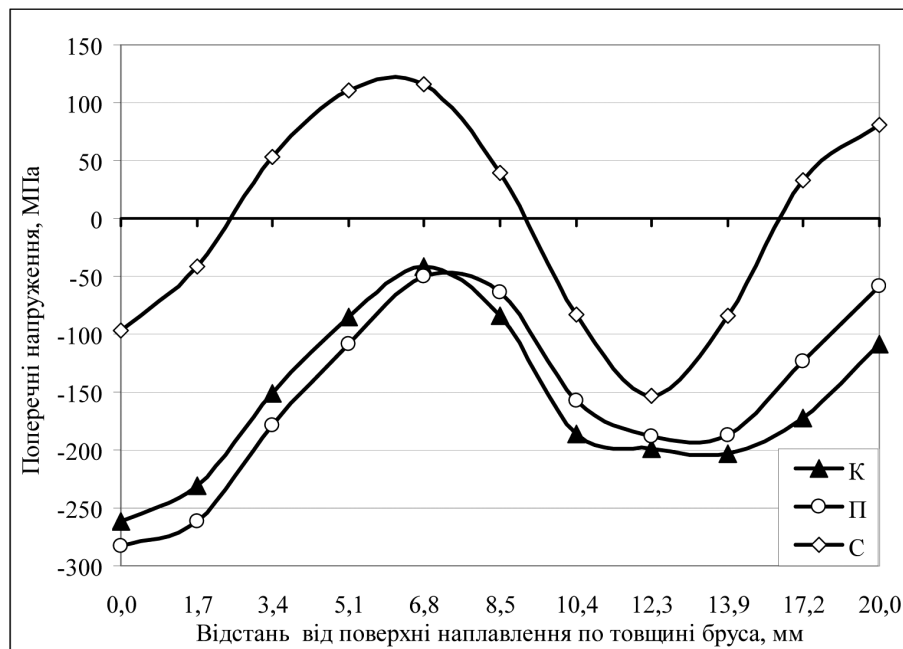


Рис. 4. Розподіл залишкових поперечних напружень σ_{yy} по товщині бруса

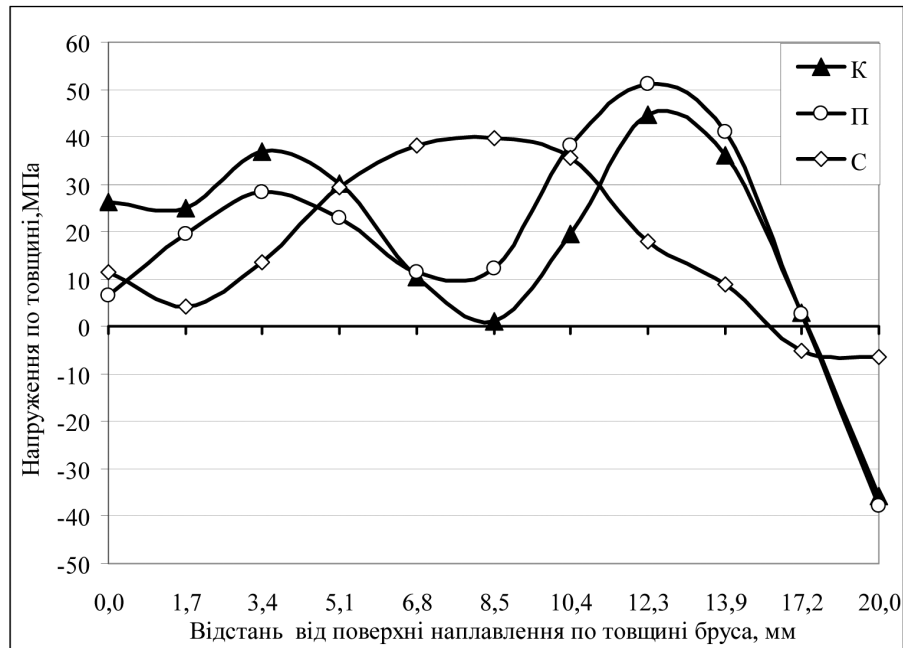


Рис. 5. Розподіл залишкових напружень σ_{zz} по товщині бруса

закріплень через 5 хвилин після наплавлення спричиняє майже однаковий характер розподілу поперечних напружень на торцях бруса і в середньому поперечному перерізі. При цьому на торцях діють поперечні напруження стиснення в діапазоні $-290 \dots -250$ МПа на поверхні наплавлення і до $-50 \dots -100$ МПа на протилежній поверхні. В середньому поперечному перерізі на поверхні наплавлення діють напруження -100 МПа, які збільшуються по глибині до рівня -125 МПа з переходом в зону стиснення на глибині 13 мм від поверхні наплавлення і утворенням розтягу приблизно 80 МПа на зворотній поверхні.

