

# ВПЛИВ ОБРОБКИ ІМПУЛЬСНИМ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИМ ПОЛЕМ НА НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН КІЛЬЦЕВИХ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ АЛЮМІНІЄВОГО СПЛАВУ АМг6

Л.М. Лобанов<sup>1</sup>, М.О. Пашин<sup>1</sup>, О.Л. Миходуй<sup>1</sup>, О.В. Черкашин<sup>1</sup>, О.М. Тимошенко<sup>1</sup>,  
І.П. Кондратенко<sup>2</sup>, Т.Г. Соломійчук<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ІЕЗ ім. С.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: [office@paton.kiev.ua](mailto:office@paton.kiev.ua)

<sup>2</sup>Інститут електродинаміки НАН України. 03057, м. Київ, просп. Перемоги, 56

У теперішній час спостерігається підвищений інтерес до технологій обробки імпульсним електромагнітним полем з метою покращення механічних характеристик металів, сплавів і зварних з'єднань. На базі обробки імпульсним електромагнітним полем можуть бути розроблені ефективні методи оптимізації напружено-деформованого стану виробів із алюмінієвих сплавів з метою подовження їх ресурсу для застосування в авіаракетній, суднобудівній та інших галузях промисловості. Метою роботи є дослідження впливу обробки імпульсним електромагнітним полем на напружено-деформований стан кільцевих зварних з'єднань алюмінієвого сплаву АМг6. Розроблено оригінальну експериментальну методику дослідження кінетики сили електродинамічного тиску при обробці імпульсним електромагнітним полем металевих матеріалів. Показано, що в результаті обробки імпульсним електромагнітним полем на однаковому режимі значення  $P$  зростало при застосуванні екрану, що обумовлено збільшенням активного додаткового об'єму електропровідного середовища. Встановлено, що використання екрану при обробці імпульсним електромагнітним полем сприяє зниженню рівня залишкових зварювальних напружень розтягування та підвищенню точності кільцевих зварних з'єднань. Бібліогр. 8, табл. 3, рис. 8.

*Ключові слова:* імпульсна електромагнітна обробка, алюмінієвий сплав, кільцеві зварні з'єднання, напружено-деформований стан, залишкові зварні з'єднання, додатковий екран

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 (ІЕМП). Такими є електродинамічна обробка (ЕДО) і обробка прямою дією імпульсного електромагнітного поля (ОІЕМП). Переваги ЕДО наведено у [1], а до її недоліків, на відміну від ОІЕМП, відноситься необхідність контактної взаємодії з поверхнею металу, що обробляється.

У теперішній час спостерігається підвищений інтерес до технологій ОІЕМП у різних галузях металообробки [2], таких як формування, обтиснення, зварювання, калібрування та ін. У роботі [3] розглянуто розрахунки і конструкції індукторних систем для правлення жолоблень автомобільних кузовних конструкцій при ОІЕМП.

Базуючись на результатах [2, 3] слід зазначити, що ІЕМП є дієвим інструментом впливу на формування та механічні характеристики металів і сплавів [4], а також зварних з'єднань [5]. На базі ОІЕМП можуть бути розроблені ефективні технології керування напружено-деформованим станом

тонколистових металевих матеріалів, до яких належать алюмінієві сплави, які застосовуються у авіаракетній та суднобудівній промисловості, що є актуальним для сучасного виробництва.

Метою даної роботи є дослідження впливу ОІЕМ на залишковий напружений стан зварних з'єднань із неферромагнітних матеріалів на прикладі алюмінієвого сплаву АМг6.

**Методика, апаратура та зразки для досліджень.**

Як відомо, протікання по провідникам індуктора імпульсу електричного струму (ІЕС) в наближеному електропровідному середовищі збуджують вихрові струми. Як доведено в [6], незалежно від того, як розташовано індуктор по відношенню до площини електропровідного середовища, контури індукваного струму розташовуються паралельно площині поверхні (середовища). Внаслідок взаємодії індукваних струмів з імпульсним магнітним полем, яке збудило ці струми, виникає електродинамічна сила, яка має три просторові складові, але лише одна – нормальна складова електродинамічної сили виявляється набагато більшою за тангенціальні складові. Ця сила здійснює активне навантаження на ділянку з тиском силою  $P$  і як наслідок, змінює напружений стан матеріалу, що обробляється. За умови, що щіль-

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

Миходуй О.Л. – <https://orcid.org/0000-0001-6660-7540>, Черкашин О.В. – <https://orcid.org/0000-0002-7596-7780>,

Тимошенко О.М. – <https://orcid.org/0000-0001-9163-1067>, Кондратенко І.П. – <https://orcid.org/0000-0003-1914-1383>,

