

Прогресивні технології електрофізичної обробки для регулювання напружено-деформованих станів елементів зварних конструкцій

Л.М. Лобанов¹, П.Р. Устименко², Ю.М. Сидоренко², М.О. Пащин¹

1 – Інститут електрозварювання ім. Є.О.Патона НАН України, Київ, Україна

2 – КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна

Анотація. 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 для підвищення механічних характеристик металевих матеріалів і зварних з'єднань (ЗЗ). Обробка імпульсним електромагнітним полем (ОІЕМП) ЗЗ є перспективним напрямком оптимізації напружено-деформованих станів (НДС) зварних конструкцій із неферомагнітних металевих матеріалів. Із застосуванням методу електронної спекл-інтерферометрії досліджено вплив ОІЕМП на НДС зразків кільцевих ЗЗ товщиною $\delta = 1,0$ мм із алюмінієвого сплаву АМгб. На базі оригінальної методики із застосуванням давача прискорень досліджено кінетику дії сили P тиску магнітного поля на залишкові переміщення f і НДС зразків при їх ОІЕМП. Виконували ОІЕМП зразків ЗЗ без та із застосуванням додаткового екрану зі сплаву АМгб $\delta = 5,0$ мм. Встановлено, що застосування екрану підвищує амплітудні значення сили P до двох разів, що зумовлено збільшенням активного об'єму електропровідного середовища. При тому ОІЕМП без та із застосуванням екрану сприяє зниженню значень f відповідно у 2 і 4 рази, а залишкових НДС – на 50 і 80%. На базі математичного моделювання обґрунтовано переваги застосування електродинамічної обробки (ЕДО) стикових ЗЗ $\delta = 3,0$ мм зі сплаву АМгб1 (1561) в процесі зварювання TIG у порівнянні із ЕДО при кімнатній температурі (T_k). По результатах верифікації моделі доведено, що ЕДО при TIG сприяє формуванню пікових значень залишкових напружень стискування в зоні зварного шва на 60% більше, ніж ЕДО при T_k . Застосування імпульсного бар'єрного розряду (ІБР), який генерує низькотемпературну плазму на поверхні металу, що обробляється, сприяє оптимізації його структури. Встановлено зростання твердості HV конструктивної сталі 25ХГНМТ в результаті її обробки ІБР із 420 до 510 одиниць, яке супроводжується диспергуванням мікроструктури металу.

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) імпульсного електромагнітного поля (ОІЕМП) та 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: 1) вплив термічного циклу зварювання сприяє більш інтенсивній релаксації зварювальних напружень в результаті ЕДО у порівнянні із обробкою металу шва при кімнатній температурі; 2) зниження трудомісткості виготовлення зварної конструкції внаслідок переходу від послідовного до одночасного проведення технологічних операцій зварювання і ЕДО. Застосування ОІБР відкриває нові можливості підвищення 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 плоский індуктор (рис. 1а), а для оцінки ефективності обробки застосовували плоскі зразки із алюмінієвого сплаву АМг6 у формі диску товщиною $\delta = 1,0$ мм і діаметром відповідно $D_{зр} = 90$ мм (рис. 1б). При обробці використовували екран, що проводить струм, у вигляді диску зі сплаву АМг6 діаметром і товщиною відповідно 90 і 5,0 мм (рис. 1в). Кільцеві зварні шви виконували методом ТІГ у середовищі Ar вздовж лінії кола діаметром $D_{зв} = 45$ мм. Методом електронної спекл-інтерферометрії проводили оцінювання дотичної компоненти B_{θ} (рис. 1б) залишкового напруженого стану зварних з'єднань та вертикальних переміщень f крайків дисків до та після ОІЕМП.

