

УДК 539.3; 537.39

**Г. Степанов, докт. техн. наук; А. Бабуцький, канд. техн. наук;
А. Олісов, канд. техн. наук; І. Мамєєв, канд. техн. наук**

Інститут проблем міцності ім. Г.С. Писаренка НАН України

ВПЛИВ ПОПЕРЕДНЬОГО НАГРІВУ МЕТАЛУ НА РЕЛАКСАЦІЮ НАПРУЖЕНЬ, ВИКЛИКАНУ ПРОПУСКАННЯМ ІМПУЛЬСНОГО ЕЛЕКТРИЧНОГО СТРУМУ

Резюме. Наведено результати досліджень щодо впливу попереднього нагріву металу на релаксацію напружень розтягу, викликану пропусканням імпульсного електричного струму високої густини. Показано, що попереднє нагрівання металу призводить до ефекту посилення релаксації напружень.

Ключові слова: попередній нагрів, релаксація напружень, імпульсний електричний струм.

G. Stepanov, A. Babutskii, A. Olisov, I. Mameev

INFLUENCE OF PRELIMINARY HEATING OF METAL ON STRESS RELAXATION CAUSED BY PASSAGE OF PULSED ELECTRIC CURRENT

The summary. Results of investigations of influence of preliminary heating of metal on stress relaxation caused by passage of pulsed electric current of high density are presented in the paper. It was shown that preliminary heating of metal results in effect of amplification of stress relaxation.

Key words: preliminary heating, stress relaxation, pulsed electric current.

Розроблення сучасних методів релаксації залишкових напружень розтягу в елементах конструкцій є актуальним завданням з огляду на негативний вплив, який вони мають на несучу здатність конструкцій як при статичному, так і при циклічному механічному навантаженні. Як правило, потрібно брати до уваги такі чинники цього впливу [1]: додавання залишкових напружень до напружень, викликаних зовнішніми навантаженнями; підвищення об'ємності напруженого стану; їх вплив на сталість розповсюдження тріщин. Крім цього, залишкові напруження розтягу є головною причиною корозійного розтріскування [2].

В літературі широко представлені дані щодо впливу імпульсного електричного струму (ІЕС) на релаксацію напружень при навантаженні розтягом під дією так званого «електропластичного ефекту» (див., наприклад, [3, 4]). Виходячи з аналізу наявних результатів експериментальних досліджень, можна зробити висновок про існування можливості створення технології зниження залишкових напружень, що базується на використанні імпульсного електромагнітного поля і, зокрема, ІЕС. Дослідження в цьому напрямку з використанням як прямого пропускання струму, так і індукованого струму тривають [5 - 8], але вони потребують подальшого розвитку. В раніше опублікованих результатах досліджень [3, 4], проведених у діапазоні температур 300...78 К, встановлено, що температура випробувань практично не впливає на релаксацію та деформацію металів, тобто величина ефекту має «слабку» температурну залежність. Проте існує необхідність вивчення можливостей посилення стимульованої струмом релаксації напружень, наприклад, за рахунок додаткового попереднього нагріву металу.

В літературі вже представлені дані стосовно попереднього нагріву матеріалу, який використовується для посилення релаксації залишкових напружень. У роботі [9] застосували попередній підігрів композитного матеріалу (алюміній, зміцнений

волоконнами $Al_{18}B_4O_{33}$) до $100\text{ }^\circ\text{C}$ для підсилення релаксації залишкових напружень при обробці імпульсним магнітним полем. У роботі [10] ми показали, що попередній підігрів сталевого зразка зі зварним швом призводить до посилення релаксації залишкових зварювальних напружень при обробці ІЕС.

В статті проаналізовано механізм безпосередньої дії електричного струму високої густини на релаксацію пружних напружень, не пов'язаної з джоулевім розігрівом усього об'єму металу, та вплив на цей процес додаткового нагрівання. Для якісного оцінювання такого впливу використано існуючі уявлення щодо механізму електронної провідності металів [11, 12] і термоактивованого механізму пластичної деформації навантаженого металу [13 - 15]. На підтвердження отриманих висновків наведено результати експериментальних досліджень впливу попереднього нагріву ряду металічних конструкційних матеріалів на релаксацію напружень розтягу, викликану пропусканням ІЕС.