Соломійчук Т.Г. – <https://orcid.org/0000-0002-3038-8291>

© Л.М. Лобанов, М.О. Пашин, О.Л. Миходуй, О.В. Черкашин, О.М. Тимошенко, І.П. Кондратенко, Соломійчук Т.Г., 2020

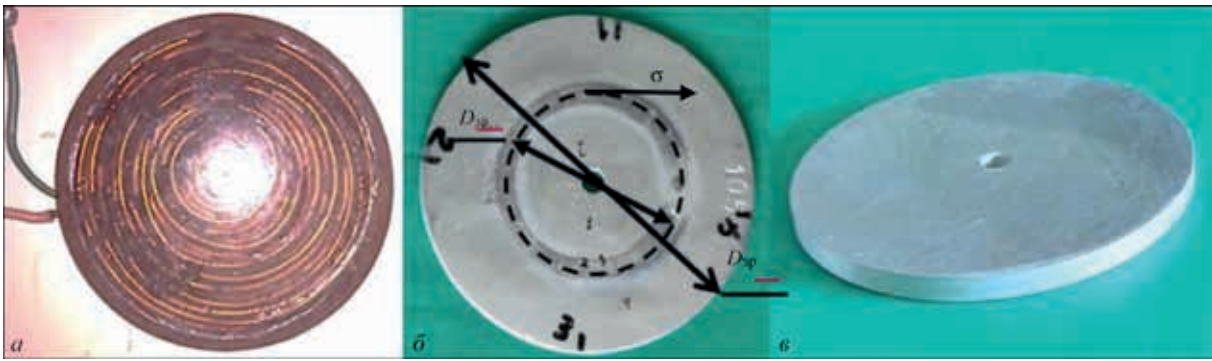


Рис. 1. Зовнішній вигляд: *a* – плоский багатovitковий індуктор; *б* – зразок кільцевого зварного з’єднання зі сплаву АМг6 товщиною  $\delta = 1,0$  мм, де  $D_{зр} = 90$  мм та  $D_{зв} = 45$  мм відповідно діаметри зразка і зварного шва;  $\sigma$  – нормальна компонента залишкових напружень; *в* – екран, що проводить струм, діаметром 90 мм і товщиною 5 мм

Таблиця 1. Характеристики плоского індуктора для ОІЕМП

Індуктивність * $L$ , мкГн при частоті $f$ , кГц 1,0	Зовнішній діаметр $d_{інд}$ , мм	Внутрішній діаметр $d_{інд}$ , мм	Висота $h_{інд}$ , мм	Матеріал обмотки	Діаметр обмотки, мм	Кількість витків $n$
121	95	5	14	Дріт, мідь марки М1	1,0	50

Примітка. \*Значення індуктивності визначені при величині повітряного проміжку 0,1 мм між індуктором і зразком зі сплаву АМг6 товщиною  $\delta = 5$  мм.

Таблиця 2. Режими наплавлення методом ТІГ кільцевих «холостих» валиків на зразках сплаву АМг6 для ОІЕМП

Товщина $\delta$ , мм	Виліт дуги, мм	Витрати аргону, л/хв	Діаметр W-електроду, мм	Швидкість зварювання $v_{зв}$ , м/год	Зварний струм $I_{зв}$ , А
1,0	1,5	10	1,6	13,4	39

ність  $j$  індукваного електричного струму досягає у металі, що обробляється, значення  $j \geq 1$  кА/мм<sup>2</sup>, створюються умови для реалізації електропластичного ефекту (ЕПЕ) [4]. Це сприяє інтенсифікації пластичного деформування матеріалу і як наслідок, керованій зміні його напружено стану. Механізм ЕПЕ діє згідно теорії електрон-дислокаційної взаємодії, за якої при  $j \geq 1$  кА/мм<sup>2</sup> у матеріалі створюються умови для взаємодії електронів провідності із дислокаціями, наслідком чого є прорив останніми структурних бар'єрів, їх розмноження і просування.

Для генерації ІЕМП використовували плоский багатovitковий індуктор (рис. 1, *a*), а для реалізації зарядного і розрядного циклів ІЕМП – джерело живлення на базі конденсаторної системи загальною ємністю  $C = 5140$  мкФ, зарядною напругою  $U$  до 800 В і запасеною енергією  $E_3 \sim 1,6$  кДж. Характеристики індуктора представлено в табл. 1.

Для оцінки ефективності ОІЕМП використовували плоскі зразки у формі диску товщиною і діаметром відповідно  $\delta = 1,0$  та  $D_{зр} = 90$  мм із алюмінієвого сплаву АМг6. Кільцеві зварні з’єднання імітували автоматичним наплавленням методом ТІГ у середовищі Аг на поверхні дисків «холостих» валиків на режимі (табл. 2) вздовж лінії кола діаметром  $D_{зв} = 45$  мм. Методом електронної спекл-інтерферометрії [1] проводили оцінювання нормальної компоненти  $\sigma$  (рис. 1, *б*) залишкового напруженого стану зварних з’єднань та вертикальних переміщень крайків дисків до та після ОІЕМП. При обробці використовували екран, що проводить струм, у ви-

гляді диску зі сплаву АМг6 діаметром і товщиною відповідно 90 і 5,0 мм (рис. 1, *в*).

