

# СУЧАСНІ ТЕХНОЛОГІЇ ЕЛЕКТРОФІЗИЧНОЇ ОБРОБКИ ДЛЯ РЕГУЛЮВАННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИХ СТАНІВ ЕЛЕМЕНТІВ ЗВАРНИХ КОНСТРУКЦІЙ

Л.М. Лобанов, М.О. Пашин, О.Л. Міходуй

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: [svarka2000@ukr.net](mailto:svarka2000@ukr.net)

Розвиток промисловості стимулює розробку сучасних підходів до оптимізації зварних конструкцій. Використання імпульсних електромагнітних полів, струмів плазми, електродинамічних сил та їх комбінованих впливів є новим трендом інженерної практики. Обробка імпульсним електромагнітним полем зварних з'єднань є перспективним напрямком оптимізації напружено-деформованих станів зварних конструкцій із неферомагнітних металевих матеріалів. Із застосуванням методу електронної спекл-інтерферометрії досліджено вплив обробки імпульсним електромагнітним полем на залишкові напруження зразків кільцевих зварних з'єднань завтовшки  $\delta = 1,0$  мм із алюмінієвого сплаву АМг6. Досліджено кінетику дії сили  $P$  тиску магнітного поля на залишкові переміщення  $f$  і напруження зразків при їх обробці імпульсним електромагнітним полем. Така обробка зразків зварних з'єднань без та із застосуванням додаткового екрану ( $\delta = 5,0$  мм) сприяє зниженню значень  $f$  відповідно у 2 і 4 рази, а залишкових напружень – на 50 і 80 %. Обґрунтовано переваги застосування електродинамічної обробки стикових зварних з'єднань  $\delta = 3,0$  мм зі сплаву АМг61 в процесі зварювання ТІГ. Доведено, що електродинамічна обробка при ТІГ зварюванні сприяє формуванню пікових значень залишкових напружень стискування в зоні зварного шва на 60 % більше, ніж електродинамічна обробка при кімнатній температурі. Застосування імпульсного бар'єрного розряду, який генерує низькотемпературну плазму на поверхні металу, сприяє оптимізації його структури та зростанню твердості  $HV$  конструктивної сталі 25ХГНМТ із 420 до 510 одиниць. Бібліогр. 8, рис. 10.

*Ключові слова:* обробка зварних з'єднань, імпульсне магнітне поле, імпульсний бар'єрний розряд, електродинамічна обробка, алюмінієвий сплав, конструктивна сталь, залишкові переміщення, напружено-деформований стан, твердість сталі

**Вступ.** Актуальність дослідження. Розвиток сучасної промисловості викликає необхідність дослідження прогресивних енергозберігаючих технологій підвищення експлуатаційних властивостей металевих конструкцій. Перспективною в цьому відношенні є розробка методів обробки металевих матеріалів і зварних з'єднань, заснованих на впливі імпульсного електромагнітного поля. Такими є електродинамічна обробка (ЕДО), обробка прямою дією (тиском) імпульсним електромагнітним полем (ОІЕМП) та обробка імпульсним бар'єрним розрядом (ОІБР) [1–6]. На базі ЕДО та ОІЕМП розробляються технології керування напружено-деформованим станом тонколистових зварних з'єднань. З урахуванням результатів [1], розроблено перспективну технологію ЕДО в процесі зварювання, яка дає такі переваги у порівнянні із ЕДО після зварювання: вплив термічного циклу зварювання сприяє більш інтенсивній релаксації зварювальних напружень в результаті ЕДО у порівнянні із обробкою металу шва при кімнатній температурі; зниження трудомісткості виготовлення зварної конструкції внаслідок переходу від послідовного до одночасного проведення технологічних операцій зварювання і ЕДО. Застосування ОІБР відкриває нові можливості підви-

щення твердості конструкційних сталей для спеціальної техніки.

Метою даної роботи є дослідження впливу ОІЕМП, ЕДО та ОІБР на залишкові напружені стани і механічні характеристики металевих матеріалів і зварних з'єднань.

**Методика досліджень і матеріали.** Електрофізичні моделі, покладені в основу дії ОІЕМП, ЕДО та ОІБР на метали, сплави і зварні з'єднання, представлені відповідно в роботах [4], [1] та [6]. Електрофізичні характеристики електродних систем і джерел живлення для ОІЕМП, ЕДО і ОІБР викладені, відповідно, в роботах [2, 4, 5], [1, 3] і [6].

