

УДК 620.179:621.373.5

ОБРОБКА ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ ІМПУЛЬСНИМ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИМ ПОЛЕМ ПРИ СЛАБКОМУ СКІН-ЕФЕКТІ**Ю.М. Васецький¹**, докт. техн. наук, **І.П. Кондратенко²**, чл.-кор. НАН України,**І.Л. Мазуренко³**, канд. техн. наук, **О.М. Пашин⁴**, канд. техн. наук

1–3 – Інститут електродинаміки НАН України,

пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03057, Україна

yuriy.vasetsky@gmail.com

4 – Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України,

вул. Малевича, 11, Київ-150, 03150, Україна

Розглянуто можливість застосування безконтактного методу впливу імпульсного електромагнітного поля на зварний шов алюмінієвого листа за умови слабого скін-ефекту, при якому в матеріалі виникають механічні напруження і протікають індуквані струми високої густини. Отримано розподіли магнітного тиску, механічних напружень розтягу в листі та густини індукваного струму на основі розрахункових моделей індукторів з різним розташуванням струмових контурів відносно електропровідного листа. Встановлено, що при слабкому скін-ефекті механічні напруження розтягу досягають межі плинності за умови надвисокої величини струму контура. Визначено необхідні величини тривалості та амплітуди імпульсних струмів, які забезпечують слабкий скін-ефект в алюмінієвому листі й дають змогу отримати необхідні механічні напруження або необхідні величини густини індукваного струму для ефекту електропластичності в зварному шві. Бібл. 8, рис. 11.

Ключові слова: електромагнітне поле, імпульсний електричний струм, слабкий скін-ефект, зварний шов, металева штаба.

На сьогодні в галузі металообробки впроваджуються нові ефективні технології, застосування яких дає змогу суттєво підвищити характеристики міцності та корозійної стійкості конструкційних матеріалів і збільшити ресурс їх експлуатації. При цьому достатня увага приділяється питанням пошуку нових ефективних способів обробки металів і сплавів. Одними з високотехнологічних методів обробки зварних конструкцій є методи із застосуванням впливу імпульсного електричного струму та імпульсного електромагнітного поля [8], які позитивно впливають на механічні властивості металевих матеріалів. Використання їх є більш результативним у порівнянні з методами традиційної обробки [1]. Обробка зварних швів при дії імпульсного електромагнітного поля, основана на виникненні електродинамічних зусиль у металі й появі механічних напружень на рівні межі плинності, сприяє зниженню напружено-деформованих станів особливо вразливих областей переходу шва до основного матеріалу [5]. Позитивний вплив на зварний шов досягається при використанні того ж методу із застосуванням імпульсного електромагнітного поля завдяки ефекту електропластичності. Тому виникає питання доцільності об'єднання цих методів впливу або вибору більш ефективного з них [3].

Метою роботи є дослідження розподілу індукованих струмів та механічних напружень в електропровідному листі за умови слабого скін-ефекту при дії імпульсного магнітного поля, створеного індукторами у вигляді струмових контурів різних конфігурацій, отримання необхідних величин тривалості та амплітуди струмів. Увага приділяється також особливостям застосування слабого скін-ефекту, які полягають у наступному: відносно малим індукованим струмам при слабкому скін-ефекті, можливості отримати на відміну від дії сильного скін-ефекту, окрім напружень стиску, також і напружень розтягу в металевій штабі.

Дослідження проведено при дії імпульсного електромагнітного поля на лист з алюмінієвого сплаву АМг6, зварні з'єднання якого на практиці зазвичай обробляють з використанням зазначених методів впливу [5].

Імпульс струму при слабкому скін-ефекті. Характеристики імпульсу струму мають обиратися залежно від необхідного процесу загасання магнітного поля в електропровідному середовищі, тобто від того, має місце слабкий чи сильний скін-ефект [4]. У разі гармонічного

в часі поля необхідно проводити порівняння товщини електропровідного матеріалу h і глибини проникнення поля $\delta = \sqrt{2/\omega\gamma\mu_0}$, яка зменшується зі збільшенням циклічної частоти $\omega = 2\pi f$ та електропровідності матеріалу γ [7]. Якщо $h \ll \delta$, то має місце слабкий скін-ефект і можна вважати, що електропровідний лист є «прозорим» для магнітного поля, оскільки струми, що індукуються в ньому, є досить малими в порівнянні з такими ж струмами у випадку сильного скін-ефекту, коли створене магнітне поле практично повністю компенсує первинне поле індуктора. Крім того, в умовах слабого скін-ефекту магнітне поле індукованих струмів в електропровідному листі є малим порівняно з магнітним полем індуктора, і його можна не враховувати.

