

ЕЛЕКТРОТЕХНОЛОГІЧНІ КОМПЛЕКСИ ТА СИСТЕМИ

УДК 537.85

DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2021.59.020>**ВПЛИВ П-ПОДІБНОГО МАГНІТОПРОВОДУ ІМПУЛЬСНОГО ІНДУКТОРА З ДВОМА КОТУШКАМИ НА ВИХРОВІ СТРУМИ ТОНКОСТІННИХ НЕМАГНІТНИХ МЕТАЛІВ У ПРОЦЕСІ МАГНІТОІМПУЛЬСНОЇ ОБРОБКИ****А.П. Ращепкін**^{*}, докт. техн. наук, **І.П. Кондратенко**^{**}, чл.-кор. НАН України,**О.М. Карлов**^{***}, канд. техн. наук, **Р.С. Кришук**^{****}, канд. техн. наук

Інститут електродинаміки НАН України,

пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна

e-mail: anatoly_raschepkin@ukr.net, dep7ied@ukr.net, lexa.k.ua@gmail.com, kr@nas.gov.ua

Виконано огляд літературних джерел щодо застосування імпульсного електричного струму для створення електропластичного ефекту в металевих деталях. Для оброблення тонкостінних металевих пластин з прямолінійними зварними швами досліджується імпульсний індуктор із П-подібним магнітопроводом. У випадку наявного магнітопроводу відносна магнітна проникність може мати низькі значення, тому використання магнітопроводу може бути недоцільним. Метою роботи є встановлення впливу наявності магнітопроводу індуктора на напругу, струм, магнітні сили в разі досягнення густини вихрових струмів 10^9 А/м² у зварному шві немагнітної тонкостінної металевої пластини. Використовується двовимірний розподіл електромагнітного поля з приведенням параметрів двовимірної моделі до тривимірної. Джерелом імпульсного струму в обмотці індуктора є заряджений до певної напруги конденсатор. Для визначення струму в обмотці індуктора розв'язується рівняння електричного кола. Визначено вплив розмірів магнітопроводу на напругу і струм в обмотці індуктора. Досліджено вплив магнітопроводу на перехідні процеси напруги конденсатора і індуктора, струму в обмотці і зварному шві металевої немагнітної пластини, магнітної сили в зварному шві. Досліджено вплив магнітопроводу на розподіл напруженості магнітного поля, струмів і магнітної сили по поверхні пластини в ділянці зварного шва. Бібл. 13, рис. 4, таблиця.

Ключові слова: електропластичний ефект, магнітоімпульсне оброблення, електромагнітні перехідні процеси, феромагнітний магнітопровід.

Унаслідок дії імпульсного електричного струму певної густини в металах виникає ефект електропластичності. Якщо в матеріалі є залишкові механічні напруження, наприклад, у зварному шві, то внаслідок дії ефекту електропластичності напружений стан може змінитися – напруження зменшуються або навіть інвертуються. Якщо матеріал деформується, то електропластичний ефект буде сприяти деформуванню. Дослідження електропластичного ефекту виконуються в багатьох країнах [1–7]. Із літературних джерел відомо, що вперше електропластичність досліджували в кристалах цинку [6].

Наприклад, у роботі [5] наведено результат дослідження дії імпульсних струмів на матеріал Al-Cu густиною $1,66$ кА/мм², частотою пропускання 1 Гц, тривалістю $0,5$ мс. Одночасно з дією струму матеріал деформували зі швидкістю $0,1$ мм/хв. Із використанням імпульсного електричного струму і механічного впливу досягається більша пластичність металу, ніж без використання струму. Максимальний електропластичний ефект досягається за першого імпульса струму порівняно з наступними імпульсами. Завдяки збільшенню інтенсивності струму, тривалості імпульсу та швидкості деформації збільшуються зрушення в мікроструктурі матеріалу.

У роботі [7] встановлено режими імпульсного струму для прокатки нержавіючої сталі: амплітуда густини струму $j = 10^8 \dots 10^9$ А/м², тривалість імпульсу $150 \dots 200$ мкс, частота повторення імпульсу $500 \dots 800$ Гц. Також у [7] представлено рекомендації щодо застосування

електропластичного ефекту в разі формування металу тиском: механічне напруження є більшим межі текучості заготовки; імпульсний струм подається безпосередньо в зону деформації; форма імпульсів прямокутна або трапецієподібна; тривалість струму – 100...1000 мкс, щоб не відбувалося нагрівання металу; амплітуда густини струму – щонайменше $10^9 \dots 10^{10}$ А/м², щоб електрони провідності набували значних швидкостей дрейфу приблизно одного метра в секунду (швидкість "електронного вітру"). У [7] пропонується частоту повторювання імпульсів визначати представленою там формулою.

