

## ІДЕНТИФІКАЦІЯ ОПТИМАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ ТЕРМООБРОБКИ ПЛАСТИН ЛОКАЛЬНИМ НАГРІВАННЯМ І ОХОЛОДЖЕННЯМ

### IDENTIFICATION OF OPTIMAL PARAMETERS OF PLATE HEAT TREATMENT BY LOCAL HEATING AND COOLING

Добрянський І.М., д.т.н., професор (Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу), Добрянська Л.О., к.е.н., доцент (Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу), Ільчук Н.І., к.т.н., доц. (Луцький національний технічний університет)

**Dobryanskyi I.M., Doctor of Engineering., Professor (Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas), Dobryanska L.O., Ph.D. of Economics, Associate Professor (Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas), Pchuk N.I., Ph.D. of Engineering, Associate Professor (Lutsk National Technical University)**

*Виконано співставлення достовірності результатів проведеного математичного моделювання для процесу термообробки пластинчатих систем при дії рухомих джерел нагріву. Описано та запропоновано підхід для визначення загальної кількості теплової енергії, яка може перерозподілятися у зварювальній пластині через локальний термічний вплив.*

*A comparison of the reliability of mathematical modeling results of the heat treatment plate systems by moving heating sources is made. An approach to determining the amount of thermal energy redistributed in the welding plate due to local thermal effects is proposed. Increasing requirements for the strength and durability of the relevant nodes and elements of welded structures, as well as the problem of saving metal and energy in the context of the transition to resource- and energy-saving technologies, determines the urgency of the task of determining the optimal parameters of low-temperature processing technology using moving sources and heat sinks. The continuous increase in the volume of welding work in industry and construction is inextricably linked with the development of ways to minimize residual stresses and deformations and their harmful effects on the quality and performance of welded structures. The analysis of known literary sources indicates insufficient study of the process of heat treatment using moving zones of heating and accompanying cooling and taking into account elastic-plastic deformations since this is associated with great difficulties of a mathematical nature associated with the mobility of thermal effects, the emergence of purely elastic zones, elastic-plastic and purely plastic deformations. The possibility of solving such problems is performed by numerical methods, namely: the method of finite differences, the method of finite elements, and the method of boundary*

*integral equations. Analytical methods that make it possible to construct solutions to such problems in a closed form can be used in calculations only under the condition of significant simplifications of the description of the deformation process, which introduces errors in establishing the real picture of the development of elastic-plastic deformations.*

*Ключові слова: пластина, зварний шов, параметри зварювання, термообробка, рухомі джерела нагріву, перерозподіл напружень.*

*Keywords: plate, weld seam, welding parameters, heat treatment, moving heating sources, stress redistribution.*

**Вступ.** Загальні вимоги до підвищення міцності та довговічності основних конструктивних вузлів та елементів у зварних конструкціях, а також проблема щодо економії металу та енергії в сучасних умовах використання різних ресурсо- та енергозберігаючих технологій, обумовлює актуальність задачі визначення оптимальних параметрів технології низькотемпературної обробки, яка передбачає можливість використання рухомих джерел та стоків тепла. Існуюче безперервне збільшення обсягів виконання зварювальних робіт як у промисловості так і в будівництві завжди нерозривно пов'язане з розробкою різних способів мінімізації залишкових напружень і деформацій та їх шкідливим впливом на якість і роботу зварних конструкцій. Трудність теоретичного вирішення даної проблеми (від постановки задачі до всебічного чисельного аналізу відповідних термопружнопластичних процесів) полягає насамперед у виборі ефективної розрахункової схеми визначення зон чисто пластичних деформацій.

**Аналіз останніх досліджень.** На сьогодні в літературі відома достатня кількість задач в пружній постановці, тобто без врахування пластичних деформацій. Термопружні розв'язки безумовно не визначають всю повноту розглядуваних процесів термообробки, однак, на думку вчених, дають важливе уявлення про якісну картину розподілу напружень залежно від рівня температури за умов термообробки. Крім того, пружний розв'язок, в подальшому є основою для аналізу пружно-пластичних зон.