Залежність залишкових напружень σ_{zz} по товщині бруса у перерізах П, С і К показана на рис. 5. З рисунка видно, що для обраного варіанту закріплень торців бруса, у середньому поперечному перерізі на поверхні наплавлення діють незначні за величиною напруження розтягу ~ 10 МПа, на глибині 8 мм напруження σ_{zz} досягають 40 МПа з поступовим їх зменшенням до рівня -8 МПа на зворотній поверхні. На торцях маємо нерівномірний розподіл напружень, які змінюються в межах від $8 \dots 30$ МПа до -40 МПа відповідно на поверхнях наплавлення і зворотній стороні для початку і кінця зварного шва.

Розподіл залишкових пластичних деформацій

Розглянемо залишкові пластичні деформації для тих же поперечних перерізів П, С, К і вузлів сітки, в яких вище розглядалися залишкові напруження.

Залишкові поздовжні пластичні деформації ϵ_{xx} показані на рис. 6. У перерізі С по товщині бруса утворюється пластична деформація укорочення в межах $-2 \times 10^{-3} \dots -4 \times 10^{-3}$. На торцях бруса у приповерхневому шарі до 5 мм зі сторони наплавлення утворюється поздовжня пластична деформація різних знаків: укорочення у перерізі П і розтяг у перерізі К, де поздовжня пластична деформація досягає максимального значення $+3 \times 10^{-2}$, а вже на глибині 3,4 мм зменшується до мінімального значення $+1,5 \times 10^{-3}$. У перерізі П з самого початку наплавлення утворюється поздовжня пластична деформація іншого знаку: на поверхні наплавлення маємо укорочення $-8,33 \times 10^{-2}$, далі по товщині бруса до глибини 8,5 мм від поверхні наплавлення укорочення зменшується з переходом у пластичне видовження, яке досягає максимального значення $+2,65 \times 10^{-3}$.

Залишкові поперечні пластичні деформації ϵ_{yy} показані на рис. 7. З рисунка видно, що, за умови звільнення торців бруса від закріплень через 5 хвилин після наплавлення, на поверхні наплавлення на торцях бруса значення залишкової пластичної поперечної деформації досягає $-1,4 \times 10^{-2} \dots -4,65 \times 10^{-3}$, а на зворотній поверхні бруса значення деформацій досягає максимуму $-1,89 \times 10^{-4} \dots -2,39 \times 10^{-4}$. Величина деформацій в середньому поперечному перерізі на поверхні наплавлення досягає мінімуму $-2,72 \times 10^{-2}$ і з урахуванням знаку поступово збільшується вглиб бруса, досягаючи на його зворотній стороні максимального значення $+2,83 \times 10^{-3}$.

Залишкові пластичні деформації ϵ_{zz} по товщині бруса показані на рис. 8. Як видно з рисунка, для обраного варіанту закріплень торців бруса в серед-

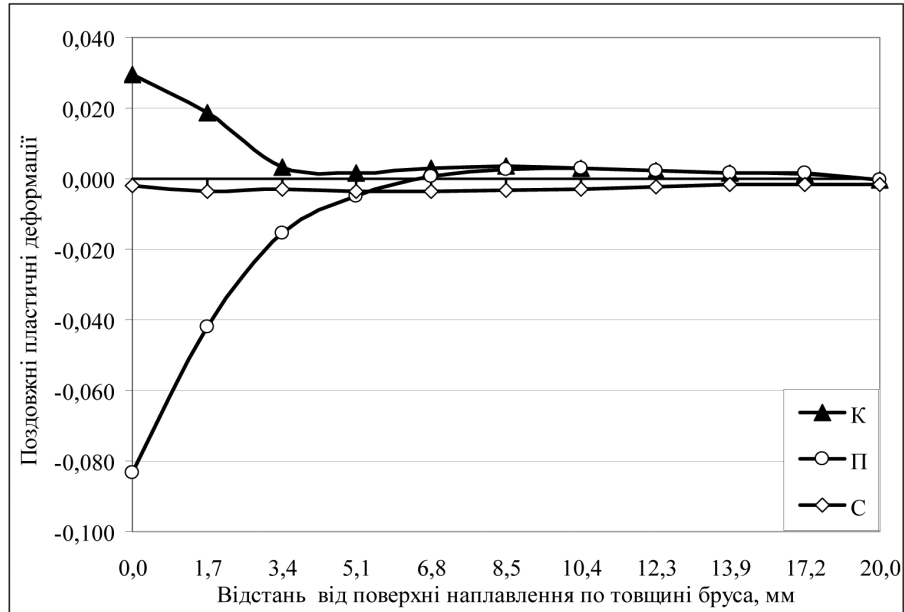


Рис. 6. Поздовжні пластичні деформації ϵ_{xx} на лінії симетрії поперечних перерізів П, С і К

