

І. Добрянський

Доцент, канд. техн. наук,
Львівський національний
аграрний університет,
м. Львів

УДК 539.374:621.78

РОЗРАХУНКОВА СХЕМА ІДЕНТИФІКАЦІЇ ОПТИМАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ ТЕРМООБРОБКИ ПЛАСТИН ЛОКАЛЬНИМ НАГРІВАННЯМ І СУПУТНИМ ОХОЛОДЖЕННЯМ

Виконано порівняння вірогідності результатів математичного моделювання процесу термообробки пластинчатих систем рухомими джерелами нагріву з відомими експериментальними даними. Запропоновано підхід до визначення кількості теплової енергії, що перерозподіляється в зварювальну пластину через локальний термічний вплив.

пластина, зварний шов, параметри зварювання, термообробка, рухомі джерела нагріву, перерозподіл напружень

Вступ. 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 енергоощадні технології, обумовлює актуальність задачі визначення оптимальних параметрів технології низькотемпературної обробки з використанням рухомих джерел і стоків тепла. Неперервне збільшення обсягів зварювальних робіт в промисловості і будівництві нерозривно пов'язане з розробленням способів мінімізації залишкових напружень і деформацій та їхнім шкідливим впливом на якість і працездатність зварних конструкцій. Трудність теоретичного вирішення цієї проблеми (від постановки задачі до всебічного числового аналізу відповідних термопружнопластичних процесів) полягає насамперед у виборі ефективної розрахункової схеми визначення зон чисто пластичних деформацій.

На сьогодні в літературі відома достатня кількість задач у пружній постановці, тобто без врахування пластичних деформацій.

Термопружні розв'язки безумовно не визначають всю повноту процесів термообробки, однак, на думку В. А. Винокурова [1, 2], дають важливе уявлення про якісну картину розподілу напружень залежно від рівня температури за умов термообробки. Крім цього, пружний розв'язок в подальшому є основою для аналізу пружно-пластичних зон.

Питанню застосування локальної термообробки зонами нагріву присвячено достатньо багато праць [3 – 8], однак недостатньо повно представлено результати систематизованого підбору оптимальних параметрів технології термообробки з використанням рухомих джерел і стоків тепла. Зокрема, вказано тільки схематично, що області розміщення рухомих джерел тепла мають бути симетричними відносно зварювального шва, а також додатково до нагріву доцільно здійснювати охолодження шва.

Аналіз відомих літературних джерел свідчить про недостатню вивченість процесу термообробки з використанням рухомих зон нагріву і супутнього охолодження та

врахування при цьому пружно-пластичних деформацій, оскільки це пов'язано з великими труднощами математичного характеру, пов'язаними з рухомістю теплового впливу, виникненню зон чисто пружних, пружно-пластичних та чисто пластичних деформацій. Розв'язування такого роду задач здійснюють переважно чисельними методами: методом скінчених різниць, методом скінчених елементів, методом граничних інтегральних рівнянь. Аналітичні методи, які дають можливість будувати розв'язки таких задач у замкнутому вигляді, можна застосовувати у розрахунках лише за умови суттєвих спрощень опису процесу деформування, що вносить похибки у встановлення реальної картини розвитку пружно-пластичних деформацій.

Постановка задачі дослідження. Сформулюємо задачу визначення оптимальних параметрів термообробки зварних пластин рухомими нормально-круговими джерелами тепла. Схема нагріву такого типу описує термообробку тонких металевих листів (з повним вирівнюванням температури по товщині) полум'ям газового нагрівача з віссю, перпендикулярною до поверхні листа [5 – 8].

Вважаємо, що джерела нагріву переміщуються зі сталою швидкістю v . Також припускаємо, що вихідні поздовжні залишкові напруження $\sigma_{xx}^{(0)}$ в зоні зварного шва, середня лінія якого співпадає з віссю Ox , є розтягувальними і набагато перевищують поперечні $\sigma_{yy}^{(0)}$.

Згідно з [9] розподіл поздовжніх залишкових напружень $\sigma_{xx}^{(0)}$ описується залежністю

$$\sigma_{xx}^{(0)} = \gamma \sigma_s^{(0)} \left(1 - y^2 / b^2\right) e^{-y^2 / (2b^2)}, \quad (1)$$

де γ – параметр, який змінюється в межах $0 \leq \gamma \leq 1$; b – півширина зони розтягувальних напружень; $\sigma_s^{(0)}$ – межа текучості матеріалу при кімнатній ($t_0 = 20^\circ C$) температурі.