Аналіз безпосередньої дії електричного струму на кристалічну решітку металу. Основні співвідношення, що визначають кінетику взаємодії електронів провідності з вузлами кристалічної решітки у відповідності з існуючими уявленнями про механізм електронної провідності металів [11, 12], включають залежності для визначення густини струму, напруженості електричного поля та електричного опору:

$$\begin{aligned} i &= e v n_0; \\ \frac{dU}{dx} &= E = \rho i; \\ \rho &= \frac{2m_e \bar{v}}{n_0 e^2 l_0} = \frac{2m_e}{n_0 e^2 t_0}, \end{aligned} \quad (1)$$

де i – густина струму; e – заряд електрона; v – швидкість направленої руху (дрейфу) електронів; n_0 – число електронів провідності в одиниці об'єму; U – електричний потенціал; E – напруженість електричного поля; ρ – питомий електричний опір; m_e – маса спокою електрона; \bar{v} – середня швидкість руху електронів; l_0 – середня довжина вільного пробігу електрона; t_0 – середній час вільного пробігу електрона.

Базуючись на рівняннях (1), можна отримати вираз для кінетичної енергії направленої руху електронів під дією електричного поля

$$K_e = m_e v^2 / 2 = e E (t_0 v) = \rho i (e v n_0) \frac{t_0}{n_0} = \rho i^2 \frac{t_0}{n_0}. \quad (2)$$

У відповідності з рівнянням (1) кінетична енергія направленої руху електронів пропорційна квадрату густини струму, що не суперечить отриманому раніше висновку [8]. В рівнянні (2) вплив електричного поля на підвищення кінетичної енергії електронів в одиниці об'єму визначається тільки швидкістю v [12]:

$$\sum_{n_0} \left[\frac{m_e (\bar{v} + v)^2 - m_e \bar{v}^2}{2} \right] \approx \sum_{n_0} \frac{m_e v^2}{2} \text{ враховуючи, що } \sum_{n_0} \bar{v} v \approx 0.$$

При заданих густині струму та електричному опору за рівняннями (1) та (2) можна визначити параметри взаємодії електронів з вузлами кристалічної решітки. Для кількісної оцінки ефекту цієї взаємодії достатньо знати значення середнього часу вільного руху електронів між зіткненнями t_0 та число електронів провідності в одиниці об'єму n_0 . Наприклад, приймаючи $n_0 = b \cdot n$ (n – число атомів в одиниці об'єму, b – валентність), $t_0 = 4 \cdot 10^{-15}$ с, отримаємо розрахункове значення питомого електричного опору заліза $\rho = 1,06 \cdot 10^{-7}$ Ом-м, близьке до наведених у літературі.

Підвищення кінетичної енергії електрона за період його вільного пробігу, розраховане за виразом (2) при густині струму 10^{10} А/м², складає величину $K_e = 3,15 \cdot 10^{-12}$ еВ, що набагато менше зміни енергії теплового руху атома при підвищенні температури на один градус, яка дорівнює $8,62 \cdot 10^{-5}$ еВ/°К. Таким чином,

одноразова взаємодія електрона з атомом суттєво не впливає на рух атома в досконалій частині кристалічної решітки. Однак при оцінюванні впливу електричного струму на динаміку дислокацій потрібно врахувати переважну взаємодію потоку електронів з атомами в околиці дислокацій та інших дефектів.

При співвідношенні загальної густини атомів n до густини «дефектних» атомів (атомів в околиці дефектів – границь зерен, дислокацій, вакансій та ін.) n_d , що дорівнює $n/n_d \approx 2 \cdot 10^6$ та відповідає густині дислокацій $\approx 10^9$ $1/\text{м}^2$, отримаємо середнє ефективне підвищення кінетичної енергії «дефектних» атомів $K_{ef} = 6,3 \cdot 10^{-6}$ еВ. Таким чином, взаємодія електронів з «дефектними» атомами за час термодинамічної релаксації $t_r \approx 2,2 \cdot 10^{-10}$ с (t_r – час, протягом якого зберігається направлений рух атомів дислокаційних ліній і який характеризує їх демпфування) підвищує енергію направлено руху атомів в околиці дефектів у результаті дії потоку електронів на величину $\Delta Q_e = (t_r/t_0) K_{ef} = 0,347$ еВ, що вже може суттєво стимулювати рух дислокацій та розвиток пластичного зсуву за наявності достатнього рівня зовнішнього механічного навантаження.