В якості виконавчого інструменту для ОІЕМП використовували плаский індуктор (рис. 1, а), а для оцінки ефективності обробки застосовували пласкі зразки із алюмінієвого сплаву АМг6 у формі диску товщиною і діаметром відповідно  $\delta = 1,0$  мм і  $D_{\text{зр}} = 90$  мм (рис. 1, б). При обробці використовували екран, що проводить струм, у вигляді диску зі сплаву АМг6 діаметром і товщиною відповідно 90 і 5,0 мм (рис. 1, в). Кільцеві зварні шви виконували методом ТІГ у середовищі Аг вздовж лінії кола діаметром  $D_{\text{зв}} = 45$  мм. Методом електронної спекл-інтерферометрії проводили оцінювання дотичної компоненти  $\sigma_{\theta}$  (рис. 1, б) залишкового напруженого стану зварних з'єднань

Лобанов Л.М. – <http://orcid.org/0000-0001-9296-2335>, Пашин М.О. – <http://orcid.org/0000-0002-2201-5137>,

Міходуй О.Л. – <http://orcid.org/0000-0001-6660-7540>

© Л.М. Лобанов, М.О. Пашин, О.Л. Міходуй, 2023

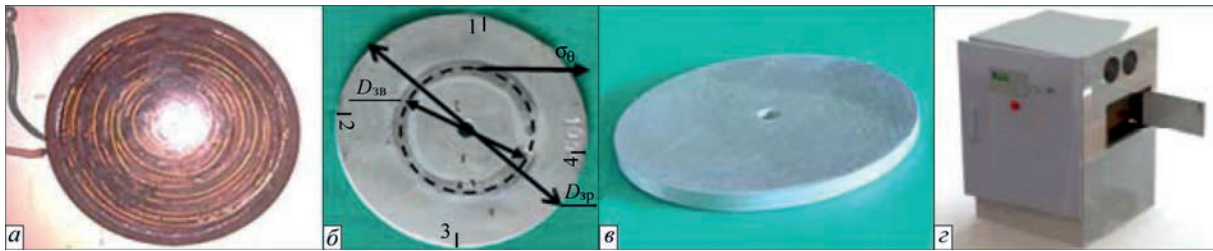


Рис. 1. Зовнішній вигляд: а – плоский індуктор; б – зразок кільцевого зварного з’єднання зі сплаву АМгб товщиною  $\delta = 1,0$  мм, де  $D_{zp} = 90$  мм і  $D_{zv} = 45$  мм відповідно діаметри зразка і зварного шва;  $\sigma_0$  – компонента залишкових напружень; в – екран, що проводить струм, діаметром 90 мм і завтовшки 5 мм; г – джерело живлення для ОІЕМП

та вертикальних переміщень  $f$  крайків дисків до та після ОІЕМП.

Для реалізації розрядного циклів ОІЕМП використовували джерело живлення на базі конденсаторної системи із зарядною напругою  $U$  до 800 В і амплітудою імпульсного струму до 10 кА (рис. 1, г), яке може здійснювати обробку в автоматичному режимі з періодами часу між імпульсами 1...5 с. Реєстрацію часових розподілів імпульсного струму  $I$  і сили електродинамічного тиску  $P$  при ОІЕМП зразків без та із застосуванням екрану виконували із застосуванням відповідно безіндукційного шунта і датчика прискорень Kistler Instrumente AG [7]. Виконували ОІЕМП зразків завтовшки  $\delta = 1,0$  мм та збірки зразка  $\delta = 1,0$  мм зі струмопровідним екраном  $\delta = 5,0$  мм ( $\Sigma\delta = 6$  мм). Обробку проводили серією імпульсів електричного струму на режимі при зарядній напрузі  $U$  до 800 В. Залишкові напружені стани зварних з’єднань досліджували із застосуванням методу електронної спекл-інтерферометрії [1].

Розроблено і виготовлено апаратний комплекс для автоматичного зварювання алюмінієвих сплавів в процесі ЕДО (рис. 2). До складу комплексу входить система для подання присадного дроту 1, пальник 2 для зварювання ТІГ, електродний пристрій ЕДО 3 і лінійний соленоїд переміщення 4 електроду для ЕДО. Складові комплексу конструктивно об’єднані в моноблок.

