

ЕКСПОНЕНЦІЙНИЙ ЗАКОН РОЗПОДІЛУ ЗОНИ ТЕРМІЧНОГО ВПЛИВУ ЗВАРНОГО ШВА СТАЛІ AISI 304

Вінницький національний технічний університет

Анотація

У роботі встановлено експоненційний закон розподілу граничної пластичної деформації в зоні термічного впливу (ЗТВ) зварного шва для сталі AISI 304. Показано, що просторовий розподіл пластичності визначається затухаючим характером температурного поля при зварюванні та кінетикою мікроструктурних перетворень. Запропоновано аналітичну модель і розрахунковий алгоритм визначення параметрів розподілу за мінімуму експериментальних даних. Отримані результати дозволяють виконувати інженерне прогнозування локалізації деформації у зварних конструкціях.

Ключові слова: AISI 304, зона термічного впливу, пластичність, гранична пластична деформація, експоненційний закон, зварювання.

Abstract

An exponential law of plasticity distribution in the heat-affected zone (HAZ) of welded joints made of AISI 304 steel is established. It is shown that the spatial distribution of limiting plastic strain is governed by the attenuation of the welding temperature field and microstructural transformation kinetics. An analytical model and a calculation algorithm with minimal experimental input are proposed. The results can be applied for engineering prediction of strain localization in welded structures.

Keywords: AISI 304, heat-affected zone, plasticity, limiting plastic strain, exponential law, welding.

Основна частина

Зона термічного впливу (ЗТВ) є ключовою областю зварного з'єднання, у якій формуються локальні неоднорідності механічних властивостей. Для аустенітної сталі AISI 304 ці неоднорідності проявляються насамперед у зміні пластичності, що визначає місце локалізації деформації та руйнування.

Температурний розподіл у процесі зварювання описується рішенням задачі рухомого джерела тепла, згідно з яким температура експоненційно зменшується з віддаленням від лінії сплавлення [1]. Це означає, що інтенсивність термічного впливу, яка визначає глибину мікроструктурних змін, також має експоненційний характер.

Водночас мікроструктурні процеси, що відбуваються в ЗТВ (зростання зерна, релаксація дислокаційної структури, сенсibilізація), підпорядковуються кінетичним залежностям типу Арреніуса [2]. Для сталі AISI 304 сенсibilізація є одним із визначальних факторів, що призводить до локального зниження пластичності в ЗТВ [3]. Таким чином, просторовий розподіл пластичних властивостей формується як результат суперпозиції експоненційного температурного поля та експоненційної кінетики структурних перетворень.

На основі зазначених фізичних передумов встановлено, що гранична пластична деформація в ЗТВ змінюється за експоненційним законом:

$$\varepsilon_{\text{гр}}^{\text{пл}}(x) = \varepsilon_{\text{Б.М.}}^{\text{пл}} - \Delta\varepsilon^{\text{пл}} e^{-\frac{x}{l}},$$

де $\varepsilon_{\text{Б.М.}}^{\text{пл}}$ – гранична пластична деформація базового металу; $\Delta\varepsilon^{\text{пл}}$ – максимальне зниження пластичності в ЗТВ; l — характеристична довжина затухання (ширина зони термічного впливу).

Запропонований закон має універсальний характер і відображає фундаментальну закономірність затухання впливу термічного циклу.

Для практичного застосування розроблено розрахунковий алгоритм визначення параметрів закону за мінімуму експериментальних даних.

Першим етапом є визначення базового рівня пластичності $\varepsilon_{\text{Б.М.}}^{\text{пл}}$, який може бути отриманий з одного випробування або з довідкових даних для сталі AISI 304 [4].

Другим етапом є аналіз профілю мікротвердості $HV(x)$, отриманого на поперечному шліфі. Визначаються значення $HV_{\text{Б.М.}}$ (твердість базового матеріалу) та HV_{max} , після чого вводиться нормований параметр:

$$\phi(x) = \frac{|HV(x) - HV_{\text{Б.М.}}|}{|HV_{\text{max}} - HV_{\text{Б.М.}}|}$$

Фізичний зміст цього параметра полягає в наступному. Чисельник характеризує локальне відхилення властивостей матеріалу від базового стану, тоді як знаменник – максимальне відхилення в ЗТВ. Таким чином, $\phi(x)$ є безрозмірною мірою «інтенсивності термічного впливу», нормованою до одиниці.

При $\phi=l$ матеріал знаходиться у найбільш зміненому стані (максимальний термічний вплив), тоді як при $\phi \rightarrow 0$ його властивості практично відповідають базовому металу. Таким чином, $\phi(x)$ можна розглядати як узагальнений параметр структурного пошкодження або деградації пластичності. Оскільки, як температурне поле, так і мікроструктурні зміни затухають експоненційно, параметр $\phi(x)$ також підпорядковується експоненційному закону:

$$\phi(x) = \exp\left(-\frac{x}{l}\right).$$

Це дозволяє безпосередньо визначити характеристичну довжину l . Для цього задається безрозмірний параметр ρ , який характеризує ступінь «відновлення» матеріалу після термічного впливу. При малих значеннях ρ (наприклад, 0.05–0.1) вважається, що властивості матеріалу практично досягли рівня базового металу. Враховуючи сказане, можна визначати ширину ЗТВ з умови відновлення базових властивостей:

$$\phi(x)=\rho.$$

Таким чином, відстань w_ρ , яка відповідає умові $\phi=\rho$, визначає ефективну ширину зони термічного впливу з точки зору зміни механічних властивостей.

