

РОЗРОБКА СПОСОБІВ МІНІМІЗАЦІЇ ЗАЛИШКОВИХ НАПРУЖЕНЬ І ДЕФОРМАЦІЙ У ЗВАРНИХ МЕТАЛОКОНСТРУКЦІЯХ

І. Добрянський, д. т. н., Л. Добрянська, к. е. н., А. Грицевич, старший викладач
Львівський національний аграрний університет

<https://doi.org/10.31734/architecture2018.19.070>

Постановка проблеми. Підвищення вимог до міцності і довговічності відповідальних вузлів та елементів зварних конструкцій, а також проблема економії металу та енергії в умовах переходу на ресурсо- та енергозберігаючі технології зумовлює актуальність завдання визначення оптимальних параметрів технології низькотемпературної обробки з використанням рухомих джерел і стоків тепла. Неперервне збільшення обсягів зварювальних робіт у промисловості і будівництві нерозривно пов'язане з розробкою способів мінімізації залишкових напружень і деформацій та їх шкідливим впливом на якість і працездатність зварних конструкцій. Труднощі з теоретичним вирішенням цієї проблеми (від постановки завдання до всебічного чисельного аналізу відповідних термопружнопластичних процесів) полягають насамперед у виборі ефективної розрахункової схеми визначення зон суто пластичних деформацій.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Методи визначення залишкових напружень поділяють на розрахункові та експериментальні. Зважаючи на складність явищ, що відбуваються при зварюванні, єдиного розрахункового методу визначення напружень як таких, що супроводжують зварювальний процес, так і таких, що залишаються в конструкції після зварювання, сьогодні немає. Можна лише відзначити, що чим менше припущень введено в розрахункові передумови, тим складніша техніка виконання самих розрахунків.

Основні завдання з визначення поздовжніх напружень базуються на відомих припущеннях і гіпотезах, які не завжди дають змогу отримати результат, який підтверджується експериментами [1; 6; 7]. Однак значна трудомісткість і труднощі з цими розрахунками – суттєва перешкода для їх практичного використання.

Постановка завдання. Наше завдання – визначення оптимальних параметрів термообробки зварних пластин рухомими нормально-круговими джерелами тепла. Схема нагріву цього типу описує термообробку тонких металевих листів (з

повним вирівнюванням температури за товщиною) полум'ям газового нагрівача з віссю, перпендикулярною до поверхні листа [1-4].

Виклад основного матеріалу. Вважаємо, що джерела нагріву переміщуються зі сталюю швидкістю n . Також припустимо, що вихідні поздовжні залишкові напруження $S_{xx}^{(0)}$ у зоні зварного шва, середня лінія якого збігається з віссю Ox , є розтягувальними і набагато перевищують поперечні $S_{yy}^{(0)}$.

Згідно з результатами праці [7], розподіл поздовжніх залишкових напружень $S_{xx}^{(0)}$ описують залежністю

$$S_{xx}^{(0)} = g S_s^{(0)} (1 - y^2/b^2) e^{-y^2/(2b^2)}, \quad (1)$$

де g – параметр, який змінюється в межах $0 \leq g \leq 1$; b – півширина зони розтягувальних напружень; $S_s^{(0)}$ – межа текучості матеріалу за кімнатної ($t_0 = 20^\circ C$) температури.

З метою ефективнішого зниження рівня поздовжніх залишкових напружень $S_{xx}^{(0)}$ у ділянці зварного шва локальну термообробку здійснювали для випадку симетрично розміщених рухомих ділянок нагріву відносно нього. Також були реалізовані умови, за яких у системі координат $Oxuz$, що рухається разом з джерелами нагріву, процес нагріву встановлений, а центри зон нагріву розміщено в точках з координатами $(0, \pm d, h)$, де d – відстань центрів ділянок нагріву від середньої лінії зварного шва (осі Ox); h – півтовщина пластини.

Результати числових досліджень. Оскільки пластична текучість, яка приводить до зниження рівня залишкових зварних напружень, виникає в тих точках, де сумарне значення зварних $S_{ij}^{(0)}$ і тимчасових термопружних напружень $S_{ij}^{(t)}$ буде досягати значення межі текучості S_s , то відстань d необхідно вибирати,

послугуючись принципом: термопружні напруження в зоні зварного шва мають бути розтягувальними і якомога більшими. Виходячи з цього, а також беручи до уваги умови текучості Мізеса [5-7], доходимо висновку, що відстань d слід визначати з умови, що в точках на зварному шві має бути досягнуто максимум різниці напружень $s = s_{xx}^{(t)} - s_{yy}^{(t)}$ за $y=0$.