Параметри ІЕС вивчали із використанням вимірювального цифрового приладу на базі безіндукційного шунта, призначеного для реєстрації амплітудного значення однополярних ІЕС. Крім величини амплітуди струму прилад вимірював тривалість імпульсу і кількість ІЕС від початку роботи. Реєстрацію часового розподілу сили  $P$  здійснювали із застосуванням датчику прискорень Kistler 8042 [7]. Зовнішній вигляд апаратурного комплексу для реєстрації часових розподілів ІЕС –  $I$  та  $P$  наведено на рис. 2.

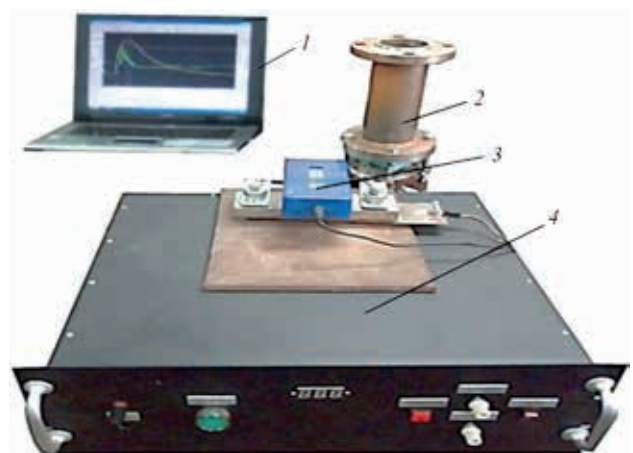


Рис. 2. Зовнішній вигляд апаратурного комплексу для реєстрації часових розподілів ІЕС –  $I$  та  $P$  при ОІЕМП металевих матеріалів: 1 – пристрій обробки і візуалізації результатів вимірювань; 2 – пристрій фіксації індуктора для ОІЕМП і реєстрації значень сили  $P$ ; 3 – цифровий прилад реєстрації значень амплітуди і тривалості ІЕС; 4 – джерело живлення для ОІЕМП

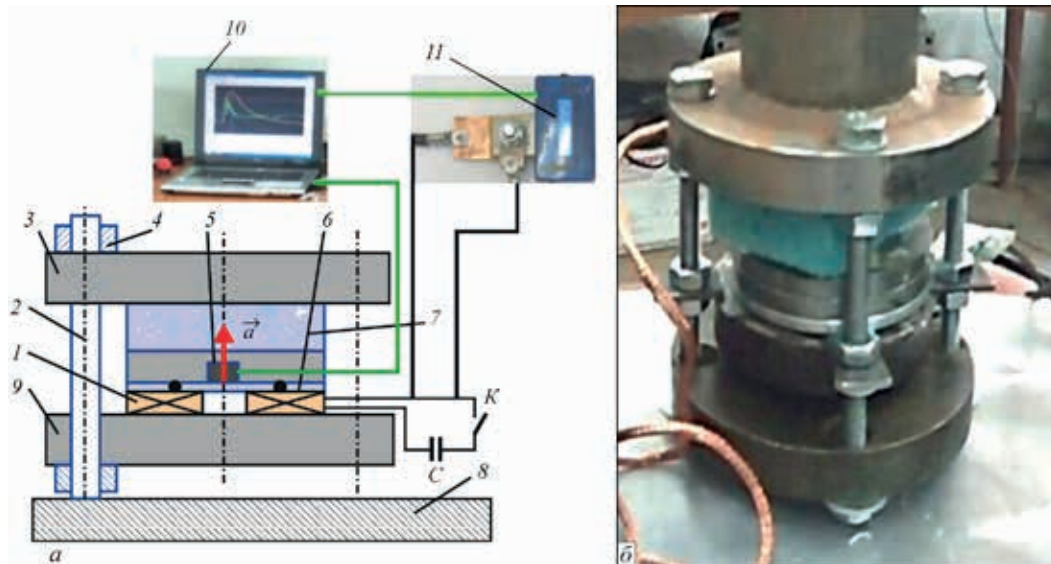


Рис. 3. Пристрій для реєстрації часових розподілів ІЕС і  $P$  у складі апаратурного комплексу для ОІЕМП (рис. 2): а – конструктивна схема, де 1 – індуктор; 2 – шпилька; 3 – верхня плита; 4 – гайка притискання; 5 – датчик прискорень; 6 – зразок-імітатор зварного з’єднання; 7 – демпфер тиску; 8 – базова опора; 9 – нижня плита; 10 – система реєстрації і обробки отриманих даних; 11 – цифровий прилад обробки даних; С – джерело живлення; К – ключ запуску розрядного циклу; а – вектор прискорення; б – зовнішній вигляд пристрою

