

УДК 621.313

DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2020.55.090>

## ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ПОЛЯ ІНДУКТОРА ДЛЯ МАГНІТОПЛАСТИЧНОГО ЕФЕКТУ В НЕМАГНІТНИХ МЕТАЛЕВИХ ПЛАСТИНАХ

**Р.С. Кришук**, канд. техн. наук

Інститут електродинаміки НАН України,  
просп. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна  
e-mail: [kr@nas.gov.ua](mailto:kr@nas.gov.ua)

Для оброблення металевих електропровідних немагнітних пластин зі зварними швами з метою досягнення магнітопластичного і електропластичного ефектів запропоновано індуктор з П-подібним магнітопроводом. Використано методику моделювання електромагнітного поля в двовимірній постановці, яка враховує: товщину металевої пластини, повітряний проміжок між магнітопроводом і пластиною, детальні розміри індуктора, залежність активного опору від тривалості імпульсу, індуктивність лобових частин обмотки, додатковий опір від вихрових струмів у пластині в зоні лобових частин. Виконано розрахунок параметрів конкретного індуктора. Порівняно параметри індуктора, розрахованого за розробленою методикою, з параметрами, розрахованими в тривимірній постановці методом скінченних елементів. Показано, яким чином міняються параметри індуктора у разі насичення магнітопроводу. Бібл. 5, рис. 3.

**Ключові слова:** магнітопластичний ефект, П-подібний магнітопровід, імпульсний індуктор, активний опір, індуктивність.

Із літературних джерел відомо про позитивний вплив імпульсного струму до  $10^9$  А/м тривалістю 100...500 мкс для виникнення електропластичного ефекту в електропровідних матеріалах. У [1] встановлено, що електродинамічна обробка зварних з'єднань сприяє суттєвому зниженню залишкових напружень розтягу від 165 МПа з супутньою трансформацією до напруження стискання 80 МПа, що веде до підвищення втомної міцності зварних з'єднань сплаву АМг6.

Про магнітопластичний і електропластичний ефекти також можна дізнатися з джерел [2–4].

Для металевих пластин зі зварними швами П-подібний магнітопровід дасть змогу спрямовувати імпульсний вихровий струм високої щільності в зварний шов (рис. 1 а).

**Метою роботи** є дослідження параметрів електромагнітного поля імпульсного індуктора з П-подібним магнітопроводом для збудження вихрових струмів у металевих немагнітних пластинах.

Розрахунок параметрів двовимірної моделі (рис. 1 б) індуктора виконується в квазістационарному режимі для певної частоти  $f$  струму.

Оскільки індуктор симетричний, то при моделюванні простіше розглядати половину моделі, а на осі симетрії задати граничну умову симетрії з рівністю нулю тангенціальної складової напруженості магнітного поля (рис. 2):

$$H_y = 0. \quad (1)$$

На рис. 2 а представлено модель з суцільними перерізами котушки, в яких задається

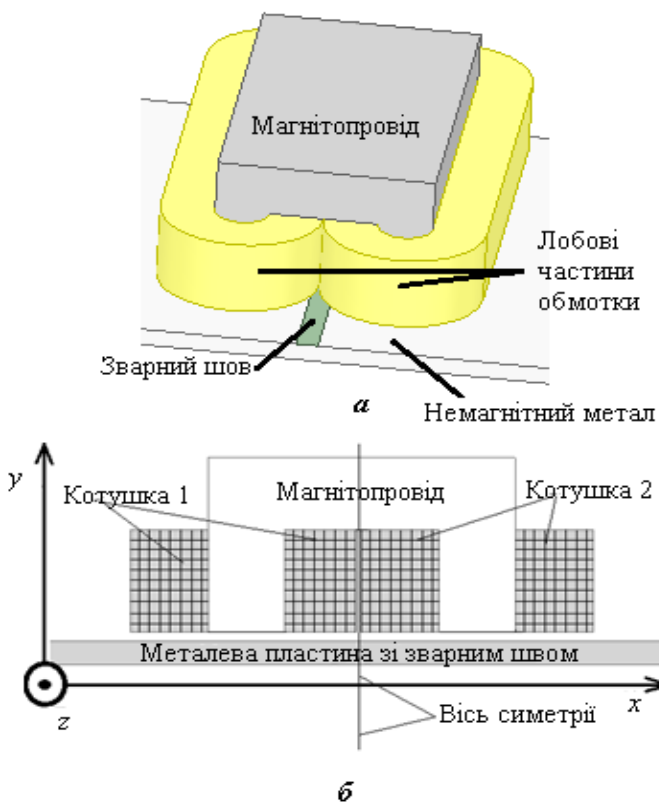


Рис. 1

сумарний струм витків, а на рис. 2 б – з окремими витками. Якщо використовується модель з окремими витками (рис. 2 б), враховується ефект витіснення струму в витках. У моделі на рис. 2 а потрібно ефект витіснення струму в витках враховувати коефіцієнтами додаткових втрат, як у [5, 132 с.].

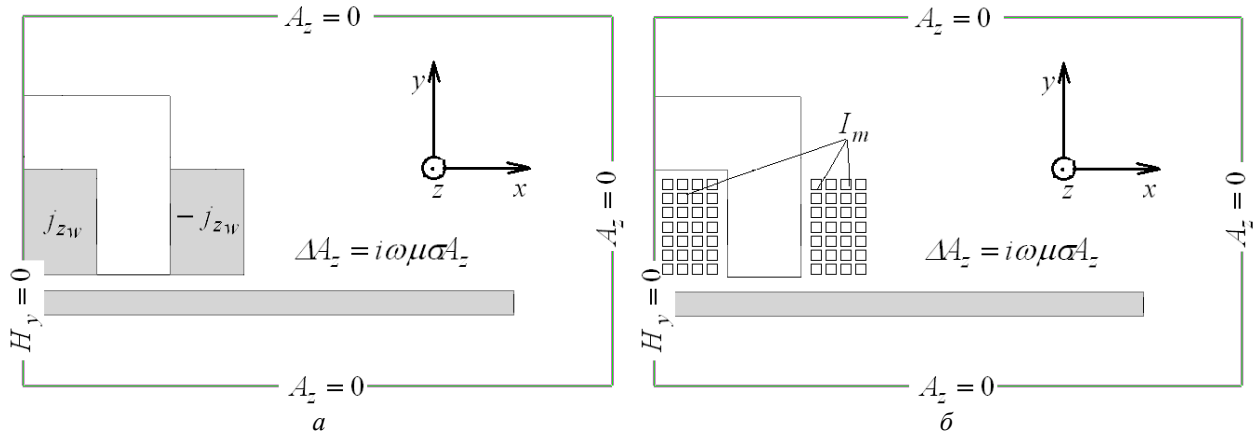


Рис. 2

Використовується система рівнянь магнітного поля для комплексних амплітуд:

$$\operatorname{rot} \hat{A} = \hat{B}; \quad \operatorname{rot} \hat{H} = \hat{j}; \quad \hat{j} = -i\omega\sigma \hat{A}, \quad (2)$$

де  $\hat{A}$ ,  $\hat{B}$ ,  $\hat{H}$ ,  $\hat{j}$  – комплексні амплітуди індукції магнітного поля, напруженості магнітного поля, густини струму.

На основі системи рівнянь (2) для складової  $\hat{A}_z$  векторного магнітного потенціалу маємо рівняння:

$$\Delta \hat{A}_z = i\omega\mu\sigma \hat{A}_z, \quad (3)$$

де  $\Delta$  – оператор Лапласа.

На зовнішніх границях розрахункової області (рис. 2) задається гранична умова рівності нулю векторного магнітного потенціалу:

$$\hat{A}_z = 0. \quad (4)$$

Частота визначається тривалістю  $T_{pulse}$  одного імпульсу індуктора:

$$f = 1/2T_{pulse}. \quad (5)$$

На величину глибини  $\delta_w$  проникнення струму вибирається діаметр провідника  $d_w$ . Приймається відношення ширини пазу до висоти пазу як 3/2, оскільки під час розрахунку індуктора таке співвідношення має найбільшу ефективність для створення максимальної інтенсивності густини струму в металевій пластині.

Повна індуктивність індуктора включає не лише індуктивність двовимірної моделі (рис. 2), але й індуктивність від лобових частин  $L_{lob}$  кожної котушки, яку двовимірна модель не враховує:

$$L_{lob}|_{\mu \rightarrow \infty} = 2\mu_0 w^2 (0,47l_{lob} - 0,3\tau), \quad L_{lob}|_{\mu \rightarrow \mu_0} = 0,5 \cdot L_{lob}|_{\mu \rightarrow \infty}. \quad (6)$$

Тут  $l_{lob}$  – середня довжина однієї лобової частини котушки;  $\tau$  – полюсна відстань котушки;  $(\mu \rightarrow \infty)$  – магнітопровід ненасичений;  $(\mu \rightarrow 0)$  – магнітопровід насичений.

Оскільки під лобовими частинами індуктора металева пластинка не закінчується, то там також будуть протікати вихрові струми, що матиме вплив на опір  $R_2$  додаткових втрат у пластині:

$$R_2^{3D} \Big|_{\mu \rightarrow \infty} = \frac{L_{ind}^{3D}}{L_{ind}^{2D}} R_2^{2D}, \quad R_2^{3D} \Big|_{\mu \rightarrow 0} = R_2^{2D}, \quad (7)$$

де  $L_{ind}^{3D}$  – індуктивність індуктора з урахуванням виразу (6),  $L_{ind}^{2D}$  – індуктивність індуктора без урахування виразу (6).

Виконано розрахунок для тривалості імпульсу  $T_{pulse} = 0,000250$  с, з круглим перерізом провідників (30 витків) діаметром  $d_w = 0,0016$  м. Розміри П-подібного магнітопроводу: 36,0x34,1x100,0 мм.

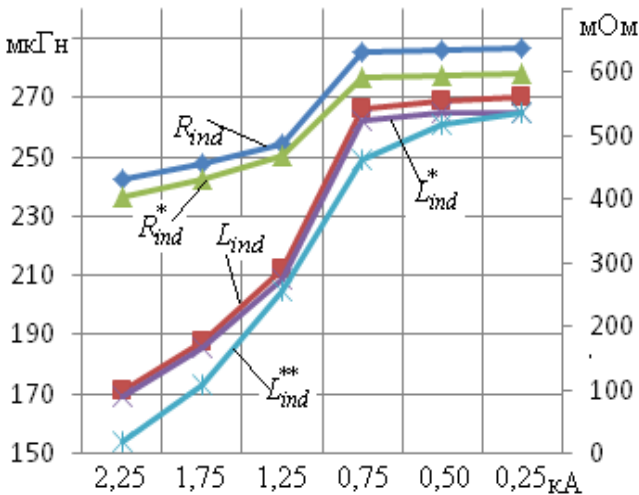


Рис. 3

На рис. 3 представлено розрахунок параметрів електромагнітного поля індуктора за різних амплітудних значень струму в провідниках обмотки (2,25...0,25 кА).  $R_{ind}$  – активний опір індуктора, що містить в собі і опір (2), і активний опір провідників обмотки  $R_1$  з урахуванням коефіцієнтів додаткових втрат [5, 132 с.] для різних ділянок обмотки (модель на рис. 2 а);  $R_{ind}^*$  – активний опір індуктора, в якому коефіцієнти додаткових втрат опору  $R_1$  обмотки враховані автоматично (модель на рис. 2 б);  $L_{ind}$  і  $L_{ind}^*$  – індуктивність індуктора відповідно при розрахунку  $R_{ind}$  (рис. 2 а) і  $R_{ind}^*$  (рис. 2 б);  $L_{ind}^{**}$  – індуктив-

ність індуктора, розрахована в тривимірній моделі (рис. 1 а).

**Висновок.** Представлено методику розрахунку параметрів імпульсного індуктора з П-подібним магнітопроводом для збудження вихрових струмів у металевих немагнітних пластинах зі зварними швами. Досліджено параметри індуктора з феромагнітним шихтованим магнітопроводом 36,0x34,1x100,0 мм. При насиченому магнітопроводі індуктивність зменшується в 1,7 раза, а активний опір – в 1,5 рази. Порівняно з чисельним розрахунком у тривимірній постановці спостерігається відхилення результатів від 0 до 10 % залежно від насичення магнітопроводу.

1. Лобанов Л.М., Кондратенко І.П., Жильцов А.В., Карлов О.М., Пашин М.О., Васюк В.В., Ящук В.А. Нестационарні електрофізичні процеси в системах зниження залишкових напружень зварних з'єднань *Технічна електродинаміка*. 2016. № 6. С. 10–19. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2016.06.010>
2. Васильев М.А. Особенности пластической деформации металлов и сплавов в магнитном поле. Обзор. *Успехи физики металлов*. 2007. т. 8. С. 65–105.
3. Кузнецов Н.Н. Влияние электро- и магнитно-импульсного воздействия на заготовку. *Обработка материалов давлением*. 2010. № 3 (24). С. 126–129.
4. Комшина А.В., Помельникова А.С. Перспективность метода низкоэнергетической обработки материалов с использованием магнитного поля. *Научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. Наука и Образование*. 2012. Эл. № ФС77 – 48211. С. 463–488. DOI: <https://doi.org/10.7463/0912.0454270>
5. Постников И.М. Проектирование электрических машин. Киев: Государственное издательство технической литературы УССР, 1952. 736 с.

УДК 621.313

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ ИНДУКТОРА ДЛЯ МАГНИТОПЛАСТИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА В НЕМАГНИТНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛАСТИНАХ**

**Р.С. Крищук**, канд. техн. наук

Институт электродинамики НАН Украины,  
пр. Победы, 56, Киев, 03057, Украина

Для обработки металлических электропроводящих немагнитных пластин со сварными швами с целью достижения магнитоластического и электроластического эффектов предложен индуктор с П-образным магнитопроводом. В работе представлена методика моделирования электромагнитного поля в двумерной постановке, которая учитывает: толщину металлической пластины, воздушный промежуток между магнитопроводом и пластиной, подробные размеры индуктора, зависимость активного сопротивления от длительности импульса, индуктивность лобовых частей обмотки, дополнительное сопротивление от вихревых токов в пластине зоны лобовых частей. Выполнен расчет параметров конкретного индуктора. Выполнено сравнение параметров индуктора, рассчитанного по представленной методике, с параметрами, рассчитанными в трехмерной постановке методом конечных элементов. Показано, каким образом меняются параметры индуктора при насыщении магнитопровода. Библ. 5, рис. 3.

**Ключові слова:** магнитоластический эффект, П-образный магнитопровод, импульсный индуктор, активное сопротивление, индуктивность.

## RESEARCH OF ELECTROMAGNETIC FIELD FOR U-SHAPED INDUCTOR IN THE MAGNETIC-PULSE PROCESSING OF NONMAGNETIC METALS

**R.S. Kryshchuk**

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,  
pr. Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine

*The methodology of analysis of electromagnetic processes in an inductor with a U-shaped ferromagnetic core is presented. The inductor is designed for contactless excitation magnetic field pulses and high density currents in nonmagnetic metal plates. A two-dimensional electromagnetic field simulation methodology takes into account the thickness of the metal plate; the air gap between the ferromagnetic core and the nonmagnetic metal plate; detailed dimensions of the inductor; dependence of active resistance on pulse duration; inductance of the frontal parts of the winding; additional resistance from eddy currents in the plate under the frontal parts of inductor. The calculation of the parameters of the inductor is done in this paper. The parameters of the inductor calculated according to the presented methodology are compared with the parameters calculated in the three-dimensional model by the finite element method. It is shown how the parameters of the inductor change when the magnetic circuit is saturated. References 5, figures 3.*

**Key words:** magnetoplastic effect, U-shaped magnetic core, impulse inductor, active resistance, inductance.

1. Lobanov L.M., Kondratenko I.P., Zhylytsov 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. DOI: <https://doi.org/10.15407/technd2016.06.010> (Ukr)
2. Vasil'ev M.A. Features of plastic deformation of metals and alloys in a magnetic field. Overview. *Uspekhi fiziki metallov*. 2007. T. 8. Pp. 65–105. (Rus)
3. Kuznetsov N.N. Influence of electro impulse and magneto impulse effects on the workpiece. *Obrabotka materialov davleniem*. 2010. No 3(24). Pp. 126–129. (Rus)
4. Komshina A.V., Pomel'nikova A.S. Promising method of low-energy materials processing using a magnetic field. *Nauchnoe izdanie MGTU im. N. Eh. Baumana. Nauka i Obrazovanie*, 2012. No FS77 – 48211. Pp. 463–488. DOI: <https://doi.org/10.7463/0912.0454270> (Rus)
5. Postnikov I.M. Electrical machinery design. *Kiev: Gosudarstvennoe izdanie tekhnicheskoi literatury USSR*, 1962. 736 p. (Rus)

Надійшла: 23.10.2019

Received: 23.10.2019