Питанню застосування локальної термообробки зонами нагріву присвячено достатньо багато робіт [1-7], але не в повному обсязі представлено загальні результати для систематизованого підбору оптимальних параметрів та технології термообробки як з використанням рухомих джерел так і стоків тепла. Досить часто, розглядається лише схематично, що області розміщення рухомих джерел тепла повинні бути симетричними відносно зварювального шва, а ще додатково до здійснення нагріву доцільно також здійснювати охолодження шва.

Проведений аналіз літературних джерел свідчить про недостатню вивченість процесу термообробки з використанням рухомих зон нагріву і супутнього охолодження та урахуванню 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 встановленні реальної картини розвитку пружно-пластичних деформацій.

**Мета статті:** визначення загальних оптимальних параметрів проведення термообробки зварних пластин дією рухомими нормально-круговими джерелами тепла. Загальна прийнята схема для нагріву даного типу описує проведення термообробки тонких металевих листів, які мають повне вирівнювання температури по товщині, з рахунок полум'я газового нагрівача з віссю, яка є перпендикулярною до поверхні листа. Відповідно до поставленої мети вирішується наступне завдання: визначення чисельної оцінки для точності методики розв'язування задачі термопружності відносно локальної низькотемпературної термообробки пластин. Передбачено визначення оптимальних параметрів та досліджено ефективність вказаного способу зварювання пластин.

**Опис матеріалу досліджень.** Припускаємо, що усі джерела нагріву будуть переміщуватися зі сталою швидкістю  $v$ , а також вихідні поздовжні залишкові напруження  $\sigma_{xx}^{(0)}$ , які є в зоні зварного шва, а середня лінія співпадає з віссю  $Ox$ , і є розтягуючими, що набагато перевищують поперечні напруження  $\sigma_{yy}^{(0)}$ .

Згідно результатів роботи 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  $\gamma$  – параметр, який змінюється в межах  $0 \leq \gamma \leq 1$ ;  $b$  – півширина зони розтягуючих 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 основного зварного шва, локальну термообробку було здійснено 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 основними джерелами нагріву, при цьому процес нагріву є встановленим, а існуючі центри зон нагріву було розміщено в точках з координатами  $(0, \pm d, h)$ , де  $d$  – це є віддаль центрів областей нагріву від середньої лінії зварного шва (осі  $Ox$ ),  $h$  – це є половина товщини пластини.

**Результати числових досліджень.** Оскільки пластичне течіння, яке призводить до загального зниження рівня існуючих залишкових зварних напружень, яке виникає в тих точках, де є сумарне значення для зварних  $\sigma_{ij}^{(0)}$  і тимчасових термопружних напружень  $\sigma_{ij}^{(t)}$  буде досягати значення межі текучості  $\sigma_s$ , то віддаль  $d$  потрібно вибирати за принципом: термопружні напруження, які виникають в зоні зварного шва, повинні бути розтягуючими і якомога більшими. Саме тому, а також беручи до уваги існуючі умови текучості Мізеса, робимо висновок, що віддаль  $d$  потрібно визначати, виходячи з умови, що в точках на зварному шві потрібно намагатися досягти максимальної різниці напружень  $\sigma = \sigma_{xx}^{(t)} - \sigma_{yy}^{(t)}$  при  $y = 0$ .