Доведено, що дія імпульсного струму високої густини (10^9 А/м²) може призводити до реалізації електропластичного ефекту в зварних конструкціях [1–3]. Електропластичний ефект у зварних швах проявляється у вигляді зменшення залишкових напружень. Для струму густиною 10^9 А/м² рекомендується тривалість імпульсів $10^{-4} \dots 10^{-3}$ с [1–3, 5, 7].

Досліджено використання лінійного електромеханічного перетворювача індукційного типу [3], у якому подача електричного струму на зварний шов здійснюється за допомогою електродів. Такий спосіб подачі струму дасть змогу досягати потрібної густини струму локально в товстостінних конструкціях і з криволінійними зварними швами. Після дії електроду електромеханічного перетворювача можуть залишатися сліди дотику. Тому для їхнього уникнення пропонується використовувати індуктор для створення вихрових імпульсних струмів високої густини в зварних швах [8–10].

У [9] досліджено електромагнітне поле індукційної системи, що складається з одновиткового контуру. Такий пристрій має невеликі розміри, що дасть змогу використовувати його для оброблення зварних швів криволінійних конструкцій та у важкодоступних місцях, а також оброблення тонкостінних пластин. Багатовитковий індуктор з П-подібним магнітопроводом з двома котушками (рис. 1) для оброблення прямолінійних зварних швів тонкостінних пластин досліджено в [8, 10]. Такий індуктор дає змогу зменшити струм в електричному колі проти одновиткового, але в цьому разі збільшується напруга на виводах обмотки.

Для досягнення в тонкостінних пластинах густини вихрових струмів 10^9 А/м² потрібна висока напруженість магнітного поля (від 2×10^3 А/м). Якщо йдеться про індуктор із магнітопроводом, то останній може входити в насичений стан. У разі насиченого магнітопроводу його відносна магнітна проникність буде мати низькі значення. Є припущення, що використання магнітопроводу є недоцільним. Відомо, що імпульсні індуктори без магнітопроводу характеризуються вищою швидкістю і значною імпульсною механічною потужністю і застосовуються під час магнітно-імпульсної обробки тонкостінних металів і оболонок та в наукових дослідженнях [11]. З іншого боку, дослідження [12] показує, що наявність магнітопроводу в індукторах для магнітоімпульсного оброблення металевих пластин дає можливість досягати більшої густини струму.

Мета роботи. Встановити вплив магнітопроводу на напругу, струм, магнітні сили в разі досягнення густини вихрових струмів 10^9 А/м² у зварному шві немагнітної тонкостінної металеві пластина в імпульсній індукційній системі з П-подібним магнітопроводом і двома котушками обмотки для створення електропластичного ефекту в металевих немагнітних пластинах зі зварними швами.

На рис. 1 наведено ескіз індукційної системи в площині xOy декартової системи координат x, y, z . Ескіз є незмінним вздовж координати z . Позначення на рис. 1: 1 – магнітопровід, 2 – провідники обмотки, 3 – металева немагнітна пластина, 4 – зварний шов, 5 – поверхня пласти, що міститься під чотирма провідниками завширшки $c/2$. Магнітопровід індукційної системи має ширину a , обмотка в магнітопроводі має висоту b і ширину c . Немагнітна електропровідна пластина під індуктором має товщину d . Відстань між

