

НЕРУЙНІВНИЙ МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ ЗАЛИШКОВИХ НАПРУЖЕНЬ У ЗВАРНИХ З'ЄДНАННЯХ НА ОСНОВІ ВИКОРИСТАННЯ ІМПУЛЬСІВ СТРУМУ ВИСОКОЇ ЩІЛЬНОСТІ ТА СПЕКЛ-ІНТЕРФЕРОМЕТРІЇ

Л.М. Лобанов, В.В. Савицький, О.П. Шуткевич, К.В. Шиян, І.В. Киянець

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: shutkevich1996@gmail.com

Створено методику неруйнівного визначення залишкових напружень у зварних з'єднаннях на основі використання імпульсів струму високої щільності та лазерної спекл-інтерферометрії. Проведено порівняння результатів вимірювання залишкових напружень у зварних з'єднаннях, отриманих розробленим методом і методом отворів. Бібліогр. 19, рис. 10.

Ключові слова: залишкові напруження, зварні з'єднання, імпульс струму високої щільності, спекл-інтерферометрія, електропластичний ефект, метод отворів

Вступ. Одним з важливих завдань при виробництві, проектуванні та експлуатації зварних конструкцій є контроль їхнього напруженого стану, оскільки залишкові напруження істотно впливають на ресурс конструкцій. Для визначення залишкових напружень широко розповсюджені неруйнівні методи такі як: рентгенівський, ультразвуковий, магнітний тощо, та механічні, що засновані на принципі релаксації напружень [1–3]. При визначенні залишкових напружень в елементах і вузлах конструкцій для їх пружного розвантаження використовують різні способи, наприклад, термічний вплив [4], пластичне вдавлення кульки [5], свердління отвору та ін. Найбільшого поширення для пружного розвантаження залишкових напружень отримав метод висвердлювання невеликих ненаскрізних отворів (діаметром 1,0...3,0 мм, завглибшки 0,5...3,0 мм). Вимірювання деформацій та переміщень навколо зони пружного розвантаження (навколо висвердленого отвору) виконуються з використанням різних методів експериментальної механіки, наприклад, електротензометрії, механічних тензометрів та оптичних методів, включаючи методи лазерної інтерферометрії [6–13].

Проте, незважаючи на досить широке використання методу отворів, він все ж таки є руйнівним. Це накладає ряд обмежень щодо його застосування. Наприклад, метод має обмежене використання при діагностиці реальних конструкцій у процесі їх експлуатації. У зв'язку з цим визначення залишкових напружень часто виконують на окремих макетах елементів і вузлів реальних конструкцій. Тому розробка та створення неруй-

нівних способів пружного розвантаження залишкових напружень натурних конструкцій є актуальною задачею.

Метою даного дослідження є створення неруйнівного методу визначення залишкових напружень, який має високу точність і достовірність, притаманну руйнівним релаксаційним методам. Для цього пропонується замінити процес свердління отворів для релаксації напружень, який порушує суцільність поверхні конструкцій, неруйнівним способом локальної релаксації напружень на основі використання імпульсів струму високої щільності $10^7...10^{10}$ А/м² (рис. 1) [14–16]. Вважається, що при введенні імпульсу струму формується зона, що має напівсферичний вигляд, у якій виникає електропластичний ефект та відбувається релаксація напружень навколо місця введення імпульсу. При цьому цілісність контрольованої ділянки матеріалу не порушується. Оскільки розмір ділянки, в якій відбувається релаксація напружень, заздалегідь не відомий і залежить від пара-

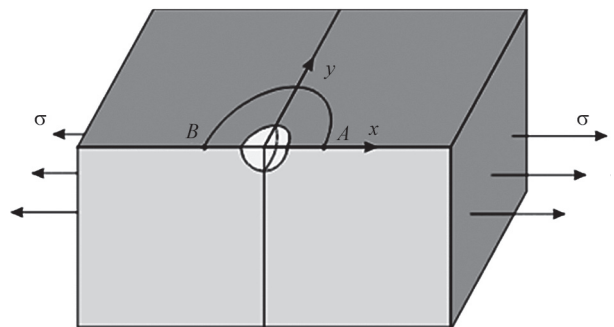


Рис. 1. Схема релаксації залишкових напружень після введення імпульсу струму

Л.М. Лобанов – <https://orcid.org/0000-0001-9296-2335>, В.В. Савицький – <https://orcid.org/0000-0002-2615-1793>, О.П. Шуткевич – <https://orcid.org/0000-0001-5758-2396>, К.В. Шиян – <https://orcid.org/0000-0001-9198-6554>, І.В. Киянець – <https://orcid.org/0000-0002-2559-8200>

© Л.М. Лобанов, В.В. Савицький, О.П. Шуткевич, К.В. Шиян, І.В. Киянець, 2023

метрів електродної системи, необхідно оцінити ефективність релаксації залишкових напружень при введенні імпульсу струму.

