

## ВПЛИВ ОБРОБЛЕННЯ ІМПУЛЬСНИМ ЕЛЕКТРОМАГНЕТНИМ ПОЛЕМ НА НАПРУЖЕНИЙ СТАН АЛЮМІНІЄВОГО СПЛАВУ АМг6

Л. М. ЛОБАНОВ<sup>1</sup>, М. О. ПАЩИН<sup>1</sup>, О. Л. МІХОДУЙ<sup>1</sup>,  
О. В. ЧЕРКАШИН<sup>1</sup>, І. П. КОНДРАТЕНКО<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України, Київ;

<sup>2</sup> Інститут електродинаміки НАН України, Київ

Розроблено оригінальну експериментальну методіку дослідження кінетики електродинамічного тиску  $P_{PEMF}$  за оброблення імпульсним електромагнетним полем (ОІЕМП) металевих матеріалів. Використано пласкі диски  $\varnothing 90$  mm і завтовшки  $\delta = 1...5$  mm із алюмінієвого сплаву АМг6. Встановлено, що послаблення тиску імпульсного електромагнетного поля зі зменшенням товщини зразків обумовлено нерівномірним розподілом густини індукованих струмів за глибиною та зниженням активного об'єму електропровідного середовища. Показано, що в результаті ОІЕМП зразків за однакового режиму значення  $P_{PEMF}$  підвищуються зі зростанням  $\delta$  від 1 до 5 mm. Запропоновано підвищити ефективність ОІЕМП нанесенням додаткових шарів спорідненого матеріалу як струмопровідного екрану, за якого еквівалентна товщина буде оптимальною для досягнення найбільшого електромагнетного тиску  $P_{PEMF}$ . Для ефективної обробки тонких зразків необхідно зменшувати тривалість струмового імпульсу, що вимагає зміни параметрів розрядних контурів і потребує додаткових досліджень.

**Ключові слова:** імпульсне електромагнетне поле, напружено-деформований стан, сплав алюмінію, електромагнетний тиск.

The original experimental technique for the study of kinetics the electrodynamic pressure force  $P_{PEMF}$  under treatment by pulsed electromagnetic field (PEMF) of metallic materials is developed. As a subject of research flat disks of AMg6 aluminum alloy with a diameter of 90 mm and a thickness  $\delta = 1...5$  mm are used. It is found that the pressure force of the pulsed electromagnetic field is reduced with the sample thickness decrease due to the uneven distribution of the density of induced currents in depth and the decrease of the active volume of the conductive medium. It is shown that as a result of the PEMF of samples in the same mode, the  $P_{PEMF}$  values increase with increasing  $\delta$  from 1 to 5 mm. The method of increasing the efficiency of the PEMF is proposed by installing additional layers of related material, at which the equivalent thickness will be optimal to achieve the highest value of the electromagnetic pressure force  $P_{PEMF}$ . For the efficient processing of thin samples, it is necessary to reduce the duration of the current pulse, which requires a change in the parameters of the discharge circuits and requires additional research.

**Keywords:** pulsed electromagnetic field, stress-strain state, aluminum alloy, electromagnetic pressure.

**Вступ.** Для розвитку сучасної промисловості необхідні прогресивні енергозберігаючі технології для підвищення експлуатаційних властивостей металевих конструкцій. Перспективними є методи обробки металевих матеріалів і зварних з'єднань, які базуються на впливі імпульсного електромагнетного поля (ІЕМП). Такими є електродинамічна обробка (ЕДО) і обробка прямою дією імпульсного

електромагнетного поля (ОІЕМП). Переваги ЕДО наведено раніше [1], а її недоліком є необхідність контактної взаємодії з поверхнею оброблюваного металу.

На сьогодні спостерігаємо підвищений інтерес до технологій ОІЕМП у різних галузях металообробки [2] таких, як формування, обтиснення, зварювання, калібрування тощо. Розглянуто [3] розрахунки і конструкції індукторних систем для правлення жолоблень автомобільних кузовних конструкцій за ОІЕМП.