Виконано числові розрахунки оптимальних віддалей  $d_{op}$  в серединному січенні пластини  $z = 0$  при існуючих різних значеннях для параметрів  $Bi$ ,  $\nu$ ,  $a$  і розмірів для зони нагріву, яка характеризується радіусом  $r_*$ ; також було отримано наближене значення оцінки для ефективності термообробки, яку можна охарактеризувати параметром  $\varepsilon$ . Даний параметр є відношенням максимальної інтенсивності для температурних напружень на шві, а саме при  $y = 0$ , до максимуму інтенсивності температурних напружень в тих точках, які відповідають значенням оптимальних віддалей  $d_{op}$ , а саме при  $y = \pm d_{op}$ . З вище наведених даних випливає, що для більшого значення максимуму інтенсивності для термопружних напружень на шві, тобто для величини  $\sigma = \sigma_{xx}^{(t)} - \sigma_{yy}^{(t)}$  при  $y = 0$ , буде відповідати більш ефективна локальна термообробка. Всі отримані числові дані показують, що загальна ефективність локальної термообробки значно залежить від таких значень параметрів як:  $Bi$ ,  $\nu$ ,  $a$ , радіуса плями нагріву  $r_*$ . При цьому, при збільшенні тепловіддачі та радіуса  $r_*$ , але при зменшенні швидкості переміщення джерел нагріву, відбувається підвищення ефективності термообробки в цілому. Загальна ефективність локальної термообробки, як правило, залежить від виду самого матеріалу, що обумовлюється коефіцієнтом температуропровідності  $a$ . До прикладу: для пластин з титанового сплаву ВТ5, загальна ефективність термообробки є нижчою,

ніж для пластини зі сталі 09Г2С, а для пластини, яка виготовлена з алюмінієво-магнієвого сплаву АМг6, вона є вищою.

За результатами проведених розрахунків, максимально допустима температура  $t_d^{(max)}$ , при якій виникають залишкові напруження розтягу, безпосередньо в зонах дії джерел нагріву, становить близько 170...195 °С. Проведені дослідження показали також, що застосування сумісно з нагрівом додатково охолодження зварного шва дозволяє понизити існуючі залишкові розтягуючі напруження з наближенням до нуля, до наприкладу: при значенні  $Bi = 0,1$ .

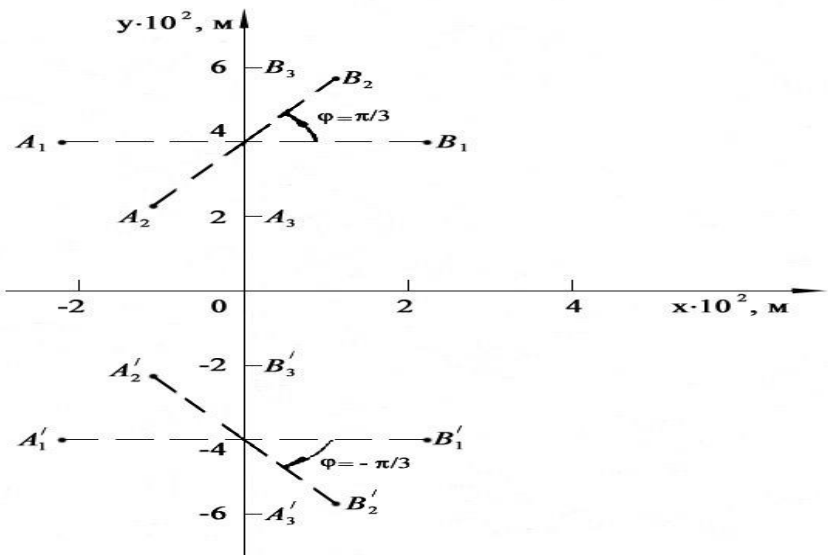


Рис. 1. Схема розміщення центрів рухомих джерел відносно середньої лінії зварювального шва пластини

Визначено (з урахуванням тепловіддачі) оптимальний кут нахилу  $\varphi_{opt}$  зон для розподілу джерел тепла у додатньому напрямку осі  $Ox$ . Для цього також необхідно виконати відповідні розрахунки для поздовжніх залишкових напружень, які виникають при термообробці нормально-круговими джерелами тепла, прийняту схему розміщення яких наведено на рис. 1. Графіки, які представлено на рисунку показують, що прийнятий

кут нахилу ( $\varphi = \pm\pi/3$ ) прямої, який з'єднує центри зон нагріву, у додатньому напрямку осі  $Ox$ , тобто напрямку руху джерел, є найбільш оптимальним.

