

# МАГНІТОІМПУЛЬСНА ОБРОБКА ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ У ПРОЦЕСІ ЗВАРЮВАННЯ ПЛАВЛЕННЯМ

Л.М. Лобанов<sup>1</sup>, М.О. Пашин<sup>1</sup>, О.Л. Міходуй<sup>1</sup>, О.М. Тимошенко<sup>1</sup>, К.В. Шиян<sup>1</sup>, О.М. Карлов<sup>2</sup>,  
І.П. Кондратенко<sup>2</sup>, Р.С. Кришук<sup>2</sup>, В.В. Чопик<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: olha.mikhodui@gmail.com

<sup>2</sup>ІЕД НАН України. 03057, м. Київ, просп. Берестейський, 56. E-mail: ied1@ied.org.ua

Обробка імпульсним електромагнітним полем (ОІЕМП) зварних з'єднань призводить до зниження рівня залишкових зварювальних напружень. ОІЕМП у процесі зварювання сприяє підвищенню ефективності зварювального процесу (у порівнянні з ОІЕМП після зварювання) та простоті його технічної реалізації. На базі математичного моделювання та експериментальних досліджень магнітоімпульсних процесів розроблено автоматизований комплекс для зварювання ТІГ, що є сумісним з ОІЕМП металу шва в умовах термодформаційного циклу зварювання. Бібліогр. 20, рис. 6.

*Ключові слова:* імпульсне електромагнітне поле, зварні з'єднання, залишкові зварювальні напруження, ТІГ зварювання, диспергування структури, математичне моделювання, алюмінієвий сплав

**Вступ.** Розвиток промисловості ініціює дослідження прогресивних технологій для підвищення експлуатаційних властивостей зварних конструкцій. Перспективною в цьому напрямку є обробка зварних з'єднань імпульсним електромагнітним полем (ОІЕМП) [1–20]. Базуючись на результатах досліджень [1–5, 11], слід зазначити, що дія імпульсного електромагнітного поля (ІЕМП) є дієвим інструментом впливу на напружений стан зварних з'єднань. При цьому ефективність впливу підвищується при його застосуванні в умовах зварювання [5]. На базі ОІЕМП можуть бути розроблені ефективні технології керування напружено-деформованим станом зварних з'єднань із неферомагнітних металевих матеріалів, до яких належать алюмінієві сплави, які застосовуються в авіаракетній та суднобудівній промисловості.

**Метою** даної роботи є розробка наукових засад застосування ОІЕМП у процесі зварювання неферомагнітних матеріалів на прикладі алюмінієвого сплаву АМг6.

**Методика досліджень.** Підвищення ефективності ОІЕМП у процесі зварювання в порівнянні з обробкою при кімнатній температурі базується на наступних засадах: підвищення продуктивності зварювального процесу внаслідок переходу від послідовного до одночасного проведення основних технологічних операцій; можливість автоматизації; підвищення ефективності обробки для зниження залишкових зварювальних напружень згідно з механізмом, наведеним у [11]; диспергування структури металу зварного шва під час магнітодинамічних дій в умовах підвищених температур;

використання елементів збирального оснащення в якості екранів для підвищення величини електромагнітного тиску на метал, що обробляється.

Як відомо, при протіканні по провідникам індуктора імпульсу електричного струму (ІЕС) у наближеному електропровідному середовищі збуджуються вихрові струми. Як доведено в [12, 13], внаслідок взаємодії індуктованих струмів з ІЕМП, яке збудило ці струми, виникає електродинамічна сила  $P$ , нормальна складова якої здійснює активне навантаження на ділянку металевих матеріалу, що обробляється і, як наслідок, змінює його напружений стан. За умови, що щільність  $j$  індуктованого електричного струму досягає у металі, що обробляється, значення  $j \geq 1$  кА/мм<sup>2</sup>, створюються умови для реалізації ефекту електропластичності (ЕПЕ) [11–13]. Це сприяє інтенсифікації пластичного деформування матеріалу і, як наслідок, релаксації його залишкового напруженого стану. Для реалізації ОІЕМП використовували плоский індуктор із зовнішнім діаметром 95 мм та індуктивністю  $L = 120$  мкГн [12]. Для генерації ІЕМП застосовували джерело живлення на базі конденсаторної системи загальною ємністю  $C = 5140$  мкФ, зарядною напругою  $U$  до 800 В і запасеною енергією  $E_z \sim 1,6$  кДж. Для оцінки ефективності ОІЕМП використовували зразки у формі диску завтовшки  $\delta = 1$  мм і діаметром  $D_{зр} = 90$  мм із алюмінієвого сплаву АМг6 зі швом, виконаним зварюванням ТІГ. Зварні з'єднання на поверхні диску були зроблені у формі кільця діаметром  $D_{зв} = 45$  мм. Таким чином, між зварним швом і вільним краєм диску була відстань у 45 мм.