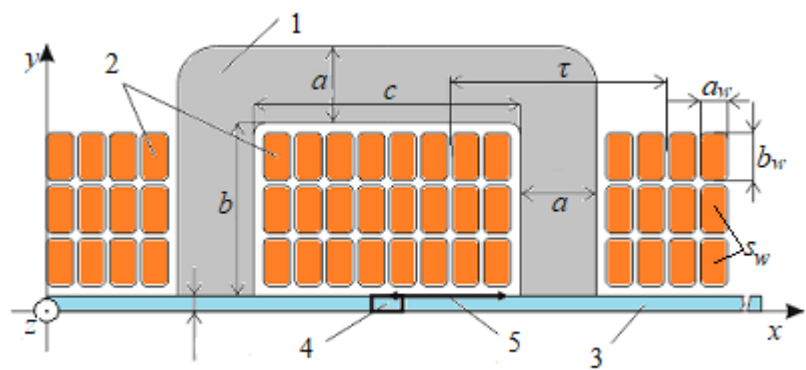


Рис. 1

пластиною і магнітопроводом у загальному випадку може змінюватися, але в цій роботі прийнято припущення, що вона ідеальна і дорівнює нулю. Тобто індуктор лежить на пластині з рівною поверхнею. Мідні провідники прямокутного перерізу $a_w \times b_w$ (наприклад, ІЕС 60317-0-2:2013), на відміну від круглих, даватимуть можливість більш щільно виконати обмотку. Такі провідники розраховані на температуру до 473 К. У загальному випадку кількість витків N вибирається залежно від напруги живлення, а ширина обмотки c – залежно від ширини зварного шва 4 і ширини поверхні 5 навколо зварного шва (рис. 1). Ескіз індукційної системи (рис. 1) використовується для моделювання електромагнітного поля методом скінченних елементів у двовимірній постановці.

Приймається умова, що струм в обмотці має бути не більш ніж 9 кА, а напруга – не більш ніж 1 кВ. Оскільки зростання величини струму та напруги веде до більш значної вартості електронних компонентів джерела живлення індукційної системи та зростання класу ізоляції, то приймається умова, що струм в обмотці має бути не більше 9 кА, а напруга – не більше 1 кВ. Також прийнято, що ділянка зварного шва 4 на рис. 1 має такі ж електрофізичні параметри, як уся металева пластина 3.

Передбачувана тривалість імпульсу струму лежить у межах 500...1000 мкс [1–3, 5, 7], що еквівалентно половині періоду синусоїдного струму частотою 1000...500 Гц. Оскільки лінії магнітного потоку за наявності магнітопроводу є паралельні до поверхні металевої пластини, то ефект витіснення струму має напрямок за координатою y (рис. 1). Тому висота мідного провідника (b_w , рис. 1) рівна подвійній величині глибини проникнення струму ($b_w = 6,30$ мм) за найменшої частоти струму ($f = 500$ Гц), що вибрана для розрахунку, і за електропровідності нагрітого мідного провідника $\sigma = 50 \times 10^6$ См/м. Ширина провідника (a_w , рис. 1) відповідає максимальному стандартному значенню $a_w = 3,55$ мм (ІЕС 60317-0-2:2013). Радіус заокруглення провідників 0,80 мм, номінальний переріз провідників $s_w = 21,82$ мм². Розмір магнітопроводу a задається у вигляді ряду: $a = 10, 15, \dots, 50$ мм. Магнітопровід складається із листів електротехнічної сталі 0,5 мм. Під час розрахунку враховується крива намагнічування сталі 20JNEH1200. Тонкостінна пластина немагнітного металу, на яку діє індуктор, виготовлена зі сплаву АМг6 завтовшки 2 мм електропровідністю 15×10^6 См/м.

Реальний магнітоімпульсний пристрій із П-подібним магнітопроводом має лобові частини, які не враховуються у двовимірній постановці, зображеній на рис. 1. Параметри двовимірної моделі (рис. 1) можна привести до параметрів тривимірної моделі. Один із таких варіантів запропоновано в роботі [8] – за допомогою коефіцієнту

$$k_{2D/3D} = l/l' = l/(l + \tau), \quad (1)$$

де l – реальна довжина магнітопроводу за координатою z , l' – довжина двовимірної моделі за координатою z , τ – полюсна відстань котушок (рис. 1). Такий спосіб приведення має похибку для опору та індуктивності в межах 0...10 % [13]. Довжину двовимірної моделі (рис. 1) для розрахунку електромагнітного поля задано такою: $l' = 75$ мм у разі ширини магнітопроводу $a = 10$ мм і відстані $\tau = 28,6$ мм. Для інших значень: $a = 15, \dots, 50$ мм довжина моделі відповідно $l' = 80, \dots, 115$ мм.