Подано оцінку ефективності термообробки попередньо нагрітих (до рівномірної температури  $T_0$ ) зварних пластин рухомими нормально-круговими стоками тепла, яка характеризується поведінкою залишкових напружень в напрямку 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:  $T_0 = 200^0 C$ ;  $d = 0$ ;  $\gamma = 0,9$ ;  $b = 0,2$  м;  $\Delta\theta_0 = -15^0 C$ ;  $k_* = 2500$  1/м2. Товщина пластини складала  $h = 0,006$  м; розбиття області на елементарні прямокутники при використанні чисельного алгоритму, розробленого у працях вчених 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 самому зварному шві досягала своїх від'ємних значень.

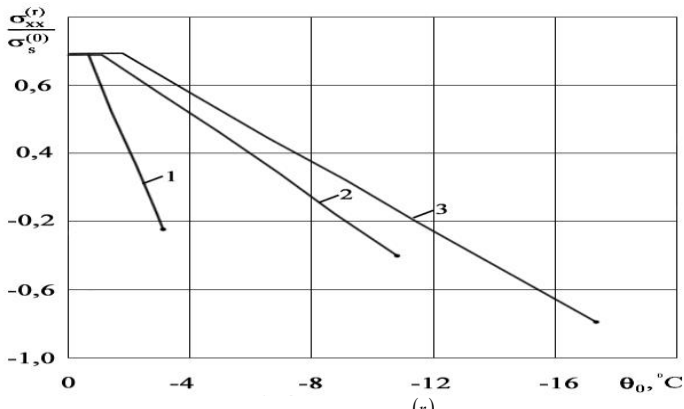


Рис. 2. Розподіл залишкових напружень  $\sigma_{xx}^{(r)}$  у зварній пластині після виконання термообробки нормально-круговими стоками тепла, а саме:

- 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

Також досить важливим чинником, який визначає процес термообробки зварних пластин, і досить суттєво впливає на загальну ефективність щодо процесу є ефективна теплова потужність зварювальної дуги, яку можна визначити за допомогою залежності:  $q = \eta IU$ , у ній  $\eta$  – це ефективний ККД для процесу нагріву;  $I$  – це є зварювальний струм;  $U$  – це є напруга дуги, погонна енергія зварювання, яка також характеризує загальну кількість теплоти зварювання, яка передається в одиницю довжини, прийнято 1 см, для однопрохідного шва або валика, яку визначають відповідно до залежності:  $q_p = q/v$ , у ній  $v$  – це є швидкість зварювання.

Погонна енергія є основним показником для формування вибору режиму зварювання, а основними параметрами, при яких здійснюється загальний підбір режиму зварювання, є струм і швидкість з якою переміщується зварювальна дуга.

Так як напруга дуги при виконанні зварювання 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

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

У залежностях (2), (3) позначено:

$\beta$  – коефіцієнт наплавлювання, г/А·год;

$F$  – площа поперечного перерізу однопрохідного шва, мм<sup>2</sup>;

$\varphi$  – щільність наплавленого металу, г/мм<sup>3</sup>;

$\eta = 0,6 \div 0,85$ ,

0,24 – це є коефіцієнт, який враховує можливий вплив, який виникає при дії синусоїдальних кривих напруги і струму, на потужність дуги при умові виконання зварювання змінним струмом.

Відповідно до результатів проведених практичних робіт орієнтовні режими для ручного дугового зварювання прийнято узагальнювати даними, які пов'язують між собою як товщину прокатного профілю, так і діаметра електрода та значення для зварювального струму.

Для виконання побудови алгоритму щодо визначення основних параметрів термообробки в умовах дугового зварювання здійснюється шляхом задання граничного залишкового прогину  $f$  прокатного профілю,

що виникає в процесі виникнення термічних напружень, обумовлених як локальним термічним впливом, так і для порівняння його з розрахунковими даними, які було отримано на основі методик.

**Висновки.** Наведено результати проведеної чисельної оцінки точності методики щодо розв'язування задачі термопружності локальної низькотемпературної термообробки різних пластин. Визначено та проаналізовано загальні оптимальні параметри та досліджено ефективність даного способу зварювання. За результатами було встановлено, що збільшення тепловіддачі, а саме збільшення критерію Біо Ві, яке було досягнуто охолодженням рівномірно нагрітої пластини, також дає можливість не лише зняти, але і навести на зварному шві досить значні за величиною та ділянкою, де вони можуть зосереджуватися, а напруження стиску, які також суттєво підвищують як надійність, так і термін служби різних елементів зварних конструкцій. Слід зазначити, що при одних і тих же параметрах термообробки, усі залишкові напруження при зварюванні можна понизити до значно нижчого рівня, ніж вони були до початку процесу термообробки.