Джерело імпульсного струму. В Інституті електродинаміки НАН України створено джерело імпульсного струму (ДІС), а в ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України розроблено два типи електродних систем ударно-імпульсного та імпульсного впливу, які використовуються для введення імпульсного струму в досліджувану ділянку об'єкта. У джерела живлення є широкі можливості регулювання основних електричних параметрів системи, що забезпечують необхідну форму імпульсів струму.

Електродна система імпульсної дії включає електрод e , вантаж P , що забезпечує необхідний контакт між електродом і точкою введення струму, джерело імпульсного струму (рис. 2). В електродній системі імпульсної дії індуктивність L котушки змінюється в діапазоні 4700...1900 мкГн, ємність C конденсаторної батареї – 3400...17000 мкФ, зарядна напруга – 50...186 В.

Створена електродна система дозволяє вводити імпульсний струм у досліджуваний матеріал, вплив якого призводить до виникнення переміщень навколо точки введення. Значення переміщень залежать від напруженого стану в точці введення імпульсу, а також від таких параметрів електродної системи як зарядна напруга на конденсаторному накопичувачі U , індуктивність L та ін. Для того, щоб визначити ефективні параметри електродної системи, необхідно оцінити ступінь релаксації напружень при введенні імпульсу струму в контрольовану ділянку досліджуваного елемента.

Вплив параметрів електродної системи на релаксацію напружень. Для визначення впливу

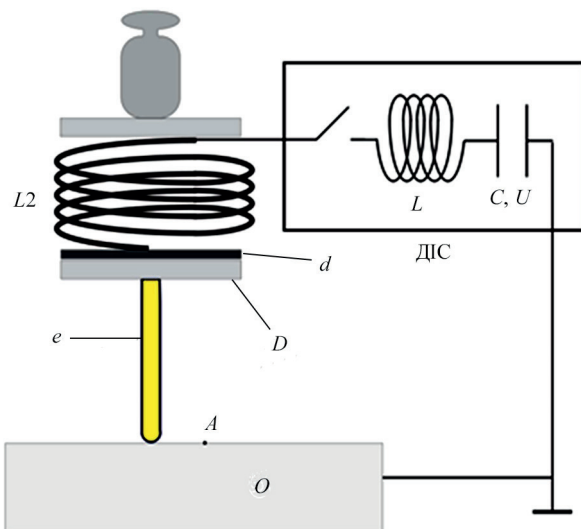


Рис. 2. Схема електродної системи ударно-імпульсного типу дії: L – котушка індуктивності; C – конденсаторна батарея із зарядною напругою U ; e – електрод; D – диск; O – об'єкт, в який вводиться імпульс струму; d – діелектрична прокладка; ДІС – джерело імпульсного струму

параметрів електродної системи на релаксацію напружень було розроблено та виготовлено механічний пристрій для навантаження тестових зразків (рис. 3, 4). У якості тестового зразка використовується балка рівного опору згину, оскільки напруження у всіх поперечних перерізах не будуть перевищувати наперед задані.

Розроблений в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона спекл-інтерферометричний прилад [11–13] дозволяє реєструвати переміщення точок поверхні в діапазоні 0,03...3 мкм. На рис. 5 представлені картини інтерференційних смуг, які містять інформацію про переміщення u_x , отримані після введення локального імпульсу струму в тестовий зразок під навантаженням (рис. 4). Інтерферограми показують, що зі збільшенням значень напружень σ_{xx} область збурень в околі точки введення імпульсу також збільшується.

У контрольовану ділянку тестового зразка в точках n_i з рівнем напружень σ_{xx} від –100 до 100 МПа вводився імпульс струму (рис. 4). У результаті локальної релаксації напружень в околі точки