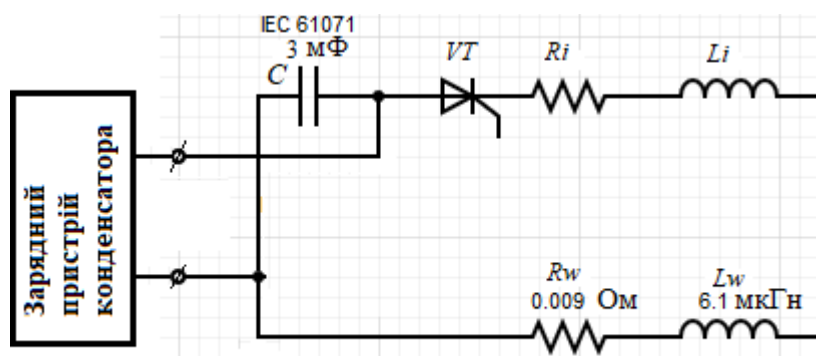


Рис. 2

На рис. 2 показано електричну схему, на якій конденсатор C з ємністю 3 мФ, тиристор VT для розмикання електричного кола після досягнення половини періоду колювання струму в обмотці. Під час розрядження конденсатора в електричному колі струм має вигляд загасаючої синусоїди. Після половини періоду синусоїди струм досягає значення $i(t) = 0$ А і елект-

ричне коло (рис. 2) розмикається тиристором VT . На схемі присутні активний опір та індуктивність індукційної системи (R_i, L_i) і електричного кола (R_w, L_w).

Розрахунок електромагнітного поля виконується для моментів часу $t = 0, 10, \dots, 1000$ мкс. Неоднорідне диференціальне рівняння стосовно A_z складової векторного магнітного потенціалу має бути розв'язане:

$$\text{rot}((\mu_r \mu_0)^{-1} \text{rot} A_z) + \sigma \partial A_z / \partial t = j_{0z}. \quad (2)$$

Тут t – час, j_{0z} – внесена густина струму, що в провідниках обмотки:

$$j_{0z} = i(t) / s_w, \quad (3)$$

Миттєве значення струму $i(t)$ визначається із нелінійного рівняння електричного кола, записаного за другим законом Кірхгофа (рис. 2):

$$\frac{\partial \psi(t)}{\partial t} + i(t)r + \frac{1}{C} \int_0^t i(t) dt + U_C(0) = 0. \quad (4)$$

Тут ψ – потокозчеплення, що визначається із розв'язку рівняння (2) для моменту часу t , $i(t)$ – струм у провідниках електричного кола (рис. 2), r – сумарний активний опір в електричному колі, C – ємність конденсатора, $U_C(0)$ – початкова напруга конденсатора в момент часу $t = 0$.

Розрахунок потокозчеплення проводиться для кожного поперечного перерізу витка s_w обмотки двовимірної моделі (рис. 1) за виразом:

$$\psi_n(t) = \frac{l'}{s_w} \int_{s_w} (A_{zn}(t) \cdot m_z) ds_w, \quad (5)$$

де $m_z = 1$ для поперечних перерізів витків (рис. 1), у яких напрямок струму j_{0z} збігається з координатою z , а $m_z = -1$ для витків з протилежним напрямком струму. Потокозчеплення обмотки індуктора є сумою потокозчеплень поперечних перерізів витків двовимірної моделі:

$$\psi(t) = \sum_1^N \psi_n(t), \quad (6)$$

де $N = 48$ – кількість перерізів витків двовимірної моделі на рис. 1.

Отже, підставляючи вираз потокозчеплення обмотки (6) в рівняння (4), приходимо до системи рівнянь (2), (4) для миттєвих значень густини струмів у котушці та миттєвих значень магнітного векторного потенціалу, яка розв'язується чисельними методами. За величиною магнітного векторного потенціалу знаходяться всі електромагнітні характеристики електромагнітного поля.

У таблиці наведено результат розрахунку з магнітопроводом (“core”) і без магнітопроводу (“coreless”) амплітудних значень напруги конденсатора $U_C(0)$ і струму в електричному колі $i(t)$. Для ряду значень ширини $a = 10, 15, \dots, 50$ мм (рис. 1) визначено напругу $U_C(0)$, за якої досягається амплітудне середнє значення густини струму $j = 10^9$ А/м² у ділянці зварного шва (рис. 1 – позначення 4). Встановлено (таблиця), що збільшення розміру a від 10 до 30 мм дає змогу зменшити струм на 27 % (з магнітопроводом) і на 9 % (без магнітопроводу), а напруга живлення зростає водночас на 7 % в обох випадках. Збільшення розміру a понад 30 мм не впливає суттєво на струм.