З наведеного аналізу випливає, що ефективність безпосередньої дії електричного струму на динаміку дислокацій зростає пропорційно квадрату його густини, густині «дефектних» атомів і часу термодинамічної релаксації. Нижче наведено оцінки безпосереднього впливу електричного струму та нагрівання на швидкість пластичної деформації.

Оцінка впливу електричного струму та нагрівання на швидкість пластичної деформації металу. У відповідності з кінетичною теорією міцності енергія активації руйнування $Q(\sigma)$ знижується зі зростанням рівня напружень [15]:

$$Q(\sigma) = Q_f - \gamma \sigma = Q_f (1 - \beta \sigma); \quad \beta = \gamma / Q_f, \quad \tau = \tau_0 \exp\left(\frac{Q_f(1 - \beta\sigma)}{kT}\right), \quad (3)$$

де – Q_f , γ та τ_0 – параметри матеріалу, σ – рівень ефективних напружень, τ – час до руйнування, k – постійна Больцмана.

Аналогічно рівнянню у формі (3), що характеризує процес руйнування, для оцінювання впливу механічних напружень на швидкість пластичної деформації при термоактивованому процесі використовують рівняння [13, 14]

$$\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}_0 \exp\left(-\frac{Q_0(1 - \beta \cdot \sigma)}{kT}\right). \quad (4)$$

Для якісного оцінювання термоактивованого процесу деформування маловуглецевої сталі приймаємо в рівнянні (4) $Q_0 = 80$ ккал/моль = 3,45 еВ/ат, $\beta = 2,88 \cdot 10^{-9}$ Па⁻¹, що відповідає зниженню енергії активації пластичної деформації до нуля (тобто підвищенню швидкості деформації $\dot{\epsilon}$ до максимального значення) при критичному напруженні $\sigma_{cr} = 1/\beta \approx 350$ МПа.

Використання лінійної залежності енергії активації від рівня напружень у рівнянні (4) дозволяє оцінити вплив електричного струму на активацію дислокаційного механізму деформації навантаженого металу:

$$Q(\sigma) = Q_0 - \gamma \sigma - \Delta Q_e = Q_0(1 - \beta \sigma - \frac{\Delta Q_e}{Q_0}) = Q_0 \left[1 - \beta(\sigma + \sigma_{ef}^e)\right]; \quad \sigma_{ef}^e = \frac{\Delta Q_e}{Q_0} / \beta. \quad (5)$$

Для наведених вище значень параметрів β та Q_0 визначимо величину ефективного механічного напруження в металі, викликаного дією електричного струму (безпосередньою дією електронів провідності на «дефектні» атоми)

$$\sigma_{ef}^e = \frac{\Delta Q_e}{Q_0} / \beta = \frac{0,347}{3,45} / 2,88 \cdot 10^{-9} \approx 35 \text{ МПа}.$$

Таким чином, залежність контрольованої термоактивованим рухом дислокацій швидкості пластичної деформації від рівня механічного навантаження та густини струму визначимо експоненціальним виразом

$$\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}_0 \exp\left(-\frac{Q_0(1 - \beta(\sigma + \sigma_{ef}^e))}{kT}\right), \quad (6)$$

де $\dot{\epsilon}_0$ – гранична швидкість пластичної деформації, що відповідає нульовому рівню потенціальних бар'єрів на шляху дислокацій при критичному напруженні $\sigma_{cr} = \sigma + \sigma_{ef}^e$.

Підвищення швидкості пластичної деформації при підвищенні рівня напружень розтягу, розраховане за рівнянням (6) при різних температурах попереднього нагріву, ілюструють залежності, зображені на рис. 1. Як впливає з цих залежностей, при фіксованих температурі попереднього нагрівання та σ_{ef}^e швидкість пластичної деформації швидко підвищується зі зростанням механічного навантаження. Підвищення температури попереднього нагріву інтенсифікує термоактивований процес пластичної деформації, що підвищує ефект дії електричного струму при процесах релаксації напружень: підвищення температури забезпечує підтримання заданої швидкості деформації за умов зниження навантаження, яке відбувається при релаксації напружень. Нижче наведено результати експериментальних досліджень на підтвердження висновків щодо впливу попереднього нагріву металів на ефект інтенсифікації релаксації напружень розтягу при пропусканні ІЕС високої густини.