У зв'язку з незначною величиною магнітного поля струмів в електропровідному листі порівняно з полем струмів індуктора будемо нехтувати перехідним процесом дифузії магнітного поля в електропровідне середовище [4, 6].

У випадку імпульсного струму значна частина імпульсу магнітного поля з енергетичної точки зору припадає на характерну частоту чи вузький діапазон частот, які можна виділити для оцінок зі всього спектра, і саме для них справедливим залишається представлення про слабкий скін-ефект.

Будемо вважати, що імпульс струму є позитивною півхвилею синусоїдальної форми, тобто

$$I(t) = \begin{cases} I_m \sin(\omega t), & 0 \leq \omega t \leq \pi \\ 0, & \omega t > \pi \end{cases}, \quad (1)$$

де ω – циклічна частота, яка є характерною частотою частотного спектра імпульсу. У випадку слабого скін-ефекту циклічна частота ω пов'язана з товщиною h алюмінієвого листа співвідношенням

$$h = k_d \delta, \quad (2)$$

а «коефіцієнт непрозорості» k_d має задовольняти умові $k_d < 1$ або

$$\omega = \frac{2k_d^2}{\mu_0 \gamma h^2}. \quad (3)$$

Розрахункова модель з індуктором, струмові контури якого розташовані паралельно плоскому електропровідному листу. Розрахункову модель з індуктором, прямий і зворотний струмопроводи якого розташовані паралельно алюмінієвому листу на однаковій відстані від його середньої лінії, показано на рис. 1.

Вважається, що зварний шов орієнтований вздовж осі x . Задача ставиться в двовимірній постановці, що відповідає системі, в якій подовжні розміри вздовж шва значно перевищують поперечні розміри системи.

Для проведення оцінок будемо вважати, що струм протікає за центральними лініями струмопроводів: правий I^+ – у позитивному напрямку осі x , лівий I^- – протилежно осі x .

У зв'язку з малою товщиною металевої штаби магнітне та індукване електричне поля розраховуються на середній лінії, яка співпадає з віссю y . Крім того, в межах товщини штаби будемо нехтувати зміною полів у поперечному напрямку.

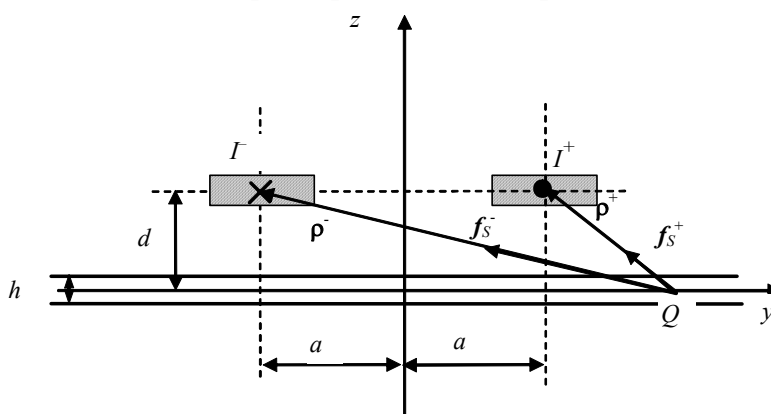


Рис. 1

Тоді, враховуючи зроблені припущення, з закону електромагнітної індукції

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (4)$$

отримаємо рівняння для знаходження поздовжньої складової напруженості електричного поля E_x :

$$\frac{\partial E_x}{\partial y} = \frac{\partial B_z}{\partial t}. \quad (5)$$

Оскільки в умовах слабкого скін-ефекту магнітне поле визначається тільки струмами індуктора, тобто двома зосередженими струмами (рис. 1), то нормальна складова індукції при $z = 0$ у цій моделі визначається таким чином [2]:

$$B_z = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \left[\frac{y-a}{(y-a)^2 + d^2} - \frac{y+a}{(y+a)^2 + d^2} \right]. \quad (6)$$

З урахуванням виразу (5), виконуючи інтегрування за координатою y , знайдемо поверхневу густину струму j_{sx} в алюмінієвому листі:

$$j_{sx} = \gamma h E_x(y, z=0) = \gamma h \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{dI}{dt} \ln \frac{(y-a)^2 + d^2}{(y+a)^2 + d^2}. \quad (7)$$

