

ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ПРОЦЕСИ В ЛИСТОВИХ НЕМАГНІТНИХ МЕТАЛАХ ПІД ЧАС МАГНІТО-ІМПУЛЬСНОЇ ОБРОБКИ ШВІВ В ПРОЦЕСІ ЗВАРЮВАННЯ

І.П. Кондратенко^{1*}, чл.-кор. НАН України, **Р.С. Кришук**^{1**}, канд. техн. наук,
Л.М. Лобанов^{2***}, академік НАН України, **М.О. Пашин**^{2****}, докт. техн. наук,
О.Л. Миходуй^{2*****}, канд. техн. наук, **О.М. Тимошенко**^{2*****}, канд. техн. наук

¹ Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Берестейський, 56, Київ, 03057, Україна.

² Інститут електрзварювання ім. Є.О. Патона НАН України,
вул. Казимира Малевича, 11, Київ, 03680, Україна.

E-mail: dep7ied@ukr.net; olga.mikhodui@gmail.com.

Залишкові напруження розтягу, що є у зварних з'єднаннях, негативно впливають на втомну міцність, корозійну стійкість та точність геометричних параметрів металевих конструкцій. Обробка імпульсним електромагнітним полем дає змогу оптимізувати напружений стан та структуру металу зварного з'єднання. Це сприяє підвищенню надійності та довговічності конструкцій і, як наслідок, подовженню їх експлуатаційного ресурсу. **Метою роботи** є встановлення за допомогою математичного моделювання розподілу електромагнітного поля і магнітних сил в об'ємі зварного шва у пластині зі сплаву алюмінію з ізотропними параметрами під час його оброблення магнітним полем індуктора з імпульсним струмом. Розроблено тривимірну математичну модель індукційної системи для розрахунку рівняння електромагнітного поля. Виконано розрахунок імпульсного струму в провідниках обмотки індуктора разом з електромагнітним полем всієї індукційної системи, використовуючи рівняння електричного кола за другим законом Кірхгофа та рівняння електромагнітного поля на основі системи рівнянь Максвелла. Проведено порівняння магнітних сил, напруженості поля та густини вихрових струмів у області зварного шва для пластин товщиною 6 мм і 3 мм. Пластина товщиною 6 мм може бути інтерпретована як дві пластини по 3 мм, одна з яких має зварний шов, а інша виконує роль екрану, що дало можливість дослідити вплив такого екранування на розподіл сил і струмів. Виконано дослідження векторних величин напруженості поля, густини струму та магнітних сил в об'ємі ділянки зварного шва, яка піддається обробці, залежно від часу. На базі розробленої методики проведено експериментальні дослідження впливу магніто-імпульсного оброблення на залишкові зварювальні напруження і структуру металу зварних з'єднань із алюмінієвого сплаву АМг6. Доведено, що обробка металу шва в процесі або після зварювання сприяє зниженню залишкових напружень розтягу та диспергуванню структури металу зварного шва. Бібіл. 16, рис. 11, табл. 2.

Ключові слова: імпульсний струм, електромагнітне поле, математична модель, електромагнітний індуктор, обробка зварних швів.

Вступ. В сучасному авіа-, ракето- і суднобудуванні широко використовуються зварні тонколистові конструкції або металеві пластини зі сплавів на основі алюмінію. Залишкові напруження розтягу, що є у зварних з'єднаннях, негативно впливають на довговічність, корозійну стійкість, аеро- та гідродинамічні характеристики таких конструкцій. Оброблення зварних швів імпульсним електромагнітним полем дає змогу знизити залишкові зварювальні напруження розтягу, що має сприяти подовженню експлуатаційного ресурсу металевих конструкцій. Зокрема, в [1] продемонстровано ефективність електродинамічної обробки зварних з'єднань зі сплаву АМг6, де

© Кондратенко І.П., Кришук Р.С., Лобанов Л.М., Пашин М.О., Миходуй О.Л., Тимошенко О.М., 2026

ORCID: * <https://orcid.org/0000-0003-1914-1383>; ** <https://orcid.org/0000-0002-1933-0144>;

*** <https://orcid.org/0000-0001-9296-2335>; **** <https://orcid.org/0000-0002-2201-5137>;

***** <https://orcid.org/0000-0001-6660-7540>; ***** <https://orcid.org/0000-0003-0226-3755>

© Видавець ВД «Академперіодика», НАН України, 2026



Це стаття відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND 4.0
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode.uk>

застосування імпульсного струму через ударний електрод сприяє переходу залишкових розтягувальних напружень у стискальні.

Оброблення зварних швів може здійснюватися як електричним струмом, так і магнітним полем [2–10]. Дослідження [2] показує, що імпульсне електромагнітне навантаження здатне викликати як зниження міцності, так і зміцнення металу шляхом перебудови дислокаційної структури. У роботі [3] систематизовано механізми впливу магнітного поля на пластичність металів, зокрема досліджено вплив магнітного поля на рух дислокацій і релаксацію напружень у металах. Електропластичний ефект, який проявляється за густини імпульсного струму понад 10^6 А/м², детально досліджений в [4], де за допомогою наноіндентування виявлено зниження опору деформації матеріалу під дією електричних імпульсів.

Практичне застосування імпульсного струму задля покращення технологічних процесів розглянуто в [5], де показано переваги волочіння та прокатки металів з використанням імпульсного струму, що забезпечує зниження опору деформації на 25-30%. Аналогічні результати отримано в [6] для низьковуглецевої сталі, де зафіксовано зменшення межі текучості на 48 МПа внаслідок застосування електричних імпульсів струму густиною 10^7 - 10^8 А/м² під час одновісного розтягування. Фундаментальні основи електроімпульсної та електропластичної обробки металів детально розглянуто в [7], де описано фізичні механізми впливу електричного струму на структуру та властивості матеріалів.

Застосування магнітного поля під час зварювання також показує перспективні результати. В [8] експериментально доведено, що використання слабого поперечного магнітного поля (415 мТл) під час лазерного зварювання нержавіючої сталі призводить до зменшення термічних напружень на ~10%, а залишкових напружень у зоні термічного впливу – на ~20 МПа. Дослідження [9] виявило суттєвий вплив електричних імпульсів на механічні властивості та мікроструктуру сплаву AZ31В, де зростання пікового значення густини струму посилює електропластичний ефект, активізуючи динамічну рекристалізацію та зсув дислокацій у кристалічній ґратці. В [10] встановлено ефективність імпульсної електричної обробки задля зменшення залишкових напружень у зварних з'єднаннях алюмінієвого сплаву АК8МЗ, що зумовлює зменшення градієнта мікротвердості в зоні термічного впливу та перерозподіл хімічних елементів у структурі сплаву.

Якщо використовується імпульсне магнітне поле, тоді в зварних швах наводиться вихровий струм високої густини, що взаємодіє з магнітним полем індуктора. Внаслідок даної взаємодії в зоні зварного шва виникає імпульсний магнітний тиск, що ініціює відштовхування індуктора від поверхні зварної пластини. Максимальні значення тиску мають місце у процесі оброблення неферомагнітних металевих матеріалів (наприклад, на основі алюмінію) у порівнянні із феромагнітними (низьковуглецевими сталями). За умов жорсткого закріплення індуктора над поверхнею металу, що обробляється, магнітний тиск ініціює динамічне навантаження на зварне з'єднання, наслідком якого в останньому виникають хвилі механічних напружень стиску. Суперпозиція хвиль напружень стиску із залишковими зварювальними напруженнями розтягу сприяє зниженню останніх за рахунок їх релаксації, яка є наслідком реалізації електропластичного ефекту за умови, що густина імпульсного електричного струму $j \geq 1,0 \cdot 10^9$ А/м². При тому сумісна дія динамічного тиску та електричного струму сприяє подрібненню структури металу зварного шва, що позитивно впливає на його механічні характеристики [11, 12].

Метою роботи є встановлення за допомогою математичного моделювання розподілу електромагнітного поля і магнітних сил в об'ємі зварного шва стикового з'єднання зі сплаву на основі алюмінію з ізотропними параметрами під час його оброблення магнітним полем індуктора з імпульсним струмом.

Математична модель. Моделювання індукційної системи виконується в тривимірній постановці з використанням умови симетрії. На рис. 1, *а* показано ескіз симетричної половини індукційної системи в тривимірній постановці, що використовується безпосередньо задля моделювання електромагнітного поля, на рис. 1, *б* – ескіз в площині симетрії zOy , де: 1 – магнітопровід; 2 – частина обмотки в магнітопроводі; 3 – частина обмотки за межами магнітопроводу; 4 – пластина металу; 5 – ділянка пластини, що піддається максимальному впливу від магнітного поля; 6 – умовно виділений об'єм зубця магнітопроводу, у якому виконується розрахунок індукції магнітного поля. Ділянка 5 умовно поділена горизонтальними лініями на 11 однакових

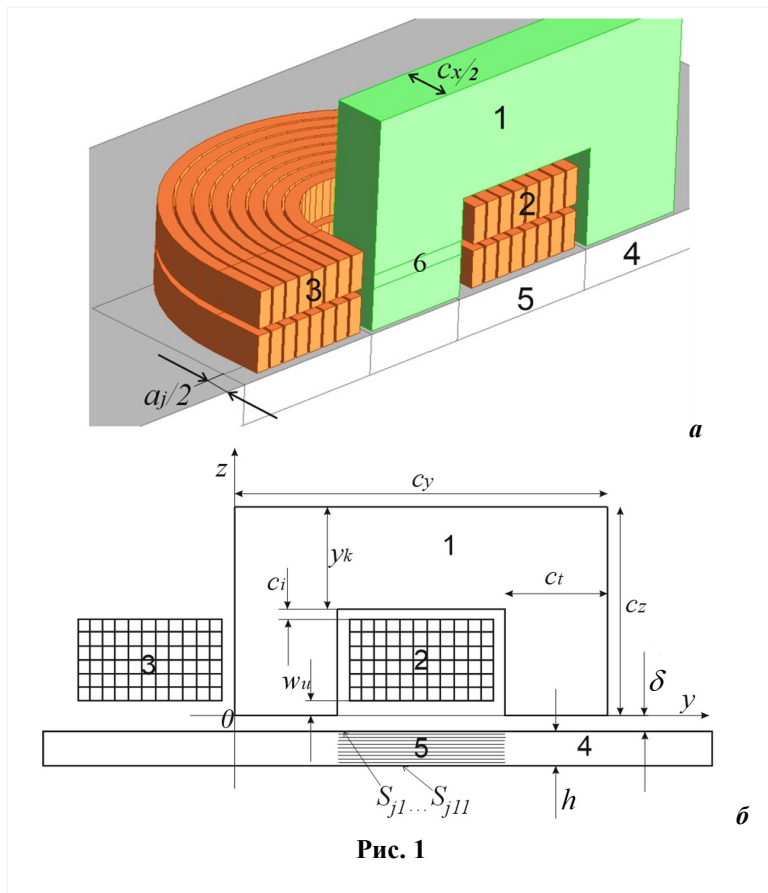


Рис. 1

площин ($S_{j1}...S_{j11}$) задля дослідження електромагнітного поля та магнітних сил на різній глибині об'єму металевої пластини. На рис. 1, а: c_x – ширина магнітопроводу; a_j – ширина зварного шва.

Магнітопровід 1 (рис. 1) виготовлений з нанокристалічного сплаву ММ-11Н, що пройшов термомагнітне оброблення. Електропровідність осердя приймається рівною нулю. Параметри кривої намагнічування обрано згідно [13] на основі кривої намагнічування для аморфних сплавів з термомагнітною обробкою з урахуванням, що індукція насичення ММ-11Н становить 1,2 Тл (табл. 1).

На рис. 2 показано електричне коло, де R_s та L_s – активний опір та індуктивність обмотки індуктора (рис. 1); R_1 та L_1 – додаткові опір та індуктивність в електричному колі; C – ємність конденсатора, який є джерелом імпульсного струму. Перед замиканням роз'єднувача S конденсатор заряджений до заданої

напруги U_C у момент часу $t=0$. Після замикання вимикача в електричному колі відбувається перехідний процес розряду ємності C . Електричний струм в колі $i_s(t)$ з двома реактивними елементами має періодичний характер. В момент зміни полярності струму $i_s(t)$ вимикач S розмикається. Протікання електричного струму через обмотку індуктора збуджує магнітне поле, яке збуджує вихровий струм у пластині. Взаємодія імпульсного магнітного поля з вихровими струмами у зварному шві створює сумісну дію струму визначеної попередніми дослідженнями густини ($j \geq 1,0 \cdot 10^9$ А/м²) та механічного впливу електромагнітних сил, що забезпечує комплексну обробку металу шва.

Таблиця 1

B , Тл	0,00	0,10	0,12	0,90	1,10	1,18	1,19	1,20	1,21	1,23
H , А/м	0,00	0,50	0,10	20,0	50,0	100	200	500	1000	10000

Магнітне поле індуктора, що взаємодіє з електропровідною пластиною, описується диференціальним рівнянням для напруженості магнітного поля, виведеним з рівнянь Максвела у квазістатичному наближенні (коли струмом зміщення можна знехтувати) за умови сталих електрофізичних параметрів середовища

$$\nabla \times (\nabla \times \mathbf{H}) = -\sigma \mu \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} + \nabla \times \mathbf{j}_s, \quad \mathbf{j}_s = i_s / S_w, \quad (1)$$

де $\mathbf{H}$ – напруженість магнітного поля; σ – питома електропровідність пластини; μ – магнітна проникність; $\mathbf{j}_s$ – густина струму в провідниках індуктора від джерела живлення; S_w – площа поперечного перерізу провідника обмотки. Напруженість магнітного поля може бути знайдена для

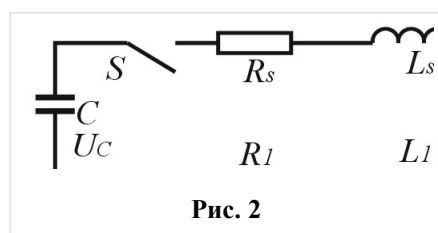


Рис. 2

відомого значення величини струму i_s , який є змінним у часі за законом перехідного процесу та є розв'язанням рівняння, складеного за другим законом Кірхгофа для електричного кола з початковими умовами (рис. 2)

$$\frac{\partial \psi}{\partial t} + i_s R_1 + L_1 \frac{\partial i_s}{\partial t} = \frac{1}{C} \int i_s dt + U_C, 0, \quad (2)$$

де $U_{C,0}$ – напруга зарядженого конденсатора в початковий момент часу; ψ – потокозчеплення, що розраховується на основі розподілу магнітного поля за рівнянням (1) індукційної системи на рис. 1; $\partial\psi/\partial t$ – індукована напруга на виводах обмотки індуктора, що відповідає напрузі на послідовно з'єднаних активному опорі R_s й індуктивності L_s . Таким чином рівняння (1) і (2) з граничними і початковими умовами описують сумісну коло-польову задачу, розв'язок якої визначається чисельним методом із застосуванням Ansys Electronics Desktop [14].

Для аналізу впливу імпульсного магнітного поля на електропровідне середовище з метою зміни механічних характеристик згідно прояву магнітно-пластичного ефекту необхідно визначити густину струму в зоні дії магнітного поля та величину магнітної сили. Величина густини індукованого струму $\mathbf{j}$ визначається рівнянням Максвелла

$$\mathbf{j} = \text{rot} \mathbf{H}. \quad (3)$$

Розподіл об'ємної густини магнітної сили $\mathbf{f}$ в об'ємі зварного шва розраховується як сила Лоренса за наступним виразом [15]:

$$\mathbf{f} = \mathbf{j} \times \mathbf{B} = \frac{1}{\mu} ((\nabla \times \mathbf{B}) \times \mathbf{B}) = \frac{1}{\mu} \left((\mathbf{B} \cdot \nabla) \mathbf{B} - \frac{1}{2} \nabla B^2 \right), \quad (4)$$

де $\mathbf{B}$ – індукція магнітного поля. Тоді складова n об'ємної густини сили ($n=x, n=y, n=z$) розраховується за виразом [16]

$$f_n = \frac{1}{\mu} \left(B_x \frac{\partial B_n}{\partial x} + B_y \frac{\partial B_n}{\partial y} + B_z \frac{\partial B_n}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial x_n} \frac{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2}{2} \right). \quad (5)$$

Для дослідження розподілу струмів та магнітних сил в зварному шві (область 5 на рис. 1) задано такі розміри індукційної системи: $c_y = 0,0552$ м, $c_z = 0,031$ м, $y_k = c_t = 0,016$ м, $c_t = 0,002$ м, $\delta = 0,0005$ м, $w_u = 0,0005$ м; $h = \{0,006$ м; $0,003$ м}, $c_x = 0,016$ м, $a_j = 0,016$ м. Обмотка складається з $w_c = 16$ витків мідного провідника у 2 ряди вздовж z (рис. 1), з міжвитковою ізоляцією $0,0004$ м та поперечним перерізом провідників $0,002$ м $\times$ $0,0056$ м.

Матеріал пластини – сплав системи $Al-Mg$ марки АМг6, що застосовується для виготовлення відповідальних зварних конструкцій. Границя плинності $\sigma_{0,2}$ для матеріалу пластини за кімнатної температури $T_{20^\circ\text{C}}$ і у гарячому стані (у процесі зварювання) $T_{зв}$ дорівнює відповідно 140 і 60 МПа. Електропровідність пластини зі зварним швом приймається рівною 13 МСм/м у гарячому стані в процесі зварювання. Розрахунок електромагнітного поля за рівнянням (1) виконується для всіх областей (рис. 1, б) з урахуванням значень їх електричної провідності, включно з провідниками обмотки. Ємність конденсатора (рис. 2) – 2,3 мФ, початкова напруга конденсатора $U_C = 800$ В. Додаткові параметри електричного кола: $R_1 = 1$ МОм, $L_1 = 0,1$ мкГн.

Результати моделювання та їх обговорення. На рис. 3 показано розрахункові значення

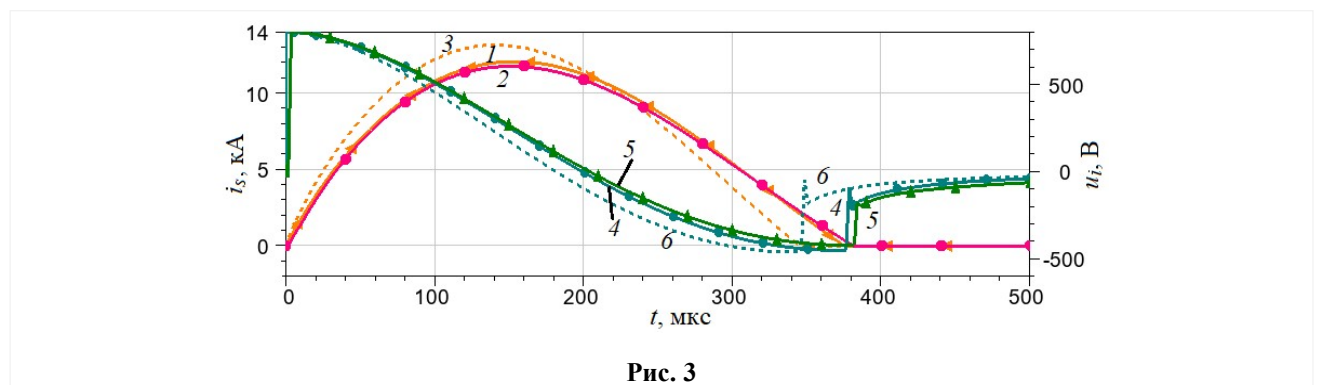


Рис. 3

струму i_s в індукторі для випадків різної товщини пластини та наявності феромагнітного осердя, а також значення напруги на виводах котушки індуктора u_i $u_i = \partial\psi/\partial t$. (6)

Зі зменшенням товщини пластини від $h=6$ мм (крива 1) до $h=3$ мм (крива 2) максимальний струм дещо зменшується – на 0,3 кА. У випадку відсутності магнітопроводу з товщиною пластини 6 мм (крива 3) – струм через індуктор збільшився на 1,1 кА. В цілому аналіз ходу перехідного процесу в процесі розряджання ємності на індуктивність, яка має електромагнітний зв'язок з електропровідною

пластиною, свідчить про незначний вплив товщини пластини на тривалість перехідного процесу та амплітуду величини струму в індукторі. Також відмічається незначне спотворення кривої струму внаслідок впливу нелінійності магнітної проникності магнітопроводу. Звертає на себе увагу характер зміни напруги на індукторі після переривання струму через індуктор. Так, після розмикання електричного кола напруга на індукторі досягає максимального, від'ємного по відношенню до прямого імпульсу, значення, стрибком зменшується, але не до нульового значення, а потім поступово прямує до нуля. Таку поведінку напруги на індукторі можна пояснити впливом вихрових струмів в пластині, що обробляється, та індукує певну електрорушійну силу в розрядному колі.

Поєднаний розв'язок задач електромагнітного поля та електричного кола дає змогу послідовно визначати електромагнітні характеристики взаємодії індуктора з електропровідною пластиною. Так згідно (3) визначається густина струму в металевій пластині. На рис. 4 наведено залежність в часі максимального значення густини струму в межах площадки S_{j1} (рис. 1, б), тобто на поверхні пластини, яка ближче до індуктора. Відзначимо, що максимальне значення величини індукованої густини струму припадає на область під витками індуктора і мало залежить від товщини пластини, що обробляється. Зі зміною товщини пластини від 3 мм до 6 мм максимальна густина струму незначно зменшується – від $2,7 \cdot 10^9$ А/м² до $2,5 \cdot 10^9$ А/м². Слід зазначити, що за будь якої товщини пластини за наявності чи відсутності магнітопроводу величина густини струму перевищує порогове значення $1 \cdot 10^9$ А/м², за якої відбувається релаксація залишкових зварювальних напружень металу згідно механізму електропластичності [5].

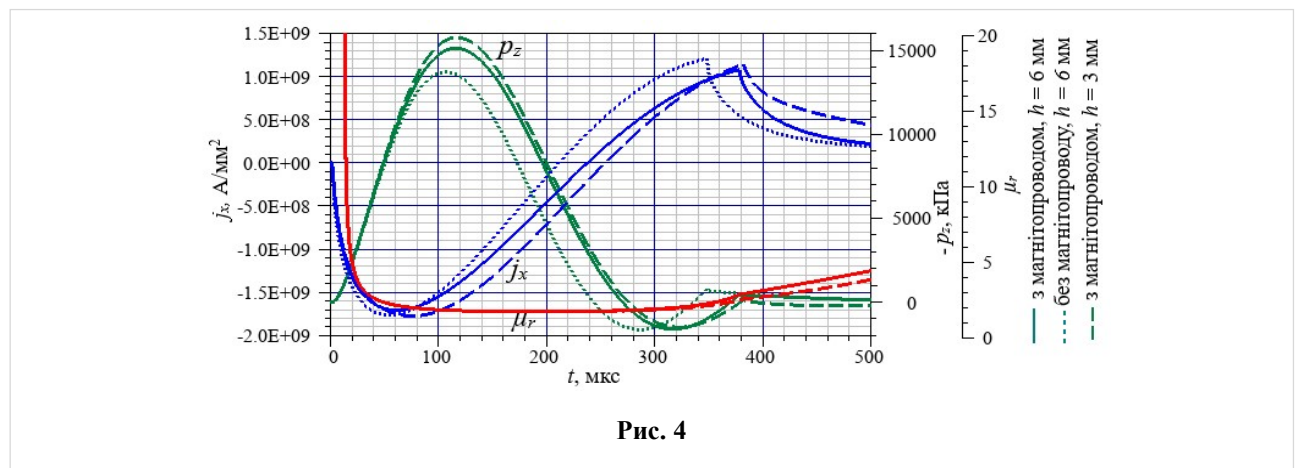


Рис. 4

На рис. 4 також наведено зміну відносної магнітної проникності в об'ємі зубця магнітопроводу (поз. б на рис. 1, а), охопленого котушкою обмотки

$$\mu_r = \frac{1}{\mu_0 V} \int_V |\mathbf{B}|/|\mathbf{H}| dV, \quad (7)$$

де μ_0 – магнітна стала; V – об'єм частини зубця, що має позначення б на рис. 1, а. З графіка видно, що значення відносної магнітної проникності осердя сягає всього 2, і виникає запитання щодо доцільності встановлення феромагнітного елемента в систему для магніто-імпульсної обробки. Однак, якщо звернути увагу на величину електродинамічних сил, які діють на обмотку індуктора, то виявляється, що встановлення феромагнітного осердя дає змогу дещо знизити руйнівну електродинамічну силу. Так за тих параметрів, які закладені в розрахунки магніто-імпульсної обробки, електродинамічна сила, що діє на окремий виток індуктора за наявності магнітопроводу, може бути меншою від сили, яка діє на окремий виток без магнітопроводу, що пояснюється меншими полями розсіювання. Загалом зусилля стиску між шарами обмотки можуть досягати 1000 Н, а радіальні сили, направлені від осі симетрії індуктора, досягають 2800 Н в межах вікна магнітопроводу та 2000 Н поза його межами. В будь якому разі величина механічних напружень, що пов'язані з електродинамічними силами, у випадку застосування для магніто-імпульсної обробки багатовиткових індукторів, не досягають критичних величин, що викликають механічні руйнування.

На рис. 4 також представлено часовий графік зміни тиску p_z на пластину в зоні максимального впливу – під витками обмотки, розташованими в вікні магнітопроводу. Тиск визначається інтегруванням об'ємної сили в центрі зони оброблення (поз. 5, рис. 1) по глибині металевої пластини h

$$p_z = \int_0^h f_z(x, y, z) dz. \quad (8)$$

На рис. 5 показано розподіл тиску p_z (8) під усією обмоткою індуктора, з окремим виділенням

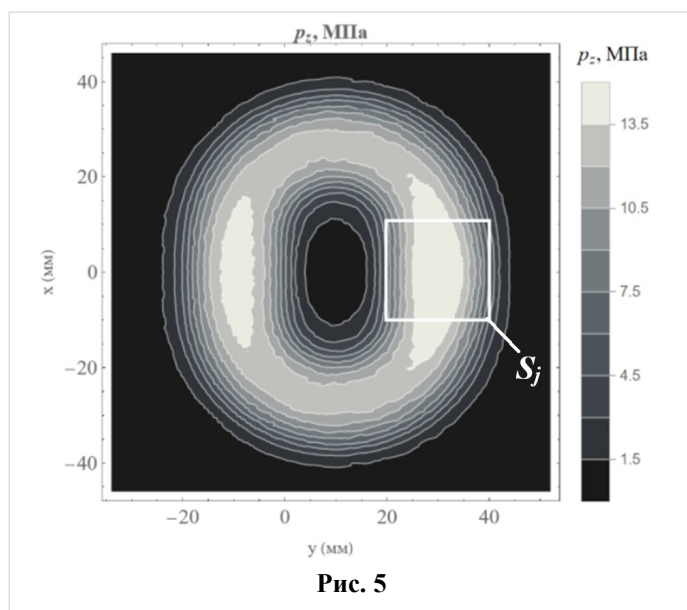


Рис. 5

області S_j під витками, розташованими в межах магнітопроводу. Розрахунки показують, що максимальний тиск виявляється під витками обмотки і досягає величини близько 16 МПа (рис. 4). Причому найбільшого значення магнітний тиск досягає із застосуванням магнітопроводу в області S_j , що виправдовує його застосування. Збільшення товщини пластини та відсутність магнітопроводу викликає зниження магнітного тиску до 13,5 МПа (рис. 4). При цьому вздовж середньої лінії котушки обмотки мінімальне значення тиску під витками не падає нижче 13,5 МПа (рис. 5).

Крім сил, які направлені нормально до поверхні пластини внаслідок взаємодії імпульсного магнітного поля зі струмом, що збуджується цим полем, в пластині існують

складові сили, що направлені по дотичній. Величина цих сил у порівнянні з нормальними силами є в 3–5 разів меншими і їхнім впливом можна знехтувати.

Слід зауважити, що настання максимального тиску в зоні обробки відбувається з запізненням по відношенню до густини струму (рис. 4) і відповідно до густини електродинамічних сил на поверхні пластини. Це пояснюється властивостями дифузії магнітного поля в електропровідне середовище. Відповідне відображення густини вихрових струмів, напруженості магнітного поля та густини електромагнітних сил за варіації значення відстані від поверхні пластин різної товщини наведено на рис. 6 – 8, де представлено середні значення густини струму $\hat{j}_x$ і напруженості $\hat{H}_y$ в області 5 на площинах $S_{j1} \dots S_{j11}$

$$\hat{j}_x = \frac{1}{S_j} \int j_x(x, y) dS_j, \quad \hat{H}_y = \frac{1}{S_j} \int H_y(x, y) dS_j. \quad (9)$$

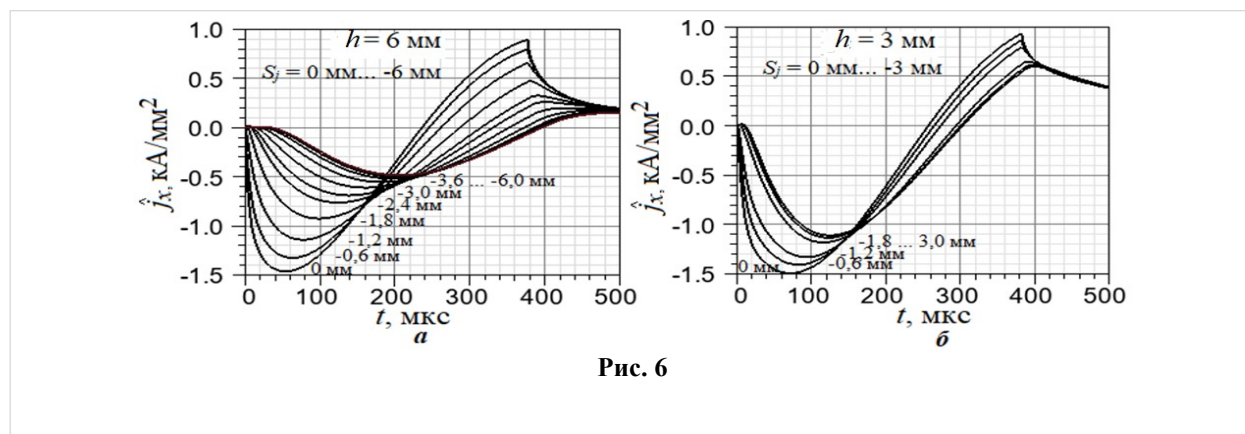


Рис. 6

Аналізуючи рис. 6, а видно, що густина струму поступово зменшується із заглибленням у пластину, а час максимуму зміщується, що обумовлено скін-ефектом, який є наслідком дифузії магнітного поля в електропровідному середовищі. На заглибленні у межах 4,8–6,0 мм у пластині зміна максимального значення густини струму та часу максимуму є майже непомітною і становить близько $0,5 \cdot 10^9$ А/м² та 200 мкс відповідно. В той же час з використанням пластин меншої товщини (рис. 6, б) густина вихрового струму виявляється більшою і перевищує $1 \cdot 10^9$ А/м² по всій товщині.

Порівняння графіків на рис. 6 і 7 демонструє, що густина струму є пропорційною часовій похідній від напруженості магнітного поля.

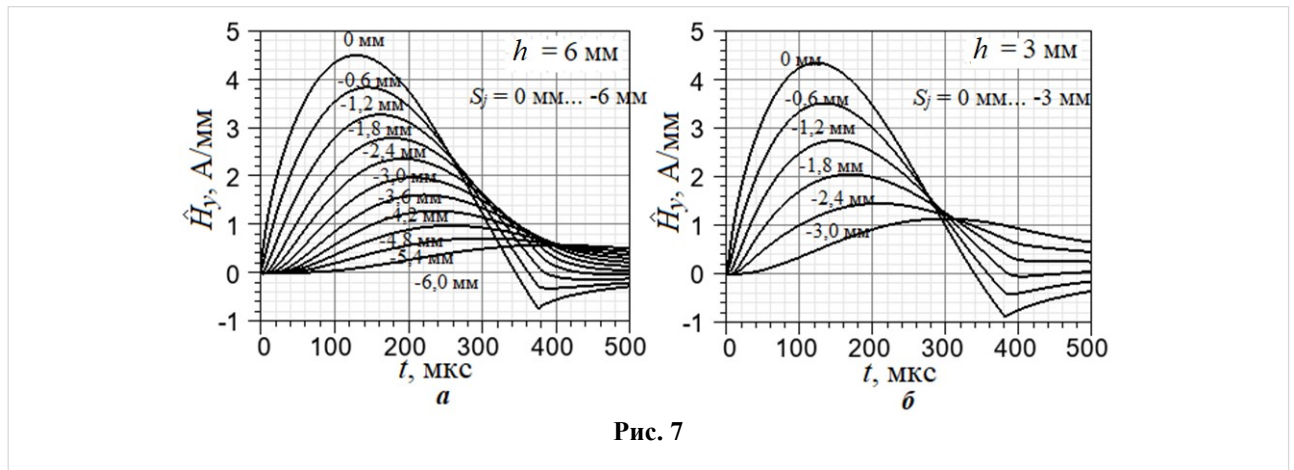


Рис. 7

На рис. 8 показано складову z середнього значення густини об'ємної магнітної сили (5) $\hat{f}_z$ в кожному шарі S_j (п. 5, рис. 1, б) зварного шва

$$\hat{f}_z = \frac{1}{S_j} \int_{S_j} f_z(x, y) dS_j. \quad (10)$$

У пластині товщиною 3 мм (рис. 8, б) амплітуда об'ємної густини сили на поверхні зварного шва на 7% більша (7,85 Н/мм³) порівняно з пластиною товщиною 6 мм (рис. 7, а) – 7,35 Н/мм³. Спостерігається експоненціальне зменшення амплітудних значень густини об'ємної сили у разі заглиблення в пластину внаслідок дифузії магнітного поля, як на рис. 4 та рис. 6, 7. По мірі заглиблення в пластину на 3 мм густина сили $\hat{f}_z$ в зварному шві тоншої пластини стає меншою (1,0 Н/мм³) порівняно з $\hat{f}_z$ на відповідній глибині у товщій пластині (1,6 Н/мм³). Тоді як густина струму (рис. 6) навпаки – більша у тоншій пластині на глибині 3 мм.

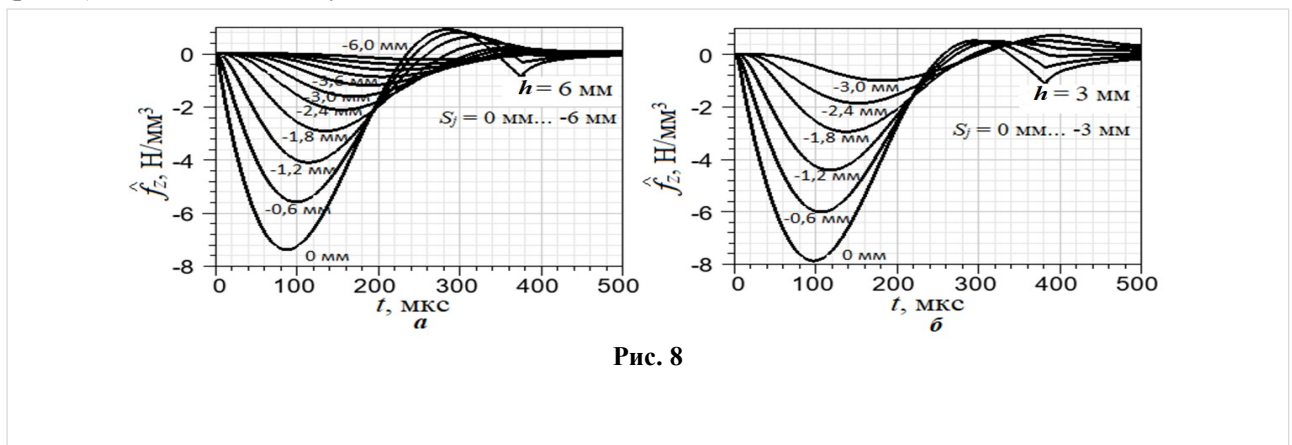


Рис. 8

Таким чином, моделювання імпульсних електромагнітних процесів під час взаємодії багатовиткового індуктора з електропровідною пластиною вказує, що за звичайних електрофізичних параметрів металу, який обробляється, є можливим досягнення густини індукованого струму на рівні передбачених значень задля реалізації ефекту електропластичності. Також необхідною умовою проявлення даного ефекту є активне навантаження зварного шва, роль якого виконує тиск імпульсного магнітного поля [7].

Практична реалізація результатів моделювання. Метод електромагнітного оброблення був застосований до зварного шву безпосередньо в процесі виконання стикового з'єднання. Як показано вище, значення $\sigma_{0,2}$ нагрітої пластини сплаву АМг6 металу удвічі менше, ніж за кімнатній температурі. За нижчих значень $\sigma_{0,2}$ відбувається інтенсифікація релаксаційних процесів, що сприяють зниженню залишкових зварювальних напружень згідно механізму електропластичності.

Також за електромагнітного оброблення у процесі зварювання виконуються такі умови дії цього механізму, як імпульсне (активне) навантаження металу пластини електромагнітним тиском з величиною густини струму $j \geq 1 \cdot 10^9$ А/м². Таким чином, створюються передумови для релаксації зварювальних напружень, що є близькими за механізмом до представлених у [1] для спорідненого (із розглянутим у даній роботі) процесу електродинамічної обробки в процесі зварювання.

Методика та обладнання для експериментальних досліджень. Задля реалізації методу оброблення імпульсним магнітним полем зварних з'єднань розроблено і виготовлено апаратурний комплекс, до складу якого входить обладнання для автоматичного зварювання методом TIG в інертному середовищі (аргон-Ar), індукторна система і генератор імпульсного електромагнітного поля. Зовнішній вигляд багатовиткового індуктора для експериментального дослідження показано на рис. 9, а параметри прогинання пластини до та після оброблення імпульсним магнітним полем представлені у табл. 2.

Як зразки стикових зварних з'єднань використовували пластини зі сплаву АМгб розмірами 300х160х3 мм. Зварні шви довжиною 300 мм виконували в середній частині пластин на величинах напруги, струму і швидкості процесу відповідно $U_{зв} = 18$ В, $I_{зв} = 140$ А і $V_{зв} = 4,4$ мм/с за витрати Ar = 8 л/мін. Оброблення металу шва проводили за один прохід на режимі, що відповідав значенню $U_c = 800$ В (рис. 2), а часовий інтервал між імпульсами магнітного поля становив 0,8 с.

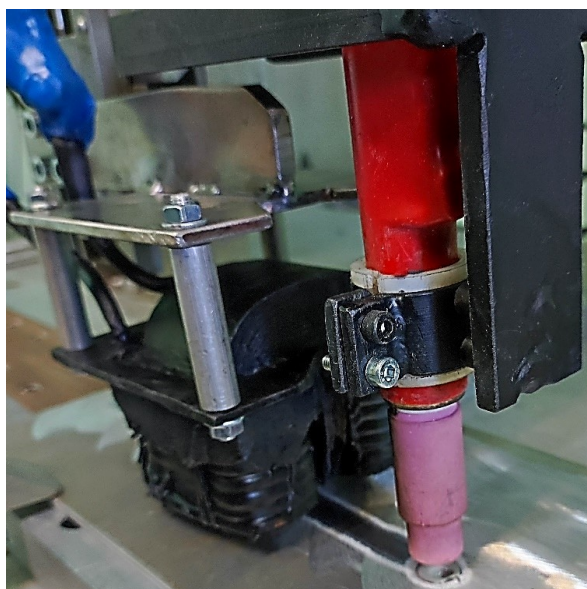


Рис. 9

Досліджено вплив термічного циклу зварювання на ефективність оброблення за двох варіантів прикладання магніто-імпульсних дій до зразків: 1) оброблення металу шва за температури пластини $T_{20^\circ\text{C}}$ та швидкості руху індуктора вздовж шва $V_{інд} = 4,4$ мм/с (вплив термічного циклу зварювання виключено); 2) оброблення металу шва в процесі зварювання за температури $T_{зв}$. Проведено реєстрацію значень поздовжньої (вздовж шва) компоненти залишкових зварювальних напружень σ_x , залишкових поздовжніх $f_1 \dots f_3$, поперечних $\Delta_n \dots \Delta_k$ прогинів пластин у вихідному стані (після зварювання і вистигання) після обох варіантів прикладання магніто-імпульсних дій.

Прогини визначено із застосуванням строганої лінійки та штангенциркуля, а σ_x – методом електронної спеклінтерферометрії в центрі шва на відстані 150 мм від поперечних крайків пластин [11]. Після визначення $\sigma_x, f_1 \dots f_3$

та $\Delta_n \dots \Delta_k$ з пластин вирізали фрагменти, з яких виготовляли шліфи для вивчення (із застосуванням методу оптичної металографії) еволюції структури металу зварного шва у вихідному стані до оброблення та після оброблення в процесі зварювання.

Обговорення результатів експериментів. Схему та величини $f_1 \dots f_3, \Delta_n \dots \Delta_k$ та σ_x для зразків зварних з'єднань за різних умов їх оброблення наведено відповідно на рис. 10 та у табл. 2.

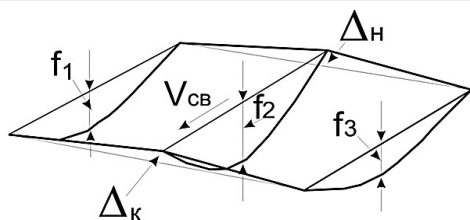


Рис. 10

Аналізуючи результати табл. 2, слід зазначити, що магніто-імпульсне оброблення зварних з'єднань зі сплаву АМгб позитивно впливає на їх напружено-деформовані стани. Так, під час порівняння значень $f_1 \dots f_3, \Delta_n \dots \Delta_k$ і σ_x для необроблених зразків (рядок 1) і після обробки шва за один прохід з його початковою температурою 20°C (рядок 2) можна бачити, що магніто-імпульсні дії сприяють зниженню показників залишкових прогинів і напружень

до 30%. Базуючись на результатах [7, 12], можна зробити висновок, що збільшення кількості проходів в умовах оброблення навіть за $T_{20^\circ\text{C}}$, буде сприяти більш вагомому зниженню залишкових

значень $f_1...f$, $\Delta_n... \Delta_k$ та σ_x . Порівняння даних у рядках 1 і 3 табл. 2 підтверджує, що дія термічного циклу зварювання підвищує ефективність оброблення. Про це свідчить зниження показників залишкового напружено-деформованого стану зразків до 85% після оброблення металу шва в процесі зварювання.

Таблиця 2

№	Умови оброблення зразка	Поздовжні прогини, мм (схема на рис. 10)			Поперечні прогини, мм (схема на рис. 10)		σ_x , МПа
		f_1	f_2	f_3	Δ_n	Δ_k	
1	Без оброблення	4,5	4,5	3,8	4,1	4,0	144
2	Оброблення за $T_{20^\circ C}$ (після зварювання і вистигання)	4,0	4,5	3,5	3,0	3,5	98
3	Оброблення за T_{zv} (в процесі зварювання)	0,7	0,5	1,5	0,4	1,5	20

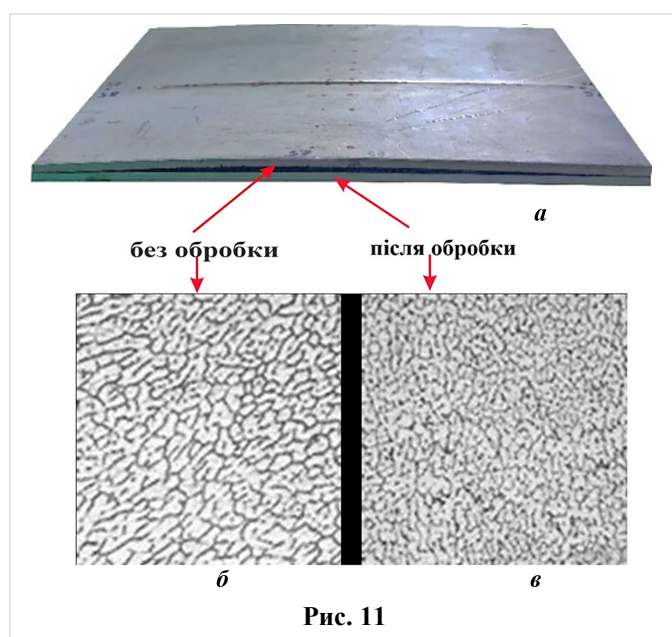


Рис. 11

Результати металографічних досліджень шліфів (збільшення зображення $\times 200$) підтвердили позитивний вплив оброблення на еволюцію структури металу зварного шва (рис. 11). У загальному вигляді мікроструктура являє собою світлу матрицю – α -твердий розчин із виділенням надлишкової фази у вигляді сітки по межах кристалів. Якщо у вихідному стані структура має переважно витягнуту форму, орієнтовану вздовж напрямку зростання кристалів (рис. 11, а), то після оброблення зерна набувають рівновісної орієнтації (рис. 11, б) і характеризуються зменшенням середнього розміру приблизно у два рази (у порівнянні з вихідним станом). Отримані результати можна, імовірно, пояснити магніто-імпульсним впливом на міжзеренні межі, наслідком чого є локальний розігрів зерен [7, 11]. Еволюція структури після оброблення сприяє підвищенню

механічних характеристик і збільшенню ресурсу зварних з'єднань.

Враховуючи наведені результати, слід зазначити, що магніто-імпульсне оброблення є ефективним засобом підвищення точності виготовлення елементів тонколистових зварних конструкцій із алюмінієвих сплавів та регулювання їх залишкових напружених станів. До переваг цього методу перед загальною термічною обробкою належать його значно менша енергоємність та відсутність потреби у спеціальному металомісткому пічному обладнанні. Для застосування оброблення імпульсним електромагнітним полем (ОІЕМП) у промисловому виробництві, зокрема в авіаційній та «білій» суднобудівній галузях, доцільно визначити кілька напрямів, які нададуть можливості підвищити ефективність обробки в інженерній практиці:

- оптимізація електрофізичних параметрів оброблення, що забезпечують максимальний вплив складових магнітного поля на напружено-деформований стан і структуру неферомагнітних матеріалів;
- розробка і виготовлення індукторних систем підвищеної міцності та термостійкості;
- розробка і виготовлення енергоефективних імпульсних джерел живлення з оптимальними характеристиками зарядного і розрядного циклів;
- розробка технологій магніто-імпульсного оброблення для регулювання напружено-деформованих станів зварних, наплавлених та напилених конструкцій із електропровідних матеріалів.

Висновки. У дослідженій моделі наявність магнітопроводу дає змогу зменшити імпульсний струм в обмотці індуктора від 13,1 кА до 12,0 кА і при цьому збільшити імпульсний магнітний тиск на поверхні зварного шва з 17 МПа до 19 МПа. Зубець магнітопроводу, що охоплений обмоткою, насичується до 2 одиниць відносної магнітної проникності.

Порівняння максимального значення тиску вказує, що зі зменшенням товщини пластини від 6 мм до 3 мм максимальне значення тиску зменшилося з 19 МПа до 16 МПа.

Максимальні значення густини струму та магнітного тиску, які усереднені по площі зварного шва в зоні оброблення, мають різний час максимуму з заглибленням у пластину. Максимальні значення цих величин зменшуються під час заглиблення в немагнітну електропровідну пластину внаслідок дифузії магнітного поля у провідному середовищі з одночасним зростанням часу цих максимумів по експоненті.

Максимальне, усереднене по площі поверхні зварного шва в зоні оброблення, значення імпульсу густини струму є дещо більше на тоншій пластині, а відповідне значення імпульсу магнітної сили навпаки – у товщій пластині. У разі заглиблення в пластину до 3 мм сила в товщій пластині уже є меншою, оскільки дифузія магнітного поля відбувається на більшу глибину, порівняно з пластиною товщиною 3 мм. Оброблення імпульсним магнітним тиском та струмом в пластині має виконуватися не лише в самому зварному шві, але й в області навколо нього як нормальною складовою магнітного тиску, так і тангенціальними складовими у місцях між краями зубця магнітопроводу та обмотки.

За результатами верифікації моделювання на натурних зразках стикових зварних з'єднань із алюмінієвого сплаву АМг6 товщиною 3 мм встановлено, що оброблення в процесі зварювання призводить до зменшення залишкових зварювальних напружень розтягу до 85 % від необробленого вихідного стану. За результатами металографічного аналізу шліфів показано, що оброблення сприяє зменшенню середнього розміру зерен приблизно у два рази (у порівнянні з необробленим металом). Встановлено, що у вихідному стані структура має переважно витягнуту форму, орієнтовану вздовж напрямку зростання кристалів, а після оброблення – рівнобісну орієнтацію зерен. Це пояснюється впливом магнітного поля на міжзеренні межі та їх локальним розігрівом.

Оптимізація напружено-деформованого стану й еволюція структури металу зварних з'єднань у результаті магніто-імпульсних дій сприяє підвищенню механічних характеристик і ресурсу зварних тонколистових конструкцій.

Сформульовано перспективні напрями подальших досліджень процесу магніто-імпульсного оброблення для підвищення його ефективності та впровадження у промислове виробництво.

Роботу виконано за рахунок держбюджетної теми «Розвиток теорії та моделювання нестационарних електрофізичних процесів в електропровідних і діелектричних середовищах імпульсних електромагнітних систем (шифр: Бар'єр-3)», КПКВК 6541030.

1. Lobanov L.M., Pashchyn M.O., Mikhodui O.L., Sydorenko Yu.M., Ustyomenko P. R. Stress-Strain State of Welded Joints of AMg6 Alloy after Electrodynamic Treatment During Welding. *Strength of Materials*. 2022. Vol. 54. Pp. 983–996. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11223-023-00474-y>.
2. Кузнецов Н.Н. Влияние электро- и магнитноимпульсного воздействия на заготовку. *Обработка материалов давлением*. 2010. № 3(24). С. 126–129. URL: [http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/omd/3\(24\)-2010/nomer.html](http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/omd/3(24)-2010/nomer.html) (дата звернення 25.07.2025)
3. Васильев М.А. Особенности пластической деформации металлов и сплавов в магнитном поле. Обзор. *Успехи физики металлов*. 2007. Т. 8. Вып. 1. С. 65–105. URL: <https://ufm.imp.kiev.ua/ru/abstract/v08/i01/065.html> (дата звернення 25.07.2025) DOI: <https://doi.org/10.15407/ufm.08.01.065>.
4. Andrea D., Burlata T., Körkemeyerb F., Gersteinb G., Gibsona J.S.K.-L., Sandlöbes-Hauta S., Korte-Kerzel S. Investigation of the electroplastic effect using nanoindentation. *Materials & Design*. 2019. Vol. 183. Pp. 1–10. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108153>.
5. Troitsky A., Stashenko V.I. Advantages of drawing and rolling metals with pulse current. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Fifth interdisciplinary scientific forum with international participation *New materials and promising technologies*. Moscow, Russia, 30 October – 1 November 2019. Vol. 848. Pp. 1–8. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/848/1/012084>.
6. Hendeniya N., Abeygunawardena G.A., De Silva I., Wickramasinghe S. The tensile electroplasticity of low carbon steel with low amplitude pulse current. *Moratuwa Engineering Research Conference (MERCon)*, Moratuwa, Sri Lanka, 28-30 July 2020. Pp. 165–169. DOI: <https://doi.org/10.1109/MERCon50084.2020.9185238>.
7. Баранов Ю.В., Троицкий О.А., Авраамов Ю.С., Шляпин А.Д. Физические основы электроимпульсной и электропластической обработок и новые материалы. М.: МГИУ, 2001. 844 с.
8. Liang L., Pang S., Shao X., Wang C., Jiang P., Chen X. Weak Magnetic-Assisted Thermal Stress Field Reduction Effect in Laser Welding. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2018. Vol. 49. Pp. 198–209. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11661-017-4408-z>.

9. Bao W., Chu X., Lin S., Gao J. Electro-plastic effect on tensile deformation behaviour and microstructural mechanism of AZ31B alloy. *Materials Science and Technology*. 2017. Vol. 33. No 7. Pp. 836–845. DOI: <https://doi.org/10.1080/02670836.2016.1242272>.
10. Vakulenko I.A., Nadezhdin Y.L., Sokirko V.A., Volchok I.P., Mitiaev A.A. Electric pulse treatment of welded joint of aluminum alloy. *Science and Transport Progress*. 2013. Vol. 4. No 46. Pp. 73–82. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2013/16584>.
11. Lobanov L.M., Pashchyn M.O., Mikhodui O.L., Cherkashyn O.V., Solomiichuk T.G., Shl'ons'kyi P.S., Kondratenko I.P. Pulsed Electromagnetic Field Effect on Residual Stresses and Strains of Welded Joints of AMg6 Aluminum Alloy. *Strength of Materials*. 2021. Vol. 53. No 6. Pp. 834–841. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11223-022-00350-1>.
12. Lobanov L.M., Pashchin N.A., Mikhodui O.L. Influence of the loading conditions on the deformation resistance of AMg6 alloy during electrodynamic treatment. *Strength of Materials*. 2012. Vol. 44. Pp. 472–479. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11223-012-9401-6>.
13. Kanada T., Kido Y., Kutsukake A., Ikeda T., Enokizono M. Magnetic properties of soft magnetic materials under tensile and compressive stress. *Przegląd Elektrotechniczny*. 2011. R. 87. No 9b. Pp. 93–96. URL: <https://archiwum.pe.org.pl/articles/2011/9b/22.pdf> (дата звернення 25.07.2025).
14. Ansys Inc. Ansys Electronics Desktop (AEDT). URL: <https://www.ansys.com/products/electronics> (дата звернення 25.07.2025).
15. Davidson P. An Introduction to Magnetohydrodynamics. Cambridge: Cambridge University Press, 2001. 431 p.
16. Тамм И.Е. Основы теории электричества: учебное пособие. М.: Физматлит, 2003. 616 с.

