

МАГНІТНІ СИЛИ І СТРУМИ ІНДУКТОРА ДЛЯ МАГНІТНО-ІМПУЛЬСНОЇ ОБРОБКИ  
ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ НЕМАГНІТНИХ ТОНКОЛИСТОВИХ МЕТАЛІВ

А.П. Ращепкін<sup>1</sup>, докт.техн.наук, І.П. Кондратенко<sup>2</sup>, чл.-кор. НАН України,  
О.М. Карлов<sup>3</sup>, канд.техн.наук, Р.С. Крищук<sup>4</sup>, канд.техн.наук  
Інститут електродинаміки НАН України,  
пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна,  
e-mail: [anatoly\\_raschepkin@ukr.net](mailto:anatoly_raschepkin@ukr.net), [dep7ied@ukr.net](mailto:dep7ied@ukr.net), [lexa.k.ua@gmail.com](mailto:lexa.k.ua@gmail.com), [kr@nas.gov.ua](mailto:kr@nas.gov.ua)

З метою усунення залишкових напружень у зварних швах тонколистових немагнітних металів розглядається можливість застосування магнітно-імпульсної обробки. Розглянуто електромагнітний індуктор з П-образним магнітопроводом і двома котушками з масивного провідника. Задля створення однополярного імпульсу струму в обмотці індуктора використовується триністор, який комутує електричне коло з конденсатора, індуктивності і активного опору, а при досягненні струму в обмотці індуктора нульового значення розмикає коло. Розрахунок перехідного процесу в електричному колі з індуктивністю, що динамічно змінюється, виконується шляхом розв'язання коло-польової задачі з заданими початковими умовами, а розрахунок електромагнітного поля – методом скінчених елементів для двовимірної моделі індуктора. Досліджено електромагнітні процеси в індукторі і тонколистових немагнітних заготовках з амплітудою максимальної щільності струму  $1 \text{ кА/мм}^2$ . Наведено розподіл щільності струму і щільності магнітної сили по поверхні заготовки і в часі. Доведено, що лише для незначної товщини зварних виробів (2 мм) може бути досягнута одночасність силового і токового впливу. Бібл. 9, рис. 4.  
**Ключові слова:** магнітно-імпульсна обробка, імпульсний індуктор, перехідні процеси, П-подібний магнітопровід.

Одним з найпоширеніших методів обробки металів для надання їм потрібної форми є пластична деформація, яка практично здійснюється різними способами: прокатка, волочіння, видавлювання, пресування, кування та ін. Пластична деформація модифікує структуру матеріалу, значно підвищуючи її якість. В деяких випадках пластична деформація виявляється скрутною або навіть неможливою з огляду на високий рівень опору матеріалу деформуванню. У таких випадках на допомогу приходять спеціальні методи пластичної деформації, засновані на додатковому впливі на матеріал електричного струму, що в умовах активного пластичного деформування призводить до зростання пластичності матеріалу. Цей метод вже зараз знаходить широке практичне застосування. Додатковий вплив на матеріал (обов'язково металевий) здійснюється електричним струмом густиною до  $1 \text{ кА/мм}^2$  [5, 9]. Струм збуджують імпульсами 100 мкс з низькою частотою ( $\sim 1 \text{ Гц}$ ). Така обробка називається електроімпульсною (ЕІО). Метод обробки, коли застосовується пластична деформація разом з електроімпульсною обробкою, був названий електропластичною деформацією (ЕПД). Таким чином, одним із шляхів інтенсифікації технологічних процесів, пов'язаних з обробкою металів, є збудження в зоні деформування імпульсів струму значної щільності [5, 8, 9].

ЕПД останнім часом привертає увагу дослідників в областях фізичного матеріалознавства і обробки металів тиском [1]. Зміна пластичності металів у разі зовнішніх струмових впливів є основою створення нових і вдосконалення існуючих технологій з метою підвищення комплексу експлуатацій-них властивостей металів. Зокрема ЕІО запобігає втомному руйнуванню і супроводжується зростанням втомного ресурсу. Таким чином, за допомогою ЕІО представляється можливим відновлення ресурсу і втомної міцності металів і сплавів. В [2] доведено, що ЕІО впливає на напружений стан, статичну і втомну міцність, тріщиностійкість і корозійну стійкість, а також ударну вязкість металів і сплавів.

