

АКСІАЛЬНО-СИМЕТРИЧНА МОДЕЛЬ МАГНІТНОГО ПОЛЯ ІНДУКТОРА ЗАДЛЯ ЗМЕНШЕННЯ ЗАЛИШКОВИХ НАПРУЖЕНЬ У ЗВАРНИХ З'ЄДНАННЯХ АЛЮМІНІЄВИХ ПЛАСТИН

І.П. Кондратенко^{1*}, чл.-кор. НАН України, Р.С. Крищук^{1**}, канд. техн. наук,
М.О. Пашин^{2***}, докт. техн. наук

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

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

E-mail: dep7ied@ukr.net.

Зварні шви в металевих конструкціях схильні до утворення залишкових напружень, що значно знижує їхні міцнісні характеристики та довговічність. Традиційні методи зменшення цих напружень часто є трудомісткими або недостатньо ефективними. У цьому контексті перспективним напрямом є застосування імпульсного електромагнітного поля (ІЕМП), яке дає змогу знизити рівень залишкових напружень. У даному дослідженні представлено комплексний підхід до вивчення процесів, що відбуваються під час імпульсної електромагнітної обробки зварних з'єднань. Основну увагу приділено розробці аксіально-симетричної моделі магнітного поля індуктора та аналізу його впливу на алюмінієві пластини. Метою наукової роботи є встановлення розподілу магнітних сил і густини вихрових струмів в алюмінієвій пластині за допомогою аксіально-симетричної моделі індуктора, реалізованої методом скінченних елементів з явним урахуванням ефекту близькості провідників обмотки та витіснення струму, аналіз впливу екрануючої пластини на інтенсифікацію цих параметрів та верифікація отриманих результатів шляхом порівняння результатів чисельного моделювання з експериментальними даними. Розроблено аксіально-симетричну модель індукційної системи в циліндричній системі координат на основі системи рівнянь Максвелла. Розрахунок імпульсного струму в обмотці індуктора виконано з використанням рівняння електричного кола за другим законом Кірхгофа та електромагнітної моделі, реалізованої в ANSYS Maxwell 2D. Розподіл об'ємної густини магнітної сили в об'ємі пластини розраховується як сила Лоренца, використовуючи стандартну форму дивергенції тензора Максвелла. Проаналізовано вплив екрануючої пластини на інтенсифікацію магнітних сил, густини струму та магнітного тиску. Задля верифікації результатів проведено порівняння чисельного моделювання з експериментальними даними, що були опубліковані раніше. Визначено опір та індуктивність системи для різних частот струму за наявності та відсутності екрануючої пластини. Встановлено моменти максимуму амплітудних значень напруженості магнітного поля, густини вихрових струмів, густини магнітної сили та магнітного тиску. Проаналізовано розподіл густини вихрових струмів, густини магнітної сили та напруження магнітних сил по радіальній координаті на поверхні пластини. Результати моделювання узгоджуються з експериментальними даними, що підтверджує адекватність моделі. Бібл. 17, рис. 9.

Ключові слова: імпульсне електромагнітне поле, залишкові напруження, вихрові струми, магнітна сила, аксіально-симетрична модель, чисельне моделювання.

Вступ. У сучасній промисловості широко використовуються тонколистові алюмінієві сплави, які часто з'єднують зварюванням. Однак у зварних швах неминуче виникають залишкові напруження, що призводить до деформацій конструкцій, зниження їхньої міцності та довговічності. Задля мінімізації цих негативних ефектів застосовують різні методи постобробки. Серед найперспективніших методів впливу слід відзначити: електродинамічну обробку (ЕДО) [1], що поєднує вплив імпульсного струму високої густини (до 10^9 А/м²) з механічним ударним навантаженням; магнітно-імпульсну обробку

© Кондратенко І.П., Крищук Р.С., Пашин М.О., 2025

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

*** <https://orcid.org/0000-0002-2201-5137>

© Видавець ВД «Академперіодика» НАН України, 2025



Це стаття відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND 4.0

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode.uk>

(МІО) [2], яка забезпечує локальний вплив на структуру матеріалу імпульсним магнітним полем. МІО здатна викликати як зниження міцності, так і зміцнення металу за рахунок перебудови дислокаційної структури [3]. Ці методи відрізняються високою технологічністю, спрямованістю дії та можливістю контролювати параметри впливу.

Є чимало наукових праць, спрямованих на дослідження впливу ЕДО та МІО на різні матеріали. У [1] показано, що ЕДО зварних з'єднань зі сплаву АМг6, де імпульсний струм подається через ударний електрод, сприяє переходу залишкових розтягувальних напружень у стискальні. Розроблена в [1] математична модель ударної взаємодії електрода з пластиною за підвищених температур (150-300 °С) підтверджена експериментально за допомогою електронної спекл-інтерферометрії. Показано, що серед досліджуваних температурних значень найбільш прийнятною для ЕДО сплаву АМг6 є температура 150 °С. Ефективність методу зумовлена не лише локальним нагрівом, а й проявом електропластичного ефекту, що виражається у зниженні опору деформації матеріалу під дією імпульсного струму. У [4] досліджується оброблення імпульсним струмом густиною 10^6 А/м² мідних і сталевих дрітків під час їхнього волочіння, за якого опір металу деформації знижується на 25-30%. У [5] зафіксовано зменшення межі текучості на 48 МПа зразка низьковуглецевої сталі внаслідок застосування електричних імпульсів струму густиною 10^7 - 10^8 А/м² під час однобічного розтягування. У [6] досліджено вплив електричних імпульсів на деформаційну поведінку металів, зокрема термодинамічні (ефект Джоуля) та кінетичні (атермальний ефект) механізми, які сприяють зниженню опору деформації та покращенню мікроструктури матеріалів. У дослідженні [7] виявлено суттєвий вплив електричних імпульсів із густиною струму 10^7 - 10^8 А/м² на механічні властивості та мікроструктуру сплаву AZ31В. Зростання пікового значення густини струму посилює електропластичний ефект, активізуючи динамічну рекристалізацію та зсув дислокацій у кристалічній ґратці. У [8] встановлено ефективність імпульсної електричної обробки задля зменшення залишкових напружень у зварних з'єднаннях алюмінієвого сплаву АК8МЗ. Показано, що імпульсний вплив зумовлює: зменшення градієнта мікротвердості в зоні термічного впливу; перерозподіл хімічних елементів у структурі сплаву; зміну морфології фазових складових. Важливим результатом є одночасне підвищення міцності окремих ділянок біля зварного шва та зменшення дефектів кристалічної ґратки. Ці ефекти пов'язані з процесами відпалу, які активуються під дією електричних імпульсів [8].

МІО [2, 9] знижує залишкові напруження за рахунок комбінованого впливу сили Лоренца, магнітного поля та вихрових струмів (до 10^9 А/м²), залежно від параметрів системи. Так, в [10] систематизовано механізми впливу МІО на пластичність металів, зокрема досліджено вплив магнітного поля на рух дислокацій і релаксацію напружень у металах. У [11] експериментально доведено, що електропластичний ефект проявляється навіть у крихких інтерметалідах, де основним механізмом є взаємодія електронів з дислокаціями. Застосування слабкого поперечного магнітного поля (415 мТл) під час лазерного зварювання нержавіючої сталі 304 призводить до зменшення термічних напружень на ~10%, а залишкових напружень у зоні термічного впливу – на ~20 МПа [12]. Ці результати викликають зацікавленість для дослідження та вдосконалення індукційних систем [2, 9] для МІО зварних з'єднань металевих конструкцій, зокрема алюмінієвих пластин зі зварними з'єднаннями.

Результати експериментального дослідження МІО в [9] показують, що МІО зменшує залишкові напруження та кривизну пластин зі сплаву АМг6. На формування імпульсних магнітних сил у металевих пластинах з алюмінієвого сплаву АМг6 впливає використання додаткових екрануючих пластин під зварним з'єднанням. Проте експериментальне дослідження не дає змогу провести детальний просторово-часовий аналіз інтенсивності просторових складових магнітних сил та вихрових струмів у металевій пластині зі зварним з'єднанням. Задля вимірювання магнітної сили відштовхування індуктора від пластин використовувався датчик прискорення. Радіальна складова магнітних сил не досліджена. Для виконання більш детального аналізу магнітних сил та струмів індукційної системи, що досліджувалася експериментально в [9], доцільно використовувати тривимірну модель магнітного поля з урахуванням параметрів джерела імпульсного струму, ефекту витіснення струму в провідниках обмотки індуктора в режимі розрахунку перехідних процесів методом скінчених елементів.

Метою роботи є встановлення розподілу магнітних сил і густини вихрових струмів в алюмінієвій пластині за допомогою аксіально-симетричної моделі індуктора, реалізованої методом скінчених елементів з явним урахуванням ефекту близькості провідників обмотки та витіснення струму (скіну), аналіз впливу екрануючої пластини на інтенсифікацію цих параметрів та верифікація отриманих результатів шляхом порівняння результатів чисельного моделювання з експериментальними даними [9].

Модель індукційної системи. Моделювання індукційної системи виконано в двовимірній постановці за допомогою програмного модуля Ansys Maxwell 2D, що входить до складу Ansys Electronics Desktop 2025 R1 [13, 14]. Розрахунки виконано в циліндричній системі координат із застосуванням методу скінченних елементів і граничної умови аксіальної симетрії. На рис. 1, *а* наведено ескіз індукційної системи у тривимірній постановці, де для наочності відображено 3/4 частини конструкції (виріз по площині симетрії). Таке подання дає можливість візуалізувати внутрішню структуру обмотки, розташування та товщину металевих пластин (диск та екран). На рис. 1, *б* показано повний переріз системи у площині симетрії для аналізу геометричних параметрів. Тут: 1 – провідники спіралеподібної обмотки діаметром 1,4 мм; 2 – металевий диск зі сплаву АМг6 товщиною 1 мм; 3 – металевий екран із того ж сплаву товщиною 5 мм. Відстань між обмоткою і диском становить 0,35 мм, між диском і екраном – 0,2 мм. Обмотка має форму плоскої кільцевої котушки з товщиною 5 мм, внутрішнім діаметром 10 мм та зовнішнім – 90 мм.

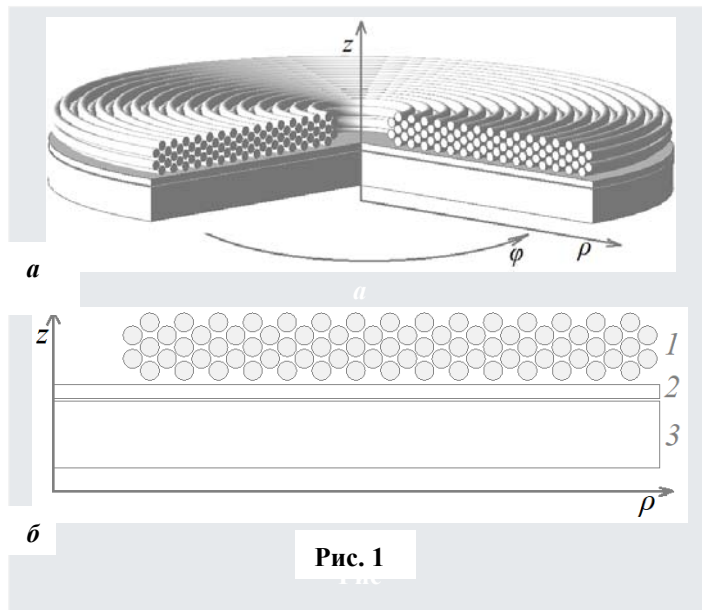


Рис. 1

напрямку, з поступовим згасанням амплітуди через втрати на активному опорі. Однак у схемі паралельно до конденсатора підключено діод $D1$, який в початковий момент закритий (через протилежну полярність відносно конденсатора). Під час розряджання конденсатора його напруга зменшується, і в момент зміни полярності діод відкривається і далі пропускає струм через себе, залишаючи конденсатор розрядженим. Це змінює характер струму на аперіодичний. Такий режим дає можливість сформувати односторонній імпульс струму через індуктор. Протікання електричного струму через обмотку індуктора створює магнітне поле, яке в свою чергу збуджує вихрові струми в пластині. Внаслідок взаємодії магнітного поля і вихрових струмів на пластину буде діяти магнітна сила [9].

Магнітне поле аксіально-симетричної моделі індукційної системи (рис. 1, *б*) описується рівнянням в квазістационарному режимі для азимутальної складової векторного магнітного потенціалу [15]

$$\frac{1}{\mu r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial A_\phi}{\partial r} \right) + \frac{1}{\mu} \frac{\partial A_\phi}{\partial z} = \sigma \frac{\partial A_\phi}{\partial t} - j_{s\phi}, \quad (1)$$

де A_ϕ – векторний магнітний потенціал; μ – магнітна проникність; σ – питома електропровідність; $j_{s\phi} = i_s / S_w$ – густина стороннього струму i_s , що в провідниках обмотки (рис. 1, *б*) від джерела живлення, S_w – площа поперечного перерізу провідника обмотки.

На рис. 2 показано електричне коло, до складу якого входить індуктор (рис. 1) з активним опором R_s і власною індуктивністю L_s , а також додаткові елементи: опір $R1$, індуктивність $L1$ і ємність $C1$, яка перед запуском схеми заряджена до певної напруги U_{C0} у момент часу $t = 0$. Схема моделює реальне джерело живлення разом з проводами для підключення індуктора, що використовувалося в експериментальних дослідженнях [9]. Під час замикання контактів роз'єднувача $S1$ відбувається розрядний процес у RLC -контурі, де енергія зарядженого конденсатора передається через індуктивний елемент системи. У типовому випадку без додаткових елементів, таких як діод, струм у такому контурі мав би коливальний характер: конденсатор періодично розряджався і заряджався в зворотному

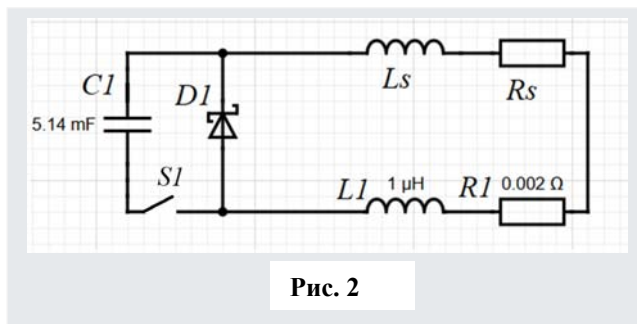


Рис. 2

Рівняння (1) розв'язується разом з рівнянням для електричного кола (рис. 2) за другим законом Кірхгофа

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

де $U_{C,0}$ – напруга зарядженого конденсатора в початковий момент часу; ψ – потокозчеплення, що розраховується на основі розподілу магнітного поля за рівнянням (1); $\partial \psi / \partial t$ – індукована напруга на виводах обмотки індуктора, що відповідає напрузі на послідовно з'єднаних активному опорі R_s й індуктивності L_s (рис. 2).

Задля розрахунку параметрів індукційної системи (опір та індуктивність) використовується рівняння (1) в гармонійному режимі з комплексними амплітудами ($\bar{A}_\phi$, $\bar{J}_{s\phi}$)

$$\frac{1}{\mu r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \bar{A}_\phi}{\partial r} \right) + \frac{1}{\mu} \frac{\partial \bar{A}_\phi}{\partial z} = i \omega \sigma \frac{\partial \bar{A}_\phi}{\partial t} - \bar{J}_{s\phi}, \quad (3)$$

де i – уявна одиниця; $\omega = 2\pi f$, f – частота струму.

Задля 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. Густина вихрових струмів у пластині (рис. 1, п. 2) розраховується за виразом

$$j_\phi = -\sigma \partial A_\phi / \partial t. \quad (4)$$

Розподіл об'ємної густини магнітної сили $\mathbf{f}$ в об'ємі пластини розраховується як сила Лоренца, використовуючи стандартну форму дивергенції тензора Максвелла [16, 17]. Тоді для аксіально-симетричної моделі радіальна й аксіальна складові магнітних сил розраховуються за наступними виразами:

$$f_r = \frac{\partial T_{rr}}{\partial r} + \frac{\partial T_{rz}}{\partial z} + \frac{T_{rr} - T_{\phi\phi}}{r}, \quad f_z = \frac{\partial T_{zr}}{\partial r} + \frac{\partial T_{zz}}{\partial z} + \frac{\partial T_{zz}}{\partial z}, \quad (5)$$

де T_{mn} – тензор напружень Максвелла

$$T_{mn} = \frac{1}{\mu} \left(B_n B_m - \delta_{mn} \frac{1}{2} B^2 \right), \quad (6)$$

індекс n відповідає компоненті вихідного вектору, а сума за η охоплює всі координати (наприклад, r , ϕ , z у тривимірному просторі); B_n , B_η – компоненти магнітної індукції $\mathbf{B}$; δ_{mn} – символ Кронекера (1, якщо $n = \eta$, і 0, якщо $n \neq \eta$). Магнітна індукція розраховується за виразом $\mathbf{B} = \text{rot} A_z$

$$B_r = \mu H_r = -\frac{\partial A_z}{\partial z}, \quad B_z = \mu H_z = \frac{1}{r} \frac{\partial (r A_r)}{\partial r}, \quad (7)$$

де H_r , H_z – складові напруженості магнітного поля.

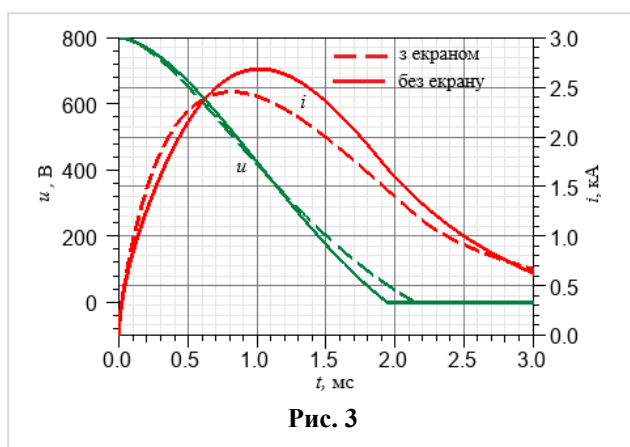


Рис. 3

Результати досліджень. Рис. 3 ілюструє зміну напруги на конденсаторі $u(t)$ (ліва шкала, зелена крива) та струму $i(t)$ через індуктор (права шкала, червона крива) під час розряду зарядженого конденсатора в електричне коло (рис. 2). Показано два варіанти: з металевим екраном (пунктирні лінії) та без нього (суцільні лінії). На початку процесу ($t = 0$) конденсатор має максимальну заряджену напругу. Після замикання роз'єднувача $S1$ (рис. 2), розпочинається його розряд через індуктор. Струм зростає, досягаючи максимуму приблизно на момент часу 1 мс, після чого починає спадати. З графіка видно, що напруга на конденсаторі після перетину нульового рівня залишається рівною 0 В, а струм ще деякий час протікає, розсіюючи залишкову енергію в індукторі. Наявність металевого екрана з алюмінієвого сплаву АМг6 товщиною 5 мм під основною пластинною (АМг6, 1 мм)

призводить до зменшення максимального струму в індукторі з 2,68 кА до 2,45 кА, а також до скорочення часу досягнення амплітуди з 1,02 мс до 0,82 мс. Якщо вважати, що цей час відповідає чверті періоду гармонійного коливання (див. рівняння (3)), то відповідна частота змінюється від 250 Гц до 312 Гц. За цих умов повна індуктивність системи зменшується з 139 мкГн до 118 мкГн (рис. 4), що зумовлено частковою компенсацією магнітного потоку екраном. Крім того, спостерігається збільшення активного опору кола з 175 мОм до 230 мОм, що пов'язано з підвищеними втратами на вихрові струми у провідному екрані.

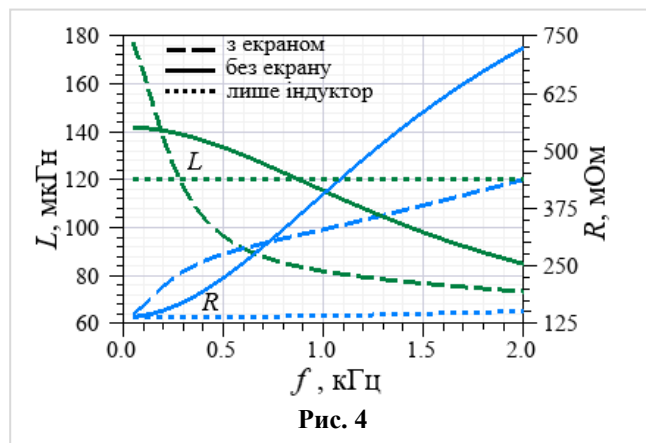


Рис. 4

ментальними даними [9]. Експериментально зафіксовані значення (наприклад, 2,3 кА при 0,6 кВ проти розрахункових 1,85 кА) демонструють відхилення, які можна пояснити технологічним розкидом параметрів матеріалів; граничною точністю вимірювань; припущеннями, прийнятими під час моделювання. Водночас форма кривих (графічні залежності) добре узгоджується з експериментальними даними, що підтверджує коректність моделі електромагнітного поля.

На рис. 6 подано максимальні на поверхні пластини значення для густини струму j_ϕ (4), напруженості магнітного поля H (7) та магнітного тиску p (напруження магнітних сил за модулем):

$$p = \sqrt{T_{zz}^2 + T_{\rho z}^2}. \quad (8)$$

Використана в роботі оцінка тиску p (8) є фізично обґрунтованою. В умовах осе-симетричної постановки задачі для розглянутого випадку виконується співвідношення $T_{\rho\rho} = -T_{zz}$ (рис. 7), що призводить до того, що величина p (8) чисельно збігається як з максимальним дотичним напруженням, так і з найбільшим головним напруженням у площині (p, z) . Головні та дотичні напруження є базовими характеристиками напруженого стану згідно з положеннями теорії міцності, що робить величину H інформативною для оцінки механічної реакції матеріалу на дію об'ємних сил магнітного поля (5).

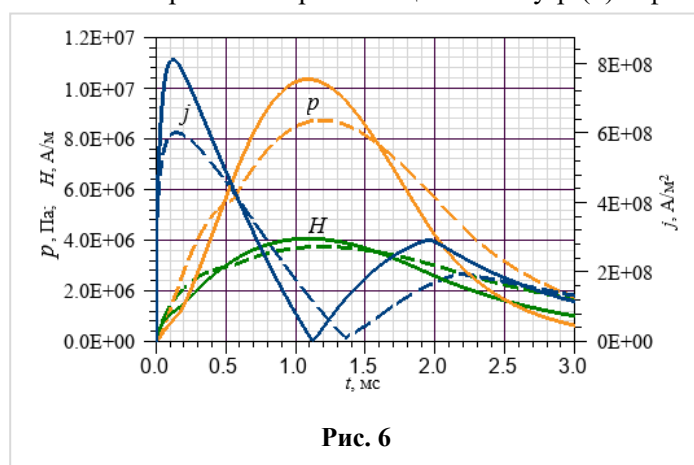


Рис. 6

менту часу 0,14 мс, тоді як максимуми для напруженості магнітного поля H та тиску p спостерігаються близько до 1,15 мс. На рис. 8 показано зміну в часі повної магнітної сили, що діє на пластину товщиною 1 мм, як з екраном (штрихові криві), так і без нього (суцільні лінії). Розрахунки виконано за наступними виразами:

$$F_\rho = 2\pi \iint f_\rho p dz d\rho; \quad F_z = 2\pi \iint f_z p dz d\rho; \quad |F| = \sqrt{F_z^2 + F_\rho^2}. \quad (10)$$

На рис. 5 показано залежність амплітудного значення магнітної сили, що діє на всю пластину, від амплітудного значення струму в електричному колі (рис. 2) для різних значень напруги зарядженого конденсатора. Результати чисельного моделювання порівняно з експери-

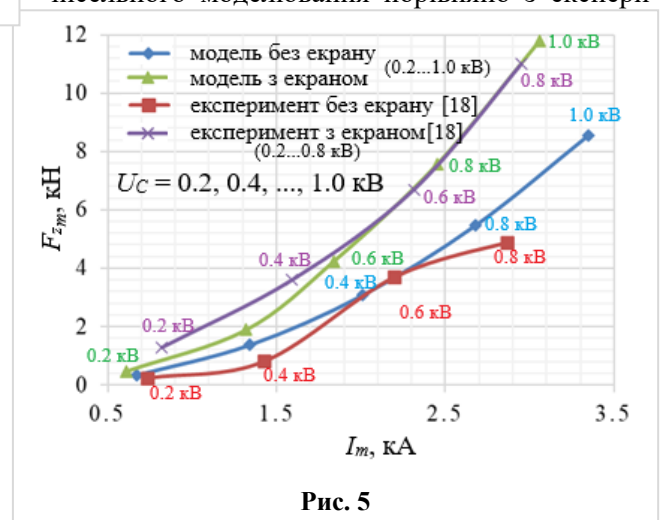


Рис. 5

ментальних даних порівняно з експериментальними даними [18]. Результати чисельного моделювання порівняно з експериментальними даними [18]. Результати чисельного моделювання порівняно з експериментальними даними [18].

Амплітудне значення густини струму j (рис. 6) досягає максимуму близько до моменту часу 0,14 мс, тоді як максимуми для напруженості магнітного поля H та тиску p спостерігаються близько до 1,15 мс.

Максимум сили F досягається на момент часу $\sim 0,4$ мс. За наявності екрану сила є більшою,

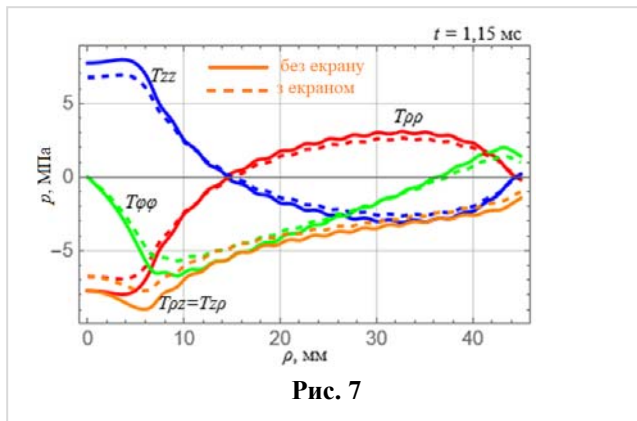


Рис. 7

центруючи дію в аксіальному напрямку.

Аналіз часової динаміки параметрів електромагнітного впливу на алюмінієву пластину (рис. 6, рис. 8) та їхнього просторового розподілу по радіальній координаті (рис. 9) виявив три характерні фази процесу. У момент 0,14 мс спостерігається максимальне амплітудне значення густини струму в пластині ($6 \cdot 10^8$ А/м²), що обумовлено швидким наростанням струму в обмотці індуктора. Максимум об'ємної густини магнітних сил ($1,8 \cdot 10^9$ Н/м³) досягається у момент 0,4 мс, коли густина струму знижується до 85% від максимального амплітудного значення, що свідчить про суттєвий внесок взаємодії первинного магнітного поля індуктора з полем вихрових струмів у пластині. Найбільший магнітний тиск (8,8 МПа) досягається в момент часу 1,15 мс у центральній зоні пластини, де осьова складова магнітної індукції досягає максимуму завдяки геометричній концентрації поля в області з малим діаметром вікна котушки (10 мм). Цей ефект підкреслює важливу роль конфігурації індуктора у формуванні просторового розподілу напружень в алюмінієвій пластині.

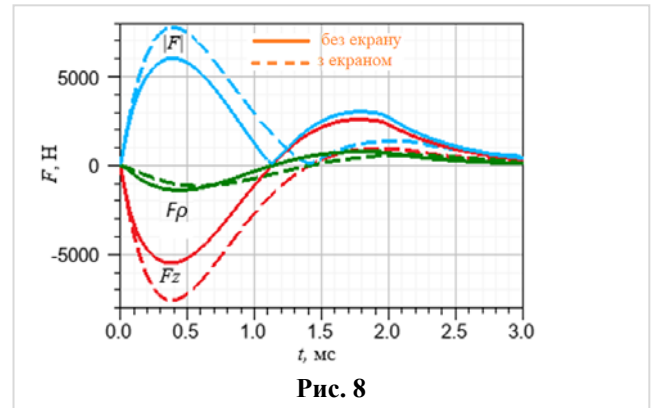


Рис. 8

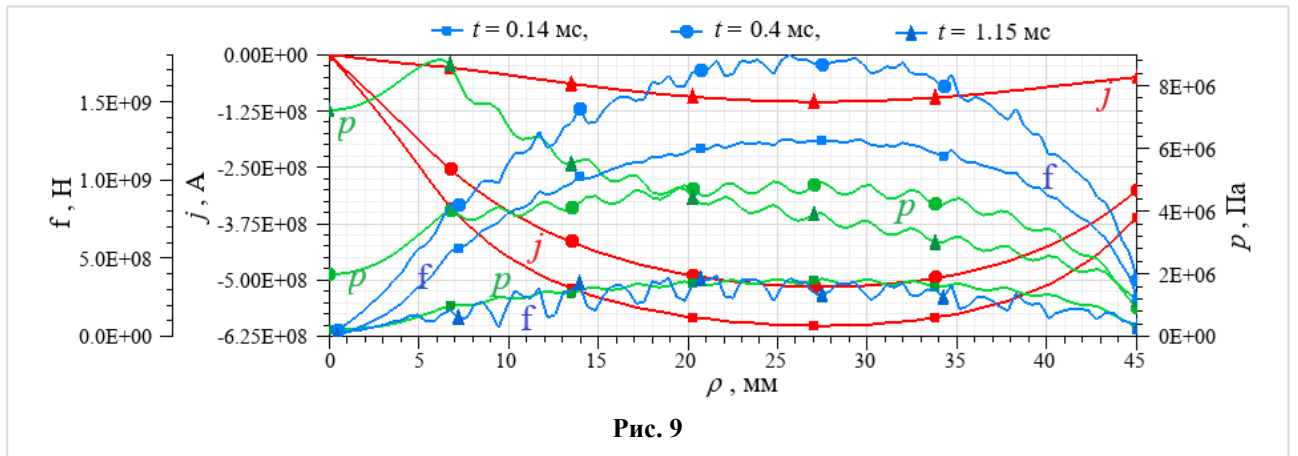


Рис. 9

Висновок. Отримані результати демонструють важливу роль наявності екрануючої пластини та особливостей конструкції індукційної системи у формуванні просторового розподілу електромагнітних параметрів впливу на алюмінієву пластину зі зварним швом. Наявність екрануючої пластини суттєво впливає на розподіл та інтенсивність імпульсних магнітних сил і вихрових струмів у моделі індукційної системи, що досліджується, а також знижує загальну індуктивність в електричному колі на 15% та збільшує активний опір на 31%, що призводить до зменшення амплітудного значення струму на 8%, і до скорочення часу досягнення амплітудного значення на 20%.

Експерименти [9] підтверджують адекватність моделі з певними похибками, які можуть бути пов'язані з невизначеністю параметрів матеріалів або вимірювань. Підтверджено, що за наявності екрануючої пластини аксіальна складова інтегрального значення магнітної сили, що діє на весь об'єм пластини, суттєво збільшується, що було раніше експериментально досліджено. Але моделювання показало, що радіальна складова магнітної сили водночас зменшується.

Встановлено три ключові моменти часу, що характеризують максимальні значення електромагнітних величин у досліджуваній системі: 0,14 мс – максимум густини струму в пластині ($6 \cdot 10^8$ А/м²); 0,4 мс – максимум густини об'ємної магнітної сили ($1,8 \cdot 10^9$ Н/м³); 1,15 мс – максимум магнітного тиску (8,8 МПа). Аналіз просторового розподілу цих величин показав, що у момент часу 0,4 мс основна дія магнітних сил зосереджена у периферійній частині пластини за рахунок сумарної дії первинного поля струмів котушки та вторинного поля вихрових струмів у пластині. При цьому є переважання радіальної складової магнітної індукції. Натомість у момент часу 1,15 мс максимальні напруження спостерігаються у центральній зоні (радіус ~6 мм), що обумовлено геометричною концентрацією магнітного поля в області малого діаметра котушки, де переважає осьова складова магнітної індукції.