Поверхневу густину електромагнітних сил, що діють на металевий лист, знайдемо як силу взаємодії розподіленого вздовж поверхні струму j_{sx} зі струмами індуктора I^+ і I^- . Шукана сила Лоренца $\mathbf{f} = \mathbf{j}_S \times \mathbf{B}$ у такому випадку визначається вектором індукції магнітного поля \mathbf{B} , яка є суперпозицією полів струмів I^+ і I^- :

$$\begin{aligned} \mathbf{f} &= \mathbf{f}^+ + \mathbf{f}^- = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \left(\frac{\boldsymbol{\rho}^+}{(\rho^+)^2} - \frac{\boldsymbol{\rho}^-}{(\rho^-)^2} \right) j_{sx} = \\ &= -\frac{\mu_0^2 \gamma h}{16\pi^2} \frac{dI^2}{dt} \left[\frac{(y-a)\mathbf{e}_y + d\mathbf{e}_z}{(y-a)^2 + d^2} + \frac{-(y+a)\mathbf{e}_y + d\mathbf{e}_z}{(y+a)^2 + d^2} \right] \ln \frac{(y-a)^2 + d^2}{(y+a)^2 + d^2}, \end{aligned} \quad (8)$$

де \mathbf{e}_y і \mathbf{e}_z – одиничні вектори вздовж відповідних координат; $\boldsymbol{\rho}^+$, $\boldsymbol{\rho}^-$ – вектори, спрямовані від точки Q на середній лінії листа до точок розташування струмів I^+ і I^- .

Надалі всі величини, які позначено зірочкою, є безрозмірними з таким нормуванням:

– величини довжини $y = y^* d$ і т.п.;

– струм $I = I^* I_m$;

– частота і час нормовані на базисну частоту $f_b = 1/\pi d^2 \mu_0 \gamma$, при якій $\delta = d$, тобто

$$f = f^* f_b, \quad t = t^* / f_b;$$

– індукція магнітного поля $B = B^* \frac{\mu_0 I_m}{4\pi d}$;

– поверхнева густина індукваного струму $j_s = j_s^* \gamma h \frac{\mu_0 I_m}{4\pi} f_b = j_s^* \frac{I_m h}{4\pi^2 d^2}$;

– поверхнева густина електромагнітних сил та механічних напружень

$$f = f^* \frac{\mu_0 I_m^2}{16\pi^3 d^3}, \quad \sigma = \sigma^* \frac{\mu_0 I_m^2}{16\pi^3 d^3} \text{ відповідно.}$$

Зазначимо, що оцінки розподілів індукованих струмів та механічних напружень буде

проведено при вихідних параметрах імпульсу струму $t^* = \frac{\pi}{4\omega^*} = \frac{1}{8} \left(\frac{h^*}{k_d} \right)^2$, розташуванні струмопроводів індуктора $\frac{h}{d} = \frac{1}{1,5}$ і «коефіцієнті непрозорості» $k_d = \frac{1}{\sqrt{20}}$.

На рис. 2 показано розподіл компонент поверхневої густини сил, що діють на алюмінієвий лист у площині, як показано на рис. 1, при різних відстанях між струмопроводами індуктора. На рис. 2 а представлено залежності вертикальної складової (магнітного тиску), а на рис. 2 б зображено залежності у-складової сили.

Наведені на рис. 2 сили розраховано на момент часу, коли вони є максимальними, тобто в момент максимуму похідної від квадрату струму індуктора. Для імпульсу струму (1), що розглядається, цей момент часу відповідає умові $\omega t = \pi/4$. Приклад розрахунку в абсолютних одиницях параметрів електромагнітної системи наведено нижче.

Як видно, при слабкому скін-ефекті сили в цілому збільшуються зі збільшенням відстані між прямим і зворотним струмами індуктора. Це пояснюється тим, що електрорушійна сила електромагнітної індукції буде тим більшою, чим більший потік магнітного поля створюється індуктором. Ця позитивна тенденція обмежується одночасним збільшенням індуктивності петлі струму, що призводить до обмеження амплітуди струму джерела енергії, а також зменшення резонансної частоти контура [7].

У випадку обмеження переміщення листа у вертикальному напрямку, коли лист встановлено на жорстку поверхню, електромагнітні сили (магнітний тиск) створюють в листі механічні напруження стиску $\sigma = f_z$.