Після зварювання металів в зоні шва і навколишньої зони виникають залишкові напруження розтягу [3], які разом з різною зернистістю металу, обумовленою локальним швидкісним перегрівом

зварних з'єднань, призводять до зниження втомної міцності. Задля запобігання можливого руйнування зварного з'єднання потрібно, в першу чергу, напруження розтягу звести до напруження стискування. В роботі [3] теоретично і експериментально досліджено вплив ЕЮ разом з динамічним механічним навантаженням (динамічне стиснення) на зниження залишкових напружень і підвищення втомної міцності за циклічних навантаженнях зварних з'єднань алюмінієвого сплаву. В роботі [7] експериментальні дослідження визначили енергетичний ефект від одночасної дії динамічного і струмового факторів впливу на механічні характеристики зварного з'єднання.

Реалізація ЕЮ шляхом застосованого в [3] кондуктивного підводу електричного струму до заготовки за допомогою електродів може призвести до появи слідів дотику, порушення контакту і навіть виникнення небажаних дугових процесів. Використання індукторів задля створення вихрового імпульсного струму дає змогу безконтактним способом також одержати високу густину струму в заготовці і додатково електродинамічну силу на заготовку. Такий метод застосування додаткового впливу на матеріал електричним індукованим струмом високої густини дістав назву *магнітно-імпульсній обробці* (МІО). У цьому випадку на заготовку діє імпульсний струм  $10^8 \dots 10^9 \text{ A/m}^2$  тривалістю імпульсів  $100 \dots 500 \text{ мкс}$  [3, 5, 9].

Зростання пластичності металу внаслідок МІО має назву *магнітопластичний ефект*. При обробленні зварних швів найбільш доцільним при цьому вважається застосування індуктора з П-подібним магнітопроводом, паз з обмоткою якого розміщується над зварним швом (рис. 1), що дає змогу одержати максимальний струм у зварному шві.

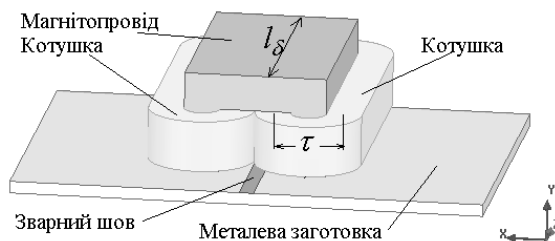


Рис. 1

**Метою роботи** є порівняння в області, де знаходиться зварний шов у тонколистової немагнітної електропровідної металевої заготовки, перехідних процесів і розподілу по поверхні заготовки густини магнітної сили та густини струму амплітудою  $1 \text{ кА/мм}^2$ , які змінюються в часі у вигляді півперіоду синусоїди і наводяться імпульсним індуктором з П-подібним магнітопроводом та двома котушками, а також встановлення впливу на перехідні процеси ємності і напруги конденсатора, від якого живиться імпульсний індуктор.

Задля визначення енергетичних показників імпульсного індуктора з П-подібним магнітопроводом доцільним є виконання розрахунку електромагнітного поля в тривимірній постановці, оскільки двовимірна постановка не враховує лобові частини індуктора. Але задля швидшого розрахунку достатньо обмежитись моделюванням у двовимірній постановці (рис. 2). При цьому для врахування впливу лобових частин пропонується глибину (по координаті  $z$ ) симетричної  $1/2$  частини моделі (рис. 2) розраховувати наступним чином:

$$l'_\delta = l_\delta + \tau, \quad (1)$$

де  $l_\delta$  – довжина магнітопроводу по координаті  $z$ ,  $\tau$  – полюсна відстань котушок.