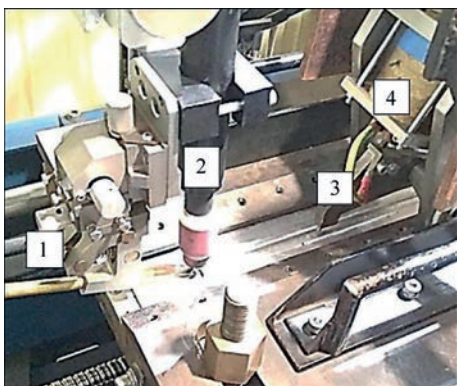


Рис. 2. Апаратний комплекс для автоматичного зварювання ТІГ, яке є сумісним із ЕДО зварного шва: 1 – система для подання присадного дроту; 2 – пальник для зварювання; 3 – електродний пристрій; 4 – лінійний соленоїд переміщення електроду ЕДО

Проводили математичне моделювання напружено-деформованих станів зварних з’єднань в результаті ЕДО в умовах підвищених температур (в процесі зварювання), яке було виконано із використанням спрощеної двовимірної плоскої постановки. Розрахункова схема задачі про процес ударної взаємодії електрода-індентора з пластинами [8] представлена на рис. 3. Розв’язання задачі проводилося за допомогою програми ANSYS/LS-DYNA.

Обробка імпульсним бар’єрним розрядом ІБР поверхні зразків сталі 25ХГНМТ проводилася із застосуванням електродної системи, конструктивна схема якої показана на рис. 4, а.

Ця система складалася із досліджуваного зразка 1 сталі 25ХГНМТ, високовольтного електрода 2 та скляного (кварцове скло) діелектричного бар’єру 3 ( $100 \times 100 \times 1$  мм<sup>3</sup>). Для зменшення крайового ефекту електрод 2 мав заокруглені краї. Обробка велась при газовому проміжку  $\delta$  завтовшки 1 мм між пластиною 1 та бар’єром 3. Висока напруга на електрод 2 подавалась від генератора імпульсів, який забезпечував уніполярні імпульси напруги амплітудою до 30 кВ зі швидкістю їх зростання  $\approx 3 \cdot 10^{11}$  В/с та тривалістю близько 150 нс. Зовнішній вигляд розряду, який наведено на рис. 4, б (час експозиції 0,1 с), свідчить про однорідний характер в проміжку  $\delta$ , а не ниткоподібний.

**Обговорення результатів досліджень.** Залежність сили тиску  $P$  при ОІЕМП від сили струму  $I$  для

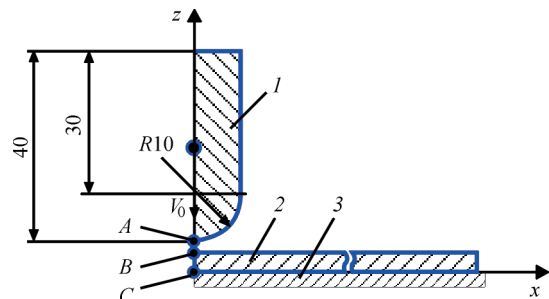


Рис. 3. Розрахункова схема процесу динамічного навантаження пластини при ЕДО: 1 – електрод-індентор; 2 – зразок, що обробляється; 3 – абсолютно жорстка основа; А – точка на зовнішній поверхні електрода-індентора; В – точка на зовнішній поверхні пластини; С – точка на зворотній поверхні пластини;  $V_0$  – швидкість руху електрода-індентора

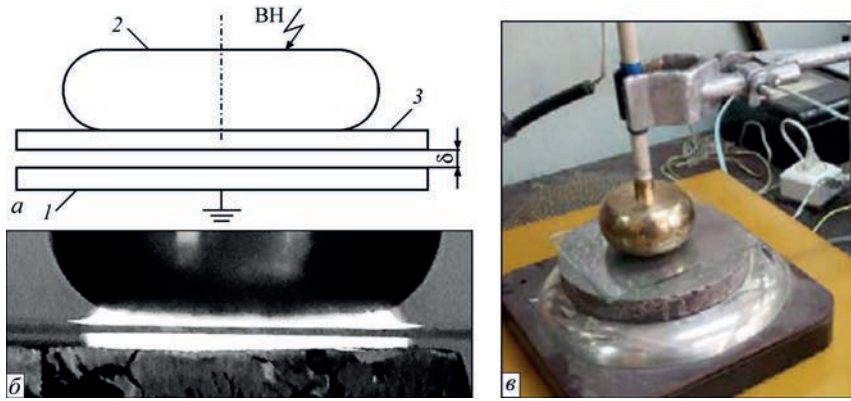


Рис. 4. Обробка сталі 25ХГНМТ імпульсним бар'єрним розрядом: а – схема електродної системи для обробки зразків сталі 25ХГНМТ (де 1 – досліджуваний зразок сталі 25ХГНМТ; 2 – високовольтний електрод; 3 – діелектричний бар'єр;  $\delta$  – газовий проміжок; ВН – висока напруга); б – дія імпульсного бар'єрного розряду; в – обробка сталі 25ХГНМТ