Лобанов Л.М. – <http://orcid.org/0000-0001-9296-2335>, Пашин М.О. – <http://orcid.org/0000-0002-2201-5137>,  
Міходуй О.Л. – <https://orcid.org/0000-0001-6660-7540>, Шиян К.В. – <https://orcid.org/0000-0001-9198-6554>,  
Карлов О.М. – <https://orcid.org/0000-0002-1350-1870>, Кондратенко І.П. – <https://orcid.org/0000-0003-1914-1383>,  
Кришук Р.С. – <https://orcid.org/0000-0002-1933-0144>, Чопик В.В. – <https://orcid.org/0000-0002-5046-5223>

© Л.М. Лобанов, М.О. Пашин, О.Л. Міходуй, О.М. Тимошенко, К.В. Шиян, О.М. Карлов, І.П. Кондратенко, Р.С. Кришук, В.В. Чопик, 2025

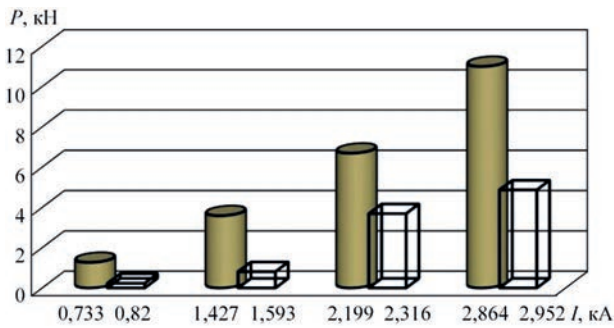


Рис. 1. Вплив амплітудних значень ІЕС –  $I$  на силу тиску  $P$  при ОІЕМП зразків кільцевих зварних з'єднань  $\delta = 1,0$  мм зі сплаву АМг6: □ – ОІЕМП без екрана; ■ – ОІЕМП з екраном

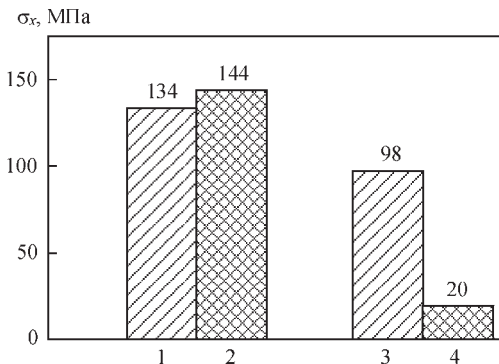


Рис. 2. Вплив ОІЕМП зварного шва без застосування (1, 3) та із застосуванням (2, 4) екрана на залишкові напруження  $\sigma_x$  у металі шва зварного з'єднання сплаву АМг6: 1, 2 – до ОІЕМП; 3, 4 – після ОІЕМП

Методом електронної спекл-інтерферометрії [12, 14] проводили оцінювання  $\sigma_x$  тангенціальної компоненти напруженого стану зварних з'єднань у точках на лінії кільцевого зварного шва.

**Результати досліджень.** Виконували ОІЕМП зразків завтовшки  $\delta = 1,0$  мм та збірки зразка  $\delta = 1,0$  мм зі струмопровідним екраном зі сплаву АМг6 також у формі диску  $\delta = 5,0$  мм ( $\Sigma\delta = 6$  мм) і діаметром 90 мм. ОІЕМП проводили серією із восьми ІЕС на режимі при зростанні значень  $U$  у наступній послідовності:  $U_1 = 200$  В,  $U_2 = 400$  В,  $U_3 = 600$  В,  $U_4 - U_8 = 800$  В. ІЕС при  $U_1 - U_3$  сприяли поступовому виходу на номінальний режим,

а ІЕС при  $U_4 - U_8$  – генерації ІЕМП для обробки зразків. Вибір кількості ІЕС при номінальному режимі обробки (при напрузі 800 В) був оснований на результатах [15].