З метою більш ефективного пониження рівня поздовжніх залишкових напружень $\sigma_{xx}^{(0)}$ в області зварного шва, локальну термообробку здійснювали для випадку симетрично розміщених рухомих областей нагріву по відношенню до нього. Також були реалізовані умови, за яких в системі координат $Oxyz$, яка рухається разом з джерелами нагріву, процес нагріву є усталеним, а центри зон нагріву розміщено в точках з координатами $(0, \pm d, h)$, де d – віддалі центрів областей нагріву від середньої лінії зварного шва (осі Ox), h – половина товщини пластини.

Результати числових досліджень. Оскільки пластичне течіння, яке приводить до зниження рівня залишкових зварних напружень, виникає в тих точках, де сумарне значення зварних $\sigma_{ij}^{(0)}$ і тимчасових термопружних напружень $\sigma_{ij}^{(t)}$ буде досягати значення межі текучості σ_s , то віддалі d необхідно вибирати керуючись принципом: термопружні напруження в зоні зварного шва мають бути розтягуючими і якомога більшими. Виходячи з цього, а також беручи до уваги умови текучості Мізеса [10 – 12], приходимо до висновку, що віддалі d слід визначати з умови, що в точках на зварному шві має досягатися максимум різниці напружень $\sigma = \sigma_{xx}^{(t)} - \sigma_{yy}^{(t)}$ при $y = 0$.

Виконано числові розрахунки оптимальних віддалей d_{op} у серединному перерізі пластини $z = 0$ при різних значеннях параметрів Bi , v , a і розмірів зони нагріву,

яка характеризується радіусом r^* ; також отримано наближену оцінку ефективності термообробки, яка характеризується параметром ε : цей параметр є відношенням максимуму інтенсивності температурних напружень на шві (тобто при $y = 0$) до максимуму інтенсивності температурних напружень у точках, що відповідають значенню оптимальних віддалей d_{op} (тобто при $y = \pm d_{op}$). З наведених даних випливає, що більшому значенню максимуму інтенсивності термопружних напружень на шві, тобто величині $\sigma = \sigma_{xx}^{(t)} - \sigma_{yy}^{(t)}$ при $y = 0$, відповідатиме більш ефективна локальна термообробка. Отримані числові дані показують, що ефективність локальної термообробки істотно залежить від значень параметрів Bi , v , a , радіуса плями нагріву r^* : збільшення тепловіддачі та радіуса r^* , але зменшення швидкості переміщення джерел нагріву, приводить до підвищення ефективності термообробки. Крім цього, ефективність локальної термообробки залежить від виду самого матеріалу, що обумовлюється, в основному, коефіцієнтом температуропровідності a . Так, для пластини з титанового сплаву BT5 ефективність термообробки нижча, ніж для пластини зі 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, складає $170 - 195^\circ C$. Проведені дослідження показали також, що застосування разом з нагрівом додатково охолодження зварного шва дозволяє понизити залишкові розтягувальні напруження до нуля, наприклад, при значенні $Bi=0,1$.

Визначено (з урахуванням тепловіддачі) оптимальний кут нахилу φ_{opt} зон розподілу джерел тепла до додатного напрямку осі Ox . Для цього необхідно виконати відповідні розрахунки поздовжніх залишкових напружень, що виникають при термообробці нормально-круговими джерелами тепла, схему розміщення яких вказано на рис. 1. Представлені графіки на цьому рисунку показують, що кут нахилу ($\varphi = \pm \pi / 3$) прямої, який з'єднує центри зон нагріву, до додатного напрямку осі Ox (напряму руху джерел) є оптимальним.

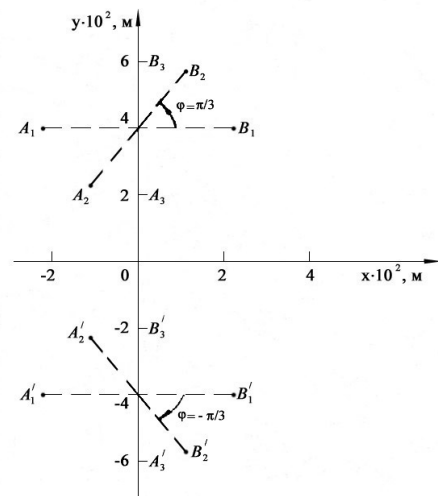


Рис. 1. Схема розміщення центрів рухомих джерел відносно середньої лінії зварювального шва пластини