Імпульси електричного струму в обмотці індуктора і в металевій заготовці одержуються шляхом комутації електричного кола, яке включає попередньо заряджений до напруги  $U_C$  конденсатор ємністю  $C$ , активний опір провідників індуктора  $r$  і його індуктивність  $L$ . Комутація кола здійснюється триністором, який забезпечує розмикання кола у разі досягнення струму нулевого значення. Це забезпечує протікання однополярного імпульсу струму в обмотці індуктора. Процес заряджання конденсатора до початкової напруги перед кожним таким імпульсом не береться до уваги в цій роботі.

Для розрахунку струму в колі з індуктивністю, яка динамічно змінюється через присутність феромагнітного осердя і електропровідного масивного тіла, необхідно сумісно розв'язати основне рівняння електричного кола [4]

$$\frac{\partial \psi}{\partial t} + ir + \frac{1}{C} \int_0^t i dt + U_C(0) = 0 \quad (2)$$

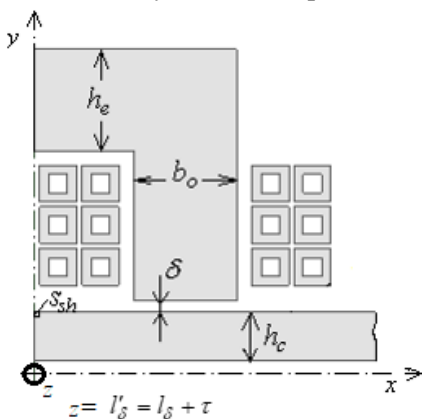


Рис. 2

і рівняння електромагнітного поля, записаного для електромагнітної системи (рис. 2)

$$\operatorname{rot}((\mu_r \mu_0)^{-1} \operatorname{rot} \mathbf{A}) + \sigma \partial \mathbf{A} / \partial t = \mathbf{j}_0, \quad (3)$$

де  $\mu_0$  – магнітна постійна,  $\mu_r$  – відносна магнітна проникність,  $\sigma$  – електропровідність,  $\mathbf{j}_0 = i / s_p$  – густина струму в провідниках обмотки,  $s_p$  – площа поперечного перерізу провідників обмотки.

В рівнянні (3) приймається: для повітря і повітряних проміжків моделі (рис. 2)  $\mu_r = 1, \sigma = 0, \mathbf{j}_0 = 0$ ; в області магнітопроводу –  $\mu_r(B) > 1, \sigma = 0, \mathbf{j}_0 = 0$ ; в провідниках обмотки –  $\mu_r = 1, \sigma > 0, \mathbf{j}_0 = i / s_p$ ; в області електропровідної смуги –  $\mu_r = 1, \sigma > 0, \mathbf{j}_0 = 0$ . Початкові умови для розв'язання рівнянь (2) і (3) ( $t = 0$ )

$$\mathbf{A} = 0, \quad i = 0, \quad \partial \psi / \partial t = -U_C(0). \quad (4)$$

Граничні умови для рівняння (3): на зовнішніх границях повітряної області моделі (рис. 2) рівність нулю векторного магнітного потенціалу, крім границі, що співпадає з лінією симетрії індукційної системи ( $x = 0$ , рис. 2), де приймається умова рівності нулю тангенціальних складових напруженості магнітного поля.

Розрахунок електромагнітних процесів індукційної системи (рис. 1, рис. 2) виконано з наступними розмірами моделі індуктора (рис. 2): довжина осердя магнітопроводу по координаті  $z$   $l'_\delta = 0,164$  м; середня ширина котушок  $\tau = 0,047$  м; ширина зубців осердя магнітопроводу  $b_o = 0,03$  м; висота ярма  $h_e = 0,03$  м; висота проміжку між осердям індуктора і металевою смугою  $\delta = 0,002$  м; товщина смуги  $h_c = 0,008, 0,002$  м; матеріал смуги – латунь ( $\sigma = 22$  МСм/м); кількість витків в кожній котушці  $w = 6$ ; котушки підключені послідовно. У процесі розроблення моделі враховано товщину ізоляції провідників  $b_i = 0,0004$  м, товщину корпусної ізоляції котушок  $b_{ik} = 0,002$  м, ізоляцію між котушками в пазу П-подібного магнітопроводу –  $b_{mk} = 0,001$  м. Для магнітопроводу індуктора відносна магнітна проникність  $\mu_r$  відповідає кривій намагнічування шихтованої електротехнічної сталі Ст. 2411. Вважаючи технологічний процес МІО тонколистових немагнітних металів безперервним з багаторазовим повторенням імпульсів, задля запобігання перегріву багатовиткова обмотка індуктора виконується з прямокутної мідної труби 6,0х6,0х1,5 мм, в якій протікає охолоджуюча рідина. Товщина стінки провідника трубки відповідає товщині скін-ефекту.