Базуючись на результатах [2, 3], слід зазначити, що ІЕМП є дієвим інструментом впливу на формоутворення та механічні характеристики металів і сплавів [4], а також зварних з'єднань [5]. На основі ОІЕМП можна розробити ефективні технології керування напружено-деформованим станом тонколистових металевих матеріалів, до яких належать алюмінієві сплави, які застосовують у авіації, ракетній та суднобудівній промисловості, що є актуальним для сучасного виробництва.

Мета роботи – дослідити вплив ОІЕМП на напружений стан неферомагнетних матеріалів на прикладі алюмінієвого сплаву АМг6.

**Методика досліджень.** Як відомо, через протікання провідниками індуктора імпульсу струму в наближеному електропровідному середовищі збуджуються вихрові струми. Причому контури індукваного струму розміщені паралельно площині поверхні [6]. Внаслідок взаємодії індукваних струмів з імпульсним магнетним полем, яке збудило ці струми, виникає електродинамічна сила, яка має три просторові складові, але лише одна – нормальна складова – є набагато більшою за тангенціальні. Ця сила здійснює активне навантаження на ділянку з тиском  $P_{РЕМФ}$  і, як наслідок, змінює напружений стан оброблюваного матеріалу. За умови, що густина  $j$  індукваного електричного струму (ІЕС) досягає у метали значення  $j \geq 1 \text{ kA/mm}^2$ , створюються умови для реалізації електропластичного ефекту (ЕПЕ). Це сприяє інтенсифікації пластичного деформування матеріалу, а отже, керуваній зміні його напруженого стану. Механізм ЕПЕ діє згідно з теорією електронодислокаційної взаємодії, за якої при  $j \geq 1 \text{ kA/mm}^2$  у матеріалі створюються умови для прориву структурних бар'єрів дислокаціями, їх розмноження і просування за взаємодії з електронами провідності [4].

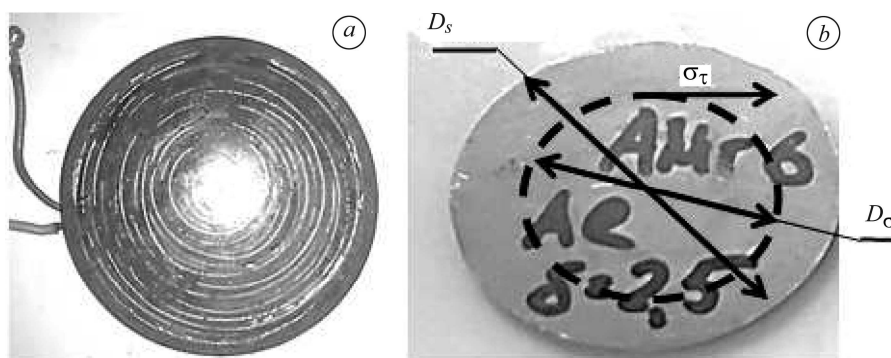


Рис. 1. Зовнішній вигляд багатовиткового індуктора (а) і зразка зі сплаву АМг6  $\delta = 2,5 \text{ mm}$  (б) для дослідження ОІЕМП, де  $D_s$  і  $D_\sigma$  – відповідно діаметри зразка і ділянки реєстрації залишкових тангенціальних напружень  $\sigma_\tau$ .

Fig. 1. An external view of the multi-turn inductor (a) and AMg6 alloy sample with thickness  $\delta = 2.5 \text{ mm}$  (b) for the study of treatment by pulsed electromagnetic field (TPEMF), where  $D_s$  and  $D_\sigma$  are the sample diameters and the area of registration of residual tangential stresses  $\sigma_\tau$ , respectively.

Для генерації ІЕМП використовували плаский багатовитковий індуктор (рис. 1а), а для реалізації зарядного і розрядного циклів – одноканальне джерело

живлення (рис. 2) на базі конденсаторної системи загальною ємністю  $C = 5140 \mu\text{F}$ , зарядною напругою  $U$  до  $800 \text{ V}$  і запасною енергією  $E_s \sim 1,6 \text{ kJ}$ . Характеристики індуктора такі: індуктивність, визначена за повітряного проміжку  $0,1 \text{ mm}$  між індуктором і зразком зі сплаву АМг6 товщиною  $\delta = 5 \text{ mm}$ ,  $L = 121/111 \mu\text{H}$  при частоті  $f = 0,5/1 \text{ kHz}$ ; зовнішній діаметр  $D = 95 \text{ mm}$ ; внутрішній діаметр  $d = 5 \text{ mm}$ ; висота  $h = 14 \text{ mm}$ ; матеріал обмотки – мідний дріт М1; діаметр обмотки  $1 \text{ mm}$ ; кількість витків 50; коефіцієнт заповнення 0,8.