a , мм	l' , мм	j , А/м ²	$U_C(0)$, В ($t = 0$)		$i(t)$, кА	
			core	coreless	core	coreless
10	75	1×10^9	660	795	5,44	7,16
15	80		670	800	4,74	6,84
20	85		675	825	4,33	6,73
25	90		690	835	4,08	6,54
30	95		710	855	3,93	6,46
35	100		735	875	3,90	6,39
40	105		760	895	3,92	6,34
45	110		780	915	3,93	6,30
50	115		805	940	3,96	6,30

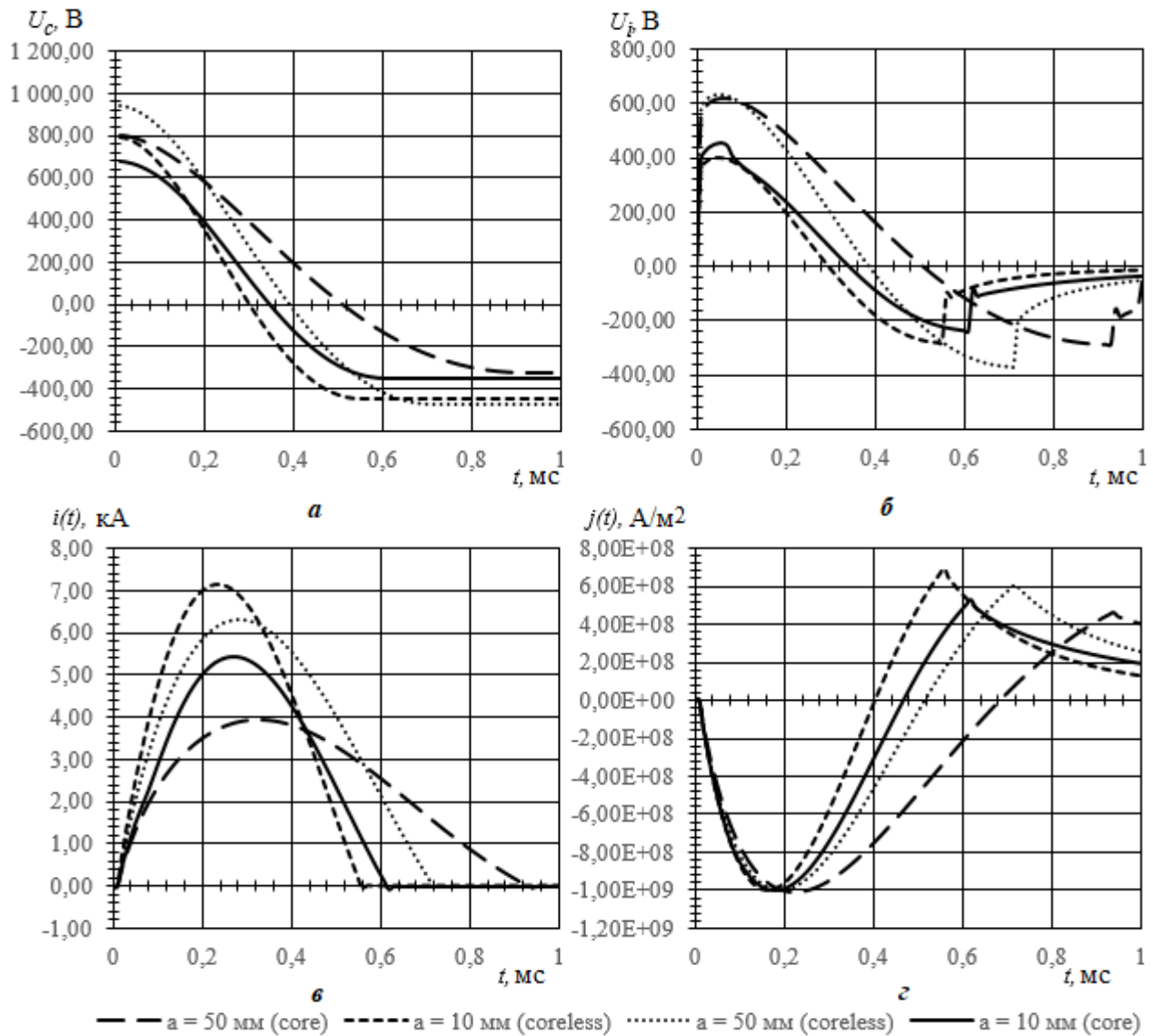


Рис. 3

Отже, є певний мінімальний розмір a , за якого струм в обмотці буде мінімальним за незмінної густини струму 10^9 A/m² у зварному шві. За розміру $a = 30$ мм струм із використанням магнітопроводу на 40 % менший, ніж без магнітопроводу.