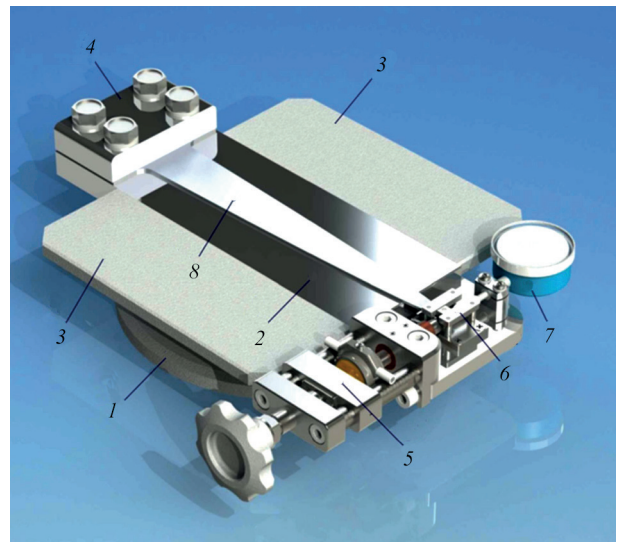


Рис. 3. Пристрій для навантаження тестових зразків: 1 – кругла пластина, на якій розміщено базову плиту для позиціонування зразка на пристрої; 2 – полірована пластина, на якій розташовано тестовий зразок; 3 – пластина для розміщення спекл-інтерферометра; 4 – притискний елемент для фіксації тестового зразка; 5, 6 – вузли навантаження тестового зразка; 7 – пристрій контролю переміщень балки (тестового зразка); 8 – балка рівного опору згину (тестовий зразок)

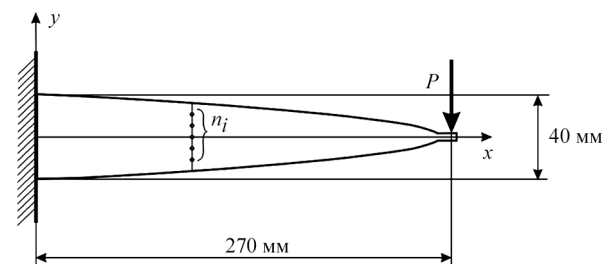


Рис. 4. Схема зразка рівного опору згину: n_i – точки, в яких вводився імпульс струму

введення імпульсу виникали переміщення, які реструвалися безконтактним методом електронної спекл-інтерферометрії.

На рис. 6 наведено графік залежності переміщень u_x від заданих напружень σ_{xx} . Даний графік демонструє, що виміряні переміщення u_x у точках A , розташованих на відстані 1,25 мм від місця введення імпульсу струму (рис. 1), лінійно залежать від напруженого стану у місці вимірювань.

Проте використання даних про переміщення тільки в точці A є недостатнім для обчислення напружень σ_{xx} у реальних конструкціях, оскільки у цих точках виникатимуть переміщення також і внаслідок дії напружень σ_{xy} . Тому необхідно ввести новий параметр, який лінійно залежить від залишкових напру-

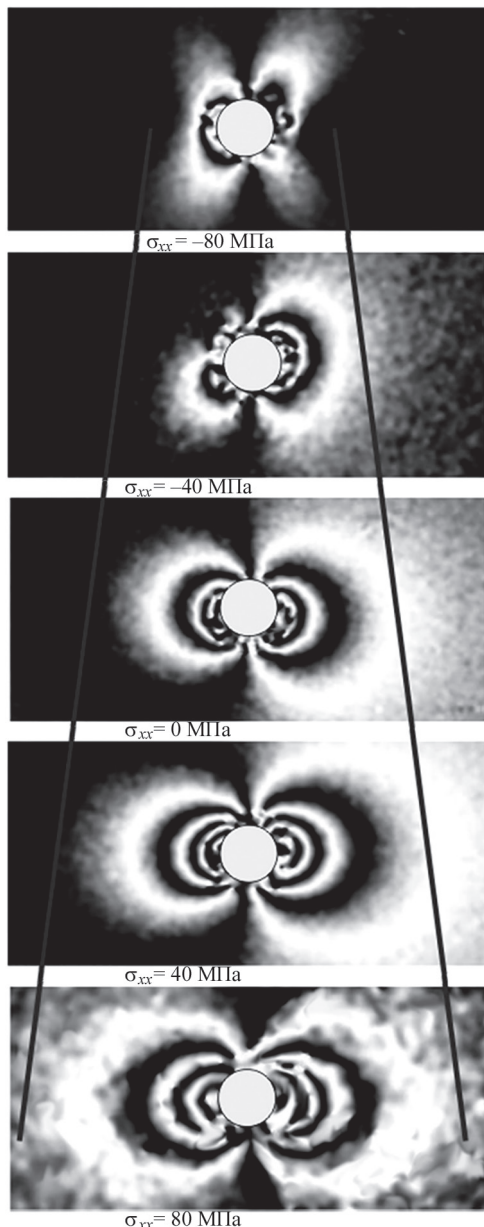


Рис. 5. Інтерферограми, одержані після введення імпульсу струму в ділянках з рівнем залишкових напружень. Параметри електродної системи: $L = 3,26$ мкГн, $U = 150$ В, $s = 0,5$ мм. Лінії позначають збільшення зони впливу релаксації напружень на переміщення при збільшенні напруженого стану