Зміною ємності конденсатора  $C$  встановлюється тривалість імпульсу струму. Амплітуда струму регулюється величиною напруги конденсатора  $U_C(0)$ . Для розрахунку індуктора приймається ємність конденсатора  $C = 2$  мФ і напруга  $U_C(0) = 0,8$  кВ.

Миттєве значення струму  $i$  в витках обмотки визначається рівнянням (2). Максимальне значення густини струму  $j_{\max}$  в металевій немагнітній заготовці визначається як середнє значення густини струму в області  $s_{sh} = 1$  мм<sup>2</sup> (рис. 2) зварного шва

$$j_{\max} = \frac{1}{s_{sh}} \int (j_z) dS = \frac{1}{s_{sh}} \int \left( \operatorname{rot}_z \frac{\operatorname{rot} \mathbf{A}}{\mu_0} \right) dS. \quad (5)$$

Напруга на конденсаторі  $U_C$  визначається із рівняння (2)

$$-U_C = \frac{\partial \psi}{\partial t} + i r. \quad (6)$$

Відповідно до [6] тензор поверхневої магнітної сили по поверхні заготовки, нормаль якої співпадає з віссю  $y$  (рис. 2), розраховується за виразом

$$T_{yy} = \mu_r \mu_0 \left( H_y^2 - 0,5 |\mathbf{H}|^2 \right), \quad (7)$$

де  $H_y$  – складова у розподілу вектору  $\mathbf{H}$  напруженості магнітного поля по поверхні заготовки.

Очевидно, що модель на рис. 2 має дві складові вектору напруженості магнітного поля –  $H_y$  та  $H_x$ , і на поверхні металевій заготовки відносна магнітна проникність  $\mu_r = 1$ . Миттєве значення сили  $F_y$  між індуктором і металевою заготовкою розраховується з використанням (7) по поверхні металевій пластини

$$F_y = 2l'_\delta \int_0^\infty T_{yy} dx = 2\mu_0 l'_\delta \int_0^\infty \left( H_y^2 - 0,5 H^2 \right) dx = \mu_0 l'_\delta \int_0^\infty \left( H_y^2 - H_x^2 \right) dx, \quad (8)$$

де  $l'_\delta$  – розрахункова довжина двовимірної моделі (рис. 2) по координаті  $z$ , що визначається виразом (1), цифра 2 появилася в (8), оскільки модель на рис. 2 представляє симетричну половину індукційної системи.

На рис. 3, *a* показано зміну в часі струму в обмотці  $i$  та поверхневої густини струму  $j_{\max}$  в області зварного шва  $s_{sh}$  (рис. 2), напруги на конденсаторі  $U_C$  і сили  $F_y$  між магнітопроводом і металевою заготовкою за товщини металевої заготовки 8 мм, а на рис. 3, *б* – за товщини металевої заготовки 2 мм. У тоншій заготовці максимальна густина струму на 35% більша. На рис. 3 видно, що максимальне значення струму  $j_{\max}$  не співпадає в часі з максимальним значенням магнітної сили  $F_y$ .