ньому поперечному перерізі С максимум деформацій $+2,27 \times 10^{-3}$ маємо на глибині 3,4 мм від поверхні наплавлення, які плавно зменшуються до $-1,08 \times 10^{-3}$ на зворотній стороні бруса. На початку наплавлення у перерізі П значення пластичних деформацій ϵ_{zz} становить $+3,78 \times 10^{-3}$, максимум $+1,81 \times 10^{-2}$ досягається на глибині 3,4 мм, і на глибині 17 мм утворюється мінімальна деформація $-6,48 \times 10^{-4}$. В кінцевому перерізі К на поверхні наплавлення утворюються пластичні деформації -1×10^{-2} , які поступово збільшуються і на глибині 5 мм досягають макси-

мального значення $+4,02 \times 10^{-3}$ з подальшим зменшенням до значення $+4,74 \times 10^{-4}$ на зворотній стороні бруса. На самій поверхні наплавлення у всіх трьох перерізах П, С і К пластичні деформації зумовлені торцевими закріпленнями бруса до 300 секунди, які після звільнення від закріплень у процесі подальшого охолодження не змінюються, як це можна встановити, розглядаючи кінетику даних деформацій.

Представлені вище на рис. 6..8 графіки розподілу по товщині бруса залишкових пластичних деформацій важко було передбачити без розв'язання даної задачі

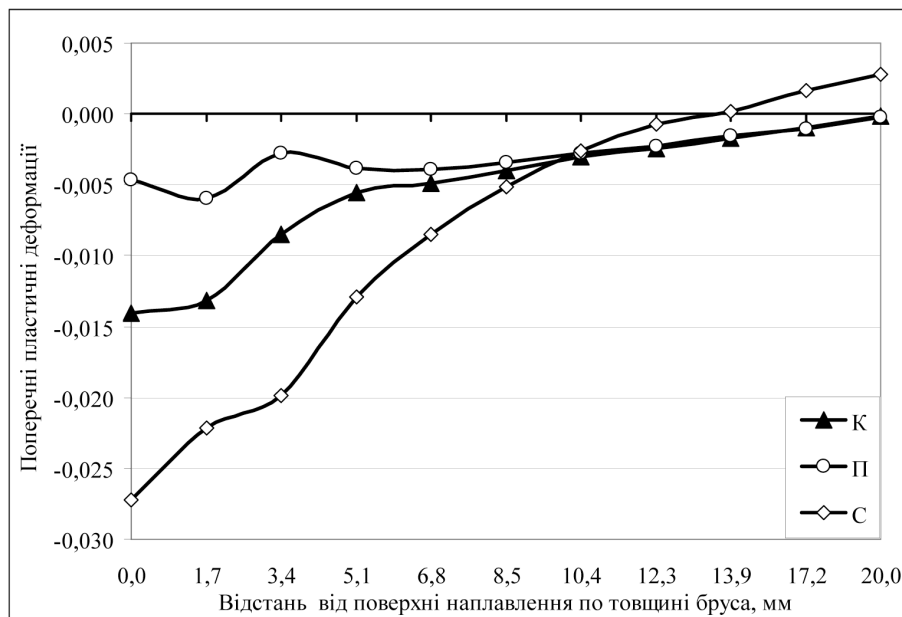


Рис. 7. Поперечні пластичні деформації ϵ_{yy} на лінії симетрії поперечних перерізів П, С і К

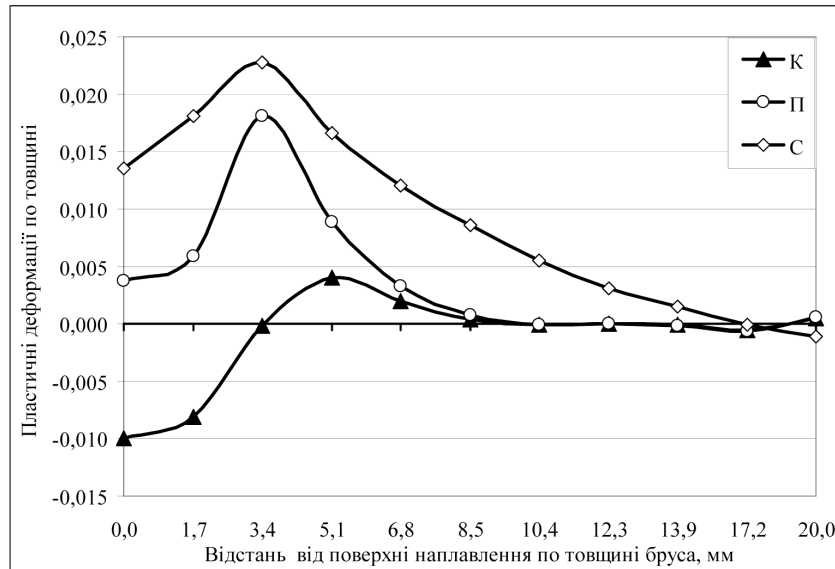


Рис. 8. Пластичні деформації ϵ_z по товщині бруса на лінії симетрії поперечних перерізів П, С і К