Для отримання механічних напружень, що створюють сили f_y , необхідно проінтегрувати вираз (8) у відповідних межах вздовж осі y і результат поділити на товщину листа h :

$$\sigma(y_s) = \frac{\mu_0^2 \gamma}{16\pi^2} \frac{dI^2}{dt} \int_{y_s}^{\infty} \left[\frac{-(y-a)}{(y-a)^2 + d^2} + \frac{(y+a)}{(y+a)^2 + d^2} \right] \ln \frac{(y-a)^2 + d^2}{(y+a)^2 + d^2} dy. \quad (9)$$

Величина $\sigma(y_s)$ в (9) буде механічним напруженням розтягу, якщо система сил у напрямку осі y є врівноваженою і не потребує додаткової механічної опори. Покажемо це, одночасно спростивши вираз (9).

Зазначимо, що

$$\frac{d}{dy} \ln \frac{\sqrt{(y-a)^2 + d^2}}{\sqrt{(y+a)^2 + d^2}} = \frac{(y-a)}{(y-a)^2 + d^2} - \frac{(y+a)}{(y+a)^2 + d^2}. \quad (10)$$

Тоді інтеграл у (9) легко обчислюється і як результат маємо

$$\sigma(y_s) = \frac{\mu_0^2 \gamma}{64\pi^2} \frac{dI^2}{dt} \left[\ln \frac{(y_s - a)^2 + d^2}{(y_s + a)^2 + d^2} \right]^2. \quad (11)$$

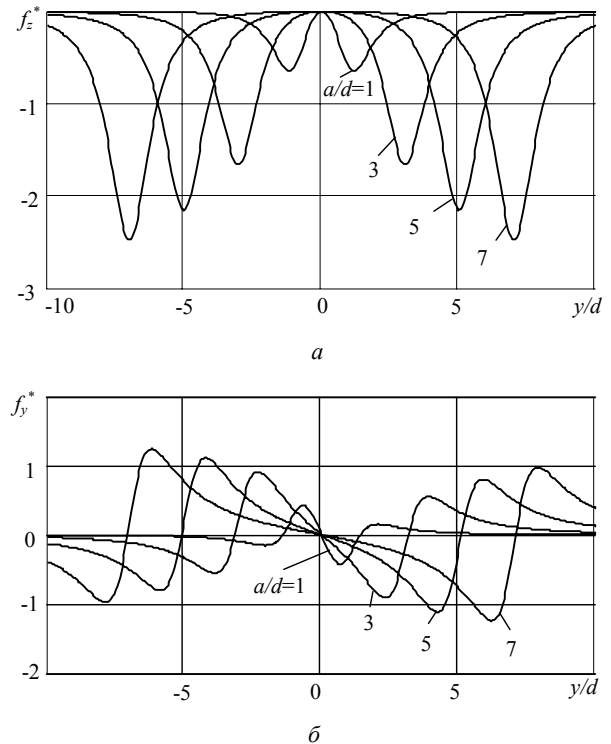


Рис. 2

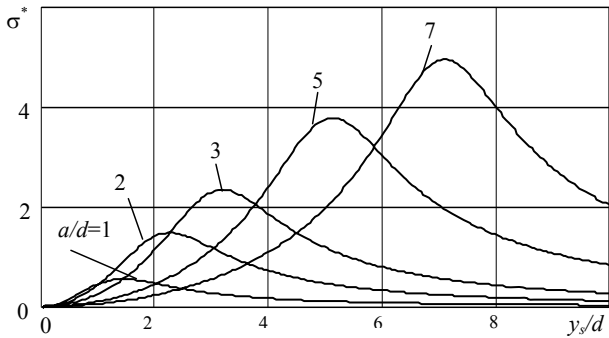


Рис. 3

a, бачимо, що у разі обраної товщі листа та параметрів імпульсу струму максимальна величина механічних напружень розтягу перевищує напруження стиску.

Особливістю розподілу механічних напружень у разі конфігурації індуктора зі струмопроводами, розташованими на однаковій відстані від металеві штаби, є те, що максимальні значення реалізуються вздовж двох ліній безпосередньо під струмопроводами. Тому така конфігурація є доцільною у використанні, якщо необхідною є механічна обробка двох паралельних швів. У більш розповсюдженому випадку обробки одного зварного шва доцільним є вибір такої конфігурації, де реалізується максимум механічних напружень вздовж однієї лінії. Для цього необхідно в подальшому проаналізувати розмірні величини струмів і параметри імпульсів, які забезпечать досягнення необхідних значень механічних напружень.