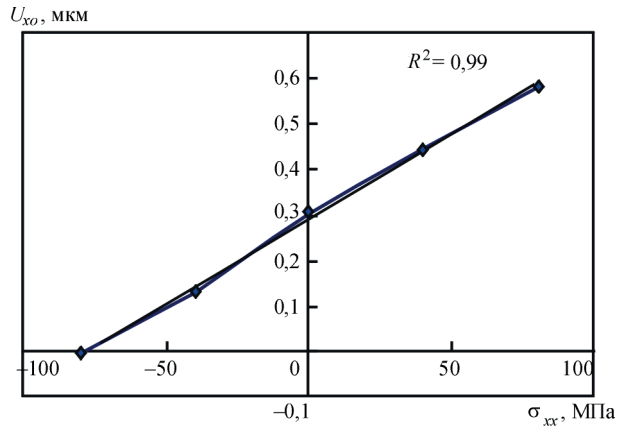


Рис. 6. Залежність переміщень u_{xo} , виміряних методом електронної спекл-інтерферометрії на відстані 1,25 мм від точки введення імпульсу струму високої щільності, від рівня заданих напружень σ_{xx} (величина вірогідності апроксимації $R^2 = 0,99$)

жень і переміщень та не залежить від розташування головних осей координат і виду напруженого стану.

Чисельні розрахунки. Припускаємо, що при введенні імпульсу струму відбувається релаксація напружень в області з віссю симетрії OZ , як при свердлінні отвору. У цьому випадку залежність переміщень u_r та u_θ , що виникають в результаті розвантаження напружень σ_{xx} , σ_{yy} і σ_{xy} , від кута θ на деякій відстані від центру отвору r у полярних координатах виражається наступними формулами [11–13, 17]:

$$u_r(r, \theta) = A\sigma_{xx} + B\sigma_{xx} \cos 2\theta \quad (1)$$

$$u_\theta(r, \theta) = C\sigma_{xx} \sin 2\theta \quad (2)$$

де коефіцієнти A , B і C залежать від граничних умов, розмірів області релаксації напружень тощо.

Вважаючи, що при введенні імпульсу струму не відбувається повної релаксації напружень, а також є початковий ефект (виникають переміщення після введення імпульсу струму в матеріалі без напружень), введемо наступні позначення:

$$\sigma_{xx}^{im} = b_{xx} + k\sigma_{xx} \quad (3)$$

$$\sigma_{yy}^{im} = b_{yy} + k_{yy}\sigma_{yy} \quad (4)$$

$$\tau_{xy}^{im} = k_{xy} + \tau_{xy} \quad (5)$$

де b_{xx} , b_{yy} і k_{xx} , k_{yy} , k_{xy} – константи, що характеризують відповідно початковий ефект і ступінь релаксації напружень порівняно з висвердленим отвором діаметром і завглибшки 1 мм.

Для плоского напруженого стану, використовуючи принцип суперпозиції напружень та вісесиметричність задачі, після перетворення рівнянь (1)–(2), отримаємо:

$$u_r(r, \theta) = A(\sigma_{xx}^{im} + \sigma_{yy}^{im}) + B[(\sigma_{xx}^{im} - \sigma_{yy}^{im}) \cos 2\theta + 2\tau_{xy}^{im} \sin 2\theta] \quad (6)$$

$$u_\theta(r, \theta) = C[(\sigma_{xx}^{im} - \sigma_{yy}^{im}) \sin 2\theta - 2\tau_{xy}^{im} \cos 2\theta] \quad (7)$$

Важливою перевагою методу електронної спекл-інтерферометрії для реєстрації переміщень є можливість одночасного визначення переміщень у великій кількості точок. Це дає можливість отримати дані про переміщення u_x у точках, розташованих по колу радіусом r із центром у місці введення імпульсу струму (рис. 7).

У результаті попередніх досліджень встановлено, що з введенням імпульсу струму при використанні різних параметрів електродної системи на об'єкті виникає відбиток електрода діаметром 0,4...1,0 мм. Тому вибирається мінімальний радіус кола, у якому співвідношення «якість спекл-картини – значення переміщень» є оптимальним. Відомо, що при вимірюванні переміщень в околі висвердленого отвору методом електронної спекл-інтерферометрії оптимальним є використання відстані r , що дорівнює 2,5 радіусу отворів r_0 . Тому у подальших дослідженнях використовувалися дані про переміщення у точках, які розташовані на колі з радіусом 1,25 мм.