Досліджували плоскі зразки у формі диску  $\delta = 1...5 \text{ mm}$  і діаметром  $D_s = 90 \text{ mm}$  (рис. 1b) із алюмінієвого сплаву АМг6.

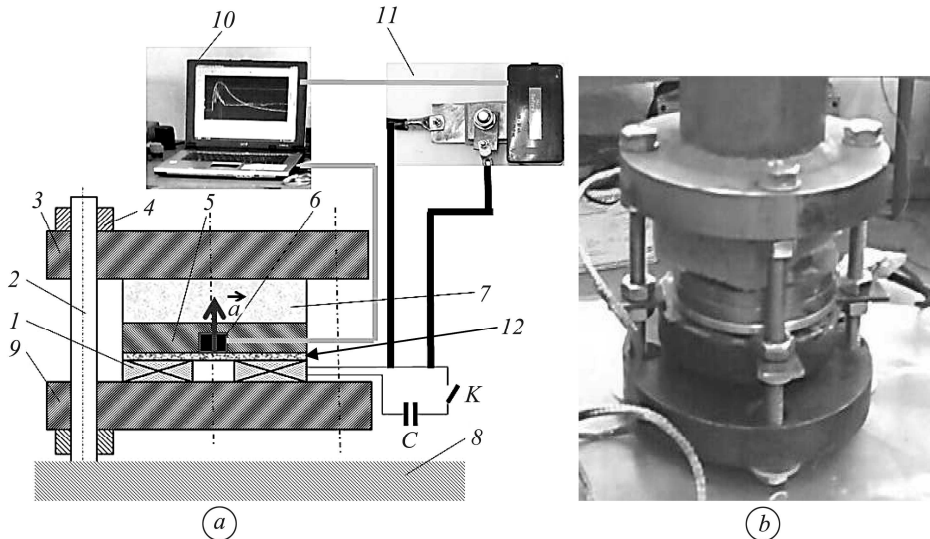


Рис. 2. Пристрій для реєстрації часових розподілів ІЕС  $I$  і  $P_{\text{РЕМФ}}$  за ОІЕМП зразків сплаву АМг6 у складі апаратного комплексу:  $a$  – схема (1 – індуктор, 2 – шпилька, 3 – верхня плита, 4 – гайка притискання; 5 – корпус кріплення давача прискорень, 6 – давач прискорень, 7 – демпфер тиску ІЕМП, 8 – базова опора, 9 – нижня плита, 10 – комп'ютер для реєстрації і обробки отриманих результатів, 11 – цифровий вимірювальний прилад, 12 – зразок сплаву АМг6;  $C$  – джерело живлення,  $K$  – ключ запуску розрядного циклу,  $\vec{a}$  – вектор прискорення);  $b$  – зовнішній вигляд.

Fig. 2. Device for registration of time distributions of induced electric current IEC  $I$  and  $P_{\text{РЕМФ}}$  under TPEMF of AMg6 alloy samples as a part of a hardware complex:  $a$  – scheme (1 – inductor, 2 – pin, 3 – upper plate, 4 – pressing nut, 5 – acceleration sensor, 6 – sensor, 7 – pressure damper of PEMP, 8 – base support, 9 – bottom plate, 10 – computer for registration and processing of the received data, 11 – digital measuring device, 12 – AMg6 alloy sample;  $C$  – power supply,  $K$  – discharge cycle start key,  $\vec{a}$  – acceleration vector);  $b$  – external view.