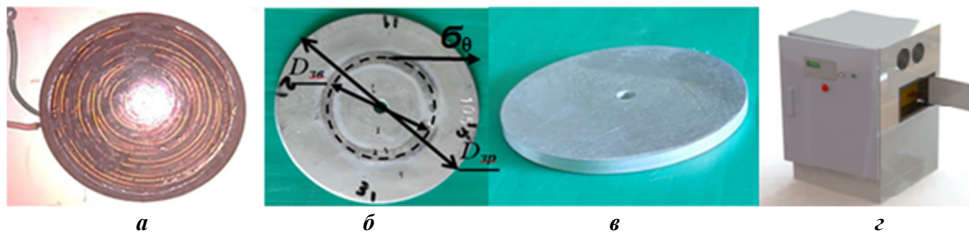


Рис. 1. Зовнішній вигляд: а) плоский індуктор; б) зразок кільцевого зварного з'єднання зі сплаву АМг6 товщиною $\delta = 1,0$ мм, де $D_{зр} = 90$ мм і $D_{зв} = 45$ мм відповідно діаметри зразка і зварного шва, B_{θ} – компонента залишкових напружень; в) екран, що проводить струм, діаметром 90 мм і товщиною 5 мм; г) ДЖ для ОІЕМП

Для реалізації розрядного циклів ОІЕМП використовували джерело живлення (ДЖ) на базі конденсаторної системи із зарядною напругою U до 800 В і амплітудою імпульсного струму до 10 кА (рис. 1г). ДЖ може здійснювати ОІЕМП в автоматичному режимі з періодами часу між імпульсами 1–5 сек. 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 товщиною $\delta = 1,0$ мм та збірки зразка $\delta = 1,0$ мм зі струмопровідним екраном $\delta = 5,0$ мм ($\Sigma\delta = 6$ мм). Обробку проводили серією ІЕС 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 апаратурний комплекс для автоматичного зварювання алюмінієвих сплавів в процесі ЕДО (рис. 2). До складу комплексу входить система для подання присадочного 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.

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 (2D) 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 ІБР поверхні зразків *сталі 25ХГНМТ* проводилася із застосуванням електродної системи (ЕС), конструктивна схема якої показана на рис. 4.

Схему електродної системи (ЕС) для обробки ІБР наведено на рис. 4а. ЕС складалася із досліджуваного зразка 1 сталі 25ХГНМТ, високовольтного електроду 2 та скляного (кварцове скло) діелектричного бар'єру 3 ($100 \times 100 \times 1$ мм³). Для зменшення крайового ефекту електрод 2 мав заокруглені краї. Обробка велась при газовому проміжку δ завтовшки 1 мм між пластиною

1 та бар’єром 3. Висока напруга (ВН) на електрод 2 подавалась від генератора імпульсів (ГІ), який забезпечував уніполярні імпульси напруги амплітудою до 30кВ зі швидкістю їх зростання $\approx 3 \cdot 10^{11}$ В/с та тривалістю близько 150 нс. Зовнішній вигляд розряду, який наведено на рис. 4б (час експозиції 0,1с), свідчить про однорідний характер в проміжку δ , а не ниткоподібний.

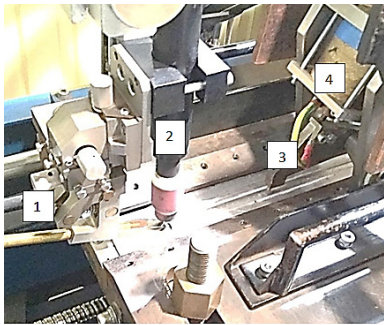


Рис. 2. Апаратний комплекс для автоматичного зварювання ТІГ, яке є сумісним із ЕДО зварного шва, де 1 - система для подання присадочного дроту, 2 - пальник для зварювання, 3 - електродний пристрій, 4 - лінійний соленоїд переміщення електроду ЕДО

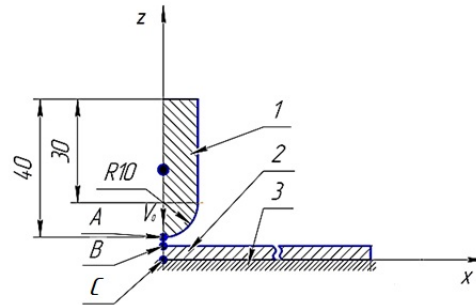
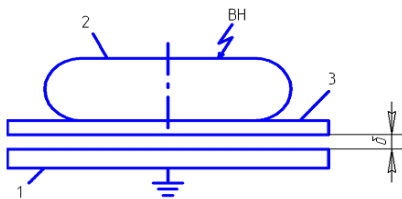
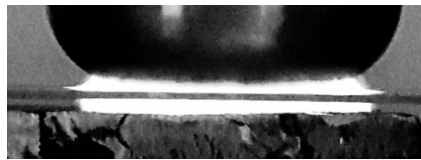