Для спрощення обчислень з рівнянь (6) і (7) виділимо компоненти-множники $F(\theta)$, $G(\theta)$ та $H(\theta)$ перед σ_{xx}^{im} , σ_{yy}^{im} та τ_{xy}^{im} , які залежать від кута θ та коефіцієнтів A , B і C , отримуємо наступну залежність:

$$u_x(r, \theta) = u_r(r, \theta) \cos \theta - u_\theta(r, \theta) \sin \theta \quad (8)$$

$$u_x(\theta) \Big|_{r=1,25 \text{ мм}} = F(\theta) \sigma_{xx}^{im} + G(\theta) \sigma_{yy}^{im} + H(\theta) \tau_{xy}^{im} \quad (9)$$

Вимірювання переміщень u_x у точках кола (більше трьох точок) дозволяє обчислити значення σ_{xx}^{im} , σ_{yy}^{im} та τ_{xy}^{im} методом найменших квадратів, використовуючи систему рівнянь:

$$\begin{bmatrix} F(\theta_1) & G(\theta_1) & H(\theta_1) \\ F(\theta_2) & G(\theta_2) & H(\theta_2) \\ F(\theta_3) & G(\theta_3) & H(\theta_3) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_{xx}^{im} \\ \sigma_{yy}^{im} \\ \tau_{xy}^{im} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} u_x(\theta_1) \\ u_x(\theta_2) \\ u_x(\theta_3) \end{Bmatrix} \quad (10)$$

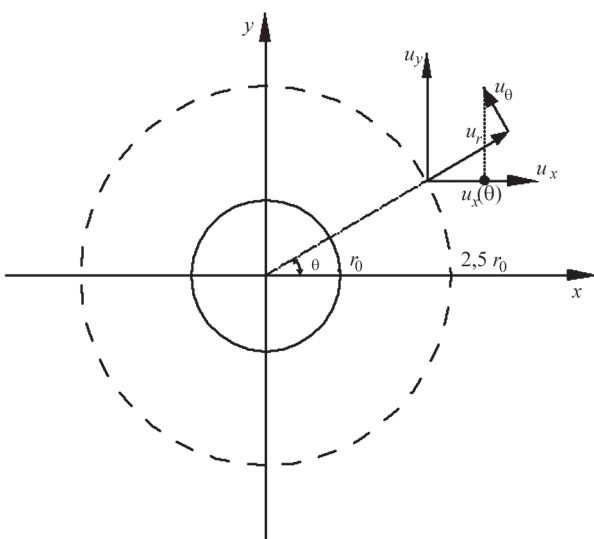


Рис. 7. Схема вимірювання переміщень в околі точки (місця) введення імпульсу струму високої щільності

Для того, щоб оцінити можливість застосування запропонованого алгоритму та використання σ_{xx}^{im} , σ_{yy}^{im} та τ_{xy}^{im} при визначенні залишкових напружень, побудуємо на основі даних про переміщення u_x , представлені на рис. 6, графік залежності σ_{xx}^{im} від заданого напруженого стану σ_{xx} . Як і у випадку з даними про переміщення u_x (рис. 6), залежність між σ_{xx}^{im} та σ_{xx} має лінійний характер (величина вірогідності апроксимації $R^2 = 0,99$). Даний графік характеризується кутом нахилу щодо осі OX , а також значенням у точці з нульовими напруженнями. З графіка можна визначити значення k_{xx} і b_{xx} , які відповідають даним параметрам електродної системи, і за формулою (3) обчислити значення залишкових напружень у точці введення імпульсу струму.

Таким чином, для визначення залишкових напружень у натурних об'єктах необхідне попереднє калібрування електродної системи на тестовому зразку з метою отримання залежності σ_{xx}^{im} від σ_{xx} (3). Для цього на балці рівного опору згину задаються напруження σ_{xx} і вводиться імпульс струму в області спостереження спекл-інтерферометра. На основі даних, отриманих методом спекл-інтерферометрії, про зміщення точок поверхні після введення імпульсу струму в метал, що знаходиться під впливом механічних напружень, із системи лінійних рівнянь (10) обчислюється значення σ_{xx}^{im} . За даними певних значень σ_{xx}^{im} у п'яти точках будується графік залежності σ_{xx}^{im} від σ_{xx} , за яким визначаються значення k_{xx} і b_{xx} відповідних параметрам даної електродної системи.

Отже, використовуючи значення σ_{xx}^{im} , обчислене на основі даних про переміщення, зареєстровані методом електронної спекл-інтерферометрії, і визначені з графіка значення k_{xx} і b_{xx} за формулою (3), можна визначити напружений стан в точці введення імпульсу струму.