методом скінчених елементів. Може бути поставлено багато запитань стосовно причин тих чи інших особливостей розподілу, часто важко зрозумітих, як залишкових пластичних деформацій, так і залишкових напружень. Відповіді на ці запитання можна знайти після розгляду процесу розвитку пластичного деформування даного бруса під час наплавлення на основі аналізу кінетики пластичних деформацій у зіставленні її з кінетикою відповідних напружень. При такому підході механізм процесу пластичного деформування стає більш зрозумілим і його цілком аргументовано можна пояснити. Але це вже є темою окремої статті.

Висновки

1. Для обраного варіанту жорсткого закріплення вузлів сітки на торцях бруса встановлені закономірності розподілу залишкових поздовжніх, поперечних і в напрямку товщини напружень і пластичних деформацій уздовж вертикальної лінії симетрії трьох поперечних перерізів (двох торцевих і одного середнього), які показують, що для середньої частини бруса по довжині у кожному поперечному перерізі напружено-деформований стан є більш-менш усталеним, але розподіл залишкових напружень і пластичних деформацій у точках перерізу вкрай неоднорідний, що чітко видно з приведених в роботі графіків.

2. У торцевих поперечних перерізах розподіл залишкових напружень майже однаковий, чого не можна сказати по відношенню до залишкових пластичних деформацій. На розподіл в цих перерізах у вузлах сітки пластичних деформацій суттєвий вплив справляє кінетика пластичних деформацій і напру-

жень під час зварювання (20 секунд) і під час подальшого охолодження (~ 30 секунд). Після 50 секунд при подальшому охолодженні і звільненні торців від закріплень залишкові пластичні деформації не змінюються. Звільнення торців від закріплень призводить лише до пружного розвантаження бруса, головним чином, у приторцевих зонах.

Література

- [1] Прохоренко, В.М. Напруження та деформації у зварних з'єднаннях і конструкціях [Текст]: навч. посіб./ В.М. Прохоренко, О.В. Прохоренко. – К.: НТУУ «КПІ», 2009. – 268 с. – Бібліогр.: с.267. – 400 пр. ISBN 978-966-622-331-2.
- [2] John A. Goldak, Mehdi Akhlaghi. Computational welding mechanics. – USA: – Springer, 2005. – 325.

Символьні позначення, індекси, абревіатури

- НДС – напружено-деформований стан
- ККД – коефіцієнт корисної дії
- П – торцевий поперечний переріз бруса на початку зварювання
- С – середній по довжині поперечний переріз бруса
- К – торцевий поперечний переріз бруса в кінці зварювання
- σ – нормальні зварювальні напруження, МПа
- ϵ – відносні зварювальні деформації
- xx – напрямок вздовж зварного шва
- yy – напрямок поперек зварного шва
- zz – напрямок по товщині бруса
- I – зварювальний струм, А
- U – зварювальна напруга, В
- η – коефіцієнт корисної дії
- t – час зварювання, с
- T_0 – початкова температура, °С

Q – погонна енергія зварювання, Дж/мм
 v – швидкість зварювання, мм/сек
 rf – частка тепла, внесена в передню частину зварювальної ванни
 rb – частка тепла, внесена в задню частину зварювальної ванни

a_n – половина ширини зварювальної ванни, мм
 b_n – глибина проплавлення, мм
 c_{nf} – довжина передньої частини зварювальної ванни, мм
 c_{nb} – довжина задньої частини зварювальної ванни, мм

Prokhorenko V.M., Prokhorenko D.V.

National Technical University of Ukraine “Kyiv polytechnic institute” Ukraine, Kyiv

THE RESIDUAL STRESS-STRAIN STATE AT WELDING SEAM ON THE BEAM SURFACE

The solution of the finite element method problems in the mechanics of residual stress-strain state caused by welding symmetric seam on the surface of limited size beam is considered. The results of the solutions are analyzed in superposition of reacting the beam clamped ends on the three dimensional stress degree and the thickness distribution of the residual stress tensor components and plastic deformation is set.

Keywords: beam, stress-strain state, finite element method, welding stresses and strains.

References

- [1] Prokhorenko, V.M. Stresses and deformations in welded joints and structures [Text]: teach. handbook. / V.M. Prokhorenko, O.V. Prokhorenko. - K.: NTU "KPI", 2009. - 268 p. - Ref.: S.267. - 400 p. ISBN 978-966-622-331-2.
- [2] John A. Goldak, Mehdi Akhlaghi. Computational welding mechanics. – USA: – Springer, 2005. – 325.