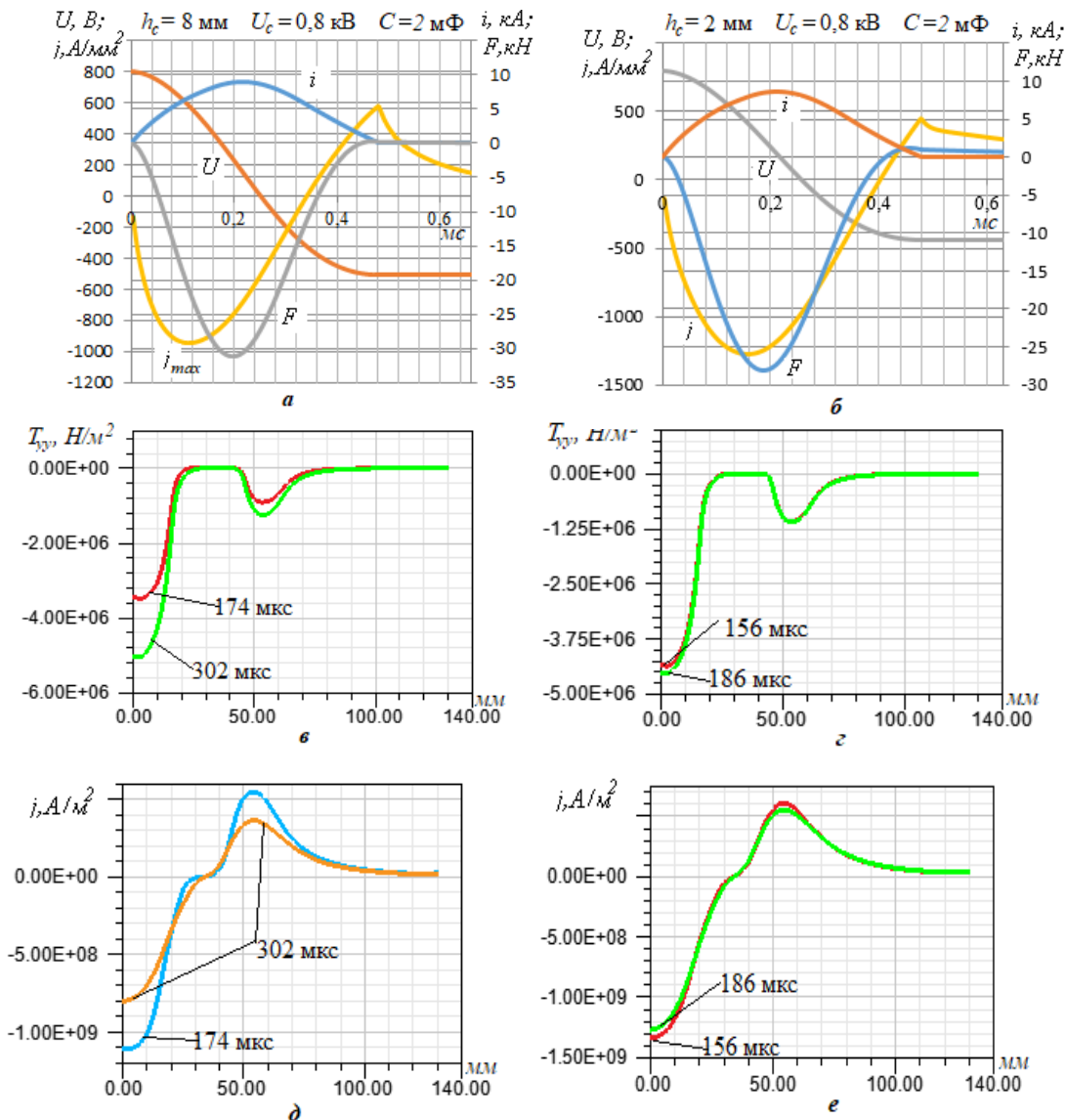


Рис. 3

Розподіл поверхневої густини струму  $j_{\max}$  і густини магнітної сили  $T_{yy}$  на поверхні заготовки по координаті  $x$  при 2-х часових моментах (максимального значення сили  $F_y$  і максимального значення густини струму  $j_{\max}$  із рис. 3, *a, б*) для товщини заготовки 8 мм і для товщини заготовки 2 мм показано на рис. 3, *в, д* і рис. 3, *з, е* відповідно.