Конструктивну схему і зовнішній вигляд пристрою 2 (рис. 2) наведено відповідно на рис. 3. Схема реєстрації параметрів ІЕМП працює наступним чином. Замикання розрядного контуру ключем  $K$  розпочинає перехідний процес розряду ємнісного накопичувача на активно-індуктивне навантаження. Параметри джерела живлення і його електрична схема забезпечують аперіодичний тип перехідного процесу з однополярними імпульсами струму, параметри яких реєструються цифровим приладом 11. Розрядний струм при проходженні через індуктор 1 збуджує ІЕМП. У зразку металу 6, що розташовується над індуктором, при взаємодії із ІЕМП наводяться вихрові струми, результатом взаємодії яких із ІЕМП є формування електродинамічної сили  $P$ , яка викликає відштовхування зразка скінченної маси  $m$  від індуктора (який є жорстко зафіксований) із прискоренням  $a$ . Часовий розподіл  $a$  реєструється датчиком прискорень 5, який закріплено на зразку. Зверху на збірку «датчик-зразок» встановлено демпфер тиску 7 зі шпаристого пружного матеріалу, що практично не перешкоджає вільному прискоренню збірки. Система вимірювання зафіксована гайками притискання 4 і шпильками 2 між верхньою 3 і нижньою 9 плитами, які змонтовані на базовій опорі 8. Сила  $P$  розраховується апаратно як результат множення маси на прискорення, задавали силовою схемою, наведеною на рис. 3, а.

Реєстрацію часових розподілів ІЕС –  $I$  та  $P$  після поодинокого розряду конденсатора виконували при зарядній напрузі  $U = 200 \dots 800$  В в умовах прискорення зразків товщиною  $\delta = 1,0$  мм без екрану, що проводить струм (рис. 1, в) та із його застосуванням –  $\delta = 1 + 5$  мм.

Після реєстрації  $I(t)$  і  $P(t)$  проводили ОІЕМП зразків, схему якої (із застосуванням екрану) наведено на рис. 4. Для забезпечення умов обробки демпфер і датчик прискорень було видалено. Елементами кріплення 5 і 6 була забезпечена жорстка фіксація зразка 4 та екрану 9 між нижньою 7 і верхньою 2 плитами, які розміщено на базовій опорі 8. При розряді конденсатора виникала сила відштовхування  $P$ , яка здійснювала тиск на зразок.

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 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

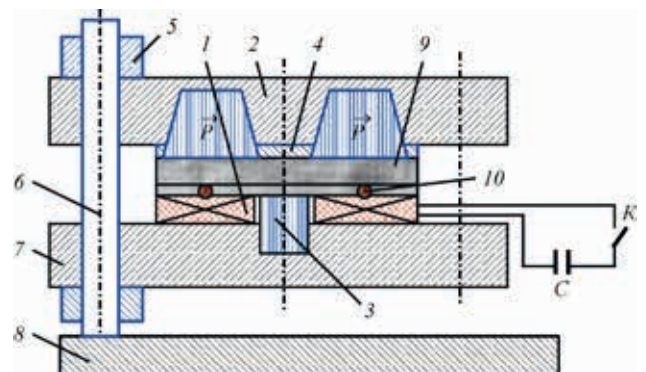


Рис. 4. Конструктивна схема ОІЕМП металевих матеріалів: 1 – індуктор; 2 – верхня плита; 3 – вісь кріплення індуктора; 4 – зразок зварного з’єднання сплаву АМг6  $\delta = 1,0$  мм; 5 – гайка притискна; 6 – шпилька; 7 – нижня плита; 8 – базова опора; 9 – струмопровідний екран (рис. 1, в); 10 – зразок-імітатор зварного з’єднання;  $P$  – епюра розподілу електродинамічної сили по поверхні зразка; С – джерело ІЕМП; К – ключ запуску розрядного циклу