Вибір значення ρ залежить від точності експериментального визначення характеристик [2, 5], тому така величина може розглядатися як критерій практичного відновлення властивостей.

З урахуванням експоненційного характеру функції $\phi(x)$ отримуємо:

$$\rho = \exp\left(-\frac{w_\rho}{l}\right),$$

звідки характеристична довжина затухання визначається як:

$$l = \frac{w_\rho}{\ln(1/\rho)}.$$

Таким чином, параметр ρ виконує роль зв'язуючої ланки між експериментально визначеною шириною зони впливу та аналітичним параметром моделі l , що дозволяє визначати його без застосування методів апроксимації.

Важливо підкреслити, що цей вираз отримано без використання апроксимації або регресійного аналізу, що суттєво зменшує обсяг експериментальних даних.

Параметр $\Delta\varepsilon^{\text{пл}}$ визначається окремо. Найбільш коректним є його визначення за однією механічною точкою:

$$\Delta \varepsilon^{\text{пл}} = \varepsilon_{\text{Б.М.}}^{\text{пл}} - \varepsilon_{\text{min}}^{\text{пл}},$$

де $\varepsilon_{\text{min}}^{\text{пл}}$ – значення мінімальної пластичності в зоні термічного впливу зварного шва.

За наявності експериментального профілю твердості по перерізу зварного з'єднання координата мінімуму граничної пластичної деформації може бути визначена безпосередньо за положенням екстремального відхилення твердості від рівня базового металу. У такому разі координата x_{min} визначається з умови $x_{\text{min}} = \arg \max |HV(x) - HV_{\text{Б.М.}}|$. Це відповідає області найбільшої структурної перебудови матеріалу, яка в межах прийнятого підходу ототожнюється з областю мінімальної пластичності. Тому експоненційний закон розподілу пластичності доцільно записувати відносно координати x_{min} , а не відносно геометричної лінії сплавлення у вигляді

$$\varepsilon_{\text{гр}}^{\text{пл}}(x) = \varepsilon_{\text{Б.М.}}^{\text{пл}} - \Delta \varepsilon^{\text{пл}} \exp\left(-\frac{|x - x_{\text{min}}|}{l}\right).$$

Розглянемо приклад. Нехай $HV_{\text{Б.М.}} = 180$, $HV_{\text{max}} = 240$, $\varepsilon_{\text{Б.М.}}^{\text{пл}} = 0.55$, $w_{0.05} = 3$ мм. Тоді:

$$l = \frac{3}{\ln(1/0.05)} \approx 1.0 \text{ мм.}$$

Якщо $\varepsilon_{\text{min}}^{\text{пл}} = 0.47$, то $\Delta \varepsilon^{\text{пл}} = 0.55 - 0.47 = 0.08$.

Отже,

$$\varepsilon_{\text{гр}}^{\text{пл}}(x) = 0.55 - 0.08 \exp\left(-\frac{|x - x_{\text{min}}|}{1}\right).$$

Ця залежність відображає швидке відновлення пластичності і добре узгоджується з літературними даними [4, 6].

Таким чином, експоненційний закон є не лише математично зручним, але й фізично обґрунтованим описом розподілу пластичності в ЗТВ.

ВИСНОВКИ

1. Встановлено, що розподіл граничної пластичної деформації в ЗТВ сталі AISI 304 має експоненційний характер.
2. Показано, що цей закон обумовлений експоненційним затуханням температурного поля та кінетикою мікроструктурних процесів.
3. Введений нормований параметр $\phi(x)$ має чіткий фізичний зміст і дозволяє пов'язати твердість зі зміною пластичності.
4. Запропоновано алгоритм визначення параметрів моделі за мінімуму експериментальних даних.
5. Отриманий закон може бути використаний для прогнозування локалізації деформації у зварних конструкціях.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

6. Rosenthal D. The theory of moving sources of heat and its application to metal treatments // *Transactions of the ASME*. 1946. Vol. 68. P. 849–866.
7. Porter D. A., Easterling K. E., Sherif M. Y. *Phase transformations in metals and alloys*. 3rd ed. Boca Raton : CRC Press, 2009. 520 p.
8. *Practical guidelines for the fabrication of austenitic stainless steels*. Brussels : International Molybdenum Association (IMO), 2015. 60 p.
9. Lippold J. C., Kotecki D. J. *Welding metallurgy and weldability of stainless steels*. Hoboken : John Wiley & Sons, 2005. 357 p.
10. Callister W. D., Rethwisch D. G. *Materials science and engineering: an introduction*. 9th ed. Hoboken : John Wiley & Sons, 2014. 960 p.
11. Kou S. *Welding metallurgy*. 2nd ed. Hoboken : John Wiley & Sons, 2003. 461 p.

Савуляк Віктор Валерійович – к.т.н., доцент кафедри технології та автоматизації машинобудування. Вінницький національний технічний університет, e-mail: vvs_81@vntu.edu.ua

Білоствечний Володимир Олександрович – аспірант кафедри технології та автоматизації машинобудування. Вінницький національний технічний університет, факультет машинобудування і транспорту

Savulyak Victor V. – Associated Professor, Ph.D., Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: vvs_81@vntu.edu.ua

Bilostechny Volodymyr O. – Postgraduate student, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia