

**ЕЛЕКТРОТЕХНОЛОГІЧНІ КОМПЛЕКСИ ТА СИСТЕМИ**

УДК 621.3:539.3

DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2022.61.005>**СТРУМИ ТА ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ЗУСИЛЛЯ В СИСТЕМАХ МАГНІТНО-ІМПУЛЬСНОЇ ОБРОБКИ З ФЕРОМАГНІТНОЮ ПЛАТФОРМОЮ****І.П. Кондратенко**<sup>\*</sup>, чл.-кор. НАН України, **О.М. Карлов**<sup>\*\*</sup>, канд. техн. наук,**Р.С. Кришук**<sup>\*\*\*</sup>, канд. техн. наук

Інститут електродинаміки НАН України,

пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна

e-mail: [dep7ied@ukr.net](mailto:dep7ied@ukr.net)

Дія імпульсного струму високої густини ( $10^9$  А/м<sup>2</sup>) призводить до появи електропластичного ефекту в металевих виробках. Для локального протікання в немагнітних пластинах імпульсного струму запропоновано магнітоімпульсне оброблення з використанням індукторів імпульсного електромагнітного поля з П-подібним магнітопроводом. Мета роботи – встановлення впливу феромагнітної платформи з нелінійною магнітною проникністю на імпульсні вихрові струми і магнітний тиск немагнітних металевих пластин різної електропровідності в процесі моделювання магнітоімпульсного оброблення зварних з'єднань для досягнення електропластичного ефекту. Використовується чисельне моделювання імпульсних електромагнітних полів методом скінченних елементів. Розрахунок струму в обмотці індуктора виконується спільним розв'язанням рівнянь магнітного поля та електричного кола для дискретного часового проміжку. Джерелом живлення є конденсатор, що заряджений до певної заданої напруги. Для дослідження впливу феромагнітної платформи на струми та сили в немагнітних пластинах з різною електропровідністю використовується однаковий імпульсний струм в обмотці індуктора. Досліджено залежність амплітудних значень густини струму та магнітного тиску на поверхнях немагнітних пластин різної електропровідності. Досліджено вплив наявності та відсутності феромагнітної платформи, а також її електропровідності і магнітної проникності на величини струму і магнітного тиску в немагнітній пластині. Бібл. 13, рис. 7, таблиця.

**Ключові слова:** магнітоімпульсне оброблення, П-подібний магнітопровід, імпульсний струм, магнітні сили, феромагнітна платформа.

**Вступ.** Дія імпульсного струму густиною понад  $10^8$  А/м<sup>2</sup> з тривалістю імпульсів  $10^{-4} \dots 10^{-3}$  с призводить до появи електропластичного ефекту в металевих виробках [1–5]. Електропластичний ефект проявляється у вигляді зменшення залишкових напружень, що актуально для зварних швів. Електромагнітне поле впливає на всіх структурних рівнях: мікро-, макро-, мезо- і практично в усіх випадках кінцевий результат є наслідком спільної дії множини вищевикладених ефектів, що проходять на різних рівнях будови матеріалу [1]. Макроскопічні ефекти впливу електромагнітного поля є результатом його дії на всі структурні та ієрархічні рівні матеріалу. Електромагнітне поле викликає зміну властивостей матеріалів різної магнітної природи, що дозволяє модифікувати як магнітні, так і немагнітні матеріали [2]. У [3] встановлено, що в результаті електродинамічної обробки металу зварного шва (стикове зварне з'єднання) сплаву АМг6 кількість циклів до руйнування зразків у разі симетричного вигину підвищується майже вдвічі у порівнянні з необробленими.

Відомі також інші результати досліджень впливу імпульсних струмів на властивості електропровідних матеріалів. Наприклад, макроскопічні експерименти стиснення евтектичного сплаву Al-Al<sub>2</sub>Cu [4] з використанням імпульсів електричного струму (густина струму  $1,66 \pm 0,01$  кА/мм<sup>2</sup>, довжина імпульсу 0,5 мс) показують більше падіння напруження металу та більш високі деформації руйнування. Перший імпульс струму викликає більше падіння напруги внаслідок відкріплення дислокацій від перешкод, ніж наступні імпульси електричного струму. У експериментах з довжиною імпульсів 100 мкс встановлено, що більша інтенсив-

ність струму, інтервал імпульсів і швидкість навантаження призводять до більших зсувів дислокацій. Також імпульси електричного струму викликають зсуви зміщення під час розвантаження стисненого сплаву.

У [5] встановлено, що використовувати технологію електропластичної деформації потрібно тільки за низьких і середніх швидкостей прокатки (не більше 0,5 м/с), а більші швидкості використовувати на дуже тонких заготовках. Встановлено параметри імпульсного струму для прокату нержавіючої сталі 12Х18Н9 і 12Х18Н10Т від 2 мм до 0,3 мм зі швидкістю 0,3...0,5 м/с: амплітуда густини струму  $10^8 \dots 10^9$  А/м<sup>2</sup>, тривалість імпульсів 0,15...0,2 мс, частота повторень імпульсів 500...800 Гц. Максимальна потужність складала у той же час 150 кВт, амплітуда струму 45 кА, густина струму в зоні деформації  $0,3 \dots 0,8 \cdot 10^9$  А/м<sup>2</sup>, залежно від товщини заготовки.

Для локального протікання у зварних швах немагнітних пластин імпульсного струму запропоновано магнітоімпульсне оброблення з використанням індукторів імпульсного електромагнітного поля [6–8]. Такі індуктори можуть бути з магнітопроводом та без магнітопроводу. Магнітопровід дає змогу досягати потрібного імпульсного вихрового струму з меншими вимогами до джерела живлення – менший струм та напруга в обмотці індуктора [9].

Ідея цього дослідження полягає в тому, щоб розмістити немагнітну пластину зі зварним швом на феромагнітній платформі, що дозволить досягти збільшення густини вихрового струму і магнітних сил у зварному шві [10]. Протікання імпульсного струму в обмотці індуктора з П-подібним магнітопроводом індукуює вихрові струми в немагнітній пластині. Тоді умовна глибина проникнення імпульсу електромагнітного поля  $\delta$  в пластину залежить від тривалості імпульсу струму  $T_i$  і електропровідності  $\sigma$  пластини:

$$\delta = \sqrt{2/(\mu\sigma\omega)} = \sqrt{1/(\mu\sigma\pi f)} = \sqrt{2T_i/(\mu\sigma\pi)} \quad (1)$$

Якщо умовна глибина проникнення імпульсного електромагнітного поля в пластину  $\delta$  менша, ніж товщина пластини  $g$ , то відповідно до [10] наявність феромагнітної платформи під пластинкою не буде мати помітного впливу на розподіл електромагнітного поля у пластині.

**Мета роботи.** Встановлення впливу феромагнітної платформи на імпульсні вихрові струми і магнітний тиск немагнітних металевих пластин різної електропровідності в процесі моделювання магнітоімпульсного оброблення зварних з'єднань для досягнення електропластичного ефекту.

**Постановка задачі.** Для досягнення мети роботи використовується чисельне моделювання методом скінченних елементів для двовимірної постановки. На рис. 1 представлено ескіз індукційної системи, що використовується для моделювання методом скінченних елементів. Зварний шов проходить по осі  $x$ . Індуктор в процесі оброблення зварного шва рухається справа наліво слідом за зварювальним пальником. Тут магнітопровід 1 і феромагнітна платформа 4 мають нелінійний параметр магнітної проникності  $\mu(\mathbf{B})$  (рис. 2), електрична провідність магнітопроводу 1 –  $\sigma = 0$  См/м. Области 2 поперечного перерізу обмотки суцільні, без урахування наведення вихрових струмів, і в них протікає заданий сумарний струм усіх витків обмотки. Дослідження густини струму та магнітного тиску виконується під обмоткою на області 5 (рис. 1) довільної ширини  $l_e$ , де вони мають найбільші значення.

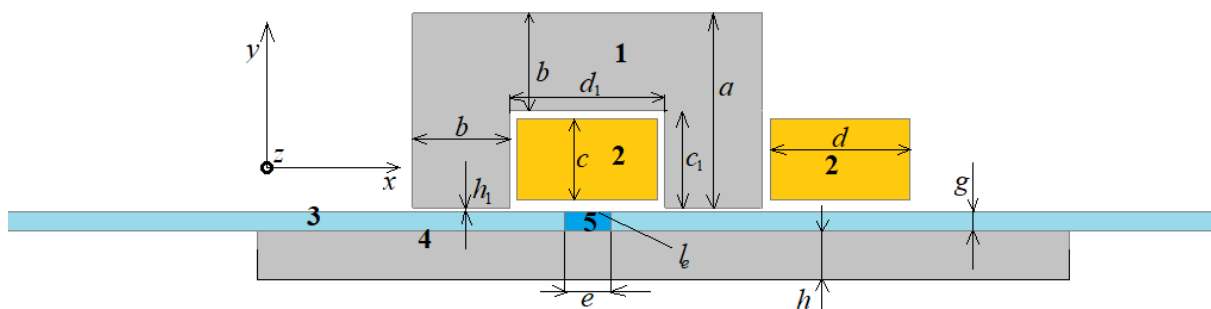


Рис. 1

**Рівняння магнітного поля.** Для розрахунку електромагнітних полів електромагнітної системи використовуються відомі рівняння:

$$\begin{aligned} \operatorname{rot} \mathbf{H} &= \mathbf{j}, \operatorname{rot} \mathbf{A} = \mathbf{B}, \operatorname{div} \mathbf{B} = 0, \operatorname{rot} \mathbf{E} = -\partial \mathbf{B} / \partial t, \\ \mathbf{E} &= -\partial \mathbf{A} / \partial t, \mathbf{B} = \mu \mathbf{H}, \mathbf{j} = \sigma \mathbf{E} + \mathbf{j}_s. \end{aligned} \quad (2)$$

Тут  $\mathbf{H}$ ,  $\mathbf{j}$ ,  $\mathbf{A}$ ,  $\mathbf{B}$ ,  $\mathbf{E}$ ,  $\mathbf{j}_s$  – відповідно вектори напруженості магнітного поля, густини струму, векторного магнітного потенціалу, індукції магнітного поля, напруженості електричного поля, густини струму джерела живлення,  $t$  – час. На основі (2) одержано наступне рівняння магнітного поля для векторного магнітного потенціалу [11]:

$$\operatorname{rot}(\operatorname{rot} \mathbf{A} / \mu) = -\sigma \partial \mathbf{A} / \partial t + \mathbf{j}_s. \quad (3)$$

У моделі індукційної системи присутня лише складова  $A_z$  векторного магнітного потенціалу. Тому рівняння (3) має вигляд

$$\operatorname{rot}_z(\operatorname{rot}(\bar{z} A_z) / \mu) = -\sigma \partial A_z / \partial t + j_{sz}, \quad (4)$$

де  $\bar{z}$  – одиничний вектор по координаті  $z$ . Густина струму джерела живлення  $j_{sz}$ , що присутня в областях 2 (рис. 1),

$$j_{sz} = \zeta \frac{i(t)}{s_w k_a}, \text{ де } k_a = \frac{s_a}{s_w N_w}, s_a = c \cdot d, \quad (5)$$

$\zeta$  – полярність струму в перерізі обмотки 2 (рис. 1);  $i(t)$  – функція струму залежно від часу;  $s_w$  – поперечний переріз одного провідника обмотки;  $k_a$  – коефіцієнт відношення поперечного перерізу  $s_a$  області обмотки 2 (рис. 1) до сумарного поперечного перерізу провідників у ній;  $N_w$  – кількість поперечних перерізів витків обмотки (рис. 1). Рівняння магнітного поля (4) з урахуванням (5) запишеться таким чином:

$$\operatorname{rot}_z \left( \frac{\operatorname{rot}(\bar{z} A_z)}{\mu} \right) + \sigma \frac{\partial A_z}{\partial t} = \zeta \frac{i(t) N_w}{s_a}. \quad (6)$$

**Рівняння електричного кола.** Індукційна система (рис. 1) живиться від зарядженого до певної напруги конденсатора. Електричне коло (рис. 3 а) складається з конденсатора, індуктивності  $L$  та активного опору  $r$ . Диференціальне рівняння електричного кола має вигляд [12]

$$\frac{\partial \psi}{\partial t} + ri + \frac{1}{C} \int i dt + u_{c(t=0)} = 0. \quad (7)$$

Тут  $\psi$  – потокозчеплення, що визначається із розв'язку рівняння (5) для кожного моменту часу  $t = t_0, t_1, \dots, t_n$  мкс;  $i$  – миттєве значення струму в провідниках електричного кола;  $r$  – сумарний активний опір в електричному колі;  $C$  – ємність конденсатора;  $u_c(0)$  – напруга конденсатора в момент часу  $t = 0$ . З урахуванням визначення потокозчеплення  $\psi$  із розв'язку рівняння (6), з урахуванням (5), рівняння електричного кола (7) має вигляд

$$\zeta \frac{N_w l'}{s_a} \int \frac{\partial A_z}{\partial t} ds_a + ri + \frac{1}{C} \int i dt = -u_{c(t=0)}. \quad (8)$$

Тут  $l'$  – глибина моделі (рис. 1) по координаті  $z$ .

**Результати дослідження.** Розрахунок електромагнітного поля індукційної системи (рис. 1) та струму  $i(t)$  в електричному колі (рис. 3 а) виконується чисельним методом зі спільним розв'язанням рівняння магнітного поля (6) та електричного кола (8) для моментів часу  $t = 0, 5, \dots, 600$  мкс. Для цього задано такі

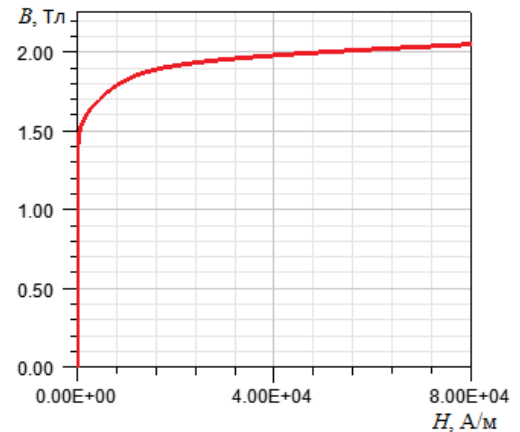


Рис. 2

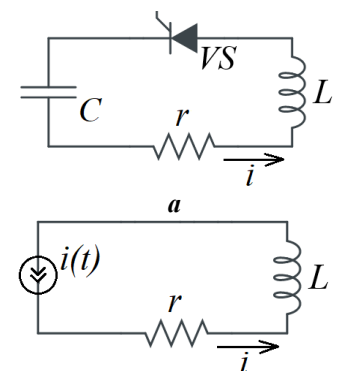


Рис. 3

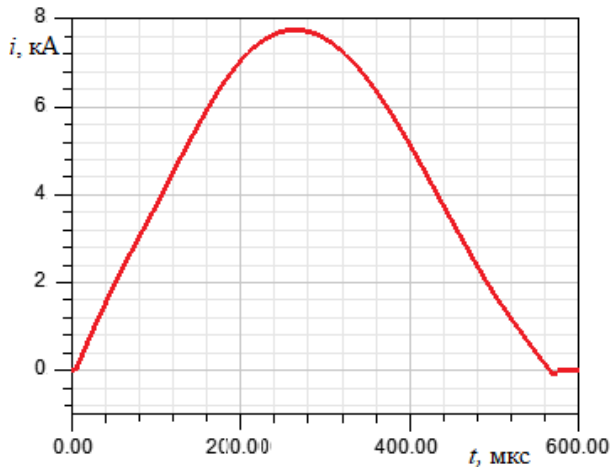


Рис. 4

параметри електричного кола (рис. 3 а): ємність конденсатора –  $C = 2$  мФ; напруга зарядженого конденсатора в початковий момент часу –  $u_c(0) = 800$  В; активний опір обмотки  $r = 0,008$  Ом;  $N_w = 36$  сумарно в двох перерізах обмотки 2 (рис. 1). Розміри моделі (рис. 1):  $a = 50$  мм;  $b = 25$  мм;  $c = 21$  мм;  $d = 36$  мм;  $e = 12$  мм;  $g = 2$  мм;  $h_1 = 0,5$  мм;  $c_1 = 25$  мм;  $d_1 = 40$  мм;  $l' = 100$  мм;  $l_e = 12$  мм. Товщина феромагнітної платформи  $h = 20$  мм вибрана такою, щоб електромагнітне поле не проникало на всю її товщину і таким чином виключити вплив цієї товщини на насичення магнітним полем. Електропровідність феромагнітної платформи –  $2 \times 10^6$  См/м. Електропровідність немагнітної пластини  $19 \times 10^6$  См/м, що відповідає умовній глибині проникнення 4 мм електромагнітного поля в немагнітну пластину (1), яка в 2 рази більше, ніж товщина пластини. У результаті одержано залежність струму в обмотці індуктора від часу –  $i(t)$  (рис. 4). Струм зростає на проміжку часу від 0 до 270 мкс і має увігнутість близько 120 мкс, наявність якої пояснюється переходом магнітопроводу в насичений стан.

Для досягнення мети роботи використовується електричне коло, що зображено на рис. 3 б, у якому джерело струму  $i(t)$  є функцією, яка представлена кривою на рис. 4. Таким чином, незмінність імпульсного струму в обмотці індукційної системи дасть змогу в усіх випадках одержати однакове первинне магнітне поле. Тоді вторинне магнітне поле, що створене вихровими струмами в пластині та платформі, буде залежати лише від параметрів платформи та пластини. Якщо задати не струм, а напругу, тоді на результати розрахунків будуть впливати параметри електричного кола, і оцінити вплив параметрів феромагнітної платформи на густину струму та магнітний тиск зварного шва буде складно.

Розрахунок індукції магнітного поля,  $z$ -складової густини струму  $j_z$  та  $y$ -складової густини магнітного тиску  $F_y$  [13] виконується за виразами:

$$\mathbf{B} = \text{rot}(\vec{z}A_z), \quad (9)$$

$$j_z = \text{rot}_z(\mathbf{B}/\mu), \quad (10)$$

$$F_y = (B_y^2 - B^2/2)/\mu. \quad (11)$$

Для знаходження усередненого магнітного тиску та усередненої густини струму на поверх-

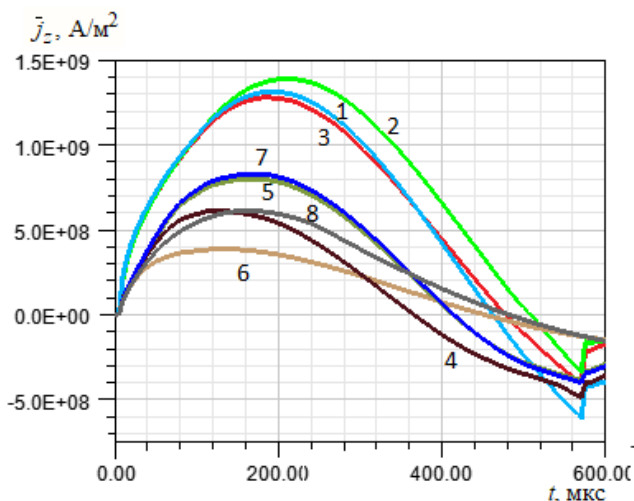


Рис. 5

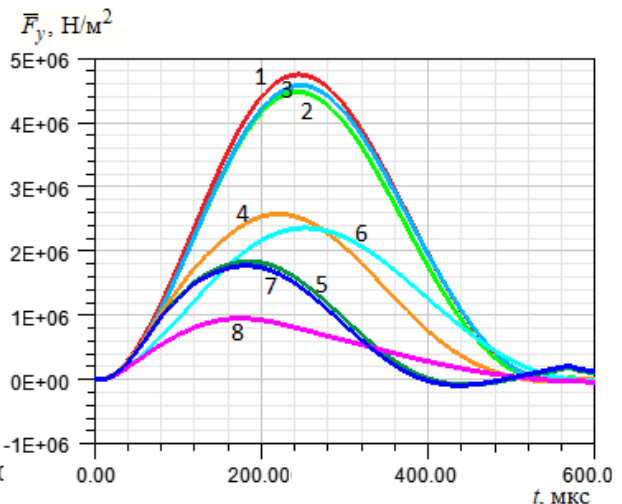


Рис. 6

ню 5 немагнітної пластини 3 (рис. 1) представлені далі вирази (12) і (13) інтегруються по лінії  $l_e$  (рис. 1), шириною 12 мм, на поверхні зварного шва:

$$\bar{j}_z = \frac{1}{l_e l_e} \int j_z dl_e, \quad (12)$$

$$\bar{F}_y = \frac{1}{l_e l_e} \int F_y dl_e. \quad (13)$$

На рис. 5 представлено усереднену на поверхні зварного шва 5 (рис. 1) густину струму  $\bar{j}_z$  (12), а на рис. 6 – магнітний тиск  $\bar{F}_y$  (13). У таблиці наведено параметри немагнітної пластини та феромагнітної платформи, за яких одержано криві 1...10 на рис. 5, 6, а також порівняння максимальних та мінімальних значень густини струму із рис. 5 і максимальних значень магнітного тиску із рис. 6.

Криві на рис. 5 і 6	Немагнітна пластинка	Феромагнітна платформа		Дані з рис. 5		Дані з рис. 6
				$j_{\max}, 10^8 \text{ А/м}^2$	$j_{\min}, 10^8 \text{ А/м}^2$	$F_{\max}, 10^6 \text{ Н/м}^2$
1	$\sigma = 19 \text{ МСм/м}$	платформа відсутня		13,13	-6,095	4,746
2		$\sigma = 2 \text{ МСм/м}$	$\mu = 2\mu_0 \text{ кГн/м}$	13,89	-3,376	4,472
3			$\mu(\mathbf{B})$ (рис. 2)	12,78	-4,021	4,576
4	$\sigma = 3 \text{ МСм/м}$	платформа відсутня		6,135	-4,838	2,579
5		$\sigma = 2 \text{ МСм/м}$	$\mu = 2\mu_0 \text{ кГн/м}$	8,012	-3,845	1,844
6			$\mu(\mathbf{B})$ (рис. 2)	3,893	-1,435	2,361
7		$\sigma = 0 \text{ МСм/м}$	$\mu = 2\mu_0 \text{ кГн/м}$	8,296	-3,962	1,775
8			$\mu(\mathbf{B})$ (рис. 2)	6,124	-1,526	0,957

Відомо, що феромагнітна платформа має вплив на густину струму в немагнітній пластині, якщо скін-ефект у немагнітній пластині не менше товщини цієї пластини [10]. Оскільки тривалість імпульсу струму (рис. 4) майже 600 мкс, то умовна глибина проникнення (скін-ефект) у немагнітній пластині становить близько 4 мм (1), що в 2 рази більше, ніж товщина пластини. На рис. 7 представлено скалярне значення індукції магнітного поля (10) під обмоткою індуктора на поверхні феромагнітної платформи для кривих 3 (таблиця, рис. 5, 6). Починаючи з часу 80 мкс, поверхня феромагнітної платформи входить у насичений стан відповідно до рис. 2. Встановлено (рис. 5, таблиця, криві 1, 2), що наявність феромагнітної платформи без урахування кривої намагнічування дає змогу збільшити максимальну густину струму на 5,7 %, а з урахуванням кривої намагнічування (крива 3) із насиченою поверхнею феромагнітної платформи – зменшити на 2,7 %.

З використанням феромагнітної платформи з постійною магнітною проникністю (таблиця, рис. 5, крива 2) густина струму з протилежною полярністю на 44,6 % менша порівняно з варіантом без платформи (крива 1). А з урахуванням кривої намагнічування – відповідно на 34,0 % (криві 1, 3).

З використанням немагнітної пластини з електропровідністю 3 МСм/м умовна глибина проникнення (1) електромагнітного поля в немагнітну пластину (~10 мм) у 5 разів більша, ніж товщина пластини (2 мм). Встановлено, що наявність феромагнітної платформи з урахуванням кривої намагнічування (таблиця, рис. 5, крива 6) спричинило зниження максимальної густини струму на 36,5 %, порівняно з кривою 4. Якщо криву намагнічування не враховувати, то навпаки – на 30,6 % густина струму

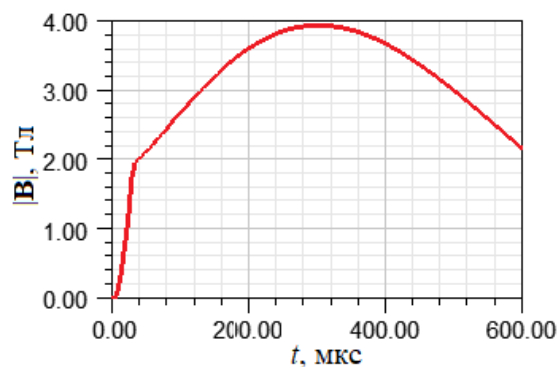


Рис. 7

зростає (крива 5). Мінімальна густина струму зі знаком мінус на поверхні зварного шва на 20,5 % менша (крива 5) з платформою без врахування кривої намагнічування і менша на 70,3 % з наявністю феромагнітної платформи з урахуванням кривої намагнічування (крива 6).

Порівнюючи криві 5 і 7 на рис. 5, які відповідно з електропровідною та неелектропровідною феромагнітною платформою без урахування її кривої намагнічування, встановлено, що електрична провідність платформи збільшує густину струму на поверхні немагнітної пластини на 3,5 %. Але з урахуванням кривої намагнічування (рис. 2) верхня поверхня феромагнітної платформи переходить у насичений стан (як показано на рис. 7). І тому, порівнюючи криві 6 і 8 (урахування насичення), бачимо, що електрична провідність феромагнітної платформи має значний вплив на густину струму на поверхні немагнітної пластини – з непровідною платформою (крива 8) максимальне значення густини струму на поверхні зварного шва таке, як і у випадку без платформи (крива 4), але дещо зміщене в часі.

За наявності феромагнітної платформи магнітний тиск (рис. 6) на немагнітну пластину менший на 5,7 і 3,6 % відповідно без урахування і з урахуванням кривої намагнічування платформи з електропровідністю немагнітної пластини 19 МСм/м (криві 1, 2, 3). А також на 28,4 та 8,5 % відповідно з пластиною 3 МСм/м (криві 4, 5, 6). Якщо феромагнітна платформа не є електропровідною, тоді відповідно 31,1 і 62,9 % (криві 4, 7, 8). Тобто в будь-якому випадку спостерігається зменшення магнітного тиску за наявності феромагнітної платформи. Чим більша проникність електромагнітного поля через немагнітну пластину (або чим менша електропровідність пластини), тим більший вплив феромагнітної платформи і тим менший магнітний тиск, що діє на немагнітну пластину.

**Висновок.** Встановлено, що в процесі моделювання електромагнітної системи для магнітоімпульсного оброблення зварних швів потрібно виконувати врахування кривої намагнічування феромагнітної платформи, оскільки у разі магнітоімпульсної обробки індукція магнітного поля на поверхні платформи сягає більше 3 Тл, і верхня частина платформи входить у насичений стан. Використання електропровідної феромагнітної платформи, яка насичується, призвело до зменшення на 2...36 % (залежно від електропровідності немагнітної пластини) максимальної густини струму на поверхні немагнітної пластини, яка оброблюється, у порівнянні з магнітною системою без платформи. Якщо магнітна проникність феромагнітної платформи в використаній моделі електромагнітної системи постійна, то результати протилежні – густина струму на поверхні зварного шва більша відповідно на 5...30 %. Використання неелектропровідної платформи, яка насичена магнітним полем, призвело до такої густини струму на поверхні зварного шва, як і без платформи. В усіх випадках феромагнітна платформа дає змогу зменшити густину струму з протилежною полярністю в немагнітній пластині у кінці імпульсу від 33 до 70 % залежно від її електропровідності. Магнітна сила зменшується відповідно на 3...8 % з електропровідною платформою і до 62 % з неелектропровідною платформою.

1. Кузнецов Н.Н. Влияние электро- и магнитно-импульсного воздействия на заготовку. *Обработка материалов давлением*. 2010. № 3(24). С. 126–129. URI: [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)
2. Комшина А.В., Помельникова А.С. Перспективность метода низкоэнергетической обработки материалов с использованием магнитного поля. *Наука и Образование*. 2012. № ФС77 – 48211. С. 463–488. DOI: <http://dx.doi.org/10.7463/0912.0454270>
3. Лобанов Л.М., Кондратенко І.П., Михальський В.М., Пашин М.О., Карлов О.М., Чопик В.В., Міходуй О.Л. Електротехнічний комплекс для електродинамічної обробки зварних з'єднань. *Технічна електродинаміка*. 2020. № 6. С. 61–68. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2020.06.061>
4. Andrea D., Burlata T., Körkemeyerb F., G. Gersteinb J.S.K.-L.Gibsona, S. Sandlöbes-Hauta, S. Korte-Kerzel Investigation of the electroplastic effect using nanoindentation. *Materials & Design*. 2019. Vol. 183. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108153>
5. Troitsky O.A. and Stashenko V.I. Advantages of drawing and rolling metals with pulse current *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/848/1/012084>

6. Васецький Ю.М., Кондратенко І.П. Електромагнітне поле індукторів для локального електроімпульсного впливу на металеві вироби. *Технічна електродинаміка*. 2020. № 4. С. 11–14. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2020.04.011>
7. Kryshchuk R.S. Influence of winding ends on the parameters of pulse inductor with U-shaped core. *Технічна електродинаміка*. 2020. № 6. С. 69–76. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2020.06.069>
8. Ращепкін А.П., Кондратенко І.П., Карлов О.М., Крищук Р.С. Магнітні сили і струми індуктора для магнітно-імпульсної обробки зварних з'єднань немагнітних тонкостінних металів. *Технічна електродинаміка*. 2020. № 5. С. 74–79. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2020.05.074>
9. Ращепкін А.П., Кондратенко І.П., Карлов О.М., Крищук Р.С. Вплив П-подібного магнітопроводу імпульсного індуктора з двома котушками на вихрові струми тонкостінних немагнітних металів у процесі магнітоімпульсної обробки. *Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України*. 2021. № 59. С. 20–27. DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2021.59.020>
10. Ращепкін А.П., Кондратенко І.П., Карлов О.М., Крищук Р.С. Метод розрахунку електромагнітного поля спіралеподібної індукційної системи для магнітоімпульсного оброблення немагнітних металевих смуг з феромагнітним екраном. *Технічна електродинаміка*. 2022. № 2. С. 43–51. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2022.02.043>
11. Вольдек А.И. Индукционные магнитогидродинамические машины с жидкометаллическим рабочим телом. Л.: Энергия, 1970. 272 с.
12. Нейман Л.Р., Демирчян К.С. Теоретические основы электротехники. Том 2. М.-Л.: Энергия, 1966. 407 с.
13. Тамм И. Е. Основы теории электричества: Учеб. пособие. М.: Физматлит, 2003. 616 с.