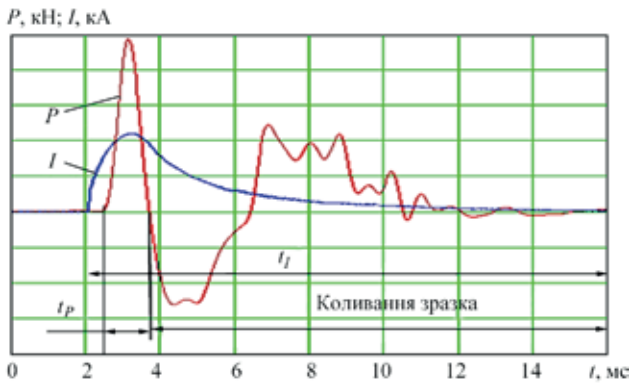


Рис. 5. Часові розподіли сили електродинамічного тиску  $P$  і сили струму  $I$  при ОІЕМП зразків сплаву АМг6  $\delta = 1,0$  мм без екрану при напрузі заряду  $U = 800$  В, де  $t_l$  та  $t_p$  відповідно періоди часу дії  $P$  та  $I$

$U_4-U_8$  – генерація ІЕМП для обробки зразків. Вибір кількості ІЕС при напрузі 800 В базується на даних [4].

**Результати експериментів та їх обговорення.** Часові розподіли осцилограм  $I(t)$  і сили  $P(t)$  при ОІЕМП диску  $\delta = 1,0$  мм без екрану наведено на рис. 5. Слід зазначити, що тиск  $P$ , який визначає зміну напруженого стану зразків, діє за період першої напівхвилі сили. Подальші загасаючі коливання  $P$ , що є наслідком контакту зразків із демпфером 7 (рис. 3) і які відображені на рис. 5, не враховували при оцінці амплітудних значень сили. Це пов'язано з тим, що загасаючі коливання мають місце тільки при реєстрації значень  $P$  і виключені при умовах жорсткої фіксації зразків (рис. 4), за якої виконували їх ОІЕМП з метою впливу на напружено-деформований стан зварних з'єднань. При виключенні можливості руху зразка в умовах його закріплення дія сили  $P$  ініціює релаксацію напружень в металі.

Амплітудно-частотні характеристики сили тиску  $P$  і сили струму  $I$  наведено у табл. 3, згідно даних якої у дослідженому діапазоні режимів обробки часовий період  $t_l$  дії ІЕС забезпечував тривалість імпульсу струму, що відповідає частоті, за якої глибина проникнення струму у сплав АМг6 досягала значення, більшого за 10 мм. Тобто, при обробці зразків товщиною  $\delta = 1,0 \dots 6,0$  мм імпульсами такої тривалості ІЕМП виявляється і на зворотній стороні зразка. Загасання індукованого струму відбувається згідно розв'язку нестационарної задачі для розподілу векторів електромагнітного поля [8]. В будь-якому разі за вибраних параметрах індуктора товщина зразка, що обробляється імпульсним електромагнітним полем,

буде мало впливати на перебіг перехідного процесу розряду ємнісного накопичувача. Електромагнітна сила  $P$  зі збільшенням товщини буде зростати, оскільки визначається як інтегральна величина в певному об'ємі, що підтверджують дані табл. 3 і залежності  $P = f(I)$  при варіації  $\delta$ , які наведено на рис. 6. При зростанні  $\delta$  до 6,0 мм внаслідок застосування екрану (крива 2) значення  $P$  підвищуються до двох разів у порівнянні із ОІЕМП без екрану зразків  $\delta = 1,0$  мм (крива 1). Зниження сили тиску  $P$  при зменшенні товщини  $\delta$  диска обумовлено поверхневим ефектом, тобто нерівномірним розподілом густини індукованих струмів по глибині та зменшенням активного об'єму електропровідного середовища, яке є електромагнітним навантаженням індуктора. Для ефективної обробки тонких зразків, таким чином, необхідно зменшувати тривалість струмового імпульсу. Такий шлях, очевидно, вимагає зміни параметрів розрядних контурів, що не є доцільним. В 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.

Ефективність впливу ОІЕМП на залишкову формозміну зразків, оброблених за наведених вище умов, підтверджують дані, наведені на рис. 7, а–в. Значення вертикальних переміщень крайків дисків  $f$  (рис. 7, а) реєстрували згідно методики [1] у точках № 1–4 (рис. 7, в) із фіксованою кутовою відстанню  $\alpha_u$  у  $90^\circ$  між сусідніми точками. Виконання ОІЕМП без екрану (рис. 7, з, крива 2) та з його застосуванням (крива 3) дозволяє зменшити значення переміщень

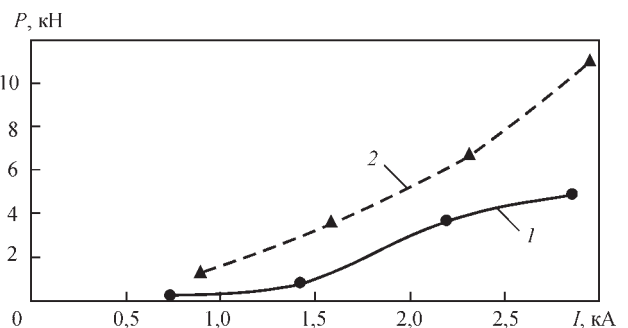


Рис. 6. Вплив амплітудних значень ІЕС –  $I$  на силу тиску  $P$  при ОІЕМП зразків кільцевих зварних з'єднань  $\delta = 1,0$  мм зі сплаву АМг6: 1 – ОІЕМП без екрану; 2 – ОІЕМП з екраном