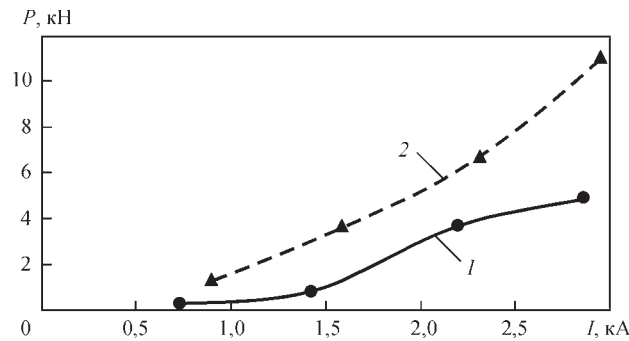


Рис. 5. Вплив амплітудних значень імпульсного електричного струму  $I$  на силу тиску  $P$  при ОІЕМП зразків кільцевих зварних з'єднань  $\delta = 1,0$  мм зі сплаву АМгб, де крива 1 – ОІЕМП без екрану; 2 – ОІЕМП з екраном

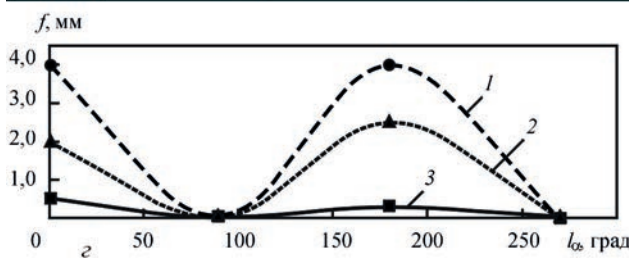
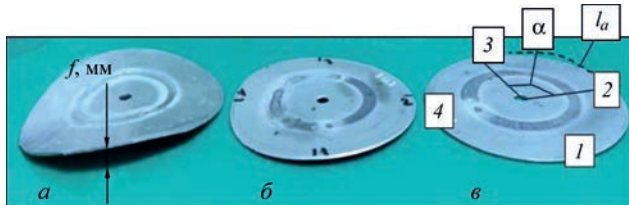


Рис. 6. Зовнішній вигляд залишкових формозмін зразків кільцевих зварних з'єднань зі сплаву АМгб: а – диск без обробки ( $f$  – переміщення крайків диска); б – ЗВ після ОІЕМП без екрану; в – після ОІЕМП із екраном (1–4 – номер точки вимірювання переміщень;  $\alpha$  і  $l_\alpha$  – відповідно кут і кутова відстань між точками 2-3); г – вертикальні переміщення  $f$  крайків диска (крива 1 – без ОІЕМП; 2 – після ОІЕМП без екрану; 3 – після ОІЕМП із застосуванням екрану)

різної товщини  $\delta$  зразків наведено на рис. 5. У дослідженому діапазоні режимів обробки  $P$  зі збільшенням  $\delta$  буде зростати, оскільки визначається як інтегральна величина в певному об'ємі струмопровідного середовища. При зростанні  $\delta$  до 6,0 мм внаслідок застосування екрану (крива 2) зна-

чення  $P$  підвищуються вдвічі порівняно із ОІЕМП без екрану зразків  $\delta = 1,0$  мм (крива 1).

Ефективність впливу ОІЕМП на залишко-ву формозміну зразків, оброблених за наведе-них вище умов, підтверджують дані, наведені на рис. 6, а–в. Значення вертикальних переміщень крайків дисків  $f$  (рис. 6, а) реєстрували у точках 1–4 (рис. 6, в) із фіксованою кутовою відстанню  $l_\alpha$  у  $90^\circ$  між сусідніми точками. Виконання ОІЕМП без екрану (рис. 6, г, крива 2) і з його застосуван-ням (крива 3) дозволяє зменшити значення пере-міщень  $f$  крайків дисків відповідно до двох і восьми разів у порівнянні із зразками без ОІЕМП.