Застосування функцій σ_{xx}^{im} , σ_{yy}^{im} та τ_{xy}^{im} є кращим порівняно з даними про переміщення u_x в точках A і B (рис. 1), оскільки в цьому випадку використання інформації про переміщення u_x в точках по всій довжині кола знижує відносну похибку і підвищує достовірність визначення залишкових напружень.

Експериментальні дослідження. За допомогою розробленої технології в стикових зварних з'єднаннях зі сплаву АМг5 визначалися залишкові напруження на основі використання імпульсів струму високої щільності. Результати вимірювання напружень, отриманих із застосуванням імпульсів струму, порівнювалися з даними, отриманими з використанням обладнання ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАНУ на основі використання методу отворів у поєднанні зі спекл-інтерферометрією. Ефективність та точність вимірювання залишкових напружень цим приладом підтверджена ре-

зультатами Raund Robin теста, який проводився Міжнародним інститутом зварювання [18, 19]. На рис. 8 представлено схему зварного зразка із зазначеними перерізами, уздовж яких проводилися вимірювання.

На рис. 9 наведено результати визначення залишкових напружень із використанням імпульсів струму високої щільності уздовж перерізу

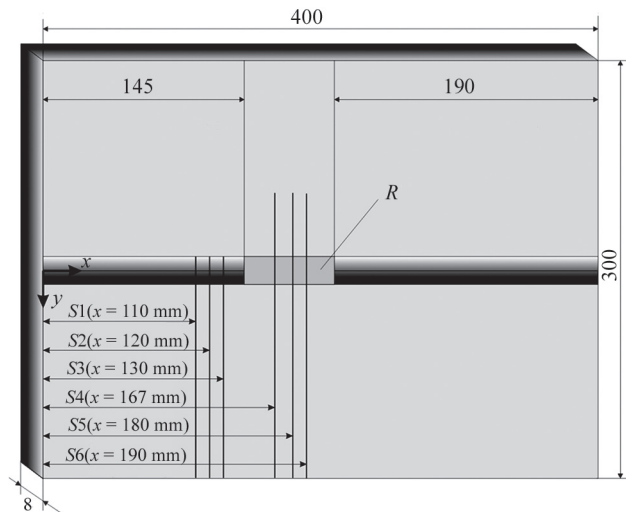


Рис. 8. Схема зварного зразка зі сплаву АМг5: S1-S6 – перерізи, в яких визначалися залишкові напруження; R – область, в якій видалено посилення зварного шва

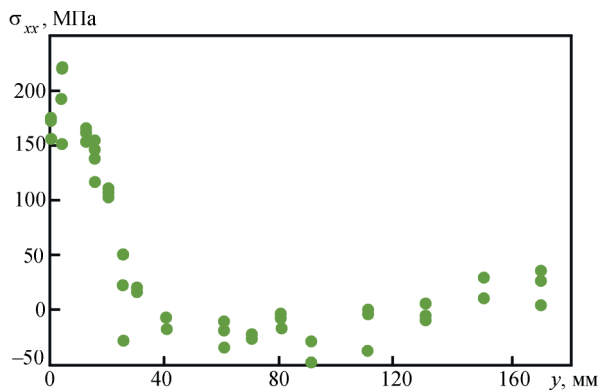


Рис. 9. Результати визначення залишкових напружень методом електронної спекл-інтерферометрії на основі використання для їх релаксації імпульсів струму високої щільності

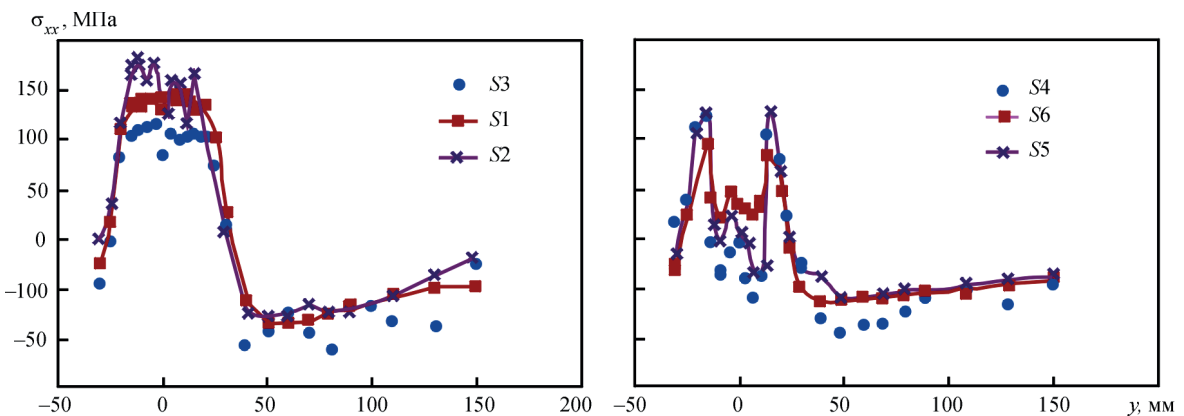


Рис. 10. Розподіл напружень σ_{xx} , що проходять через посилення зварного шва у перерізах S1-S3 (а), та після його видалення в перерізах S4-S6 (б)