Роботу виконано за рахунок державного бюджету в межах 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., Pashchin N.A., Mikhodui O.L., Shlonskyi P.S., Chopyk V.V., Karlov O.M. Elevation of the Fatigue Resistance of Welded Joints by Controlled Synchronization of Electrodynamics Actions. *Materials Science*. 2022. Vol. 58. Pp. 149–156. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11003-022-00643-5>.
2. Rashchepkin A.P., Kondratenko I.P., Karlov O.M., Kryshchuk R.S. Magnetic Forces and Currents of the Inductor for Magnetoimpulse Processing of Welded Joints of Thin Non Magnetic Metals. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2020. No 5. Pp. 74–79. DOI: <https://doi.org/10.15407/technd2020.05.074>. (Ukr)
3. Kuznetsov N.N. The influence of electric and magnetic pulse action on the thin sheet 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 28.08.2025). (Rus)
4. Troitsky A., Stashenko V.I. Advantages of drawing and rolling metals with pulse current. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 848. 012084. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/848/1/012084>.
5. Hendeniya N., Abeygunawardena G.A., De Silva I., Wickramasinghe S. The tensile electroplasticity of low carbon steel with low amplitude pulse current. *Proc. Moratuwa Engineering Research Conference (MERCon)*, Moratuwa, Sri Lanka, 28–30 July 2020. Pp. 165–169. DOI: <https://doi.org/10.1109/MERCon50084.2020.9185238>.
6. Huang T., Yang F., Xing B.H., Song K.X., Xiang N., Zhang Y.M., Chen X.W., Guo J.Q. Effects of electrical pulse on metal deformation behaviors. *Mater. Res. Express*. 2024. Vol. 11. 032003. DOI: <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ad35a9>.
7. Bao W., Chu X., Lin S., Gao J. Electro-plastic effect on tensile deformation behaviour and microstructural mechanism of AZ31B alloy. *Mater. Sci. Technol*. 2017. Vol. 33. No 7. Pp. 836–845. DOI: <https://doi.org/10.1080/02670836.2016.1242272>.
8. 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 (46). Pp. 73–82. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2013/16584>.
9. 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 Mater*. 2021. Vol. 53. Pp. 834–841. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11223-022-00350-1>.
10. Vasilev M.A. Features of plastic deformation of metals and alloys in a magnetic field. Overview. *Uspikhy fiziki metaliv*. 2007. Vol. 8. No 1. Pp. 65–105. URL: <https://ufm.imp.kiev.ua/ru/abstract/v08/i01/065.html> (accessed at 28.08.2025). (Rus) DOI: <https://doi.org/10.15407/ufm.08.01.065>.
11. Andrea D., Burlata T., Korkemeyer F., Gerstein G., Gibson J.S.K.-L., Sandlöbes-Haut S., Korte-Kerzel S. Investigation of the electroplastic effect using nanoindentation. *Mater. & Des*. 2019. Vol. 183. Pp. 1–10. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108153>.
12. Liang L., Pang S., Shao X., Wang C., Jiang P., Chen X. In situ Weak Magnetic-Assisted Thermal Stress Field Reduction Effect in Laser Welding. *Metall. Mater. Trans. A*. 2018. Vol. 49. Pp. 198–209. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11661-017-4408-z>.

13. Ansys Inc. Ansys Maxwell. URL: <https://www.ansys.com/products/electronics/ansys-maxwell> (accessed at 28.08.2025).
14. Ansys Inc. Ansys Electronics Desktop (AEDT). URL: <https://www.ansys.com/products/electronics> (accessed at 28.08.2025).
15. Voldek A.I. Liquid metal induction magnetohydrodynamic machines. Leningrad: Energiia, 1970. 272 p. (Rus)
16. Davidson P. An Introduction to Magnetohydrodynamics. Cambridge: Cambridge University Press, 2001. 431 p.
17. Tamm I.E. Theory of electricity: Ucheb. posob. Moskva: Fizmatlit, 2003. 616 p. (Rus)

AXISYMMETRIC MODEL OF INDUCTOR MAGNETIC FIELD FOR RESIDUAL STRESS REDUCTION IN WELDED ALUMINUM PLATES

I.P. Kondratenko¹, R.S. Kryshchuk¹, M.O. Pashchyn²

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

² E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine, Kazymyr Malevych Str., 11, Kyiv, 03680, Ukraine.

E-mail: dep7ied@ukr.net.

Welded joints in metal structures, particularly those made of aluminum alloys, are prone to residual stress formation, which significantly reduces their strength characteristics and durability. Traditional methods for reducing these stresses are often labor-intensive or insufficiently effective. In this context, the application of pulsed electromagnetic fields (PEMF) presents a promising approach for residual stress mitigation. This study presents a comprehensive approach to investigating the processes occurring during pulsed electromagnetic treatment of welded joints. The primary focus is on developing an axially symmetric model of the inductor's magnetic field and analyzing its effect on aluminum plates. The aim of this study is to determine the distribution of magnetic forces and eddy current density in an aluminum plate using an axisymmetric finite element model of the inductor, implemented with explicit consideration of the proximity effect and skin effect in the winding conductors. The research includes analysis of the shielding plate's influence on the intensification of these parameters and validation of the results through comparison of numerical simulations with experimental data. An axially symmetric model of the induction system was developed in a cylindrical coordinate system based on Maxwell's equations. The inductor's pulsed current was modeled via Kirchhoff's second law and FEM-based simulations in ANSYS Maxwell 2D. The volumetric density of magnetic force in the plate was calculated as the Lorentz force using the standard form of the divergence of Maxwell's stress tensor. The influence of the shielding plate on the intensification of magnetic forces, current density, and magnetic pressure was analyzed. Numerical simulation results were compared with experimental data for verification. The resistance and inductance of the system were determined for different current frequencies with and without the shielding plate. The study identified peak time instants for maximum values of magnetic field strength, eddy current density, magnetic force density, and magnetic pressure. The radial distribution of eddy current density, magnetic force density, and magnetic stress on the plate surface was analyzed. The simulation results showed good agreement with experimental data, confirming the model's adequacy. References 17, figures 9.

Keywords: pulsed electromagnetic field, residual stresses, eddy currents, magnetic force, axially symmetric model, numerical simulation.

Надійшла 09.06.2025
Остаточний варіант 11.08.2025