У [16] із застосуванням методики на базі датчика Холла було проведено оцінювання напруженості  $H$  магнітного поля індуктора, задіяного в даній роботі. Встановлено, що значення  $H$  індуктора при розряді ємності при напрузі  $U = 200$  і 500 В досягали відповідно 10 і 30 кА/м.

Електромагнітна сила  $P$  зі збільшенням товщини буде зростати, оскільки визначається як інтегральна величина в певному об'ємі, що підтверджують дані рис. 1 та результати [12]. При зростанні  $\delta$  до 6,0 мм (внаслідок застосування екрана) значення  $P$  підвищуються більш ніж удвічі у порівнянні з ОІЕМП без екрана зразків  $\delta = 1,0$  мм. Для ефективної обробки тонких зразків необхідно зменшувати тривалість струмового імпульсу. Такий шлях, очевидно, вимагає зміни параметрів розрядних контурів, що не є доцільним. У роботі запропоновано найпростіший і ефективний шлях у вигляді встановлення додаткових шарів спорідненого матеріалу, за якого еквівалентна товщина буде оптимальною з точки зору досягнення найбільшого значення сили  $P$  електромагнітного тиску. Запропонований шлях є аналогічним застосуванню металевих «супутників» при технології електромагнітного формоутворення, наприклад роздавання або обтиснення [10, 11, 17]. На рис. 2 наведено розподіли залишкових напружень  $\sigma_x$  до ОІЕМП, а також  $\sigma_x$  після ОІЕМП зразка без та із застосуванням екрана, які підтверджують ефективність екранування при ОІЕМП. Враховуючи наведене, слід зазначити, що ОІЕМП може бути ефективним засобом керування залишковим напруженим станом зварних конструкцій із алюмінієвих сплавів. Результати металографічних досліджень зразків до та після ОІЕМП підтвердили позитивний вплив обробки на еволюцію структури металу зварного шва (рис. 3). У загальному вигляді

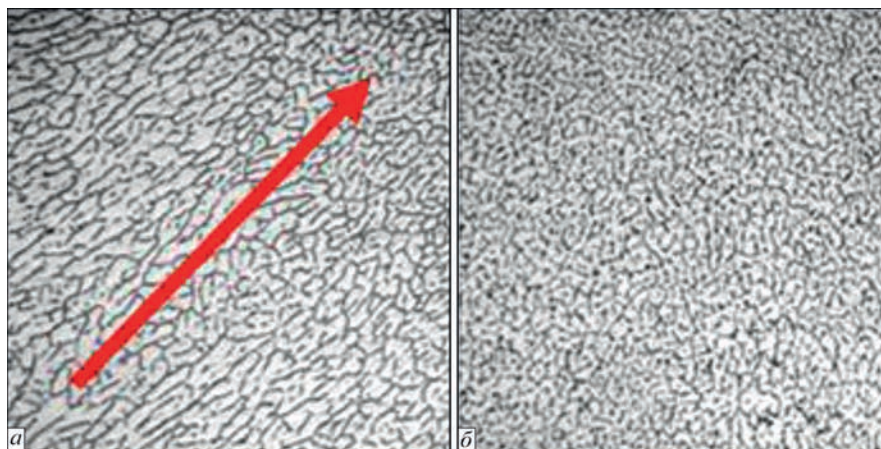


Рис. 3. Мікроструктура ( $\times 200$ ) металу зварного шва сплаву АМг6: у вихідному стані (до ОІЕМП) (а), де стрілка вказує напрям зростання кристалів; після ОІЕМП (б)

ді мікроструктура являє собою світлу матрицю –  $\alpha$ -твердий розчин із виділенням надлишкової фази у вигляді сітки по границях кристалів. Але якщо без ОІЕМП кристали мають переважно витягнуту форму, орієнтовану вздовж напрямку їх зростання (стрілка на рис. 3, *a*), то після ОІЕМП з екрануванням має місце рівновісна орієнтація зерен (рис. 3, *b*), що супроводжується їх диспергуванням. Отримані результати можна пояснити динамічним впливом сили  $P$  та вихрових струмів на міжзеренні границі в процесі ОІЕМП, який супроводжується локальним джоулевым розігрівом зерен [18–20].