Подано оцінку ефективності термообробки попередньо нагрітих (до рівномірної температури T_0) зварних пластин рухомими нормально-круговими стоками тепла, яка характеризується поведінкою залишкових напружень в напрямк їх руху. Центр нормально-кругових стоків розміщується в початку рухомої системи координат, а вісь Ox суміщається з середньою лінією зварного шва. Вихідні дані для розрахунків взято наступні: $T_0 = 200^\circ C$; $d = 0$; $\gamma = 0,9$; $b = 0,2$ м; $\Delta\theta_0 = -15^\circ C$; $k_* = 2500$ 1/м². Товщина пластини складала $h = 0,006$ м; розбиття області на елементарні прямокутники при використанні числового алгоритму, розробленого у працях [13 – 16] 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 (віднесених до межі текучості при нульовій температурі) представлено графіками на рис. 2; точкам відповідає значення $\theta_0 = \theta_0^{(max)}$, при якому температура на зварному шві досягала від'ємних значень.

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 $q = \eta IU$, в якій η – 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 із залежністю $q_p = q/v$, в якій v – швидкість зварювання.

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

Оскільки напруга дуги при зварюванні змінюється у вузьких межах (20 – 36 В), то при розрахунках її величина не регламентується. Щодо інших параметрів, то швидкість зварювання пов'язана залежністю

$$v = \frac{\beta I}{\varphi F}, \quad (2)$$

а величина струму

$$I = \frac{vq_p}{0,24\eta U}. \quad (3)$$

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

Згідно з результатами праць [18, 19] 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 шляхом задання граничного залишкового прогину f прокатного профілю, що виникає в процесі виникнення

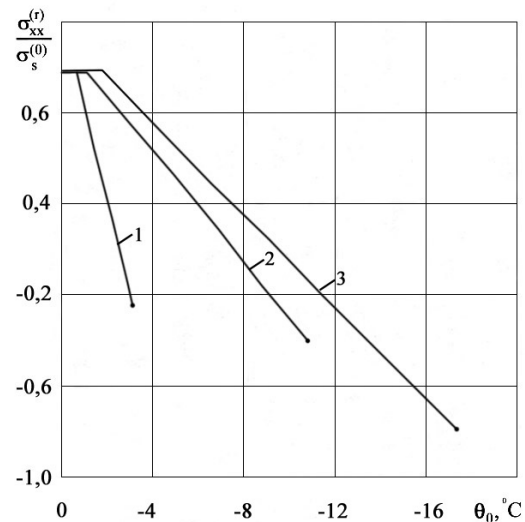


Рис. 2. Розподіл залишкових напружень $\sigma_{xx}^{(r)}$ в зварній пластині після термообробки нормально-круговими стоками тепла: крива 1 – $Bi=1$, $v=0,004$ м/с; 2 – $Bi=0,1$, $v=0,004$ м/с; 3 – $Bi=0,1$, $v=0,008$ м/с

термічних напружень, обумовлених локальним термічним впливом, і порівнянням його з розрахунковими даними, отриманими на основі методик, розроблених у працях [8, 9] і [15].

Висновки. Наведено результати числового оцінювання точності методики розв'язування задачі термопружності стосовно локальної низькотемпературної термообробки пластин. Визначено оптимальні параметри і досліджено ефективність вказаного способу зварювання. В результаті встановлено: збільшення тепловіддачі (тобто збільшення критерію Біо Bi , що досягається охолодженням рівномірно нагрітої пластини) дає можливість не лише зняти, але й навести на зварному шві значні за величиною і ділянкою, де вони зосереджуються, напруження стиску, які, згідно з результатами праці [17], істотно підвищують надійність і термін служби елементів зварних конструкцій; при одних і тих же параметрах термообробки залишкові напруження при зварюванні можна понизити до значного рівня, чим вони були більшими до початку процесу термообробки.

На основі заданого значення відносного прогину визначають параметри технологічного процесу зварювання, тобто підбираються діаметр електрода, напруга і сила струму. Після наплавлення зварного шва, згідно з вказаною розрахунковою схемою, прокатний елемент практично не зазнає залишкового прогину, обумовленого полем залишкових напружень, що спостерігається в процесі локального термічного впливу.

Розроблена методика дає можливість здійснювати перерозподіл термічних напружень на фіксованих ділянках по довжині прокатного профілю з метою підвищення несучої здатності зварюваної пластини.

Література

1. *Винокуров В. А.* Способ определения временных и остаточных напряжений при движении упругопласти-

ческой зоны в пластине при помощи цифровых вычислительных машин / В.А. Винокуров, А.Г. Григорьянц // Изв. ВУЗов. Машиностроение. – 1967. – №5. – С. 149-156.