Параметри струму вивчали, використовуючи вимірювальний цифровий прилад на базі безіндукційного шунта, призначеного для реєстрації амплітудного значення однополярних імпульсів електричного струму. Крім амплітуди струму, прилад вимірює тривалість і кількість імпульсів від початку роботи. Реєстрували часовий розподіл тиску  $P_{\text{РЕМФ}}$ , застосовуючи давач прискорень Kistler 8042 [7]. Схема реєстрації параметрів ІЕМП працює так (рис. 2). Замикання розрядного контуру ключем  $K$  розпочинає перехідний процес розряду ємнісного накопичувача на активно-індуктивне навантаження. Параметри джерела живлення і його електрична схема забезпечують аперіодичний перехідний процес з однополярними імпульсами струму, параметри яких реєструють цифровим приладом 11. Роз-

рядний струм під час проходження через індуктор  $I$  збуджує ІЕМП. У зразку металу  $12$ , розташованому над індуктором, за взаємодії з ІЕМП виникають вихрові струми. Внаслідок їх взаємодії з ІЕМП формуються електродинамічні сили  $P_{\text{РЕМФ}}$ , які відштовхують зразок скінченної маси  $m$  від індуктора (який жорстко зафіксований) із прискоренням  $a$ . Часовий розподіл  $a$  реєструють давачем прискорень  $6$ , який вмонтовано у корпус  $5$ . Поточні значення часового розподілу  $P_{\text{РЕМФ}}$  визначають на базі пристрою  $10$  апаратного комплексу. Система вимірювання зафіксована гайками притискання  $4$  і шпильками  $2$  між верхньою  $3$  і нижньою  $9$  плитами, які змонтовані на базовій опорі  $8$ . Демпфер виконано із пористого пружного матеріалу, який забезпечує вільне прискорення давача.

Реєстрували часові розподіли ІЕС  $I$  і  $P_{\text{РЕМФ}}$  після поодинокого розряду конденсатора за зарядної напруги  $U = 200 \dots 800 \text{ V}$  і прискорення зразків товщиною  $\delta = 1 \dots 5 \text{ mm}$ . Зареєструвавши кінетику  $I(t)$  і  $P_{\text{РЕМФ}}(t)$ , здійснювали ОІЕМП дослідних зразків за схемою (рис. 3). Для цього демпфер і давач прискорень видалили. Елементами кріплення  $5$  і  $6$  забезпечили жорстку фіксацію зразка  $4$  між нижньою  $7$  і верхньою  $2$  плитами, які розміщено на базовій опорі  $8$ . За розряду конденсатора виникала сила відштовхування  $P_{\text{РЕМФ}}$ , яка тиснула на зразок.

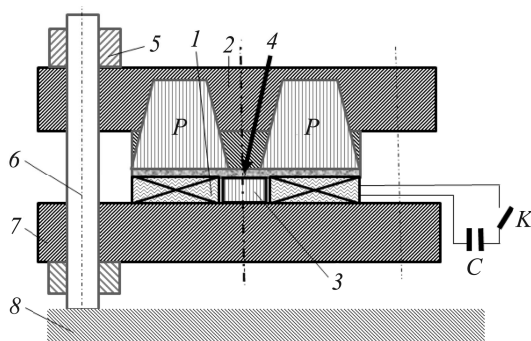


Рис. 3. Конструктивна схема ОІЕМП металевих матеріалів:  $1$  – індуктор,  $2$  – верхня плита,  $3$  – вісь кріплення індуктора,  $4$  – зразок сплаву АМг6,  $5$  – гайка притискання,  $6$  – шпилька,  $7$  – нижня плита,  $8$  – базова опора,  $C$  – джерело ІЕМП,  $K$  – ключ,  $P$  – сила відштовхування  $P_{\text{РЕМФ}}$ .

Fig. 3. Constructive scheme of TPEMF of metal materials:  $1$  – inductor,  $2$  – upper plate,  $3$  – axis of inductor fastening,  $4$  – AMg6 alloy sample,  $5$  – pressing nut,  $6$  – pin,  $7$  – bottom plate,  $8$  – base support,  $C$  – source of pulsed electromagnetic field (PEMF),  $K$  – key,  $P$  – repulsive force  $P_{\text{РЕМФ}}$ .