Рис. 3. Розрахункова схема процесу динамічного навантаження пластини при ЕДО: 1 – електрод - індентор; 2 – зразок, що обробляється; 3 – абсолютно жорстка основа, *A* – точка на зовнішній поверхні електрода-індентора, *B* – точка на зовнішній поверхні пластини, *C* – точка на зворотній поверхні пластини,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



а

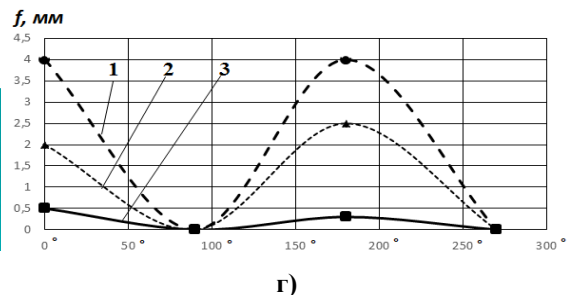
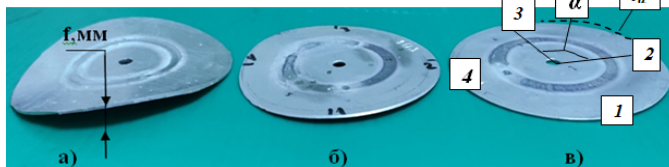


б



в

Рис. 4. Обробка сталі 25ХГНМТ ІБР, де: а) схема електродної системи для обробки ІБР зразків сталі 25ХГНМТ, де 1 - досліджуваний зразок 1 сталі 25ХГНМТ, 2 – високовольтний електрод, 3 - діелектричний бар’єр, δ - газовий проміжок, ВН – висока напруга; б) зовнішній вигляд ІБР; в) зовнішній вигляд процесу обробки ІБР сталі 25ХГНМТ



г)

Рис. 6. Залишкові формозміни зразків кільцевих зварних з’єднань зі сплаву АМг6, де: а) зовнішній вигляд (ЗВ) диска без обробки, де f – переміщення крайків диска; б) ЗВ після ОІЕМП без екрану; в) ЗВ після ОІЕМП із екраном, де 1–4 – номер точки вимірювання переміщень, α і l_α – відповідно кут і кутова відстань між точками 2–3; г) вертикальні переміщення f крайків диска, де крива 1 – без ОІЕМП, 2 - після ОІЕМП без екрану, 3 - після ОІЕМП із застосуванням екрану

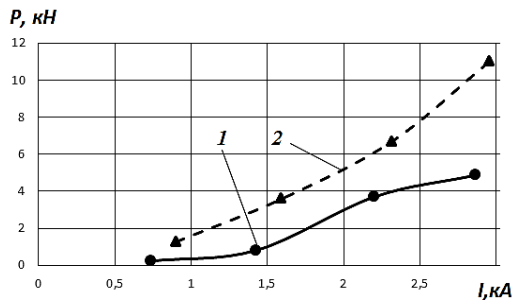


Рис. 5. Вплив амплітудних значень ІЕС - I на силу тиску P при ОІЕМП зразків кільцевих зварних з'єднань $\delta = 1,0$ мм зі сплаву АМг6, де крива 1 – ОІЕМП без екрану, 2 – ОІЕМП з екраном

дені на рис. 4а–в. Значення вертикальних переміщень крайків дисків f (рис. 6а) реєстрували у точках №1–4 (рис. 6в) із фіксованою кутовою відстанню l_a у 90° між сусідніми точками. Виконання ОІЕМП без екрану (рис. 6г, крива 2) і із його застосуванням (крива 3) дозволяє зменшити значення переміщень f крайків дисків відповідно до двох і восьми разів у порівнянні із зразками, які не були піддані ОІЕМП.