На рис. 3: a – напруга конденсатора; $б$ – напруга на виводах обмотки індуктора; $в$ – струм в обмотці індуктора; $г$ – середня густина струму в зварному шві 4 (рис. 1). Напруга конденсатора (рис. 1 a) після розмикання електричного кола тиристором VT (рис. 2) має значення з протилежним знаком, а напруга на індукторі (рис. 1, $б$) повертається до нуля. Тривалість струму в обмотці індуктора (рис. 1 $в$) за $a = 50$ мм майже однакова і в разі наявності і в разі відсутності магнітопроводу порівняно з $a = 10$ мм, оскільки за $a = 10$ мм магнітопровід є більш насиченим. Середня густина струму в зварному шві (рис. 1 $г$) – двополярна в разі використання схеми, показаної на рис. 2, має однаковий мінімум (-10^9 A/m²) за умовою виконання розрахунків. Час, за якого досягається мінімум густини струму (рис. 1 $г$), різний: з магнітопроводом – це моменти часу 180 і 220 мкс відповідно в разі $a = 10$ і 50 мм, а без магнітопроводу – 160 і 190 мкс відповідно в разі $a = 10$ і 50 мм. Абсолютне значення максимуму густини струму (після розмикання електричного кола, рис. 1 $г$) у 2 рази менше мінімального.

На рис. 4: a – розподіл напруженості магнітного поля на лінії 5 (рис. 1); $б$ – розподіл густини струму на лінії 5; $в$ – середнє значення об'ємної густини магнітної сили в ділянці зварного шва 4 (рис. 1); $г$ – розподіл тиску на поверхню пластини лінією 5 у моменти часу, коли досягається максимальна густина струму в зварному шві (рис. 3 $в$) у разі протікання струму в електричному колі.