Дія  $P_{\text{РЕМФ}}$  (за визначених параметрів режиму ОІЕМП) може сприяти формуванню у зразках напружено-деформованого стану, параметри якого реєстрували методом електронної спекл-інтерферометрії [8]. Визначали тангенціальну компоненту  $\sigma_\tau$  (див. рис. 1b) вздовж кола діаметром  $D_\sigma$  на трьох ділянках зовнішньої поверхні (яка контактує з ІЕМП) зразків  $\delta = 1 \text{ mm}$ , на зовнішній і зворотній поверхнях зразків  $\delta = 2,5$  і  $5 \text{ mm}$ . Визначення  $\sigma_\tau$  лише на зовнішній поверхні зразків  $\delta = 1 \text{ mm}$  пов'язано з їх малою товщиною, що виключає помітну різницю між значеннями  $\sigma_\tau$  на поверхнях. На поверхню зразків вздовж кола діаметром  $D_\sigma$  ІЕМП діє максимально [9]. Для дослідних зразків  $D_\sigma = 45 \text{ mm}$ .

ОІЕМП здійснювали серією із восьми ІЕС зі зростанням значень  $U$  у такій послідовності:  $U_1 = 200 \text{ V}$ ,  $U_2 = 400 \text{ V}$ ,  $U_3 = 600 \text{ V}$ ,  $U_4 \dots U_8 = 800 \text{ V}$ . ІЕС при  $U_1 \dots U_3$  сприяли поступовому виходу на номінальний режим, а ІЕС при  $U_4 \dots U_8$  – генерації ІЕМП для обробки зразків. Обґрунтування вибору кількості ІЕС за напруги  $800 \text{ V}$  базується на результатах [4]. Також використовували ІЕМП для обробки вибірки з двох зразків  $\delta = 1$  і  $5 \text{ mm}$  ( $\Sigma\delta = 6 \text{ mm}$ ), де зразок  $\delta = 1 \text{ mm}$  – об'єкт, а  $\delta = 5 \text{ mm}$  – струмопровідний екран.

**Результати експериментів та їх обговорення.** Часові розподіли осцилограм ІЕС  $I$  і тиску  $P_{\text{PEMF}}$  при ОІЕМП зразка  $\delta = 2,5$  mm наведені на рис. 4 і в якісному відношенні є типовими для усього масиву експериментальних результатів (табл. 1).

Рис. 4. Часові розподіли електродинамічного тиску  $P_{\text{PEMF}}$  і сили струму  $I$  за ОІЕМП зразка сплаву АМг6  $\delta = 2,5$  mm за напруги заряду  $U = 600$  V:  
 $I$  – коливання зразка,  
 $2$  – вплив тиску на метал зразка,  
 $P$  – сила тиску  $P_{\text{PEMF}}$ .

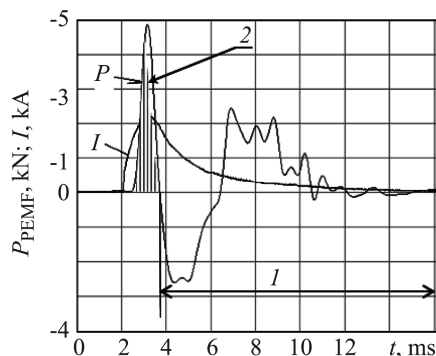


Fig. 4. Time distributions of the electrodynamic pressure force  $P_{\text{PEMF}}$  and amperage  $I$  under TPEMF of the AMg6 alloy sample  $\delta = 2.5$  mm at charge voltage  $U = 600$  V:  
 $I$  – oscillations of the sample,  $2$  – effect of pressure on the sample metal,  
 $P$  – pressure force  $P_{\text{PEMF}}$ .

Слід зазначити, що тиск  $P_{\text{PEMF}}$  впливає на напружений стан зразків переважно за період дії першої напівхвилі сили (заштрихована область під кривою 2 на рис. 4). Подальші загасаючі коливання зразків за їх контакту з демпфером не враховували під час оцінювання амплітудних значень  $P_{\text{PEMF}}$ . Це пов'язано з тим, що загасаючі коливання існують лише під час реєстрації тиску і відсутні в умовах жорсткої фіксації зразків (рис. 3). За знерухомилення зразка дія сили  $P_{\text{PEMF}}$  ініціює формування напружень у металі.