S3. В експерименті реєструвалися дані про переміщення після введення імпульсів струму в точках, розташованих на однаковій відстані від центру зварного шва. Графік показує, що існує розкид отриманих експериментальних даних, тому для підвищення точності визначення напружень пропонується використовувати значення напружень усереднені за трьома точками.

Напруження визначалися двома методами в перерізах, що проходять як через посилення зварного шва (S1, S2 і S3), так і після його видалення (S4, S5 і S6) (рис. 8). Результати визначення залишкових напружень, отриманих на основі використання імпульсного методу (перерізи S3 та S4), порівнювалися з даними, отриманими методом висвердлювання отворів діаметром та завглибшки відповідно 1,0 мм (перерізи S1 і S6) та 0,5 мм (перерізи S2 і S5) (рис. 10).

Важливим є те, що результати визначення напружень в області зварного шва та пришовної зони з використанням створеного неруйнівного методу істотно ближчі до даних, отриманих методом отворів (висвердлювання отворів діаметром і завглибшки 0,5 мм), і відрізняються від даних, отриманих при використанні отворів діаметром та завглибшки 1,0 мм (рис. 10.) Це свідчить про те, що у зварному зразку існує градієнт напружень за товщиною пластин.

Криві напружень показують збіг результатів визначення залишкових напружень, отриманих запропонованим підходом та методом отворів, що свідчить про те, що розроблений неруйнівний метод визначення залишкових напружень на основі використання для їх релаксації імпульсів струму високої щільності дозволяє отримати достовірні дані про розподіл напружень уздовж обраного перерізу, не порушуючи при цьому суцільність досліджуваного матеріалу. Максимальне відхилення результатів визначення напружень неруйнівним методом порівняно з методом отворів (діаметром висвердлених отворів 0,5 мм) не перевищує 20 МПа.

Висновки

Розроблено новий неруйнівний метод визначення залишкових напружень у зварних з'єднаннях, який базується на використанні імпульсів струму високої щільності для локальної релаксації напружень та подальшої реєстрації переміщень методом лазерної спекл-інтерферометрії. Показано, що в результаті введення імпульсів струму відбувається часткова релаксація залишкових напружень, а величина вимірних переміщень залежить від рівня напружень у місці введення імпульсу. Експериментально підтверджено, що розроблений метод дозволяє визначати залишкові напруження з похибкою до 20 МПа порівняно з руйнівним методом отворів.

Запропонований підхід дозволяє визначення залишкових напружень безпосередньо на реальних конструкціях під час їх експлуатації, не порушуючи цілісності матеріалу. Це відкриває широкі перспективи застосування методу для моніторингу напружено-деформованого стану відповідальних зварних вузлів та конструкцій в енергетиці, авіаційній та ракетно-космічній галузях, суднобудуванні тощо. Використання запропонованого підходу дозволить підвищити надійність і безпеку експлуатації технічних об'єктів за рахунок своєчасного виявлення і усунення небезпечних напружень.

Список літератури/References

1. Kandil, F.A., Lord J.D., Fry, A.T., Grant P.V. (2001) *A review of residual stress measurement methods a guide to technique selection*. National Physical Laboratory, Teddington Middlesex, TW11 OLW, UK.
2. Vasudevan, M., Shanmugasundaram, P., Baksha Arivazhagan et al. (2014) Nondestructive assessment of residual stresses and distortion in austenitic stainless steel weld joints. *Materials Evaluation*, 72(12), 1509–1518.
3. Lasseigne, A.N., Olson, D.L. (2008) Development of nondestructive techniques for characterization of residual stresses in advanced materials. *Materials Evaluation*, 66(10), 1077–1083.
4. Robinson, A.F., Dulieu-Barton, Quinn S., R.L., Burguete, J.M. (2009) A review of residual stress analysis using thermoelastic techniques. *J. of Physics: Conference Series*, 181, 012029. DOI: <https://doi.org/0.1088/1742-6596/181/1/012029>
5. Hernandez, L.C., Ponce, L., Fundora, A. et al. (2012) Residual stress mapping in TiN coatings by nanoindentation technique. *Materials Evaluation*, 70(11), 1320–1325.