Таблиця 3. Амплітудно-частотні характеристики  $P$  та  $I$  при ОІЕМП зразків сплаву АМг6 за різних значень  $U$  та  $\delta$

Номер	Характеристики ОІЕМП зразків	$U$ , В	$\delta$ , мм	$P$ , кН	$t_p$ , мс	$I$ , кА	$t_l$ , мс
1	Без екрану (БЕ)	200	1,0	0,234	0,3	0,733	8,8
2	БЕ	400	1,0	0,812	0,28	1,427	10,8
3	БЕ	600	1,0	3,694	0,48	2,199	11,9
4	БЕ	800	1,0	4,871	0,48	2,864	12,6
5	З екраном (ЗЕ)	200	1,0+5,0	1,267	1,36	0,82	7,7
6	ЗЕ	400	1,0+5,0	3,589	1,2	1,593	9,4
7	ЗЕ	600	1,0+5,0	6,690	1,2	2,316	10,0
8	ЗЕ	800	1,0+5,0	10,999	1,0	2,952	10,58

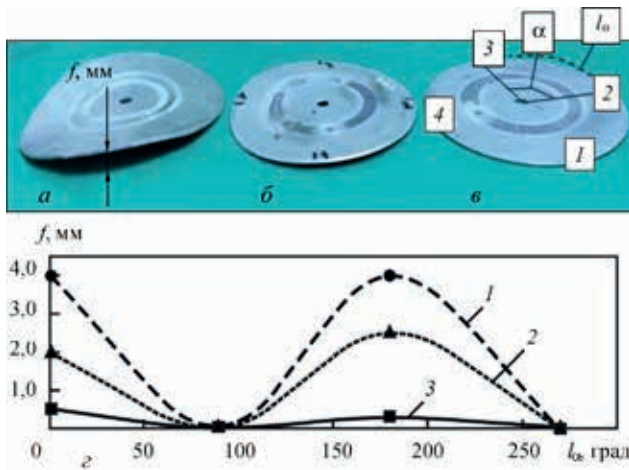


Рис. 7. Залишкові формозміни зразків кільцевих зварних з'єднань зі сплаву АМГ6: а – зовнішній вигляд (ЗВ) диска без обробки, де  $f$  – переміщення крайків диска; б – ЗВ після ОІЕМП без екрану; в – ЗВ після ОІЕМП з екраном, де 1–4 – номер точки вимірювання переміщень,  $\alpha$  та  $l_0$  – відповідно кут і кутів відстань між точками 2–3;  $z$  – вертикальні переміщення  $f$  крайків диска, де крива 1 – без ОІЕМП; 2 – після ОІЕМП без екрану; 3 – після ОІЕМП із застосуванням екрану

$f$  крайків дисків відповідно до двох і восьми разів у порівнянні зі зразками, які не були піддані ОІЕМП.

На рис. 8 наведено результати впливу ОІЕМП на нормальну компоненту  $\sigma$  залишкових напружень у центрі зварного шва (ЗШ) і у зоні навколо шва (ЗНШ) на відстані 10 мм від лінії шва. Враховуючи вигин дисків (рис. 7), наслідком якого є нерівноваженість епюр залишкових напружень, в якості оцінки впливу ОІЕМП на напружений стан визначали пікові значення  $\sigma$  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  $\sigma$  при обробці без екрану (рис. 8, а) та з екраном (рис. 8, б) 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 та в, г. Так, обробка без та із застосу-

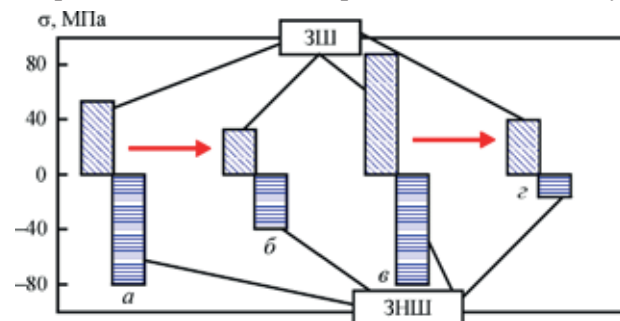


Рис. 8. Вплив ОІЕМП на нормальну компоненту  $\sigma$  залишкових напружень у зварних швах (ЗШ) і в зоні навколо шва (ЗНШ) кільцевих зварних з'єднань зразків зі сплаву АМГ6 товщиною  $\delta = 1$  мм: а – пікові значення  $\sigma$  зразків у вихідному стані; б –  $\sigma$  після ОІЕМП без застосування екрану; в –  $\sigma$  зразків у вихідному стані; г –  $\sigma$  після ОІЕМП із застосуванням екрану