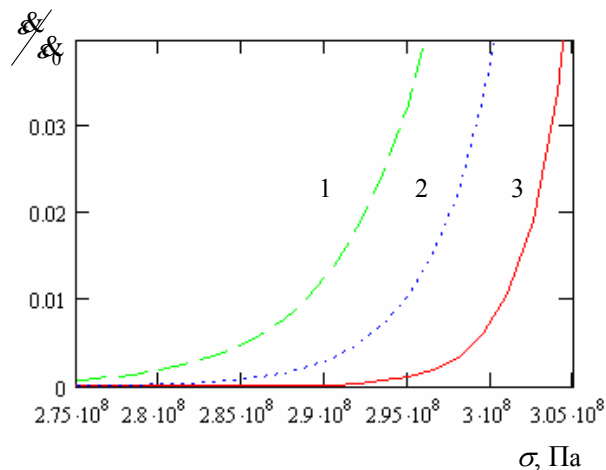


Рисунок 1 – Зміна відносною швидкості пластичної деформації залежно від рівня напружень σ при $\sigma_{ef}^e = 35$ МПа і температурі 600 °K (1), 450 °K (2) та 300 °K (3)

Експериментальне дослідження впливу електричного струму та нагрівання на релаксацію напружень розтягу. Оскільки безпосереднє експериментальне визначення зміни швидкості пластичної деформації залежно від рівня напружень і температури при пропусканні ІЕС ускладнене, для якісного підтвердження вищевказаних висновків було виконано дещо простіші дослідження.

Для цього визначали залежність від температури попереднього нагріву металу відносною зміни напружень після дії ІЕС – $\delta\sigma/\sigma$, де $\delta\sigma$ – величина зміни (падіння) напружень у результаті дії ІЕС, σ – початкові напруження, при яких розпочинали обробку струмом. У дослідженнях використовували зразки у вигляді довгих смуг із сталей Ст3 та 08X18N10T перерізом 2 мм х 6 мм та титанового сплаву ВТ-14 перерізом 3 мм х 6 мм. Навантаження в діапазоні $0,7 \dots 0,9$ від границі плинності матеріалів виконували за допомогою розривної машини ІР 5047-50-02.

Обробку струмом проводили за допомогою генератора ІЕС, описаного в [16]. У даних дослідженнях використовували два рівні максимального струму I_{max} : 38 кА та

50 кА (результат розряду батареї конденсаторів ємністю 600 мкФ, попередньо заряджених до 3 кВ та 4 кВ відповідно, рис. 2).

Попередній нагрів зразків проводили за двома варіантами (рис. 3), причому температуру посередині довжини зразка перед пропусканням ІЕС контролювали в обох варіантах за допомогою хромель-алюмелевої термопари, притиснутої до зразка, та потенціометра КСП-4 (на рисунку не показані). В першому варіанті всю частину зразка, що обробляється ІЕС, нагрівали, пропускаючи через неї постійний електричний струм від зварювального випрямлювача ВСВУ-400 ($I = 10 \dots 400$ А). Рівень струму вибирали залежно від потрібного рівня температури нагріву зразка. Після стабілізації температури зразка на вибраному рівні проводили його обробку ІЕС.

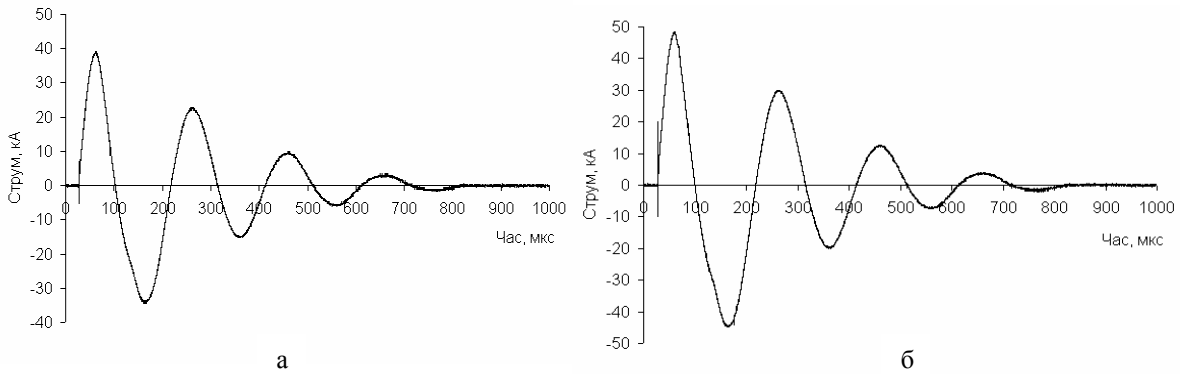


Рисунок 2 – Зареєстровані імпульси електричного струму, що використовувалися при дослідженнях:
а – розряд батареї конденсаторів $C = 600$ мкФ, $U = 3$ кВ; б – $C = 600$ мкФ, $U = 4$ кВ