На рис. 7 наведено результати впливу ОІЕМП на компоненту  $\sigma_\theta$  залишкових напружень у центрі зварного шва і у зоні на відстані 10 мм від лінії шва (ЗНШ). Враховуючи вигин дисків (рис. 6), наслідком якого є невірноваженість епор залишко-вих напружень, в якості оцінки впливу ОІЕМП на напружений стан визначали пікові значення  $\sigma_\theta$  в ЗШ і в ЗНШ в зразках у вихідному стані та за заданих умов обробки. Можна бачити, що в ці-лому ОІЕМП позитивно впливає на залишковий

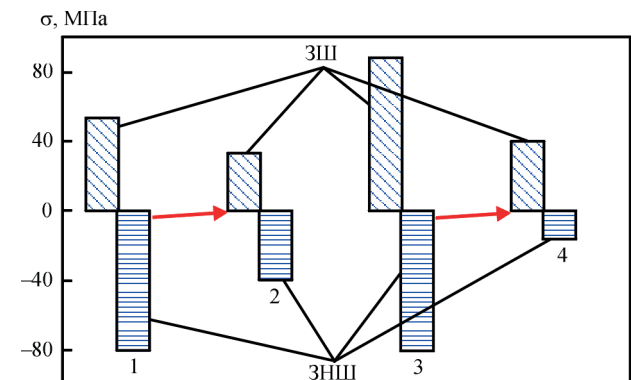


Рис. 7. Вплив ОІЕМП на компоненту  $\sigma_\theta$  залишкових напру-жень у зварних швах (ЗШ) і в зоні на відстані 10 мм від лінії шва (ЗНШ) кільцевих зварних з'єднань зразків зі сплаву АМгб завтовшки  $\delta = 1$  мм: а – пікові значення  $\sigma_\theta$  зразків у вихідному стані; б –  $\sigma_\theta$  після ОІЕМП без застосування екрану; в –  $\sigma_\theta$  зразків у вихідному стані; г –  $\sigma_\theta$  після ОІЕМП із застосуванням екрану

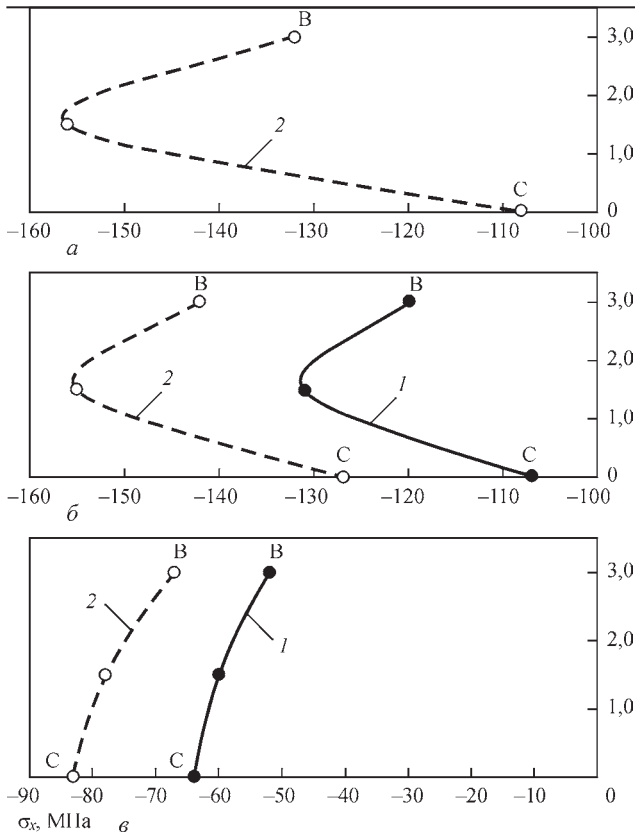


Рис. 8. Результати моделювання напружень  $\sigma_x$  вздовж лінії між точками В і С (рис. 3) пластин сплаву АМг61  $\delta = 3 \text{ мм}$  після ЕДО при температурі  $T$  (а – 20; б – 150; в – 300 °С) та вистиганні до  $T = 20 \text{ °С}$ : де крива 1 –  $\sigma_x$  (миттєві) в момент завершення контактної взаємодії при підвищених температурах, крива 2 –  $\sigma_x$  при кімнатній температурі