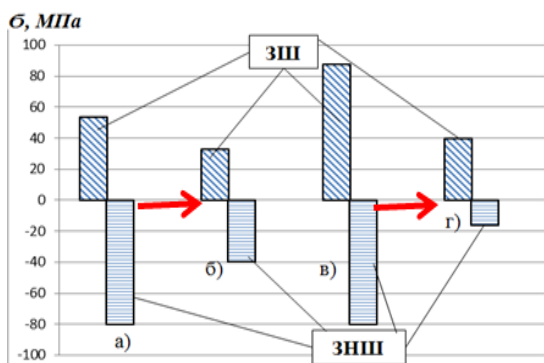


Рис. 7. Вплив ОІЕМП на компоненту B_θ залишкових напружень у зварних швах (ЗШ) і в зоні навколо шва (ЗНШ) кільцевих зварних з'єднань зразків зі сплаву АМг6 товщиною $\delta = 1$ мм: а) пікові значення B_θ зразків у вихідному стані; б) B_θ після ОІЕМП без застосування екрану; в) B_θ зразків у вихідному стані; г) B_θ після ОІЕМП із застосуванням екрану

Обговорення результатів досліджень. Залежність сили тиску P при ОІЕМП від сили струму I для різної товщини δ зразків наведено на рис. 5, згідно даних якого у дослідженому діапазоні режимів обробки можна бачити, що P зі збільшенням δ буде зростати, оскільки визначається як інтегральна величина в певному об'ємі струмопровідного середовища. При зростанні δ до 6,0 мм в наслідок застосування екрану (крива 2) значення P підвищуються до двох разів у порівнянні із ОІЕМП без екрану зразків $\delta = 1,0$ мм (крива 1).

Ефективність впливу ОІЕМП на залишкову формозміну зразків, оброблених за наведених вище умов, підтверджують дані, наведені на рис. 4а–в.

На рис. 7 наведено результати впливу ОІЕМП на компоненту B_θ залишкових напружень у центрі зварного шва (ЗШ) і у зоні навколо шва (ЗНШ) на відстані 10 мм від лінії шва. Враховуючи вигин дисків (рис. 6), наслідком якого є невірноваженість епюр залишкових напружень, в якості оцінки впливу ОІЕМП на напружений стан визначали пікові значення B_θ в ЗШ і в ЗНШ в зразках у вихідному стані та за заданих умов обробки. Можна бачити, що в цілому ОІЕМП позитивно впливає на залишковий напружений стан кільцевих зварних з'єднань зі сплаву АМг6 товщиною $\delta = 1$ мм.

Хоча початкові (до ОІЕМП) значення B_θ 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 B_θ в активній зоні розтягування (ЗШ) відповідно на 36 і 56%, а в реактивній стискування (ЗНШ) – 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 $T=150^\circ\text{C}$ (термопружності), забезпечує більші за значеннями поздовжні (вздовж вісі X на рис. 3) напруження B_x стискування, ніж при $T = 20^\circ\text{C}$ (кімнатній) та $T = 300^\circ\text{C}$ (термопластичності). Це дозволяє вибрати відстань між пальником для зварювання 2 і електродом 3 для ЕДО (рис. 2), яка забезпечує оптимальний рівень залишкових B_x стискування у зварному з'єднанні.

Верифікацію результатів моделювання проводили на зразках стикових з'єднань розмірами 300x200x3 мм зі сплаву АМг61 (рис. 9), де Зразок №1 був без ЕДО, Зразок №2 – ЕДО при $T = 20^\circ\text{C}$, Зразок №3 – ЕДО при $T = 150^\circ\text{C}$. Значення залишкових поздовжніх прогинів f_x зразків та залишкових σ_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 σ_x розтягування (крива 2 на рис. 9,б–г) у центрі шва на Зразку №2 у порівнянні із Зразком №1 зменшуються на 95% (рис. 9,в), а у Зразку №3 трансформуються у стискування і становлять близько $0,3\sigma_{0,2}$ для сплаву АМг61 (рис. 9,г).