Із рис. 3, *a* видно, що за товщини заготовки 8 мм різниця в часі між максимальною густиною струму і максимальною густиною сили складає 128 мкс (27% від повної тривалості імпульсу струму в обмотці індуктора), а за 2 мм (рис. 3, *б*) – 30 мкс, що в 4,27 раз менше, ніж зміна товщини заготовки. Але густина струму й густина сили більші в заготовці товщиною 2 мм.

На рис. 4, а показано аналогічні розрахунки за  $C = 5$  мФ. Порівняння з рис. 3, а показує, що підвищення ємності в 2,5 разів призводить до зростання тривалості імпульсу струму в 1,5 разів і до незначного зростання амплітуди струму; на рис. 4, б – розрахунки за  $C=2$  мФ і  $U_c(0)=0,6$  кВ, які порівнюються з рис. 3, а. Зменшення напруги конденсатора на 1/4 призводить до зменшення амплітудного значення густини струму на 1/3, а також незначного збільшення тривалість імпульсу внаслідок нелінійних параметрів магнітопроводу.

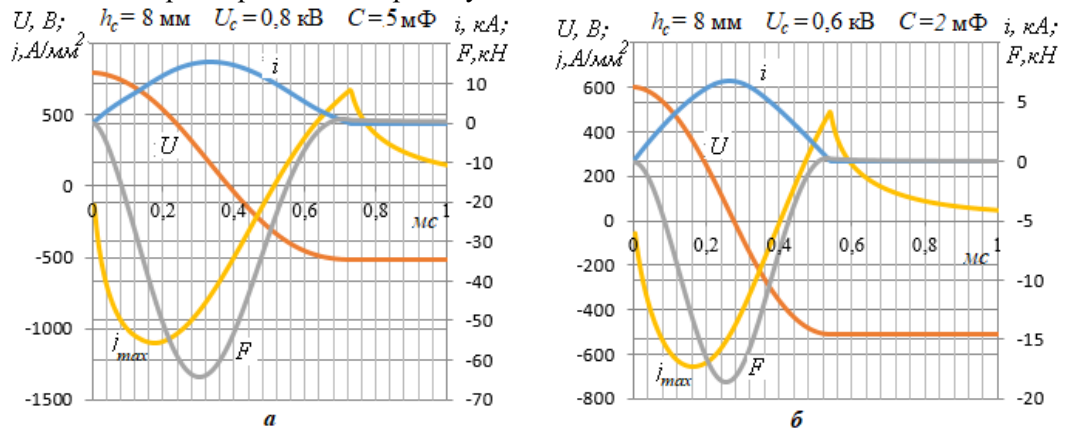


Рис. 4

**Висновок.** Моделювання коло-польових процесів показало, що застосування індуктора імпульсного електромагнітного поля з П-подібним магнітопроводом і двома котушками дає змогу одержати імпульсні струми високої щільності ( $1 \text{ кА/мм}^2$ ) в області зварного шва тонколистових немагнітних металів у разі використання ємнісного накопичувача сумарною ємністю від 2 мФ, зарядженого до напруги до 0,8 кВ.

Запропонований метод більш прийнятний з точки зору досягнення магнітопластичного ефекту у разі оброблення тонколистових немагнітних металів. Про це свідчить порівняння результатів розрахунку електромагнітної системи з заготовками листів латуні товщиною 8 і 2 мм. Встановлено, що за обраних параметрів індуктора максимальна магнітна сила і максимальний струм у тоншому листі матимуть меншу розбіжність у часі пропорційно зміні товщини заготовки (при 8 мм – 27% і при 2 мм – 6%). У цьому разі досягається на 35% більша густина струму на поверхні заготовки товщиною 2 мм порівняно з 8 мм.

Тривалість і інтенсивність імпульсів струму в обмотці індуктора та вихрового струму у об'єкті обробки мають нелінійний характер від величин ємності та напруги на ній.