2. Винокуров В.А. Отпуск сварных конструкций для снижения напряжений / В.А. Винокуров. – М.: Машиностроение, 1973. – 215 с.

3. Вологдин В.П. Деформации и напряжения в сварных судовых конструкциях / В.П. Вологдин. – Л.: Судпромгиз, 1945. – 180 с.

4. Кудрявцев И.В. Усталость сварных конструкций / И.В. Кудрявцев, Н.Е. Наумченков. – М.: Машиностроение, 1976. – 270 с.

5. Кудрявцев П.И. Остаточные сварочные напряжения и прочность конструкций / П. И. Кудрявцев. – М.: Машиностроение, 1976. – 272 с.

6. Куркин С.А. Прочность сварных тонкостенных сосудов, работающих под давлением / С. А. Куркин. – М.: Машиностроение, 1976. – 184 с.

7. Николаев Г.А. Расчет сварных соединений и прочность сварных конструкций / Г. А. Николаев. – М.: Высш. шк., 1965. – 451 с.

8. Труфяков В.И. Усталость сварных соединений / В. И. Труфяков. – К.: Наук. думка, 1973. – 216 с.

9. Masubuchi K. Investigation of residual stresses by use hydrogen cracking / K. Masubuchi, D. C. Martin // Welding Journal. – 1961. – Vol. 40, N 12. – P. 553-563.

10. Махненко В.И. Расчетные методы исследования кинетики сварочных напряжений и деформаций / В.И. Махненко. – К.: Наук. думка, 1976. – 320 с.

11. Ильюшин А.А. Пластичность. Основы общей математической теории / А.А. Ильюшин. – М.: Изд-во АН СССР, 1963. – 271 с.

12. Пространственные задачи термопластичности / [Шевченко Ю.Н., Бабешко М.Е., Пискун В.В., Савченко В. Г.]. – К.: Наук. думка, 1980. – 264 с.

13. Максимович В.Н. Численно-аналитическое решение задачи термопластичности для локально нагреваемых пологих оболочек / В.Н. Максимович, Л.В. Хомляк // Изв. АН СССР. Механика твердого тела. – 1988. – №5. – С. 126-132.

14. Максимович В.Н. Термопластическое состояние пластин при локальном нестационарном нагреве / В.Н. Максимович, А.А. Чабаненко // Инж.-физ. журн. – 1985. – Т. 48, № 2. – С. 340-341.

15. Хомляк Л.В. Снижение остаточных напряжений в сварных пластинах локальной термообработкой перемещающимися источниками тепла / Л.В. Хомляк, В.Н. Максимович, А.З. Кузьменко // Проблемы прочности. – 1990. – № 1. – С. 89-93.

16. Метод визначення пружно-пластичного напруженого стану елементів зварних конструкцій за умов локально-концентрованих теплових навантажень / І.М. Добрянський, Л.В. Хомляк, Є.Г. Іваник, Л.О. Добрянська // Вісник Львівського державного аграрного університету: архітектура і сільськогосподарське будівництво. – 2006. – №7. – С. 188-195.

17. Сварка и резка в промышленном строительстве: В 2-х томах. Т. 1 / Б.Д. Малышев, А.И. Акулов, Е.К. Алексеев и др. / Под ред. Б.Д. Малышева. – М.: Стройиздат, 1989. – 590 с.

18. Окерблом Н.О. Расчет деформаций металлоконструкций при сварке / Н. О. Окерблом. – М., Л.: Машгиз, 1955. – 212 с.

19. Винокуров В.А. Определение перемещений деталей при электрошлаковой сварке путем решения задач неизо-термической теории течения методом конечных элементов / В.А. Винокуров, В.А. Мельников // Автомат. сварка. – 1982. – №7. – С. 19-21.

Отримана 21.01.11

I. Dobryanskyi

The calculation scheme to identification of the optimal parameters of the thermoprocessing of the plate with local heating and attendant cooling

Lviv National Agrarian University, Lviv

Examine trustworthy of the results mathematical modelling thermoprocessing of plate profile with moving local heating sources with know experimentally data is execute. It's given the method of determined value of heat energy which is distribution in welding plates into account local thermal influence.

Інформація

9-th European Fluid Mechanics Conference

9-13 September 2012 University of Rome "Tor Vergata"

The 9th European Fluid Mechanics Conference will be held at the Main lecture hall of the University of Rome "Tor Vergata" (Faculty of Economics, via Columbia 2, I-00133 Rome)

The European Fluid Mechanics Conferences are run under the auspices of the EUROMECH organization and covers all aspects of theoretical, experimental and computational fluid mechanics.