На базі результатів [20] проведено математичне моделювання електрофізичних параметрів ОІЕМП зварного шва в процесі зварювання. Результати моделювання (рис. 4) мають сприяти оптимізації параметрів ОІЕМП для релаксації залишкових напружень тонколистових зварних з'єднань. На рис. 4, *a* представлено схему позиціонування П-подібного ін-

дуктора для ОІЕМП вздовж напрямку зварювання  $V_w$  (стрілка), де лінія 1 – поверхня зварного шва перед індуктором, лінія 2 – відповідно в зоні безпосередньої дії ІЕМП на метал зварного шва. На рис. 4, *b* наведено розподіл напруженості  $H$  ІЕМП, що дозволяє визначити оптимальне положення індуктора відносно зварювального пальника, яке визначається максимальним значенням  $H$  вздовж лінії 1 (початок лінії на бічній поверхні П-подібного індуктора). Із результатів на рис. 4, *b* можна зробити висновок, що на відстані 40 мм від краю магнітопроводу ( $x = 0$ ) значення  $H$  є близьким до нуля. Діаграма на рис. 4, *b* дозволяє визначити відстань між індуктором і пальником для зварювання, на якій вплив ІЕМП на зварювальний процес є мінімальним. На рис. 4, *в* представлено розподіл  $H$  ОІЕМП вздовж лінії 2 (рис. 4, *a*).

На рис. 5 наведено результати моделювання часових розподілів електрофізичних параметрів ОІЕМП зварного шва. На рис. 5, *a* виділено ділян-

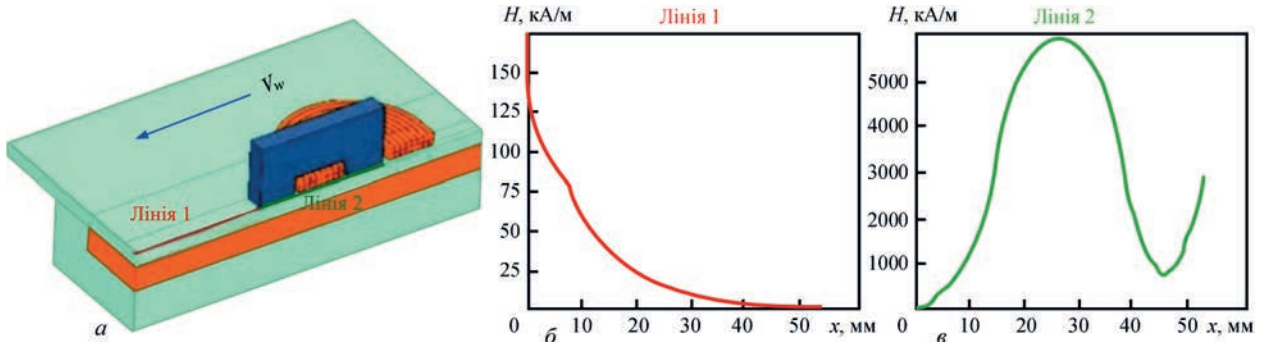


Рис. 4. Математичне моделювання електрофізичних параметрів ОІЕМП (зварного шва) в процесі зварювання: *a* – схема позиціонування П-подібного індуктора ОІЕМП вздовж напрямку зварювання  $V_w$ ; *b* – розподіл напруженості  $H$  ІЕМП вздовж лінії 1; *в* – розподіл напруженості  $H$  ІЕМП вздовж лінії 2