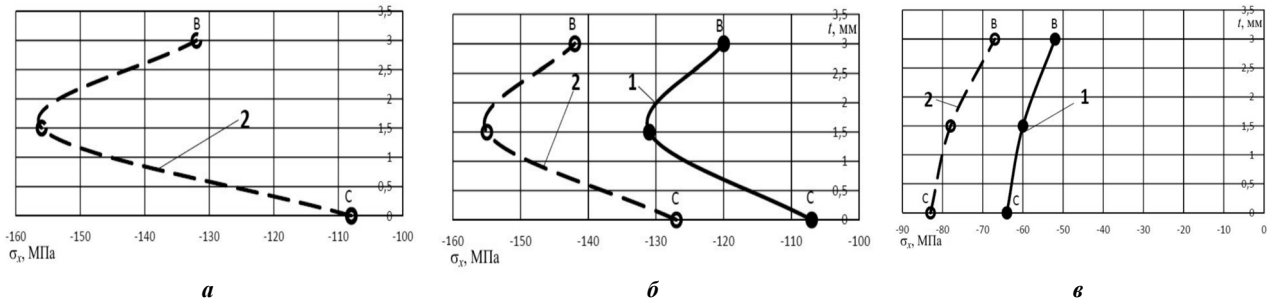


Рис. 8. Результати моделювання напружень σ_x вздовж лінії між точками В і С (рис. 3) пластин сплаву АМг61 $\delta = 3$ мм після ЕДО при температурі T та вистиганні до $T = 20^\circ\text{C}$, де крива 1 - σ_x (миттєві) в момент завершення контактної взаємодії при підвищених температурах, крива 2 - σ_x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

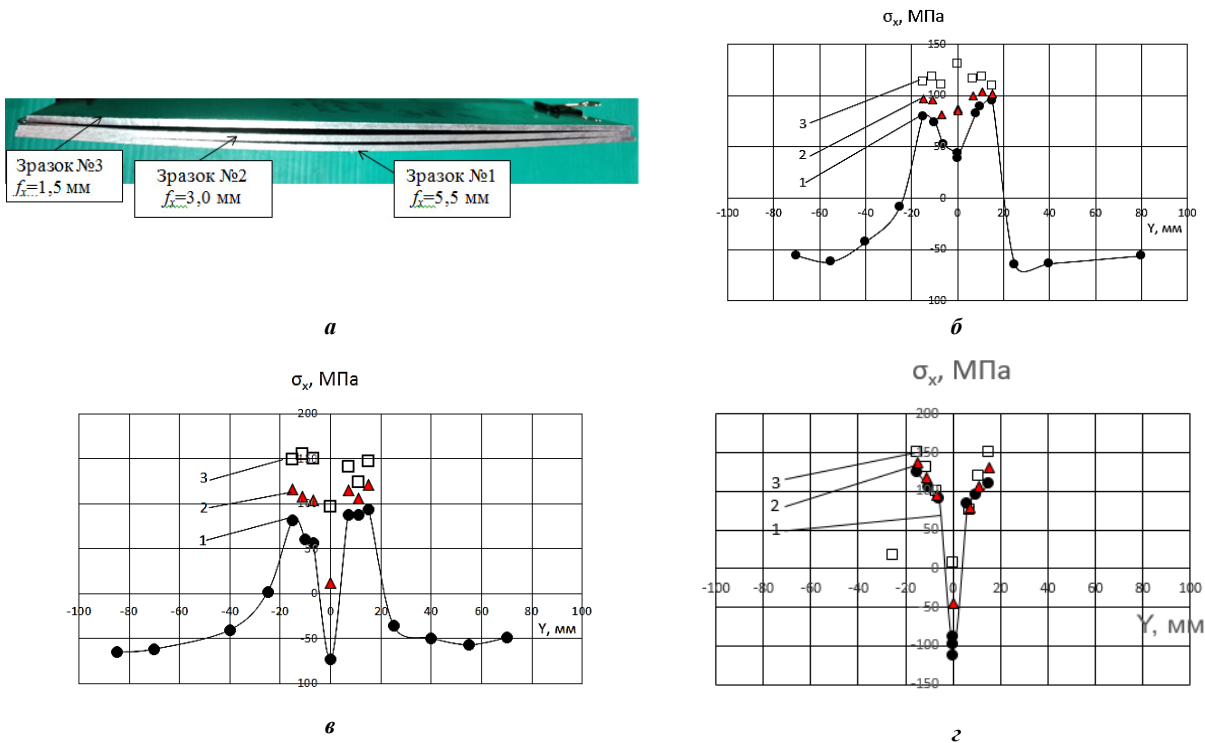


Рис. 9. Поздовжні прогини f_x і залишкові напруження σ_x зразків зварних з'єднань сплаву АМг61 $\delta=3$ мм, де Зразок №1 – без ЕДО, Зразок №2 – ЕДО при $T = 20^\circ\text{C}$, Зразок №3 – ЕДО при $T = 150^\circ\text{C}$: а) зовнішній вигляд і значення f_x Зразків №1...3; б) розподіл σ_x у центральному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