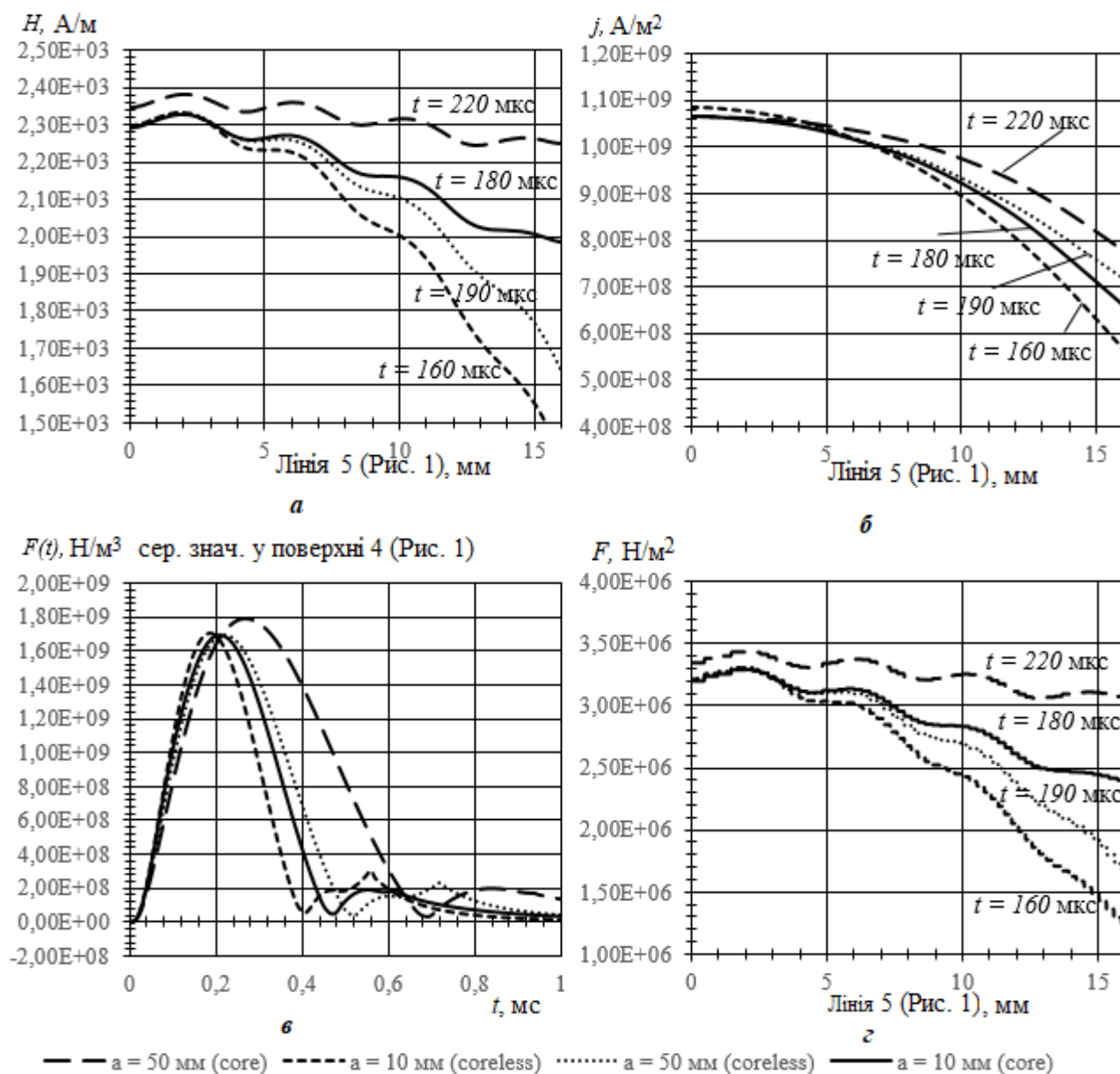


Рис. 4

Використання магнітопроводу дає змогу створити більш рівномірний розподіл напруженості магнітного поля в районі зварного шва за шириною вікна магнітопроводу (рис. 4 а). Подібний результат отримано і для тиску за шириною пластини (рис. 4 г). Оскільки за умовою було вибрано середнє значення густини струму в зварному шві 10^9 А/м², то розподіл густини струму за шириною пластини майже однаковий у всіх випадках (рис. 4 б). Об'ємна густина сили в зварному шві має однополярний імпульс і майже однакове амплітудне значення в усіх випадках (рис. 4 в), оскільки залежить від густини струму в пластині (рис. 4 б).

Висновок. У використаній моделі імпульсної індукційної системи з П-подібним магнітопроводом і двома котушками обмотки для створення електропластичного ефекту в металевих немагнітних пластинках зі зварними швами наявність магнітопроводу дає змогу зменшити амплітуду струму в обмотці до 40 %, а амплітуду напруги – до 7 %. Тривалість імпульсу струму в обмотці індуктора до 30 % більша за наявності магнітопроводу. У загальному випадку є така мінімальна ширина магнітопроводу, за якої досягається найменше значення струму в обмотці для набуття певної величини густини струму в зварному шві. Використання магнітопроводу дає змогу створити більш рівномірний розподіл напруженості магнітного поля й тиску за шириною листового немагнітного металу.

Роботу виконано за кошти бюджетної програми «Розвиток теорії електрофізичних процесів в імпульсних системах електромагнітної обробки електропровідних середовищ» («БАР'ЄР-2»). Державний реєстраційний номер теми 0117U007714.

1. Кузнецов Н.Н. Влияние электро- и магнитно-импульсного 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)
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. Nayanathara Hendeniya, Gayan Aravinda Abeygunawardena, Indika De. Silva, Shiranga Wickramasinghe The tensile electroplasticity of low carbon steel with low amplitude pulse current. *Moratuwa Engineering Research Conference (MERCOn)*, 2020. Pp. 165–169. DOI: <https://doi.org/10.1109/MERCOn50084.2020.9185238>
5. Andrea D., Burleta 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>
6. Троицкий О.А., Лихтман В.И. Об анизотропии действия электронного и γ -облучения на процесс деформации монокристаллов цинка в хрупком состоянии. *Докл. АН СССР*. 1963. Т. 148. № 2. С. 332–334.
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>
8. Рашепкін 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. 2020. № 5. С. 74–79. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2020.05.074>
9. 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>
10. Рашепкін А.П., Кондратенко І.П., Карлов О.М., Крищук Р.С. Електромагнітне поле індуктора з Ш-подібним осердям для магнітно-імпульсної обробки матеріалів. *Технічна електродинаміка*. 2019. № 6. С. 5–12. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2019.06.005>
11. Городжа К.А., Подольцев О.Д., Трошинський Б.А. Електромагнітні процеси в імпульсному електродинамічному випромінювачі для збудження пружних коливань у бетонних конструкціях. *Технічна електродинаміка*. 2019. № 3. С. 23–28. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2019.03.023>
12. Рашепкін А.П. Торцевий циліндричний індуктор з феромагнітним осердям для імпульсної струмової обробки площинного прокату металу. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*. 2020. № 55. С. 52–57. DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2020.55.052>
13. 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>