Виконано числові розрахунки оптимальних відстаней d_{op} у серединному перерізі пластини $z=0$ за різних значень параметрів B_i , ν , a і розмірів зони нагріву, яка характеризується радіусом r_* ; також отримано наближену оцінку ефективності термообробки, яка характеризується параметром e : цей параметр є відношенням максимуму інтенсивності температурних напружень на шві (тобто за $y=0$) до максимуму інтенсивності температурних напружень у точках, що відповідають значенню оптимальних відстаней d_{op} (тобто за $y=\pm d_{op}$). Із поданих даних випливає, що більшому значенню максимуму інтенсивності термопружних напружень на шві, тобто величині $s = s_{xx}^{(t)} - s_{yy}^{(t)}$ за $y=0$, відповідатиме ефективніша локальна термообробка. Отримані числові дані показують, що ефективність локальної термообробки суттєво залежить від значень параметрів B_i , ν , a , радіуса плями нагріву r_* ; збільшення тепловіддачі та радіуса r_* , але зменшення швидкості переміщення джерел нагріву приводить до підвищення ефективності термообробки. Крім того, ефективність локальної термообробки залежить від виду самого матеріалу, що зумовлено переважно коефіцієнтом температуропровідності a . Так, для пластини з титанового сплаву ВТ5 ефективність термообробки нижча, ніж для пластини із сталі 09Г2С, тоді як для пластини з алюмінієво-магнієвого сплаву АМг6 вона вища.

Як показують результати розрахунків, максимально допустима температура $t_d^{(max)}$, за якої виникають залишкові напруження розтягу в зонах дії джерел нагріву, становить $170-195^\circ C$. Проведені дослідження показали також, що застосування сумісно з нагрівом додаткового охолодження зварного шва дає змогу понизити залишкові розтягувальні напруження до нуля, наприклад, за значення $B_i = 0,1$.

Визначено (з урахуванням тепловіддачі) оптимальний кут нахилу f_{opt} зон розподілу

джерел тепла до додатного напрямку осі Ox . Для цього необхідно виконати відповідні розрахунки поздовжніх залишкових напружень, що виникають за термообробки нормально-круговими джерелами тепла, схему розміщення яких показано на рис. 1.

На цьому рисунку представлені графіки показують, що кут нахилу ($f = \pm p/3$) прямої, який з'єднує центри зон нагріву, до додатного напрямку осі Ox (напрямку руху джерел) оптимальний.

Подано оцінку ефективності термообробки попередньо нагрітих (до рівномірної температури T_0) зварних пластин рухомими нормально-круговими стоками тепла, яка характеризується поведінкою залишкових напружень у напрямку їх руху. Центр нормально-кругових стоків розміщується в початку рухомої системи координат, а вісь Ox суміщається зі середньою лінією зварного шва.

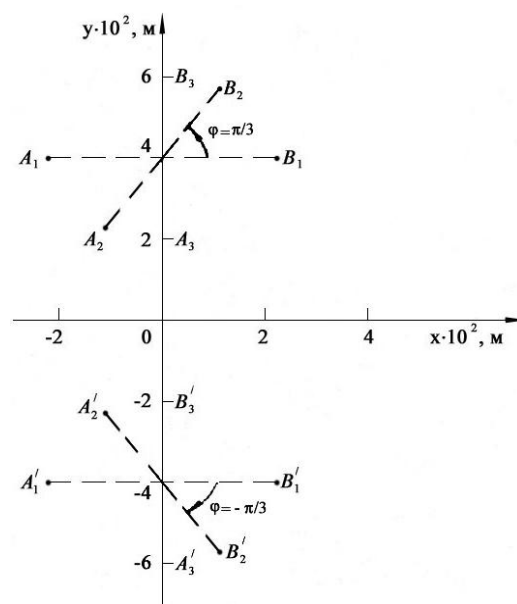


Рис. 1. Схема розміщення центрів рухомих нормально-кругових джерел відносно середньої лінії зварювального шва пластини

Вихідні дані для розрахунків такі: $T_0 = 200^\circ C$; $d = 0$; $g = 0,9$; $b = 0,2$ м; $\Delta q_0 = -15^\circ C$; $k_* = 2500$ л/м². Товщина пластини становила $h = 0,006$ м; розбиття ділянки на елементарні прямокутники за використання чисельного алгоритму, розробленого у працях [3-5], виконували за схемою: $h_x^{(m)} = h_x = 0,01$ м; $h_y^{(m)} = h_y = 0,004$ м. Результати відповідних розрахунків залишкових поздовжніх напружень (відне-

сених до межі текучості за нульової температури) представлено графіками на рис. 2; точкам відповідає значення $q_0 = q_0^{(\max)}$, за якого температура на зварному шві досягала від'ємних значень.