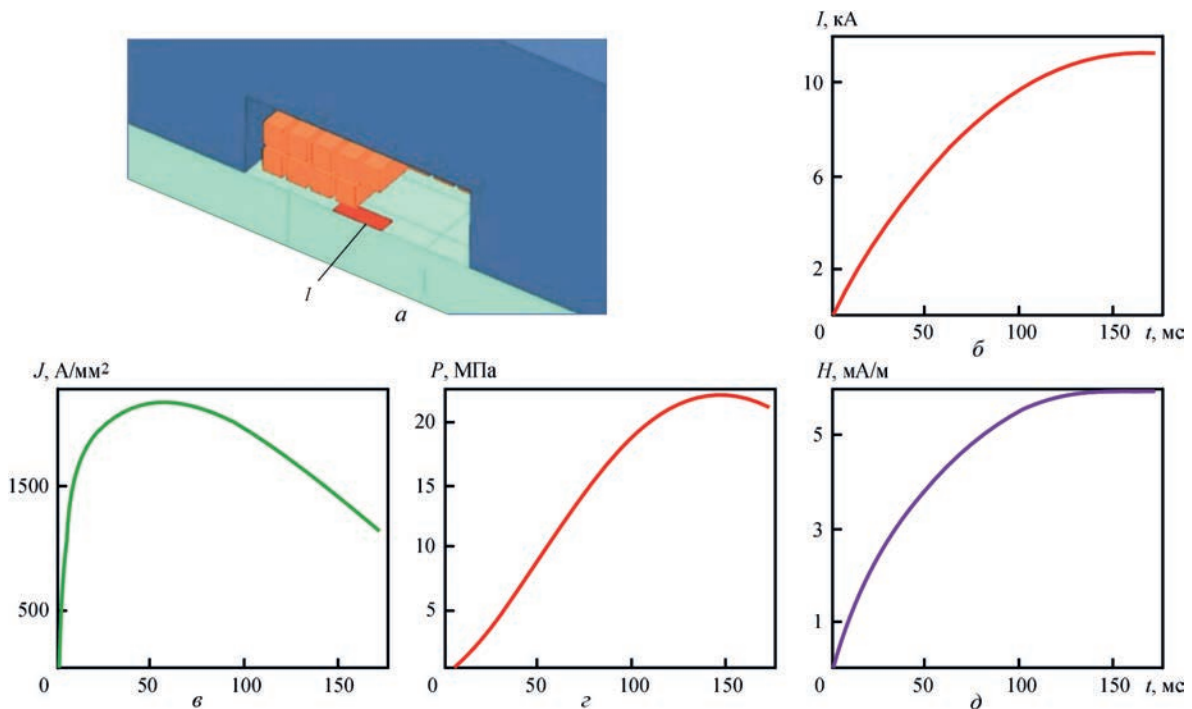


Рис. 5. Результати моделювання часових розподілів електрофізичних параметрів ОІЕМП зварного шва (пояснення рис.5, *a*–5, *e* надані в тексті)

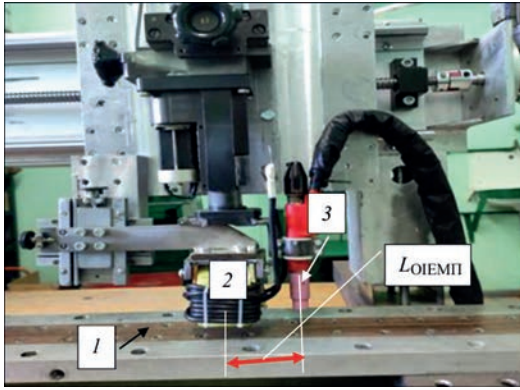


Рис. 6. Автоматизований комплекс для зварювання ТІГ в умовах супутньої ОІЕМП зварного шва: 1 – формуюча підкладка, що виконує роль екрана; 2 – індуктор; 3 – пальник;  $L_{\text{ОІЕМП}}$  – відстань між пальником і лінією 1 індуктора (рис. 4)

ку 1 із розмірами 3,5×5 мм (що відповідає задньому фронту зварювальної ванни), для якої визначено середню густину струму  $J$  (рис. 5, в) і середнє значення тиску  $P$  (рис. 5, з) за час дії ІЕС –  $I$  (рис. 5, б) на застигаючий зварний шов, що сприяє релаксації зварювальних напружень. У момент часу біля 50 мкс середня густина струму  $J$  на поверхні металу становить близько 2200 А/мм<sup>2</sup> (рис. 5, в), а тиск  $P$  досягає максимального значення при 150 мкс – 23 МПа (рис. 5, з). Це має забезпечити релаксацію зварювальних напружень на стадії їх формування при застиганні зварного шва на базі реалізації ефекту електропластичності [7]. На рис. 5, д наведено розподіл напруженості  $H$  ІЕМП в поперечному перерізі індуктора для моменту найбільших значень  $I$  та  $H$  ІЕМП, що забезпечують релаксацію напружень.

На базі результатів досліджень [1–8, 11–12, 20] розроблено автоматизований комплекс для ТІГ зварювання в умовах ОІЕМП застигаючого металу зварного шва (рис. 6), де в якості екрана (що підсилює дію сили  $P$ ) виступає формуюча підкладка 1 із неферомагнітного матеріалу, а відстань  $L_{\text{ОІЕМП}}$  між лінією 1 індуктора 2 і пальником ТІГ 3 забезпечує максимальну ефективність ОІЕМП у процесі зварювання.