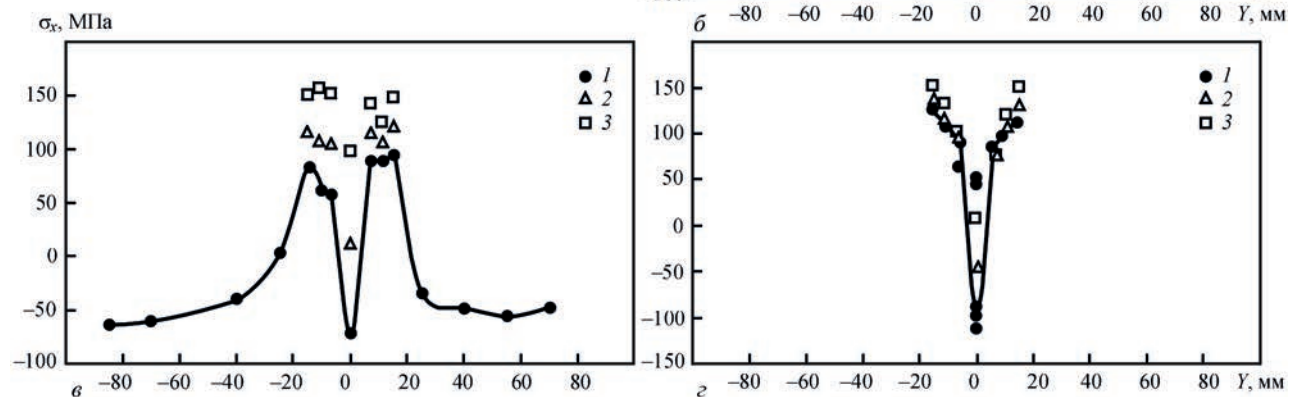
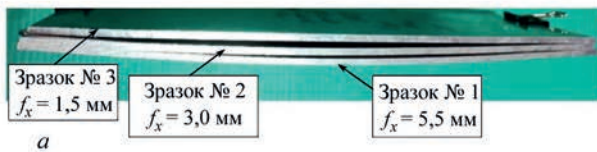


Рис. 9. Поздовжні прогини  $f_x$  і залишкові напруження  $\sigma_x$  зразків зварних з'єднань сплаву АМг61,  $\delta = 3 \text{ мм}$ , де зразок № 1 – без ЕДО, зразок № 2 – ЕДО при  $T = 20 \text{ °С}$ , зразок № 3 – ЕДО при  $T = 150 \text{ °С}$ : а – зовнішній вигляд і значення  $f_x$  зразків № 1...3; б – розподіл  $\sigma_x$  у центральному поперечному перерізі зразка № 1, де крива 1 – верх (●) поверхня (т. В) на рис. 3, крива 2 – мембранні напруження, 3 – низ (□) поверхня (т. С) на рис. 3; в – аналогічно б – для зразка № 2; г – аналогічно б – для зразка № 3

напружений стан кільцевих зварних з'єднань зі сплаву АМг6 товщиною  $\delta = 1 \text{ мм}$ .

Хоча початкові (до ОІЕМП) значення  $\sigma_0$  при обробці без екрану (а) і з екраном (в) відрізняються, що пов'язано із малою жорсткістю дисків, можна бачити, що застосування екрану позитивно впливає на релаксацію напружень при ОІЕМП. Це підтверджує порівняння між собою діаграм а-б і в-г. Так, обробка без та із застосуванням екрану призвела до зменшення початкових значень  $\sigma_0$  в активній зоні розтягування у центрі зварного шва відповідно на 36 і 56 %, а в реактивній стискуванн – на 50 і 80 %.

Результати математичного моделювання наведено на рис. 8, з якого можна бачити, що ЕДО в умовах підігріву пластини зі сплаву АМг61 до температури  $T = 150 \text{ °С}$  (термопружності), забезпечує більші за значеннями поздовжні (вздовж вісі  $X$  на рис. 3) напруження  $\sigma_x$  стискування, ніж при  $T = 20 \text{ °С}$  (кімнатній) та  $T = 300 \text{ °С}$  (термопластичності). Це дозволяє вибрати відстань між пальником для зварювання 2 і електродом 3 для ЕДО (рис. 2), яка забезпечує оптимальний рівень залишкових  $\sigma_x$  стискування у зварному з'єднанні.

Верифікацію результатів моделювання проводили на зразках стикових з'єднань розмірами  $300 \times 200 \times 3 \text{ мм}$  зі сплаву АМг61 (рис. 9), де зразок № 1 був без ЕДО, зразок № 2 – ЕДО при  $T = 20 \text{ °С}$ , зразок № 3 – ЕДО при  $T = 150 \text{ °С}$ . Значення залишкових поздовжніх прогинів  $f_x$  зразків