ELECTROMAGNETIC PROCESSES IN NON-MAGNETIC SHEET METALS DURING MAGNETO-PULSE TREATMENT OF WELDS IN THE WELDING PROCESS

I.P. Kondratenko¹, R.S. Kryshchuk¹, L.M. Lobanov², M.O. Pashchyn², O.L. Mykhoduy², O.M. Tymoshenko²

¹ Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine,
56, Beresteiskyi Ave., Kyiv, Ukraine.

² E.O. Paton Electric Welding Institute National Academy of Sciences of Ukraine,
11, Kazymyr Malevych Str., Kyiv, 03680, Ukraine.

E-mail: dep7ied@ukr.net; olga.mikhodui@gmail.com.

Residual tensile stresses in welded joints negatively affect the fatigue strength, corrosion resistance, and dimensional accuracy of metal structures. Treatment with a pulsed electromagnetic field allows for optimization of the stress state and metal microstructure of the welded joints, thereby contributing to enhanced reliability and longevity of structures, and consequently extending their operational lifespan. The aim of this work is to determine, through mathematical modeling, the distribution of the electromagnetic field and magnetic forces within the volume of a weld seam in an aluminum alloy plate with isotropic parameters during its treatment by the magnetic field of an inductor with pulsed current. A three-dimensional mathematical model of the induction system was developed to calculate the electromagnetic field equations. The calculation of pulsed current in the inductor winding conductors along with the electromagnetic field of the entire induction system was performed using electrical circuit equations based on Kirchhoff's second law and electromagnetic field equations based on Maxwell's equation system. A comparison of magnetic forces, field strength, and eddy current density in the weld seam area was conducted for plates with thicknesses of 6 mm and 3 mm. The 6 mm plate can be interpreted as two 3 mm plates, one with a weld seam and the other acting as a screen, which allowed investigation of such screening effect on force and current distribution. A study was conducted of the vector quantities of field strength, current density, and magnetic forces in the volume of the weld seam area being treated, as a function of time. Based on the developed methodology, experimental studies were performed to assess the impact of magneto-pulse treatment on residual welding stresses and the metal microstructure of welded joints made of AMg6 aluminum alloy. It was demonstrated that treating the weld metal during or after welding contributes to reducing residual tensile stresses and dispersing the microstructure of the weld metal. References 16, figures 11, tables 2.

Keywords: pulsed current, electromagnetic field, mathematical model, electromagnetic inductor, weld treatment.

1. Lobanov L.M., Pashchyn M.O., Mikhodui O.L., Sydorenko Yu.M., Ustymenko P.R. Stress-Strain State of Welded Joints of AMg6 Alloy after Electrodynamic Treatment During Welding. *Strength of Materials*. 2022. Vol. 54. Pp. 983–996. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11223-023-00474-y>.

2. Kuznetsov N.N. Influence of electro- and magneto-pulse action on the workpiece. *Obrabotka materialov davleniem*. 2010. No 3(24). Pp. 126–129. URL: [http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/omd/3\(24\)-2010/nomer.html](http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/omd/3(24)-2010/nomer.html) (accessed at 25.07.2025). (Rus)

3. Vasiliev M.A. Features of plastic deformation of metals and alloys in a magnetic field. Review. *Uspekhi fiziki metallov*. 2007. Vol. 8. Vyp. 1. Pp. 65–105. URL: <https://ufm.imp.kiev.ua/ru/abstract/v08/i01/065.html> (accessed at 25.07.2025). DOI: <https://doi.org/10.15407/ufm.08.01.065> (Rus)
4. Andrea D., Burleta T., Körkemeyerb F., Gersteinb G., Gibsona J.S.K.-L., Sandlöbes-Hauta S., Korte-Kerzel S. Investigation of the electroplastic effect using nanoindentation. *Materials & Design*. 2019. Vol. 183. Pp. 1–10. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108153>.
5. Troitsky A., Stashenko V.I. Advantages of drawing and rolling metals with pulse current. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Fifth interdisciplinary scientific forum with international participation *New materials and promising technologies*. Moscow, Russia, 30 October – 1 November 2019. Vol. 848. Pp. 1–8. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/848/1/012084>.
6. Hendeniya N., Abeygunawardena G.A., De Silva I., Wickramasinghe S. The tensile electroplasticity of low carbon steel with low amplitude pulse current. *Moratuwa Engineering Research Conference (MERCon)*, Moratuwa, Sri Lanka, 28-30 July 2020. Pp. 165–169. DOI: <https://doi.org/10.1109/MERCon50084.2020.9185238>.
7. Baranov Yu.V., Troitskiy O.A., Avraamov Yu.S., Shlyapin A.D. Physical foundations of electropulse and electroplastic processing and new materials. Moskva: MGIU, 2001. 844 p. (Rus)
8. Liang L., Pang S., Shao X., Wang C., Jiang P., Chen X. Weak Magnetic-Assisted Thermal Stress Field Reduction Effect in Laser Welding. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2018. Vol. 49. Pp. 198–209. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11661-017-4408-z>.
9. Bao W., Chu X., Lin S., Gao J. Electro-plastic effect on tensile deformation behaviour and microstructural mechanism of AZ31B alloy. *Materials Science and Technology*. 2017. Vol. 33. No 7. Pp. 836–845. DOI: <https://doi.org/10.1080/02670836.2016.1242272>.
10. Vakulenko I.A., Nadezhdin Y.L., Sokirko V.A., Volchok I.P., Mitiaev A.A. Electric pulse treatment of welded joint of aluminum alloy. *Science and Transport Progress*. 2013. Vol. 4. No 46. Pp. 73–82. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2013/16584>.
11. Lobanov L.M., Pashchyn M.O., Mikhodui O.L., Cherkashyn O.V., Solomiichuk T.G., Shl'ons'kyi P.S., Kondratenko I.P. Pulsed Electromagnetic Field Effect on Residual Stresses and Strains of Welded Joints of AMg6 Aluminum Alloy. *Strength of Materials*. 2021. Vol. 53. No 6. Pp. 834–841. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11223-022-00350-1>.
12. Lobanov L.M., Pashchin N.A., Mikhodui O.L. Influence of the loading conditions on the deformation resistance of AMg6 alloy during electrodynamic treatment. *Strength of Materials*. 2012. Vol. 44. Pp. 472–479. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11223-012-9401-6>.
13. Kanada T., Kido Y., Kutsukake A., Ikeda T., Enokizono M. Magnetic properties of soft magnetic materials under tensile and compressive stress. *Przegląd Elektrotechniczny*. 2011. R. 87. No 9b. Pp. 93–96. URL: <https://archiwum.pe.org.pl/articles/2011/9b/22.pdf> (accessed at 06.11.2025)
14. Ansys Inc. Ansys Electronics Desktop (AEDT). URL: <https://www.ansys.com/products/electronics> (accessed at 25.07.2025)
15. Davidson P. An Introduction to Magnetohydrodynamics. Cambridge: Cambridge University Press, 2001. 431 p.
16. Tamm I.E. Fundamentals of the theory of electricity: textbook. Moskva: Fizmatlit, 2003. 616 p. (Rus)

Надійшла 05.08.2025

Прийнята 18.08.2025