**Таблиця 1.** Амплітудно-частотні характеристики  $P_{\text{PEMF}}$  і  $I$  за ОІЕМП зразків сплаву АМг6 за різних значень  $U$  і  $\delta$

№	$U$ , V	$\delta_{\text{al}}$ , mm	$P_{\text{PEMF}}$ , kN	$t_p$ , ms	$I_{\text{max}}$ , kA	$t_l$ , ms
1	200	1	0,36	0,65	0,7	10
2	400	1	1,3	0,75	1,4	10
3	600	1	2,8	0,75	2,1	10
4	800	1	5	0,75	3	10
5	400	2,5	2,75	1	1,4	10
6	600	2,5	4,9	1	2,25	10
7	800	2,5	7,1	1	2,95	10
8	200	5	1,7	1,6	0,8	10
9	400	5	4,7	1,6	1,5	10
10	600	5	9	1,6	2,1	10
11	800	5	12,5	1,6	3	10

Згідно з результатами табл. 1, у дослідженому діапазоні режимів обробки час  $t_l$  дії ІЕС був практично незмінним і становив 10 ms, тобто тривалість імпульсу струму відповідає частоті  $f = 50$  Hz. За такої частоти глибина проникнення

струму  $\Delta$  у сплав АМг6 сягає значення  $\Delta = 14,2$  mm [9]. Тобто за обробки зразків товщиною  $\delta = 1...5$  mm імпульсами такої тривалості магнетне поле виявляють і на зворотній стороні зразка. Індукований струм загасає відповідно до розв'язку нестационарної задачі для розподілу векторів електромагнетного поля. Один з методів розрахунку такого електромагнетного поля наведено раніше [10]. В будь-якому разі за вибраних параметрів індуктора товщина оброблюваного імпульсним електромагнетним полем зразка мало впливатиме на перебіг перехідного розряду ємнісного накопичувача. Електромагнетна сила зі збільшенням товщини зростатиме, оскільки визначається як інтегральна величина в певному об'ємі.

Аналіз вольтамперних характеристик ІЕС за ОІЕМП зразків свідчить, що за заданих режимів обробки значення  $I_{\max} = f(U)$  достатньо близькі в усьому діапазоні  $U$  і  $\delta$ . Порівнюючи між собою номери 1–4 ( $\delta = 1$  mm), 5–7 ( $\delta = 2,5$  mm) і 8–11 ( $\delta = 5$  mm), бачимо незмінність амплітудно-частотних характеристик ІЕС за ОІЕМП зразків різної товщини, що пояснюється переважним впливом параметрів розрядного кола (індуктивність індуктора, активний опір провідників) на перебіг перехідного процесу порівняно з впливом електромагнетного навантаження індуктора.

На відміну від ІЕС, залежності  $P_{\text{РЕМФ}} = f(I_{\max})$  відрізняються (рис. 5) за варіації  $\delta$  від 1 до 5 mm. Зі зростанням  $\delta$  відповідно до 2,5 і 5 mm значення  $P_{\text{РЕМФ}}$  підвищуються у 1,5–2 і 2,5–5 разів порівняно з ОІЕМП зразків  $\delta = 1$  mm.

Таким чином, зниження тиску  $P_{\text{РЕМФ}}$  зі зменшенням товщини  $\delta$  диска зі сплаву АМг6 обумовлено поверхневим ефектом, тобто нерівномірним розподілом густини індукваних струмів за глибиною та зменшенням активного об'єму електропровідного середовища, яке є електромагнетним навантаженням індуктора. Для ефективної обробки тонких зразків необхідно зменшувати тривалість струмового імпульсу. Це, очевидно, вимагає зміни параметрів розрядних контурів, що недоцільно. Запропоновано найпростіший і ефективний спосіб – нанесення додаткових шарів спорідненого матеріалу, за якого еквівалентна товщина буде оптимальною з точки зору досягнення найбільшого значення електромагнетного тиску.

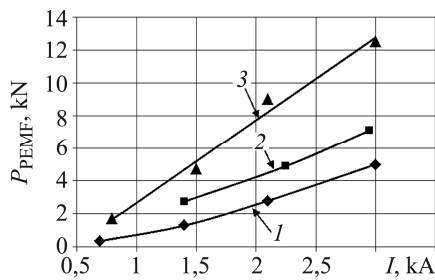


Рис. 5. Вплив амплітудних значень ІЕС  $I_{\max}$  на силу тиску  $P_{\text{РЕМФ}}$  за ОІЕМП зразків сплаву АМг6 за варіації їх товщини: 1 –  $\delta = 1$  mm, 2 – 2,5 mm, 3 – 5 mm.