ванням екрану призвела до зменшення початкових значень  $\sigma$  в активній зоні розтягування (ЗШ) відповідно на 36 і 56 %, а в реактивній стискування (ЗНШ) – на 50 і 80 %. Отримані результати пояснюються впливом поля на міжзеренні кордони і локальними розігрівками зерен [3], але потребують більш детального дослідження еволюції тонкої структури неферромагнітних матеріалів під дією ІЕМП.

Враховуючи наведене, слід зазначити, що ОІЕМП може бути ефективним засобом як підвищення точності виготовлення елементів тонколистових зварних конструкцій із алюмінієвих сплавів, так і керування їх залишковими напруженими станами. До переваг ОІЕМП перед загальною термічною обробкою слід віднести її значно меншу енергоємність та відсутність потреби у спеціальному обладнанні. Відомо, що локальна термообробка (ЛТО) алюмінієвих сплавів не є ефективною через високу теплопровідність останніх, а застосування ОІЕМП, яка характеризується в основному нетермічним механізмом впливу, є більш дієвим.

Для застосування ОІЕМП у промисловому виробництві, зокрема у авіа- і «білому» суднобудуванні доцільно визначити декілька напрямків, що дозволяють підвищити ефективність обробки:

- оптимізація електрофізичних параметрів ОІЕМП, що забезпечать максимальну ефективність впливу складових поля на напружено-деформований стан і структуру неферромагнітних матеріалів;
- розробка і виготовлення індукторних систем підвищеної міцності і термічної стійкості;
- розробка і виготовлення енергоефективних імпульсних джерел живлення із оптимальними характеристиками зарядного і розрядного циклів;
- розробка технологій ОІЕМП для регулювання напружено-деформованими станами зварних, наплавлених та напилених конструкцій із провідних матеріалів.

### Висновки

1. На базі застосування датчика прискорень розроблено експериментальну методику дослідження кінетики сили електродинамічного тиску на зразки кільцевих зварних з'єднань при їх обробці імпульсним магнітним полем (ОІЕМП).

2. Встановлено, що зменшення сили тиску імпульсного електромагнітного поля при зменшенні товщини зразків кільцевих зварних з'єднань зі сплаву АМГ6 обумовлено нерівномірним розподілом густини індуктованих струмів по глибині та зменшенням активного об'єму електропровідного середовища, яке є електромагнітним навантаженням індуктора.

3. Запропоновано метод підвищення ефективності ОІЕМП формуванням додаткових шарів спорідненого матеріалу шляхом встановлення екрану, що проводить струм, за якого еквівалентна товщина буде оптимальною для досягнення найбільшого значення сили електромагнітного тиску.

4. Встановлено, що виконання ОІЕМП без екрану, що проводить струм та із його застосуванням

дозволяє зменшити значення вертикальних переміщень зразків кільцевих зварних з'єднань відповідно до двох і восьми разів у порівнянні із зразками, які не були піддані обробці.

5. Встановлено, що ОІЕМП без та із застосуванням екрану призводить до зменшення початкових зварювальних напружень розтягування відповідно на 36 та 56 %, а стискування – на 50 і 80 %, що пояснюється впливом поля на міжзеренні кордони і локальними розігрівом зерен та потребує додаткових досліджень.

6. Сформульовано напрямки підвищення ефективності ОІЕМП для скорішого застосування її у промисловому виробництві, зокрема: оптимізація електрофізичних параметрів ОІЕМП, розробка прогресивних індукторних систем, імпульсних джерел живлення та технологій регулювання напружено-деформованими станами зварних, наплавлених та напилених конструкцій.

*Робота виконана у рамках комплексної програми НАН України «Проблеми ресурсу та безпечної експлуатації конструкцій, споруд і машин» у 2016–2020 рр.*

### Список літератури

1. Lobanov, L.M., Pashchin, M.O., Cherkashyn, O.V. et al. (2019) Prospects for application of electromagnetic fields in welding and related processes. *The Paton Welding J.*, **8**, 29–36.
2. Батыгин Ю.В., Лавинский В.И., Хименко Л.Т. (2003) *Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий*. Т. 1. 2-е изд. перераб. и доп. Батыгин Ю.В. (ред.). Харьков, МОСТ–Торнадо.
3. Туренко А.Н., Батыгин Ю.В., Гнатов А.В. (2009) Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий. Т. 3. *Теория и эксперимент притяжения тонкостенных металлов импульсными магнитными полями*. Харьков, ХНАДУ.
4. Стрижало В.А., Новогрудский Л.С., Воробьев Е.В. (2008) *Прочность материалов при криогенных температурах с учетом воздействия электромагнитных полей*. Киев, ИПП.