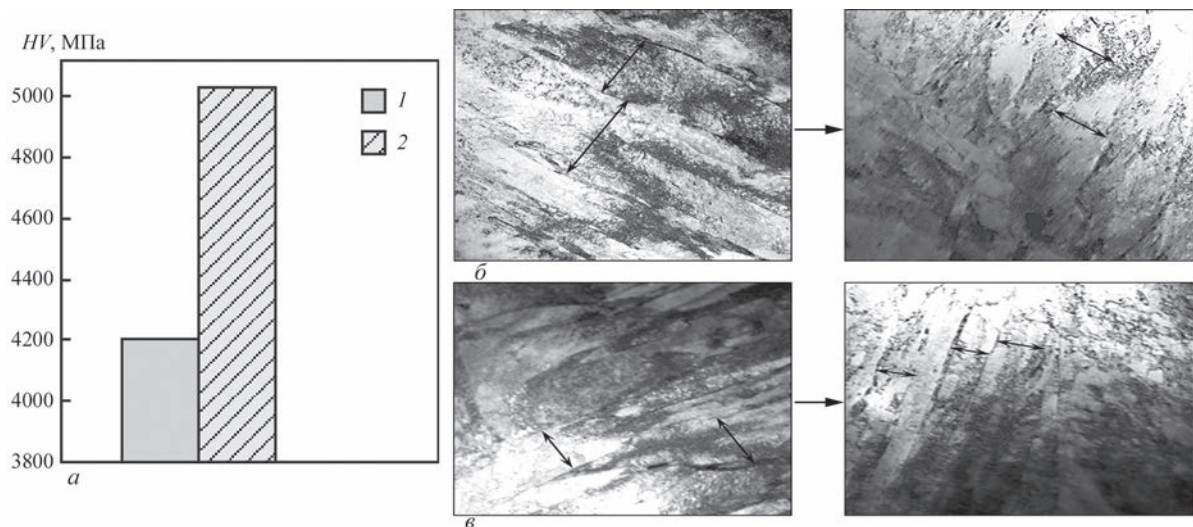


Рис. 10. Вплив обробки ІБР на структуру сталі 25ХГНМТ: а – значення твердості по Віккерсу (HV) до та після обробки ІБР; тонка структура до та після обробки ІБР: б – відпущений мартенсит (Мвдп) до та після ОІБР, в – нижній бейніт (Б<sub>н</sub>) до та після ОІБР

та залишкових  $\sigma_x$  підтверджують як ефективність ЕДО, так і її зростання в умовах термодформаційного циклу зварювання. Значення  $f_x$  зменшуються в зразку № 2 у 1,8 рази у порівнянні із зразком №1, а в зразку № 3 – у 3,7 (рис. 9, а). При тому значення мембранних  $\sigma_x$  розтягування (крива 2 на рис. 9, б–з) у центрі шва на зразку № 2 у порівнянні із зразком № 1 зменшуються на 95 % (рис. 9, в), а у зразку № 3 трансформуються у стискання і становлять близько  $0,3\sigma_{0,2}$  для сплаву АМг61 (рис. 9, з).

Встановлено, що максимальний вплив імпульсного бар'єрного розряду на твердість сталі 25ХГНМТ досягається за тривалості обробки зразків у 15 хв (на оптимальному режимі). Значення твердості HV після обробки зростають на 20 %, з 420 до 505 кг/мм<sup>2</sup> (рис. 10, а). По глибині від обробленої поверхні (від 0 мкм до 2200 мкм) у поперечному перерізі зразка виявлено зміну структурно-фазового складу, параметрів тонкої структури та щільності дислокацій: від 0 до 300 мкм формується виключно структура відпущеного мартенситу та нижнього бейніту при її подрібненні та рівномірному розподілі щільності дислокацій  $\rho = (2 \dots 8) \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$  (рис. 10, б). Отримані результати свідчать, що ОІБР сприяє підвищенню динамічної міцності зварних конструкцій із даної сталі при їх контактних взаємодіях.

Аналізуючи наведені вище результати, слід зазначити, що ОІЕМП, ЕДО в процесі зварювання та локальної обробки ІБР металів, сплавів та зварних з'єднань є перспективними напрямками для створення низки технологій, що направлені на подовження ресурсу нової техніки.

## Висновки

1. Встановлено, що ОІЕМП дозволяє зменшити залишкові переміщення і напруження зразків кіль-

цевих зварних з'єднань зі сплаву АМг6 до восьми разів у порівнянні із необробленими.

2. На базі математичного моделювання та експериментальних досліджень доведено, що застосування ЕДО металу шва, яка виконується в єдиному процесі синхронно із дуговим зварюванням, є більш ефективним у порівнянні із роздільною ЕДО після зварювання, що виражається в більш оптимальному залишковому напружено-деформованому стані готового зварного з'єднання із алюмінієвого сплаву АМг61.