## CURRENTS AND ELECTROMAGNETIC FORCES IN MAGNETIC PULSE TREATMENT SYSTEMS WITH FERROMAGNETIC PLATFORM

**I.P. Kondratenko, A.N. Karlov, R.S. Kryshchuk**

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,  
pr. Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine  
e-mail: dep7ied@ukr.net

*The action of high-density pulsed currents ( $10^9$  A/m<sup>2</sup>) leads to the appearance of the electro-plastic effect in metal products. It is proposed to use magnetic pulse treatment of nonmagnetic plates by electromagnetic inductors with a U-shaped magnetic circuit for local flow pulsed currents in the nonmagnetic plates. The work aims to establish an influence of a ferromagnetic platform with nonlinear magnetic permeability on pulsed eddy currents and magnetic pressure of nonmagnetic metal plates with different electrical conductivity in modeling magnetic pulse treatment of welded joints to achieve the electro-plastic effect. Numerical simulation of pulsed electromagnetic fields by the finite element method is used. The current calculation in the inductor's winding is performed by solving the equations of the magnetic field and the electric circuit equations for a discrete-time interval. A power source is a capacitor that is charged to a specific voltage. To study the effect of the ferromagnetic platform on eddy currents and forces in a nonmagnetic plate with its different electrical conductivity, the same pulsed current in the inductor's winding is used. The dependence of amplitude values of eddy current density and magnetic pressure on the surfaces of nonmagnetic plates of different electrical conductivity is investigated. The influence of the presence and absence of a ferromagnetic platform and its electrical conductivity and magnetic permeability on the values of eddy currents and magnetic pressure in the nonmagnetic plate have been studied. Ref. 13, fig. 7, table.*

**Keywords:** magnetic pulse treatment, U-shaped magnetic conductor, pulsed eddy current, magnetic forces, ferromagnetic platform.

1. Kuznetsov N.N. Influence of electric and magnetic-pulse action on raw stock. *Obrabotka materialov davleniem*. 2010. No 3(24). Pp. 126–129. URI: [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) (Rus)
2. Komshina A.V., Pomel'nikova A. S. Promising method of low-energy materials processing using a magnetic field *Nauka I Obrazovanie*. 2012. No FS77 – 48211. Pp. 463–488. DOI: <http://dx.doi.org/10.7463/0912.0454270> (Rus)
3. Lobanov L.M., Kondratenko I.P., Mikhalskiy V.M., Pashchin M.O., Karlov O.M., Chopyk V.V., Mykhodui O.L. Electrotechnical complex for electrodynamic processing of welded joints. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2020. No 6. Pp. 61–68. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2020.06.061> (Ukr)
4. Andrea D., Burlleta T., Körkemeyerb F., G. Gersteinb J.S.K.-L.Gibsona, S. Sandlöbes-Hauta, S. Korte-Kerzel Investigation of the electroplastic effect using nanoindentation. *Materials & Design*. 2019. Vol. 183. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108153> (Eng)
5. 7. Troitsky O.A. and Stashenko V.I. Advantages of drawing and rolling metals with pulse current. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/848/1/012084> (Eng)

6. Vasetsky Yu.M., Kondratenko I.P. Electromagnetic field of the inductor for local electric pulse effects on metal products. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2020. No 4. Pp. 11–14. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2020.04.011> (Ukr)
7. Kryshchuk R.S. Influence of winding ends on the parameters of pulse inductor with U-shaped core. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2020. No 6. Pp. 69–76. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2020.06.069> (Eng)
8. Rashchepkin A.P., Kondratenko I.P., Karlov A.N., Kryshchuk R.S. Magnetic forces and currents of the inductor for magnetic-pulse processing of welding joints of non-magnetic thin sheet metals. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2020. No 5. Pp. 74–79. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2020.05.074> (Ukr)
9. Rashchepkin A.P., Kondratenko I.P., Karlov A.N., Kryshchuk R.S. Influence of U-shaped magnetic core of inductor with two coils on eddy currents of thin-walled non-magnetic metal plates in process of magneto-pulsed treatment. *Pratsi Instytutu Elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy*. 2021. Issue 59. Pp. 20–27. DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2021.59.020>
10. Raschepkin A.P., Kondratenko I.P., Karlov O.M., Kryshchuk R.S. A method for calculating electromagnetic field of a spiral type induction system for magnetopulse processing of non-magnetic metal strips with a ferromagnetic shield. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2022. No 2. Pp. 43–51. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2022.02.043> (Ukr)
11. Voldek A.I. Induction magnetohydrodynamic machines with liquid working body. Leningrad: Energiia, 1970. 272 p. (Rus)
12. Neumann L.R., Demirchyan K.S. Theoretical foundations of electrical engineering. Volume 2. Moskva-Leningrad: Energiia, 1966. 407 p. (Rus)
13. Tamm I.E. Theory of electricity. Moskva: Nauka, 1976. 616 p. (Rus)

Надійшла: 29.04.2022

Received: 29.04.2022