6. ASTM E837-20 *Standard test method for determining residual stresses by the hole-drilling strain-gages*. <https://www.astm.org/e0837-20.html>
7. (2010) *Measurement of residual stresses by the hole drilling strain gage method*. Technical Note TN- 503-6, Revision: 01-Nov-2010, Vishay Micro Measurements, Pennsylvania.
8. Makino, A., Nelson, D. (1994) Residual-stress determination by single-axis holographic interferometry and hole-drilling – Pt I. *Theory. Exp. Mech.*, 34, 66–78. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02328443>
9. Viotti, M.R., Kapp, W., Albertazzi, Jr.A. (2009) Achromatic digital speckle pattern interferometer with constant radial in-plane sensitivity by using a diffractive optical element. *Applied Optics*, 48(12), 2275–2281. DOI: <https://opg.optica.org/ao/abstract.cfm?URI=ao-48-12-2275>
10. Schajer, G.S. (1981) Application of finite element calculations to residual stress measurements. *J. of Engineering Materials and Technology*, 103(2), 157–163. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.3224988>
11. Lobanov, L.M., Pivtorak, V.A., Savitsky, V.V. et al. (2005) Express control of quality and stressed state of welded structures using methods of electron shearography and speckle-interferometry. *The Paton Welding J.*, 8, 35–40.
12. Lobanov, L., Pivtorak, V., Savitsky, V., Tkachuk, G. (2013) Technology and equipment for determination of residual stresses in welded structures based on the application of electron speckle-interferometry. *Mat. Sci. Forum*, 768–769, 166–173. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.768-769.166>
13. Lobanov, L.M., Pivtorak, V.A., Savitsky, V.V., Tkachuk, G.I. (2006) Procedure for determination of residual stresses in welded joints and structural elements using electron speckle-interferometry. *The Paton Welding J.*, 1, 24–29.
14. Lobanov, L.M., Pashchin, N.A., Loginov, V.P., Loginova Yu.V. (2005) Application of electric pulse treatment of structural elements to extend their service life. *The Paton Welding J.*, 11, 19–23.
15. Степанов Г.В., Бабуцкий А.И., Мамеев И.А. (2004) Нестационарное напряженно-деформированное состояние в длинном стержне, вызванное импульсами электрического тока высокой плотности. *Проблемы прочности*, 4, 60–67.
16. Stepanov, G.V., Babutsky, A.I., Mameev, I.A. (2004) Nonstationary stress-strain state in long rod produced by pulses of high-density electric current. *Problemy Prochnosti*, 4, 60–67 [in Russian].
17. Lobanov, L.M., Pashchin, N.A., Mikhodui, O.L. (2012) Efficiency of electrodynamic treatment of welded joints of AMg6 alloy of different thickness. *The Paton Welding J.*, 3, 6–10.
18. Тимошенко С.П. (1972) *Курс теории упругости*. Киев, Наукова думка.
19. Timoshenko, S.P. (1972) *Course of theory of elasticity*. Kyiv, Naukova Dumka [in Russian].
20. Wohlfahrt, H., Dilger, K. (2008) *New results of the IIW Round Robin residual stress measurements*. Report on the experimental Round Robin Tests on residual stresses 2008, IIW Doc. XIII-2241-08/XV-1283-08.
21. Wohlfahrt, H., Nitschke-Pagel, T., Dilger, K. et al. (2012) Residual stress calculations and measurements – review and assessment of the IIW round robin results. *Weld World*, 56(9–10), 120–140. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF03321387>

NONDESTRUCTIVE METHOD OF RESIDUAL STRESS DETERMINATION IN WELDED JOINTS BASED ON APPLICATION OF HIGH-DENSITY CURRENT PULSES AND SPECKLE-INTERFEROMETRY

L.M. Lobanov, V.V. Savitsky, O.P. Shutkevych, K.V. Shyan, I.V. Kyanets

E.O. Paton Electric Welding Institute of NASU. 11 Kazymyr Malevych str., 03150, Kyiv. E-mail: shutkevich1996@gmail.com

A procedure was developed for nondestructive evaluation of residual stresses in welded joints based on application of high-density current pulses and laser speckle-interferometry. Comparison of the results of residual stress measurement in welded joints, obtained by the developed method and by hole-drilling method, was performed. 19 Ref., 10 Fig.

Keywords: residual stresses, welded joints, high-density current pulse, speckle-interferometry, electroplastic effect, hole-drilling method

Надійшла до редакції 04.10.2023