*Роботу виконано за держбюджетною темою «Розвиток теорії електрофізичних процесів в імпульсних системах електромагнітної обробки електропровідних середовищ» («БАР'ЄР-2»), державний реєстраційний номер 0117U007714 (КПКВК 6541030).*

1. 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.
2. Лобанов Л.М., Пашин Н.А., Логинов В.П., Логинова Ю.В. Применение электроимпульсной обработки элементов конструкций с целью повышения их ресурса. *Автоматическая сварка*. 2005. № 11. С. 26–30.
3. Лобанов Л.М., Кондратенко І.П., Жильцов А.В., Карлов О.М., Пашин М.О., Васюк В.В., Ящук В.А. Нестационарные электрофизические процессы в системах снижения избыточных напряжений сварных соединений. *Технічна електродинаміка*. 2016. № 6. С. 10-19. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2016.06.010>
4. Нейман Л.Р., Калантаров П.Л. Теоретические основы электротехники, Ч.2. М-Л.: ГЭИ, 1959. 444 с.
5. Самохвалов В.Н., Самохвалова Ж.В. Магнитно-импульсная и электроимпульсная обработка деталей машин. *Современные проблемы теории машин*. 2017. № 5. С. 113-115.
6. Тамм И.Е. Основы теории электричества. М.: Наука, 1976. 616 с.
7. Лобанов Л.М., Пашин Н.А., Миходуй О.Л., Сидоренко Ю.М. Влияние электроимпульсной составляющей на напряженное состояние сварных соединений алюминиевого сплава АМг6 при электродинамической обработке. *Проблемы прочности*. 2018. № 2. С.18-26.
8. Сейдаметов С.В., Лоскутов С.В. Влияние импульсной электромагнитной обработки на структурные перестройки сплава титана ВТЗ-1. *Журнал фізики та інженерії поверхні*. 2016. Том 1. С. 4-8.
9. Кузнецов Н.Н. Влияние электро- и магнитно-импульсного воздействия на заготовку. *Обработка материалов давлением*. 2010. № 3(24). С. 126-129.

**МАГНИТНЫЕ СИЛЫ И ТОКИ ИНДУКТОРА ДЛЯ МАГНИТОИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ НЕМАГНИТНЫХ ТОНКОЛИСТОВЫХ МЕТАЛЛОВ**

**А.П. Ращепкин**, докт.техн.наук, **И.П. Кондратенко**, чл.-корр.НАН Украины, **А.Н. Карлов**, канд.техн.наук, **Р.С. Кришук**, канд.техн.наук

**Институт электродинамики НАН Украины,**

**пр. Победы, 56, Киев, 03057, Украина,**

**e-mail: [anatoly\\_raschepkin@ukr.net](mailto:anatoly_raschepkin@ukr.net), [dep7ied@ukr.net](mailto:dep7ied@ukr.net), [lexa.k.ua@gmail.com](mailto:lexa.k.ua@gmail.com), [kr@nas.gov.ua](mailto:kr@nas.gov.ua)**

*С целью устранения остаточных напряжений в сварных швах тонколистовых немагнитных металлов рассматривается возможность применения магнитно-импульсной обработки. Рассмотрен электромагнитный индуктор с П-образным магнитопроводом и двумя катушками из массивного проводника. Для создания однополярного импульса тока в обмотке индуктора используется тринистор, который коммутирует электрическую цепь из конденсатора и индуктивности, а при достижении тока в обмотке индуктора нулевого значения размыкает цепь. Расчет переходного процесса в электрической цепи с динамично изменяющейся индуктивностью выполняется путем решения цепно-полевой задачи с заданными начальными условиями. Расчет электромагнитного поля выполняется методом конечных элементов для двумерной модели индуктора. Выполнены исследования электромагнитных процессов в индукторе и тонколистовых немагнитных заготовках с амплитудой максимальной плотности тока  $1 \text{ кА/мм}^2$ . Приведены распределения плотности тока и плотности магнитной силы по поверхности заготовки и во времени. Показано, что лишь для незначительной толщины сварных изделий (2 мм) может быть достигнута одновременность силового и токового воздействия. Библ. 9, рис. 4.*