Встановлено, що максимальний вплив ІБР на твердість сталі 25ХГНМТ досягається за тривалості обробки зразків у 15 хвилин (на оптимальному режимі). При цьому значення твердості HV після обробки зростають на 20%, з 420 до 505 кг/мм^2 (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. По глибині

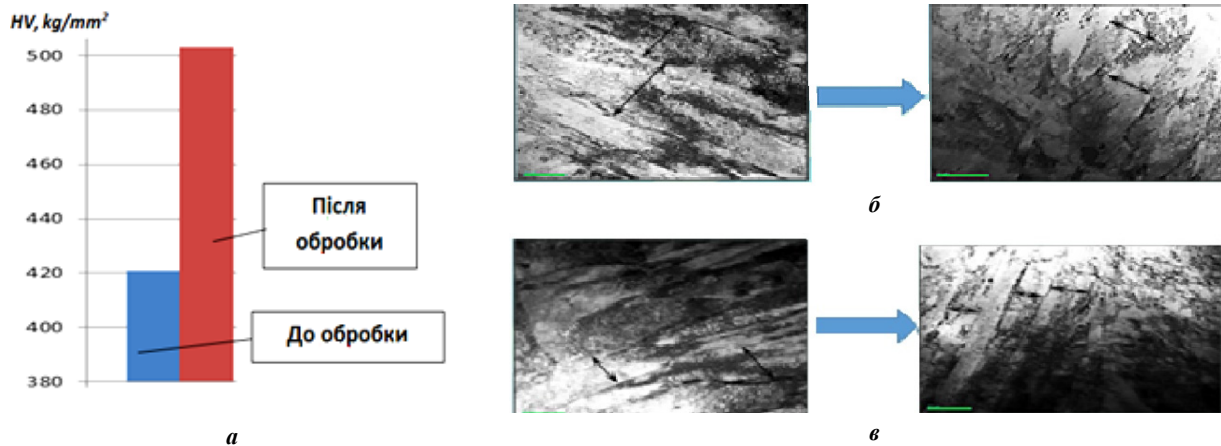


Рис. 10. Вплив обробки ІБР на структуру сталі 25ХГНМТ: а) значення твердості по Віккерсу (HV) до та після обробки ІБР; тонка структура до та після обробки ІБР: б) відпущений мартенсит (Мвідп) до та після ОІБР, в) нижній бейніт (Бн) до та після ОІБР

від обробленої поверхні до 300 мкм формується виключно структура відпущеного мартенситу та нижнього бейніту при її подрібненні та рівномірному розподілі щільності дислокацій $\rho = (2 \dots 8) \times 10^{10} \text{см}^{-2}$ (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 локальна обробка ІБР металів, сплавів та зварних з'єднань є базою для розробки низки технологій, що направлені на оптимізацію зварних конструкцій нової техніки.

Висновки

1. Встановлено, що обробка імпульсним електромагнітним полем (ОІЕМП) дозволяє зменшити залишкові переміщення і напруження зразків кільцевих зварних з'єднань зі сплаву АМгб до восьми разів у порівнянні із необробленими.

2. На базі математичного моделювання та експериментальних досліджень доведено, що застосування електродинамічної обробки (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 АМгб1.

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^2 , яке розповсюджується на глибину до 2 мм і супроводжується диспергуванням обробленої структури.