У другому варіанті (варіант конвекційного нагріву) метал зразка нагрівали струменем гарячого повітря, причому нагрівали не по всій довжині оброблюваної імпульсним струмом частини, а тільки її ділянку (рис. 3). Термопару при цьому загортали азбестом з метою запобігання її перегріву відносно металу зразка. З метою запобігання нагрівання зразка за межами зони обдуву/нагріву на ньому встановлювали радіатори (позиції б на рис. 3), зроблені з масивних мідних смуг, з'єднаних між собою через зразок.

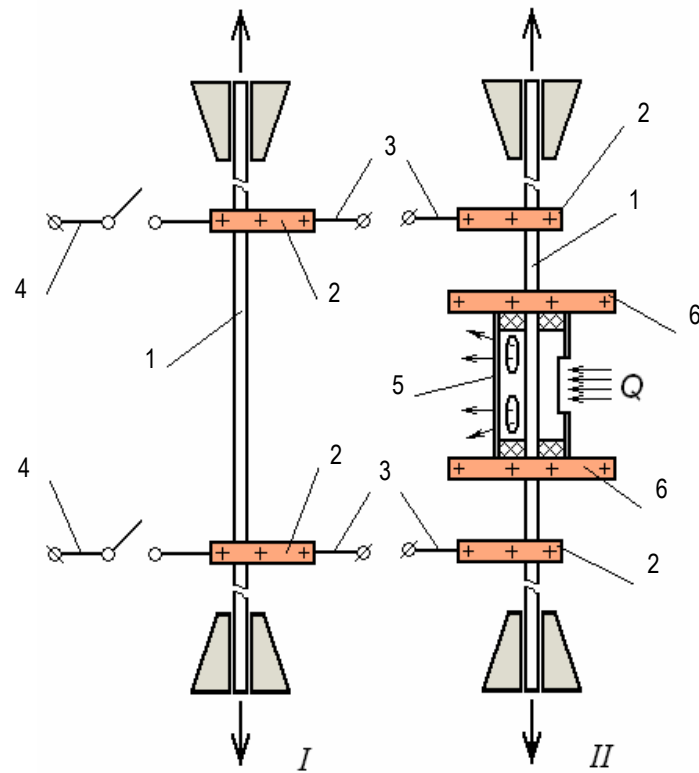


Рисунок 3 – Схеми пропускання ІЕС через навантажений зразок в умовах попереднього нагріву постійним електричним струмом (варіант I) та струменем гарячого повітря (варіант II): 1 – зразок, 2 – контактори, 3 – лінії під'єднання до генератора ІЕС, 4 – лінії під'єднання до джерела постійного струму, 5 – кожух з вхідним і вихідними отворами, 6 – радіатори