## Висновки

1. Показано, що ОІЕМП позитивно впливає на залишковий напружений стан і структуру зварних з'єднань, а ефективність впливу підвищується в умовах зварювання ТІГ.

2. Встановлено, що підвищення ефективності ОІЕМП у процесі зварювання в порівнянні з обробкою при кімнатній температурі базується на зростанні продуктивності зварювального процесу внаслідок переходу від послідовного до одночасного проведення основних технологічних операцій, можливості автоматизації обробки, позитивному впливі термічного циклу зварювання.

3. Показано, що застосування ОІЕМП сприяє зниженню залишкових напружень і диспергуванню структури металу шва у зварних з'єднаннях зі сплаву АМг6.

4. Розроблено математичну модель процесу ОІЕМП, на базі якої доведено, що значення електрофізичних параметрів обробки забезпечують релаксацію залишкових напружень на базі реалізації ефекту електропластичності.

5. За результатами математичного моделювання та експериментальних досліджень магнітоімпульсних процесів розроблено та виготовлено автоматизований комплекс для зварювання ТІГ в умовах супутньої ОІЕМП.

## Список літератури

- Lobanov, L.M., Pashchin, N.A., Cherkashin, A.V. et al. (2012) Efficiency of electrodynamic treatment of aluminium alloy AMg6 and its welded joints. *The Paton Welding J.*, 1, 2–6.
- Lobanov, L.M., Pashchin, N.A., Mihodui, O.L. (2014) Repair of the AMg6 aluminum alloy welded structure by the electric processing method. *Weld. Res. Appl.*, 1, 55–62.
- Lobanov, L.M., Pashchin, N.A., Yashchuk, V.A., Mikhodui, O.L. (2015) Effect of electrodynamic treatment on the fracture resistance of the AMg6 aluminum alloy under cyclic loading. *Strength of Materials*, 47, 447–453. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11223-015-9676-5>
- Lobanov, L.M., Pashchin, N.A., Timoshenko, A.N. et al. (2017) Effect of the electrodynamic treatment on the life of AMg6 aluminum alloy weld joints. *Strength of Materials*, 49, 234–238. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s11223-017-9862-8>
- Korzhih, V.N., Pashchin, N.A., Mikhodui, O.L. et al. (2017) Comparative evaluation of methods of arc and hybrid plasma arc welding of aluminum alloy 1561 using consumable electrode. *The Paton Welding J.*, 4, 30–34. DOI: <https://doi.org/10.15407/tpwj2017.04.06>
- Батыгин Ю.В., Лавинский В.И., Хименко Л.Т. (2003) *Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий*. Под ред. проф. Ю.В. Батыгина. Харьков, МОСТ–Торнадо.
- Andrea, D., Burleta, T., Körkemeyerb, F. et al. (2019) Investigation of the electroplastic effect using nanoindentation. *Materials & Design*, 183, 108153. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108153>
- Nayanathara Hendeniya, Gayan Aravinda Abeygunawardena, Indika De. Silva, Shiranga Wickramasinghe (2020) The tensile electroplasticity of low carbon steel with low amplitude pulse current. In: *2020 Moratuwa Engineering Research Conference (MERCOn)*, 165–169. DOI: <https://doi.org/10.1109/MERCOn50084.2020.9185238>
- Туренко А.Н., Батыгин Ю.В., Гнятов А.В. (2009) *Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий. Т.3: Теория и эксперимент притяжения тонкостенных металлов импульсными магнитными полями*. Монография. Харьков, ХНАДУ.
- Батыгин Ю.В., Лавинский В.И., Хавин В.Л. (2009) *Способ магнитно-импульсной обработки тонкостенных металлических заготовок*. Патент України № 74909, 15.02.2006, Бюл. № 2.
- Lobanov, L.M., Pashchyn, M.O., Mikhodui, O.L. et al. (2022) Stress-strain state of welded joints of AMg6 alloy after electrodynamic treatment during welding. *Strength of Materials*, 54 (6), 983–996. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11223-023-00474-y>
- Lobanov, L.M., Pashchyn, M.O., Mikhodui, O.L. et al. (2021) Pulsed electromagnetic field effect on residual stresses and strains of welded joints of AMg6 aluminum alloy. *Strength of Materials*, 53 (6), 834–841. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11223-022-00350-1>
- Васецкий Ю.М., Дзюба К.К. (2017) Аналитический метод расчета квазистационарного трехмерного электромагнитного поля тока, протекающего по контуру произвольной конфигурации вблизи электропроводного тела. *Технічна електродинаміка*, 5, 7–17. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2017.05.007>