5. Lobanov, L.M., Kondratenko, I.P., Pashchin, N.A. et al. (2016) Comparison of influence of pulsed effects of magnetic and electric fields on stressed state of welded joints of aluminium alloy AMg6. *The Paton Welding J.*, **10**, 8–13.
6. 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>
7. Kistler Instrumente AG. *Quartz Accelerometer 8042* (Passport).
8. Ращепкин А.П., Кондратенко И.П., Карлов О.М., Кришчук Р.С. (2019) Электромагнитное поле индуктора з Ш-подібним осердям для магнітно-імпульсної обробки матеріалів. *Технічна електродинаміка*, **6**, 5–12. Doi: <https://doi.org/10.15407/techned2019.06.005>

### References

1. Lobanov, L.M., Pashchin, M.O., Cherkashyn, O.V. et al. (2019) Prospects for application of electromagnetic fields in welding and related processes. *The Paton Welding J.*, **8**, 29–36.
2. Batygin, Yu.V., Lavinsky, V.I., Khimenko, L.T. (2003) *Pulsed magnetic fields for advanced technologies*. Vol.1. 2nd Ed. Ed. by Yu.V. Batygin. Kharkov, MOST-Tornado [in Russian].
3. Turenko, A.N., Batygin, Yu.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. Kharkov, KhNADU [in Russian].
4. Strizhalo, V.A., Novogrudsky, L.S., Vorobiov, E.V. (2008) *Strength of materials at cryogenic temperatures taking into account electromagnetic fields*. Kiev, IPS [in Russian].
5. Lobanov, L.M., Kondratenko, I.P., Pashchin, N.A. et al. (2016) Comparison of influence of pulsed effects of magnetic and electric fields on stressed state of welded joints of aluminium alloy AMg6. *The Paton Welding J.*, **10**, 8–13.
6. Vasetsky, Yu.M., Dzyuba, K.K. (2017) Analytical calculation method of quasi-stationary 3D electromagnetic field of current passed on contour of arbitrary configuration near conductive body. *Tekhnichna Elektrodynamika*, **5**, 7–17 [in Russian]. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2017.05.007>.
7. Kistler Instrumente AG. *Quartz Accelerometer 8042* (Passport).
8. Rashchepkin, A.P., Kondratenko, I.P., Karlov, O.M., Kryshchuk, R.S. (2019) Electromagnetic field of inductor with E core for magnetic-pulsed treatment of materials. *Tekhnichna Elektrodynamika*, **6**, 5–12 [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2019.06.005>

## INFLUENCE OF PULSED ELECTROMAGNETIC FIELD TREATMENT ON STRESSED AND DEFORMED STATE OF CIRCUMFERENTIAL WELDED JOINTS OF ALUMINUM AMg6 ALLOY

L.M. Lobanov<sup>1</sup>, M.O. Pashchin<sup>1</sup>, O.L. Mykhoduy<sup>1</sup>, O.V. Cherkashin<sup>1</sup>, O.M. Timoshenko<sup>1</sup>, I.P. Kondratenko<sup>2</sup>, T.G. Solomiychuk<sup>1</sup>

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

E-mail: [office@paton.kiev.ua](mailto:office@paton.kiev.ua)

<sup>2</sup>Institute of Electrodynamics of the NAS of Ukraine, 03057, Kyiv, Peremohy Ave., 56

At present a growing interest in pulsed electromagnetic field treatment technologies is observed to improve the mechanical properties of metals, alloys and welded joints. Based on the pulsed electromagnetic field treatment, effective methods can be developed to optimize the stress-strain state of aluminum alloy products in order to extend their life for the use in aircraft, shipbuilding and other industries. The aim of the work is to study the influence of pulsed electromagnetic field treatment on the stress-strain state of circumferential welded joints of aluminum AMg6 alloy. An original experimental procedure was developed to study the kinetics of the electrodynamic pressure force during treatment of metallic materials with a pulsed electromagnetic field. It is shown that as a result of treatment with a pulsed electromagnetic field in the same conditions, the value of P increased with the use of the screen, which is predetermined by the increase in the active additional volume of the electric conductive medium. It was established that the use of the screen during treatment by a pulsed electromagnetic field helps to reduce the level of residual tensile welding stresses and improve the accuracy of circumferential welded joints. 8 Ref., 3 Tabl., 8 Fig.

*Keywords: pulsed electromagnetic treatment, aluminum alloy, circumferential welded joints, stress-strain state, residual welded joints, additional screen*

Надійшла до редакції 01.10.2020