3. Встановлено, що в результаті обробки імпульсним бар'єрним розрядом (ІБР) сталі 25ХГНМТ відбувається підвищення її твердості по Віккерсу (HV) на 20 % – з 420 до 505 кг/мм<sup>2</sup>, яке розповсюджується на глибину до 2 мм і супроводжується диспергуванням обробленої структури.

## Список літератури/References

- Lobanov, L., Kondratenko, I., Zhiltsov, A. et. al. (2018) Development of Post-weld Electrodynamic Treatment Using Electric Current Pulses for Control of Stress-Strain States and Improvement of Life of Welded Structures. *Materials Performance and Characterization*, 7, (4), 941–955. DOI: <https://doi.org/10.1520/MPC20170092>
- Dubodelov, V.I., Goruk, M.S. et. al. (2018) The use of electromagnetic fields and magnetodynamic phenomena to intensify the effect on metal systems: world and Ukrainian experience. *Materials Science. Achievements and Prospects*, 2, 24–50.
- Zhang, Jun, Liu, Ji-De, Zhang, Xin-Fang et. al. (2021) Effect of High Density Current Pulses on Microstructure and Mechanical Properties of Dual-Phase Wrought Superalloy. *Acta Metallurgica Sinica*, 34, (12), 1635–1644. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40195-021-01211-7>
- Qin, Shuyang, Zhang, Xinfang (2022) Ultrafast regulation of nano-scale matrix defects using electrical property discrepancies to delay material embrittlement. *J. of Materials Science and Technology*, 119, 25–36. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2021.11.070>
- Guo, J.D., Wang, X.L., Dai, W.B. (2015) Microstructure evolution in metals induced by high density electric current pulses. *Materials Science and Technology*, 31 (13a), 1545–1554. DOI: <https://doi.org/10.1179/1743284715Y.0000000001>

6. Zhang, Xinfang, Qin, Rongshan (2018) Exploring the Particle Reconfiguration in the Metallic Materials under the Pulsed Electric Current. *Steel Research International Open Access*, 89 (12), 1800062. DOI: <https://doi.org/10.1002/srin.201800062>
7. Kistler Instrumente AG. Quartz Accelerometer 8042. <https://www.datasheetarchive.com/kistler-datasheet.html>
8. Lobanov, L.M., Pashchyn, M.O., Mikhodui, O.L. et. al. (2021) Modeling of stress-strain states of AMg6 alloy due to impact action of electrode-indenter in electrodynamic treatment. *The Paton Welding J.*, 6, 2–11.

## MODERN TECHNOLOGIES OF ELECTROPHYSICAL TREATMENT FOR REGULATION OF STRESS-STRAIN STATES OF ELEMENTS OF WELDED STRUCTURES

L.M. Lobanov, M.O. Pashchyn, O.L. Mikhodui

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine, 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine

The development of industry stimulates the development of modern approaches to the optimization of welded structures. The use of pulsed electromagnetic fields, plasma currents, electrodynamic forces and their combined effects is a new trend in engineering practice. Treatment with a pulsed electromagnetic field (TPEMF) is a promising direction for optimizing the stress-strain states (SSS) of welded joints (WJ) made of non-ferromagnetic metal materials. Using the method of electron speckle interferometry, the effect of TPEMF on the SSS of samples of circumferential WJ with a thickness of  $\delta = 1.0$  mm from aluminium alloy AMg6 was investigated. The kinetics of the action of the force  $P$  of the magnetic field pressure on the residual displacements  $f$  and SSS of the samples during their TPEMF were investigated. TPEMF of WJ samples was performed without and with the use of an additional screen ( $\delta = 5.0$  mm) contributes to the reduction of  $f$  values by 2 and 4 times, respectively, and residual SSS by 50 and 80 %. The advantages of using electrodynamic treatment (EDT) of butt 3.0 mm alloy AMg61 (1561) in the TIG welding process are substantiated. It was proved that EDT during TIG contributes to the formation of peak values of residual compressive stresses in the weld zone by 60 % more than EDT during room temperature ( $T_k$ ). The use of a pulsed barrier discharge (PBD), which generates a low-temperature plasma on the surface of the metal, contributes to the optimization of its structure. An increase in the hardness of  $HV$  structural steel 25KhGNMT as a result of its PBD treatment from 420 to 510 units was established. 8 Ref., 10 Fig.

Keywords: treatment of welded joints, pulsed magnetic field, pulsed barrier discharge; electrodynamic treatment, aluminium alloy, structural steel, residual displacements, stress-strain state, hardness of steel

Надійшла до редакції 21.06.2023

### Високоякісні зварювальні матеріали українського виробництва