14. 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.
15. Lobanov, L.M., Pashchin, N.A., Mikhodui, O.L. (2012) Influence of the loading conditions on the deformation resistance of AMg6 alloy during electrodynamic treatment. *Strength of Materials*, **44** (5), 472–479. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11223-012-9401-6>
16. Lobanov, L.M., Pashchin, N.A., Cherkashin, A.V. et al. (2012) Repair welding of intermediate cases of aircraft engines from high-temperature magnesium alloy ML10 with application of electrodynamic treatment. *The Paton Welding J.*, **11**, 28–33.
17. Белый И.В., Фертик С.М., Хименко Л.Т. (1977) *Справочник по магнитно-импульсной обработке металлов*. Харьков, Вища школа.
18. Батигин Ю.В., Чаплыгин Е.А. (2006) Вихревые токи в плоских листовых металлических заготовках. *Электротехника і електромеханіка*, **5**, 54–59.
19. Стрижало В.А., Новогрудский Л.С., Воробьев Е.В. (2008) *Прочность материалов при криогенных температурах с учетом воздействия электромагнитных полей*. Киев, ИПП.
20. Ращепкін А.П., Кондратенко І.П., Карлов О.М., Кришук Р.С. (2019) Электромагнітне поле індуктора з Ш-подібним осердям для магнітно-імпульсної обробки матеріалів. *Технічна електродинаміка*, **6**, 5–12. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2019.06.005>
8. Nayanathara Hendeniya, Gayan Aravinda Abeygunawardena, Indika De. Silva, Shiranga Wickramasinghe (2020) The tensile electroplasticity of low carbon steel with low amplitude pulse current. In: *2020 Moratuwa Engineering Research Conf. (MERCCon)*, 165–169. DOI: <https://doi.org/10.1109/MERCCon50084.2020.9185238>
9. Turenko, A.N., Batygin, Y.V., Gnatov, A.V. (2009) *Pulsed magnetic fields for advanced technologies. Vol.3: Theory and experiment of attraction of thin-walled metals by pulsed magnetic fields*. Monography. Kharkiv, KHNADU [in Russian].
10. Batygin, Y.V., Lavinskyi, V.I., Khavin, V.L. (2009) *Method of magnetic pulsed processing of thin-walled metal billets*. Pat. UA 74909, 15.02.2006 [in Ukrainian].
11. Lobanov, L.M., Pashchyn, M.O., Mikhodui, O.L. et al. (2022) Stress-strain state of welded joints of AMg6 alloy after electrodynamic treatment during welding. *Strength of Materials*, **54**(6), 983–996. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11223-022-00474-y>
12. Lobanov, L.M., Pashchyn, M.O., Mikhodui, O.L. (2021) Pulsed electromagnetic field effect on residual stresses and strains of welded joints of AMg6 aluminum alloy. *Strength of Materials*, **53**(6), 834–841. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11223-021-00350-1>
13. Vasetsky Y.M., Dzyuba K.K. (2017) Analytical method of calculation of quasi-stationary three-dimensional electromagnetic current field flowing along a contour of arbitrary configuration near an electrically conductive body. *Tekhnichna Elektrodynamika*, **5**, 7–17 [in Russian]. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2017.05.007>