Fig. 5. Influence of IEC amplitude values  $I_{\max}$  on the pressure force  $P_{\text{РЕМФ}}$  under TPEMF of AMg6 alloy samples with variations of their thickness: 1 –  $\delta = 1$  mm, 2 – 2.5 mm, 3 – 5 mm.

Результати впливу обробки ІЕМП на компоненту  $\sigma_{\tau}$  плоского напруженого стану зразків наведено у табл. 2, де ефективність обробки  $\Delta\sigma_{\tau}$  визначали так:

$$\Delta\sigma_{\tau} = \frac{\Delta\sigma_{\tau}^b - \Delta\sigma_{\tau}^a}{\Delta\sigma_{\tau}^b} \cdot 100\% .$$

Тут  $\sigma_{\tau}^b$  і  $\sigma_{\tau}^a$  – напруження до та після обробки, відповідно, визначали як середнє арифметичне трьох значень вздовж лінії діаметром  $D_{\sigma}$  (див. рис. 1b) на поверхнях зразків.

Аналіз результатів табл. 2 свідчить, що ОІЕМП впливає на залишковий напружений стан зразків сплаву АМг6. Причому, якщо за обробки металу товщиною  $\delta = 1$  mm напруження зростають, то зі збільшенням  $\delta$  вони знижуються.

Отже, під час ОІЕМП зразків  $\delta = 1$  mm обраним електромагнетним індуктором електромагнетний тиск і густина струму у зразку є недостатніми для ініціації ЕПЕ. Ба більше, компонента  $\sigma_{\tau}^a$  залишкових напружень зростає порівняно із  $\sigma_{\tau}^b$  (№ 1). Використання струмопровідного екрану  $\delta = 5$  mm під час обробки призводить до наближення реалізації ЕПЕ, наслідком чого є зменшення напружень розтягування (№ 4).

**Таблиця 2. Напружений стан зразків сплаву АМг6 до та після ОІЕМП**

№	$\delta$ , mm	$\sigma_{\tau}^b$ , МПа	$\sigma_{\tau}^a$ , МПа	$\Delta\sigma_{\tau}$ , %	$\sigma_{\tau}^b$ , МПа	$\sigma_{\tau}^a$ , МПа	$\Delta\sigma_{\tau}$ , %
		бік 1*			бік 2		
1	1	17	27	59↑**	–	–	–
2	1+5	30	10,5	65↓	–	–	–
3	2,5	22	10,45	52↓	28,2	5,71	80↓
4	5	22,6	13,33	41↓	16,86	1,3	92↓

\* Бік 1 – навпроти робочої поверхні індуктора; \*\* ↑ – зростання напружень розтягу після ОІЕМП; ↓ – зниження напружень розтягу.

Збільшення  $\delta$  до 2,5 і 5 mm створює умови обробки, які є близькими до ОІЕМП зразка  $\delta = 1$  mm зі застосуванням екрану. Це підтверджує факт зниження напружень розтягу зразків  $\delta = 2,5$  (№ 3) і  $\delta = 5$  mm (№ 4) в результаті ОІЕМП.

Враховуючи вищенаведене, слід зазначити, що ОІЕМП є перспективним методом, на базі якого можна розробити ефективні технології керування напружено-деформованим станом алюмінієвих сплавів і зварних з'єднань. Але оптимізація технологій обробки потребує подальших досліджень електрофізичних параметрів режиму і конструктивних особливостей індукторних систем для ОІЕМП.