Також на основі заданого значення відносного прогину, як правило, визначають параметри для технологічного процесу зварювання, тобто підбирають діаметр електрода, напруги і сили струму. Після виконання наплавлення зварного шва, відповідно до згідно вказаної розрахункової схеми прокатний елемент практично не зазнає залишкового прогину, обумовленого полем залишкових напружень, що має місце 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 пластинки.

## References

1. I.Dobryanskyu Mechanism of development of corrosion in concrete at low negative temperatures / I.Dobryanskyu, A. Hrytsevych // Architecture, and farm building: Bulletin of Lviv National Agrarian University – Lviv, 2006. №7 - P.84-87.
2. I.Dobryanskyu Deformation of concrete sto at low negative temperatures / I.Dobryanskyu, A. Hrytsevych // Architecture and farm building: Bulletin of Lviv National Agrarian University – Lviv, 2005. №6 - P.123-128.
3. A.Hrytsevych Influence of freeze-thaw temperature on the load-bearing capacity of steel-concrete beams / I.Dobryanskyu, Yu. Famuliak // Resource-saving materials, constructions, buildings and structures: Collection of scientific papers of the National University of Water and Environmental Engineering – Rivne, 2014. №29. – P.137-142.



4. A. Hrytsevych Selection rationale of the design diagram of steel concrete beam construction under conditions of periodic thermal influences A. Hrytsevych // Architecture and farm building: Bulletin of Lviv National Agrarian University – Lviv, 2017 №18 - P.97-103

5. Sala A. Radiant properties of materials / A. Sala. – Warsaw: Polish Sci. Publ., 1986. – 479 p.

6. Roźniakowski K. Some experimental results of laser beam interaction with a surface layer of brick / K. Roźniakowski, P. Klemm, A. J. Klemm // Building and Environment. – 2000. – Vol. 36, No. 4. – P. 485–491.

7. Griffith A. A. The theory of rupture / A. A. Griffith // Proc. 1st Int. Congr. Appl. Mech., Delft. – 1924. – P. 55–63.

### **Література**

1. Добрянський І.І. Механізм розвитку корозії бетону при низьких від'ємних температурах / Добрянський І.В., Грицевич А.В. // Архітектура та господарське будівництво: Вісник Львівського національного аграрного університету – Львів, 2006. №7 - С.84-87.

2. Добрянський І.Д. Деформація бетонної основи при низьких негативних температурах / І.Добрянський, А.Грицевич // Архітектура та господарське будівництво: Вісник Львівського національного аграрного університету – Львів, 2005. №6 - С.123-128.

3. Грицевич А.В. Вплив температури замерзання-відтавання на несучу здатність сталобетонних балок / І.Добрянський, Ю.В. Фамуляк // Ресурсозберігаючі матеріали, конструкції, будівлі та споруди: Збірник наукових праць НУВГІ – Рівне, 2014. №29. – С.137-142.

4. Грицевич А.А. Обґрунтування вибору розрахункової схеми сталобетонної балкової конструкції в умовах періодичних теплових впливів Грицевич А.А. // Архітектура та господарське будівництво: Вісник Львівського національного аграрного університету – Львів, 2017 №18 - С.97-103.

5. Сала А. Випромінювальні властивості матеріалів / А. Сала. – Варшава: Польська наук. опубл., 1986. – 479 с.

6. Roźniakowski K. Деякі експериментальні результати взаємодії лазерного променя з поверхневим шаром цегли / K. Roźniakowski, P. Klemm, A. J. Klemm // Building and Environment. – 2000. – Вип. 36, № 4. – С. 485–491.

7. Гріффіт А. А. Теорія розриву / А. А. Гріффіт // Тез. 1-й міжн. Конгр. апл. Механіка, Делфт. – 1924. – С. 55–63.