Список літератури

1. L. Lobanov, I. Kondratenko, A. Zhiltsov, N. Pashchin та O. Mikhodui, «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, Vol. 7, № 4, pp. 941-955, 2018. <https://doi.org/10.1520/MPC20170092>
2. V. I. Dubodelov, M. S. Goruk, «The use of electromagnetic fields and magnetodynamic phenomena to intensify the effect on metal systems: world and Ukrainian experience,» in Materials Science: Achievements and Prospects, Vol. 2, Kyiv, Akadempriodyka, 2018, pp. 24-50.
 3. L. M. Lobanov, M. O. Pashchyn, O. L. Mikhodui, Y. M. Sydorenko та P. R. Ustymenko, «Stress-Strain State of Welded Joints of AMg6 Alloy after Electrodynamic Treatment During Welding,» Strength of Materials, Vol. 54, № 6, pp. 983-996, 2022. <https://doi.org/10.1007/s11223-023-00474-y>
 4. L. M. Lobanov, M. O. Pashchyn, O. L. Mikhodui, O. V. Cherkashyn, T. G. Solomiichuk, P. S. Shl'ons'kyi та I. P. Kondratenko, «Pulsed Electromagnetic Field Effect on Residual Stresses and Strains of Welded Joints of AMg6 Aluminum Alloy,» Strength of Materials, Vol. 53, № 6, pp. 834-841, 2021
 5. L. M. Lobanov, M. O. Pashchyn, O. L. Mikhodui, O. V. Cherkashyn та I. P. Kondratenko, «Influence of Pulsed Electromagnetic Field Treatment on the Stressed State of AMg6 Aluminum,» Materials Science, № 57, pp. 1-8, 2021. <https://doi.org/10.1007/s11003-021-00507-4>
 6. L. M. Lobanov, I. V. Bozhko, I. P. Kondratenko, M. O. Pashchyn, O. M. Berdnikova, O. L. Mykhodui and O. S. Kushnaryova, «Treatment of steel 25KHGNMT by acting on its surface with a pulsed barrier discharge,» Tehnichna elektrodynamika, № 1, pp. 76-80, 2023. <https://doi.org/10.15407/tecned2023.01.076>
 7. Kistler Instrumente AG. Quartz Accelerometer 8042
 8. L. M. Lobanov, M. O. Pashchyn, O. L. Mikhodui, P. V. Goncharov, Y. M. Sydorenko та P. R. Ustymenko, «Modeling of stress-strain states of AMg6 alloy due to impact action of electrode-indenter in electrodynamic treatment,» The Paton Welding J., № 6, pp. 2-11, 2021

Progressive technologies of electrophysical processing to regulate the stress-strain states of elements of welded structures

L.M. Lobanov, P.R. Ustymenko, Yu.M. Sydorenko, M.O. Pashchyn

Abstract. 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 to improve the mechanical characteristics of metal materials and welded joints (WJ). Treatment with a pulsed electromagnetic field (TwPEMF) is a promising direction for optimizing the stress-strain states (SSS) of welded structures made of non-ferromagnetic metal materials. Using the method of electronic speckle interferometry, the effect of TwPEMF on the SSS of specimens of circumferential WJ with a thickness of $\delta = 1.0$ mm from aluminium AMg6 alloy was investigated. Based on the original procedure using an accelerometer, the kinetics of the action of the force P of the magnetic field pressure on the residual displacements f and SSS of the specimens during their TwPEMF were investigated. TwPEMF of WJ specimens was performed without and with the use of an additional shield made of AMg6 alloy $\delta = 5.0$ mm. It was found that the use of a shield increases the amplitude values of force P by up to two times, which is caused by an increase in the active volume of the conductive medium. At the same time, TwPEMF without and with the use of a shield contributes to the reduction of f values by 2 and 4 times, respectively, and residual SSS by 50 and 80%. On the basis of mathematical modelling, the advantages of using electrodynamic treatment (EDT) of butt WJ $\delta = 3.0$ mm of AMg61 (1561) alloy in the TIG welding process compared to EDT at room temperature (T_k) are substantiated. According to the results of the model verification, 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 T_k . The use of a pulsed barrier discharge (PBD), which generates a low-temperature plasma on the surface of the metal being treated, contributes to the optimization of its structure. An increase in the hardness HV of structural 25KhGNMT steel as a result of its PBD treatment from 420 to 510 units was established, which is accompanied by the dispersion of the metal microstructure.

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.