**Ключевые слова:** магнитно-импульсная обработка, импульсный индуктор, переходные процессы, П-образный сердечник.

**MAGNETIC FORCES AND CURRENTS OF THE INDUCTOR FOR MAGNETIC-PULSE PROCESSING OF OF WELDING JOINTS OF NON-MAGNETIC THIN SHEET METALS**

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

**Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine,**

**Peremohy av., 56, Kyiv, 03057, Ukraine,**

**e-mail: [anatoly\\_raschepkin@ukr.net](mailto:anatoly_raschepkin@ukr.net), [dep7ied@ukr.net](mailto:dep7ied@ukr.net), [lexa.k.ua@gmail.com](mailto:lexa.k.ua@gmail.com), [kr@nas.gov.ua](mailto:kr@nas.gov.ua)**

*In order to eliminate residual stresses in the welds of thin-sheet non-magnetic metals, the possibility of using magnetic pulse processing is considered. An electromagnetic inductor with a U-shaped magnetic circuit and two coils of solid conductor is considered. To create a unipolar current pulse in the inductor winding, a tristor is used, which switches the electrical circuit from the capacitor, inductance and active resistance, and when the current in the inductor winding reaches zero, the circuit opens. The calculation of the transient process in an electric circuit with a dynamically changing inductance is performed by solving a circuit-field problem with given initial conditions. The calculation of the electromagnetic field is performed by the finite element method for a two-dimensional model of the inductor. The study of electromagnetic processes in the inductor and thin-sheet non-magnetic workpieces with the amplitude of the maximum current density of  $1 \text{ kA/mm}^2$ . The distribution of current density and magnetic force density on the workpiece surface and in time is given. It is proved that only for a small thickness of welded products (2 mm) can be achieved simultaneous power and current. References 9, figures 4.*

**Key words:** magnetic pulse processing, pulse inductor, transients, U-shaped core.

1. Baranov Yu.V., Troitsky O.A., Avraamov Yu.S., Shlyapin A.D. Physical fundamentals of electropulse and electroplastic treatments and new materials. Moskva: MGIU, 2001. 844 p. (Rus)
2. Lobanov L.M., Pashchin N.A., Loginov V.P., Loginova Yu.V. The use of electric pulse processing of structural elements in order to increase their resource. *Avtomaticheskaja svarka*. 2005. No 11. Pp. 26-30. (Rus)
3. Lobanov L.M., Kondratenko I.P., Zhyltsov A.V., Karlov O.M., Pashchyn M.O., Vasyuk V.V., Yashchuk V.A. Electrophysical unsteady processes in the system to reduce residual stresses welds. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2016. No 6. Pp. 10-19. (Rus) DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2016.06.010>
4. Neumann L.R., Kalantarov P.L. Theoretical Foundations of Electrical Engineering, Part 2. Moskva-Leningrad: HEI, 1959. 444 p. (Rus)
5. Samohvalov V.N., Samohvalova Zh.V. Magnetic-pulse and electric pulse treatment of machine parts *Sovremennye problemy teorii mashin*, 2017. No 5. Pp. 113-115. (Rus)
6. Tamm I.E. Theory of electricity. Moskva: Nauka, 1976. 616 p. (Rus)
7. Lobanov L.M., Pashchin N.A., Mikhoduy O.L., Sidorenko Yu.M. The effect of the electric pulse component on the stress state of welded joints of the AMg6 aluminum alloy during electrodynamic processing. *Problemy prochnosti*. 2018. No 2. Pp. 18-26. (Rus)
8. Seidametov S.V., Loskutov S.V. The influence of pulse electromagnetic field on rebuilding of structure of titanium alloy vt3-1. *Zhurnal fizyky ta inzhenerii poverkhni*. 2016. Vol. 1. Pp. 4-8. (Rus)
9. Kuznetsov N.N. Influence of electroimpulse and magnetoimpulse effects on the workpiece. *Obrabotka materialov davleniem*. 2010. No 3(24). Pp. 126-129. (Rus)

Надійшла 13.03.2020

Остаточний варіант 06.05.2020