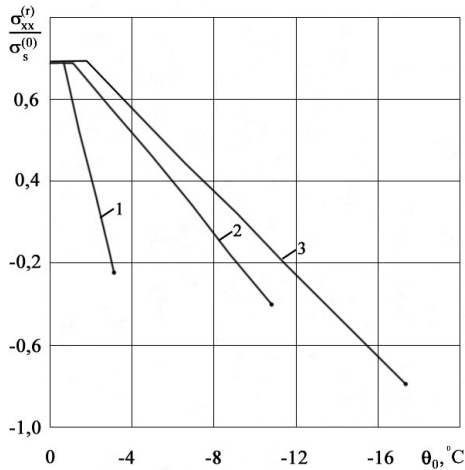


Рис. 2. Розподіл залишкових напружень $S_{xx}^{(r)}$ у зварній пластині після термообробки нормально-круговими стоками тепла: крива 1 - $B_i = 1$, $v = 0,004$ м/с; 2 - $B_i = 0,1$, $v = 0,004$ м/с; 3 - $B_i = 0,1$, $v = 0,008$ м/с

Важливим чинником, що визначає процес термообробки зварних пластин і суттєво впливає на ефективність процесу, є ефективна теплова потужність зварювальної дуги, яку визначають за допомогою залежності $q = hIU$, в якій h – ефективний ККД процесу нагріву; I – зварювальний струм; U – напруга дуги, а погонну енергію зварювання, яка характеризує кількість теплоти зварювання, що передається в одиницю довжини (1 см) однопрохідного шва або валика, визначають згідно зі залежністю $q_p = q/v$, в якій v – швидкість зварювання.

Погонна енергія – основний показник для вибору режиму зварювання, а параметрами, за якими здійснюється підбір режиму зварювання, є струм і швидкість переміщення зварювальної дуги.

Оскільки напруга дуги за зварювання змінюється у вузьких межах (20-36 В), то під час розрахунків її значення не регламентують. Щодо інших параметрів, то швидкість зварювання пов'язана залежністю

$$v = \frac{bI}{fF}, \quad (2)$$

а величина струму

$$I = \frac{vq_p}{0,24hU}, \quad (3)$$

У залежностях (2), (3) позначено: b – коефіцієнт наплавки, г/А·год; F – площа поперечного перерізу однопрохідного шва, мм²; f – густина наплавленого металу, г/мм³; $h = 0,6 \div 0,85$; $0,24$ – коефіцієнт, який враховує вплив, спричинений несинусоїдальністю кривих напруги і струму на потужність дуги за умови зварювання змінним струмом.

Згідно з результатами праць [2; 4], орієнтовні режими ручного дугового зварювання узагальнюються даними, які пов'язують між собою товщину прокатного профілю, діаметра електрода та значення зварювального струму.

Побудова алгоритму визначення основних параметрів термообробки в умовах дугового зварювання здійснюється завданням граничного залишкового прогину f прокатного профілю, що виникає у процесі появи термічних напружень, зумовлених локальним термічним впливом, і порівнянням його з розрахунковими даними, отриманими на основі методик, розроблених у працях [4; 5].

Висновки. Подано результати чисельної оцінки точності методики розв'язування задачі термопружності стосовно локальної низькотемпературної термообробки пластин. Визначено оптимальні параметри і досліджено ефективність вказаного способу зварювання. У результаті встановлено: збільшення тепловіддачі (тобто збільшення критерію B_i , що досягається охолодженням рівномірно нагрітої пластини) дає можливість не лише зняти, а й навести на зварному шві значні за значенням і ділянкою, де вони зосереджуються, напруження стиску, які, згідно з результатами праці [7], суттєво підвищують надійність і термін служби елементів зварних конструкцій; за одних і тих самих параметрів термообробки залишкові напруження за зварювання можна понизити до більшого рівня, ніж вони були до початку процесу термообробки.

На основі заданого значення відносного прогину визначають параметри технологічного процесу зварювання, тобто підбирають діаметр електрода, напругу і силу струму. Після наплавлення зварного шва згідно зі вказаною розрахунковою схемою прокатний елемент практично не зазнає залишкового прогину, зумовленого полем залишкових напружень, що відбувається у процесі локального термічного впливу.

Розроблена методика дає змогу здійснювати перерозподіл термічних напружень на фіксованих ділянках за довжиною прокатного профілю з метою підвищення несучої здатності зварюваної пластинки.