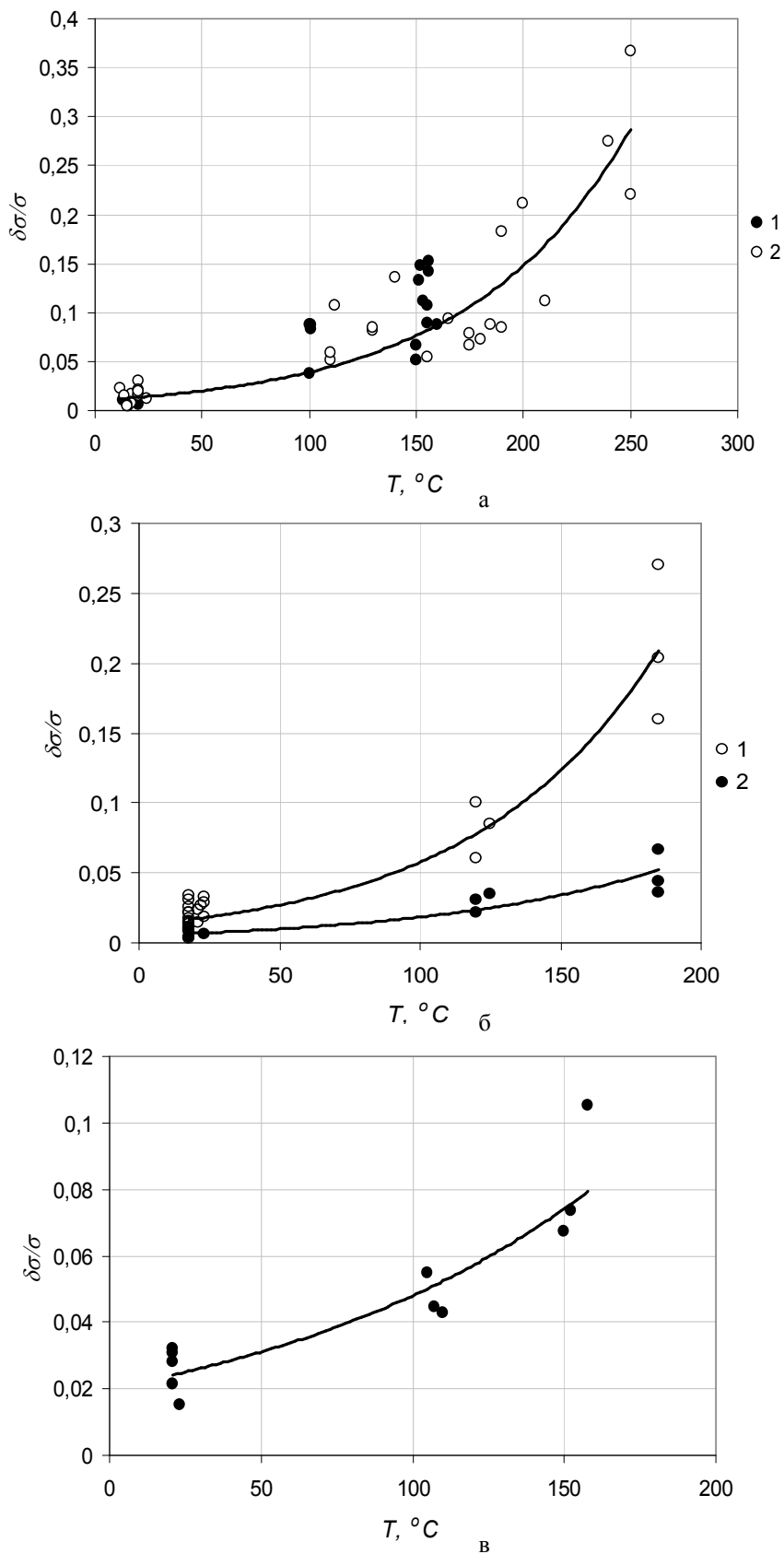


Рисунок 4 – Залежності ступеня релаксації $\delta\sigma/\sigma$ при пропусканні ІЕС від температури попереднього нагріву: а – сталь Ст3, максимальна густина струму $j_{\text{max}} \approx 4 \text{ кА/мм}^2$ (1 – конвекційний нагрів, 2 – нагрів постійним електричним струмом); б – титановий сплав ВТ-14, конвекційний нагрів (1 – $j_{\text{max}} \approx 4 \text{ кА/мм}^2$; 2 – $j_{\text{max}} \approx 3 \text{ кА/мм}^2$); в – сталь 08Х18Н10Т, конвекційний нагрів, $j_{\text{max}} \approx 4 \text{ кА/мм}^2$

Для того, щоб була можливість порівнювати й аналізувати дані для різних варіантів нагріву, початкові значення $\delta\sigma$, отримані для другого варіанта нагріву, множили на коефіцієнт $\eta = l_{\text{IEC}}/l_{\text{T}}$, де l_{IEC} – довжина частини зразка, через яку пропускали ІЕС, а l_{T} – довжина ділянки, що попередньо нагрівалася. Таким чином, враховувалася та обставина, що нагрівалась не вся частина зразка, через яку проходив ІЕС, а тільки її ділянка.