INFLUENCE OF A U-SHAPED MAGNETIC CORE OF AN INDUCTOR WITH TWO COILS ON EDDY CURRENTS OF THIN-WALLED NON-MAGNETIC METAL PLATES IN PROCESS OF MAGNETO-PULSED TREATMENT

A.P. Raschepkin, 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: anatoly_raschepkin@ukr.net, dep7ied@ukr.net, lexa.k.ua@gmail.com, kr@nas.gov.ua

A review of the literature on the use of pulsed electric current to create the electro-plastic effect in metal parts is performed. Inductor with a U-shaped magnetic core and pulsed current is investigated for processing thin-walled metal plates with rectilinear welds. With a saturated magnetic core relative magnetic permeability can be low, so using a magnetic core can be impractical. The aim of the work is to establish the influence of a magnetic core of an induction system on voltage, current and magnetic forces when reaching the eddy current density of 10^9 A/m² in the weld of a non-magnetic thin-walled metal plate. A two-dimensional model of the induction system with and without the magnetic core is investigated here. Simulation of the distribution of electromagnetic fields with the reduction of the parameters of the two-dimensional model to three-dimensional is performed. A capacitor charged to a certain voltage is a source of pulsed currents in inductor winding. The equation of the electric circuit for determining the current in the inductor's winding is solved. The influence of the dimensions of the magnetic core on voltage and currents in the inductor's winding is determined. The influence of the magnetic core on the transients of voltages of capacitor and inductor, the currents in the winding and the weld of the metal non-magnetic plate, the magnetic forces in the weld is studied. The influ-

ence of the magnetic core on the distribution of magnetic field strength, currents, and magnetic forces on the surface of the plate in the area of the weld is studied. Ref. 13, fig. 4, table.

Keywords: electro-plastic effect, magnetopulse processing, electromagnetic transients, ferromagnetic core.

1. Kuznetsov N.N. Influence of electric and magnetic-pulse action on raw stock. *Obrabotka materialov davleniem*. 2010. No 3(24). Pp. 126–129. URL: [http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/omd/3\(24\)-2010/nomer.htm](http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/omd/3(24)-2010/nomer.htm) 1 (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., Mikhalskyi 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/techmed2020.06.061> (Ukr)
4. Nayanathara Hendeniya, Gayan Aravinda Abeygunawardena, Indika De. Silva, Shiranga Wickramasinghe The tensile electroplasticity of low carbon steel with low amplitude pulse current. *Moratuwa Engineering Research Conference (MERCOn)*, 2020. Pp. 165–169. DOI: <https://doi.org/10.1109/MERCOn50084.2020.9185238> (Eng)
5. 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> (Eng)
6. Troitskii O.A.; Likhman V.I. The anisotropy of the action of electron- and gamma-radiation on the deformation process of brittle zinc single crystals. *Dokl. Akad. Nauk SS*. 1963. Vol. 148. (Rus)
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)
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/techmed2020.05.074> (Ukr)
9. 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/techmed2020.04.011> (Ukr)
10. Rashchepkin A.P., Kondratenko I.P., Karlov A.N., Kryshchuk R.S. Electromagnetic field of w-shaped inductor for magnetic-pulse processing of materials. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2019. No 6. Pp. 5–12. DOI: <https://doi.org/10.15407/techmed2019.06.005> (Ukr)
11. Gorodzha K.A., Podoltsev A.D., Troshchynckiy B.O. Electromagnetic processes in pulsed electrodynamic emitter to excite elastic vibrations in concrete structures. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2019. No 3. Pp. 23–28. DOI: <https://doi.org/10.15407/techmed2019.03.023> (Ukr)
12. Rashchepkin A.P. Threshold cylindrical inductor with ferromagnetic core for pulse current processing of flat rolling of metals. *Proc. of the Institute of Electrodynamics of the NAS of Ukraine*. 2020. Vol. 55. Pp. 52–57. DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2020.55.052> (Ukr)
13. Kryshchuk R.S. Influence of winding ends on the parameters of pulse inductor with U-shaped core. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2020. No 6. C. 69–76. DOI: <https://doi.org/10.15407/techmed2020.06.069> (Eng)

Надійшла 13.08.2021

Received: 13.08.2021