Бібліографічний список

1. Кудрявцев П. И. Остаточные сварочные напряжения и прочность конструкций. Москва: Машиностроение, 1976. 272 с.
2. Куркин С. А. Прочность сварных тонкостенных сосудов, работающих под давлением. Москва: Машиностроение, 1976. 184 с.
3. Николаев Г. А. Расчет сварных соединений и прочность сварных конструкций. Москва: Высш. шк., 1965. 451 с.
4. Труфяков В. И. Усталость сварных соединений. Киев: Наук. думка, 1973. 216 с.
5. Masubuchi K., Martin D. Investigation of residual stresses by use hydrogen cracking. *Welding Journal*. 1961. Vol. 40, № 12. P. 553–563.
6. Шевченко Ю. Н., Бабешко М. Е., Пискун В. В., Савченко В. Г. Пространственные задачи термопластичности. Киев: Наук. думка, 1980. 264 с.
7. Добрянський І. М., Хомляк Л. В., Іванік С. Г., Добрянська Л. О. Метод визначення пружно-пластичного напруженого стану елементів зварних конструкцій за умов локально-концентрованих теплових навантажень. *Вісник Львівського державного аграрного університету: архітектура і сільськогосподарське будівництво*. 2006. № 7. С. 188–195.

Добрянський І., Добрянська Л., Грицевич А.

РОЗРОБКА СПОСОБІВ МІНІМІЗАЦІІ ЗАЛИШКОВИХ НАПРУЖЕНЬ І ДЕФОРМАЦІЙ У ЗВАРНИХ МЕТАЛОКОНСТРУКЦІЯХ

Методи визначення залишкових напружень поділяють на розрахункові та експериментальні. Зважаючи на складність явищ, що відбуваються при зварюванні, нині немає єдиного розрахункового методу визначення напружень, які супроводжують зварювальний процес, а також залишкових напружень у конструкції після зварювання. Можна лише відзначити, що чим менше припущень введено в розрахункові передумови, тим складніша техніка виконання самих розрахунків.

Основні завдання з визначення поздовжніх напружень базуються на відомих припущеннях і гіпотезах, які не завжди дають змогу отримати результат, який підтверджується експериментами. Однак значна трудомісткість і важкість цих розрахунків – суттєва перешкода для їх практичного використання.

Для уточнення розрахункових методів зіставлено достовірність результатів математичного моделювання процесу термообробки пластинчатих систем рухомими джерелами нагріву з відомими експериментальними даними. Запропоновано підхід до визначення кількості теплової енергії, що перерозподіляється у зварювальну пластину через локальний термічний вплив.

На основі заданого значення відносного прогину визначають параметри технологічного процесу зварювання, тобто підбирають діаметр електрода, напругу і силу струму. Після наплавлення зварного шва згідно зі вказаною розрахунковою схемою прокатний елемент практично не зазнає залишкового прогину, зумовленого полем залишкових напружень, що має місце у процесі локального термічного впливу.

Розроблена методика дає змогу здійснювати перерозподіл термічних напружень на фіксованих ділянках за довжиною прокатного профілю з метою підвищення несучої здатності зварюваної пластинки.

Ключові слова: напруження, зварне з'єднання, деформація, числове моделювання.

Dobriansky I., Dobrianska L., Hrytsevytch A.

DEVELOPMENT OF MINIMIZATION METHODS FOR RESIDUAL STRESSES AND DEFORMATIONS IN WELDED METAL

Methods for residual stresses determining are subdivided into estimated and experimental ones. Taking into account the complexity of the phenomena occurring during welding there is currently no single calculation method for stresses determining accompanying the welding process, as well as the residual stresses in the construction after welding. One can only note that the less assumptions are introduced in the design approaches the more complicated is the technique of the calculations.

The main tasks for longitudinal stress determining are based on known assumptions and hypotheses that do not always allow obtaining a result which is confirmed by experiments. However the considerable complexity and severity of these calculations is a significant barrier to their practical use.

In order to clarify the calculation methods the reliability of the mathematical modeling results of heat treatment process of plate systems by moving heat sources with known experimental data is compared. The approach to determining the amount of thermal energy that is redistributed to the welding plate through the local thermal effect is proposed.

The parameters of technological welding process are determined taking into account ratio of deflection, that is, the electrode diameter, voltage and current strength are chosen. Having overlaid weld seam in accordance with the indicated calculation scheme the rolled element practically does not undertake a residual deflection caused by the field of residual stresses occurring in the process of local thermal influence.

The developed method allows to carry out the redistribution of thermal stresses on fixed sites along the length of the rolling profile in order to increase the bearing capacity of the weld plate.

Key words: stress, welded joints, deformation, numerical simulation.

Стаття надійшла 20.03.2018.