Результати експериментальних досліджень зображено на рис. 4. Із залежності (рис. 4а) випливає, що релаксація напружень практично не залежить від варіанта попереднього нагріву (нагріву постійним електричним струмом чи конвекційного нагріву). Ефект релаксації напружень зростає з підвищенням густини струму (рис. 4б). Аналіз результатів експериментів підтверджує висновок про те, що попереднє нагрівання металу призводить до ефекту посилення релаксації напружень розтягу в результаті дії ІЕС.

Висновки. В результаті даного дослідження теоретично обґрунтовано та експериментально підтверджено суттєву інтенсифікацію викликану пропусканням ІЕС релаксації напружень у металі завдяки його попередньому нагріву. Отримані результати можуть слугувати обґрунтуванням створення ефективних технологій обробки металічних матеріалів для релаксації несприятливих залишкових напружень.

Література

1. Касаткин Б.С. Напряжения и деформации при сварке / Касаткин Б.С., Прохоренко В.М., Чертов И.М. – К.: Вища школа, 1987. – 246 с.
2. Петушков В.Г. Обработка взрывом сварных соединений металлоконструкций / Петушков В.Г., Кудинов В.М., Фадеев Ю.И. – М.: Металлургия, 1993. – 160 с.
3. Спицын В.И. Электропластическая деформация металлов / Спицын В.И., Троицкий О.А. – М.: Наука, 1985. – 160 с.
4. Кирьянчев Н.Е. Электропластическая деформация металлов (Обзор) / Н.Е. Кирьянчев, О.А. Троицкий, С.А. Клевцур // Проблемы прочности. – 1983. – №5. – С. 101–105.
5. Влияние электродинамической обработки на напряженно-деформированное состояние теплоустойчивых сталей / Л.М. Лобанов, Н.А. Пашин, В.Ю. Скульский и др. // Автоматическая сварка. – 2006. – №5. – С. 11–15.
6. Глинберг А.Д. Практика и перспективы применения магнитно-импульсной обработки материалов / А.Д. Глинберг, Н.А. Карандашев, А.Ф. Крутин // Действие электромагнитных полей и тока на материалы: доклады международной конференции (21 – 24 октября, 2003 г., г. Москва). – Москва, 2003. – С. 55–57.
7. Research on residual stress reduction by a low frequency alternating magnetic field / F. Tang, A.L. Lu, J.F. Mei et al. // J. Mater. Processing Technology. – 1998. – №74. – P. 255–258.
8. Research on residual-stress reduction by strong pulsed magnetic treatment / A.L. Lu, F. Tang, X.J. Luo et al. // Ibid. – 1998. – №74. – P. 259–262.
9. Li G. Effect of thermomagnetic treatment on tensile properties of Al18B4O33 whisker-reinforced aluminum composite containing Fe3O4 particles / G. Li, Y. Sun, W.D. Fei // Materials Letters. – 2003. – Vol. 57. – P. 3217–3221.
10. Степанов Г.В. Вплив імпульсного електричного струму на релаксацію залишкових зварювальних напружень / Г.В. Степанов, А.І. Бабуцький, І.А. Мамеев // Вісник Тернопільського державного технічного університету. – 2007. – Т. 12. – № 3. – С. 16–22.
11. Christy R.W. The structure of matter: an introduction to modern physics / R.W. Christy, A. Pytte. – W.A. Benjamin, INC, New-York-Amsterdam, 1965. – 598 p.
12. Карякин Н.И. Краткий справочник по физике / Карякин Н.И., Быстров К.Н., Киреев П.С. – М.: Высшая школа, 1962. – 560 с.
13. Campbell J.D. The temperature and strain-rate dependence of the shear strength of mild steel / J.D. Campbell, W.G. Ferguson // Phil. Mag. – 1970. – Vol. 21. – № 1. – P. 63–82.
14. Степанов Г.В. Упругопластическое деформирование и разрушение материалов при импульсном нагружении / Степанов Г.В. – Киев: Наукова думка, 1991. – 288 с.
15. Регель В.Р. Кинетическая природа прочности твердых тел / Регель В.Р., Слуцкер А.И., Томашевский Э.В. – М.: Наука, 1974. – 560 с.
16. Степанов Г.В. Нестационарное напряженно-деформированное состояние в длинном стержне, вызванное импульсом электрического тока высокой плотности / Г.В. Степанов, А.И. Бабуцький, І.А. Мамеев // Проблемы прочности. – 2004. – №4. – С. 60–67.

Одержано 24.02.2010 р.