## ВИСНОВКИ

Розроблено експериментальну методику дослідження кінетики електродинамічного тиску  $P_{РЕМФ}$  на зразки металевих матеріалів за їх ОІЕМП. Як предмет досліджень використовували пласкі диски  $\varnothing 90$  mm і завтовшки  $\delta = 1...5$  mm із алюмінієвого сплаву АМг6. Встановлено, що зниження тиску імпульсного електромагнетного поля зі зменшенням товщини  $\delta$  сплаву АМг6 обумовлено нерівномірним розподілом густини індуктованих струмів за глибиною та зменшенням активного об'єму електропровідного середовища, яке є електромагнетним навантаженням індуктора. Показано, що в результаті ОІЕМП зразків  $\delta = 1...5$  mm в однаковому режимі значення  $P_{РЕМФ}$  підвищуються у 1,5–2 і 2,5–5 разів зі зростанням  $\delta$  від 1 відповідно до 2,5 і 5 mm. Запропоновано підвищити ефективність ОІЕМП нанесенням додаткових шарів спорідненого матеріалу як струмопровідного екрану, за якого еквівалентна товщина буде оптимальною для досягнення найбільшого значення електромагнетного тиску  $P_{РЕМФ}$ . Встановлено, що за ОІЕМП зразків товщиною 1 mm залишкові напруження розтягу після обробки зростають, а зі збільшенням товщини до 2,5 і 5 mm – знижуються. Використання струмопровідного екрану під час обробки призводить до наближення реалізації ЕПЕ, наслідком чого є зменшення напружень розтягу. Встановлено, що для ефективної об-

робки тонких зразків необхідно зменшувати тривалість струмового імпульсу, що вимагає зміни параметрів розрядних контурів і потребує додаткових досліджень.

1. *Development of post-weld electrodynamic treatment using electric current pulses for control of stress-strain states and improvement of life of welded structures* / L. Lobanov, I. Kondratenko, A. Zhiltsov, N. Pashchin, and O. Mikhodui // *Materials Performance and Characterization*. – 2018. – 7, Is. 4. – P. 941–955. <https://doi.org/10.1520/MPC20170092>
2. *Батыгин Ю. В., Лавинский В. И., Хименко Л. Т.* Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий / Под. ред. проф. Ю. В. Батыгина. – Харьков: МОСТ–Торнадо, 2003. – Т. 1. – 284 с.
3. *Туренко А. Н., Батыгин Ю. В., Гнатов А. В.* Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий. Т. 3: Теория и эксперимент притяжения тонкостенных металлов импульсными магнитными полями. – Харьков: ХНАДУ, 2009. – 240 с.
4. *Стрижало В. А., Новогрудский Л. С., Воробьев Е. В.* Прочность материалов при криогенных температурах с учетом воздействия электромагнитных полей. – К.: ИПП, 2008. – 504 с.
5. *Redistribution of residual welding stresses in pulsed electromagnetic treatment* / G. Stepanov, A. Babutski, I. Mameev, N. Pashchin, V. Savitskii, and G. Tkachuk // *Strength of Materials*. – 2011. – 43, № 3. – P. 326–331.
6. *Васецкий Ю. М., Дзюба К. К.* Аналитический метод расчета квазистационарного трехмерного электромагнитного поля тока, протекающего по контуру произвольной конфигурации вблизи электропроводного тела // *Технічна електродинаміка*. – 2017. – № 5. – С. 7–17. DOI: [doi.org/10.15407/techned2017.05.007](https://doi.org/10.15407/techned2017.05.007)
7. *Kistler Instrumente AG.* Quartz Accelerometer 8042 (Passport).
8. *Методика* определения остаточных напряжений в сварных соединениях и элементах конструкций с использованием электронной спекл-интерферометрии / Л. М. Лобанов, В. А. Пивторак, В. В. Савицкий, Г. И. Ткачук // *Автоматическая сварка*. – 2006. – № 1. – С. 10–13.
9. *Белый И. В., Фертик С. М., Хименко Л. Т.* Справочник по магнитно-импульсной обработке металлов. – Харьков: Вища школа, 1977. – 168 с.
10. *Електромагнітне поле індуктора з Ш-подібним осердям для магнітно-імпульсної обробки матеріалів* / А. П. Ращепкін, І. П. Кондратенко, О. М. Карлов, Р. С. Кришук // *Технічна електродинаміка*. – 2019. – № 6. – С. 5–12. DOI: [doi.org/10.15407/techned2019.06.005](https://doi.org/10.15407/techned2019.06.005)

Одержано 12.05.2020