References

1. Lobanov, L.M., Pashchin, N.A., Cherkashin, A.V., Mikhoduj, O.L., Kondratenko, I.P. (2012) Efficiency of electrodynamic treatment of aluminum alloy AMg6 and its welded joints. *The Paton Welding J.*, **1**, 2–6.
2. Lobanov, L.M., Pashchin, N.A., Mikhodui, O.L. (2014) Repair of the AMg6 aluminum alloy welded structure by the electric processing method. *Weld. Res. Appl.*, **1**, 55–62.
3. Lobanov, L.M., Pashchin, N.A., Yashchuk, V.A., Mikhodui, O.L. (2015) Effect of electrodynamic treatment on the fracture resistance of the AMg6 aluminum alloy under cyclic loading. *Strength of Materials*, **47**, 447–453. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11223-015-9676-5>
4. Lobanov, L.M., Pashchin, N.A., Timoshenko, A.N. et al. (2017) Effect of the electrodynamic treatment on the life of AMg6 aluminum alloy weld joints. *Strength of Materials*, **49**, 234–238. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s11223-017-9862-8>
5. Korzhik, V.N., Pashchin, N.A., Mikhodui, O.L. (2017) Comparative evaluation of methods of arc and hybrid plasma-arc welding of aluminum alloy 1561 using consumable electrode. *The Paton Welding J.*, **4**, 30–34. DOI: <https://doi.org/10.15407/tpwj2017.04.06>
6. Batygin, Y.V., Lavinsky, V.I., Khimenko, L.T. (2003) Pulsed magnetic fields for advanced technologies. Ed. by Yu.V. Batygin. Kharkov, MOST-Tornado [in Russian].
7. Andrea, D., Burlata, T., Körkemeyerb, F. et al. (2019) Investigation of the electroplastic effect using nanoindentation. *Materials & Design*, **183**, 108153. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108153>
14. 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.
15. Lobanov, L.M., Pashchin, N.A., Mikhodui, O.L. (2012) Influence of the loading conditions on the deformation resistance of AMg6 alloy during electrodynamic treatment. *Strength of Materials*, **44**(5), 472–479. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11223-012-9401-6>
16. Lobanov, L.M., Pashchin, N.A., Cherkashin, A.V. et al. (2012) Repair welding of intermediate cases of aircraft engines from high-temperature magnesium alloy ML10 with application of electrodynamic treatment. *The Paton Welding J.*, **11**, 28–33.
17. Belyi, I.V., Fertik, S.M., Khimenko, L.T. (1977) *Handbook on magnetic pulse treatment of metals*. Kharkiv, Vyshcha Shkola [in Russian].
18. Batygin, Yu.V., Chaplygin, E.A. (2006) Eddy currents in flat sheet metal blanks. *Elektrotehnika і Elektromekhanika*, **5**, 54–59 [in Russian].
19. Strizhalo, V.A., Novogrudsky, L.S., Vorobiev, E.V. (2008) *Strength of materials at cryogenic temperatures with regard to the influence of electromagnetic fields*. Kyiv, IPP [in Russian].
20. Rashchepkin, A.P., Kondratenko, I.P., Karlov, O.M., Kryshchuk, R.S. (2019) Electromagnetic field of an inductor with a W-shaped core for magnetic pulse treatment of materials. *Tekhnichna Elektrodynamika*, **6**, 5–12 [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2019.06.005>

MAGNETIC PULSE TREATMENT OF WELDED JOINTS IN THE PROCESS OF FUSION WELDING

L.M. Lobanov<sup>1</sup>, M.O. Pashchyn<sup>1</sup>, O.L. Mikhodui<sup>1</sup>, A.N. Timoshenko<sup>1</sup>, K.V. Shyian<sup>1</sup>, O.M. Karlov<sup>2</sup>, I.P. Kondratenko<sup>2</sup>, R.S. Kryshchuk<sup>2</sup>, V.V. Chopyk<sup>2</sup>

<sup>1</sup>E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine.

E-mail: olha.mikhodui@gmail.com

<sup>2</sup>Institute of Electrodynamics of the NAS of Ukraine. 56 Beresteyskiy Ave., 03057, Kyiv, Ukraine. E-mail: ied1@ied.org.ua

Treatment with a pulsed electromagnetic field (TPEMF) of welded joints leads to a decrease of residual welding stress level. TPEMF in the welding process contributes to an increase in the efficiency of the welding process (compared to PEFM after welding) and the simplicity of its technical implementation. On the basis of mathematical modelling and experimental studies of magnetic pulse processes, an automated complex for TIG welding has been developed that is compatible with TPEMF of the weld metal under the conditions of a thermal deformation welding cycle. 37 Ref., 6 Fig.

*Keywords: pulsed electromagnetic field, welded joints, residual welding stresses, TIG welding, structure dispersion, mathematical modelling, aluminium alloy*

Отримано 08.01.2025

Отримано у переглянутому вигляді 28.02.2025

Прийнято 10.04.2025