Розрахункова модель з індуктором, струмові контури якого розташовані в площині, перпендикулярній до плоского електропровідного листа. Реалізацію максимального механічного напруження вздовж однієї лінії (паралельно зварному шву)

представлено розрахунковою моделлю у вигляді прямого і зворотного провідників індуктора з імпульсним струмом, розташованих у перпендикулярній до листа площині, як показано на рис. 4.

Як і раніше, для оцінок будемо використовувати модель із зосередженими імпульсними струмами, параметри яких описуються співвідношеннями (1)...(3).

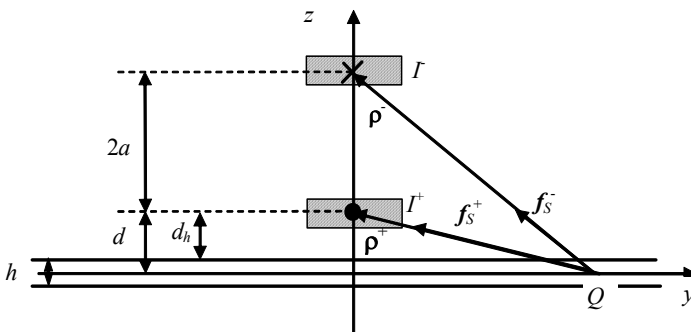


Рис. 4

Враховуючи геометрію системи, нормальна складова індукції магнітного поля та поверхнева густина індукваного струму виявляються [2] як

$$B_z = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \left[\frac{y}{y^2 + d^2} - \frac{y}{y^2 + (d + 2a)^2} \right]; \tag{12}$$

$$j_{sx} = \gamma h \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{dI}{dt} \ln \frac{y^2 + d^2}{y^2 + (d + 2a)^2}. \tag{13}$$

У свою чергу взаємодія індукваного струму зі струмами індуктора визначає поверхневу густину електромагнітних сил, що діють на металеву штабу:

$$\mathbf{f} = \mathbf{f}^+ + \mathbf{f}^- = - \frac{\mu_0^2 \gamma h}{16\pi^2} \frac{dI^2}{dt} \left[\frac{y\mathbf{e}_y - d\mathbf{e}_z}{y^2 + d^2} - \frac{y\mathbf{e}_y - (d + 2a)\mathbf{e}_z}{y^2 + (d + 2a)^2} \right] \ln \frac{y^2 + d^2}{y^2 + (d + 2a)^2}. \tag{14}$$

На рис. 5 показано залежності нормальної складової (магнітного тиску) (рис. 5 а) і складової вздовж поверхні, перпендикулярної зварному шву (рис. 5 б), поверхневої густини електромагнітних сил від точки на алюмінієвому листі при різних відстанях між струмопроводами індуктора.

Магнітний тиск визначається нормальною складовою сил в (14) (рис. 5 а) і за наявності жорсткої підкладки дає механічні сили стиску матеріалу листа.

Для отримання механічних напружень розтягу в перерізі листа, що проходить через координату y_s , необхідно проінтегрувати f_y вздовж осі y і результат поділити на товщину

листа h . Враховуючи, що співвідношення для функції $\ln \frac{\sqrt{y^2 + d^2}}{\sqrt{y^2 + (d + 2a)^2}}$ є аналогічним (10), остаточно отримаємо

$$\sigma(y_s) = \frac{\mu_0^2 \gamma}{64\pi^2} \frac{dI^2}{dt} \left[\ln \frac{y_s^2 + d^2}{y_s^2 + (d + 2a)^2} \right]^2 \quad (15)$$

Відповідні нормовані значення механічних напружень розтягу при різних перерізах листа показано на рис. 6.

З рис. 5 а і 6 видно, що максимальні значення як механічних напружень стиску, так і розтягу реалізуються вздовж однієї лінії під провідниками індуктора. Аналогічно попередньому випадку при збільшенні відстані між провідниками індуктора збільшуються і електромагнітні сили та механічні напруження.

Приклад розрахунку параметрів електромагнітної системи. Для алюмінієвих листів різної товщини визначимо необхідні параметри імпульсу та знайдемо оціночні величини амплітуди струму для системи, елементи якої показано на рис. 4. При цьому вважатимемо, що механічні напруження розтягу досягають межі плинності для алюмінію $\sigma_T = 10^8$ Па.

Як випливає з (15), максимальне механічне напруження розтягу для представленої конфігурації досягається в площині $y_s = 0$ і визначається співвідношенням

$$\sigma(y_s = 0, t) = \frac{\mu_0^2 \gamma}{16\pi^2} I_m^2 \omega \sin(2\omega t) \left[\ln \frac{1}{1 + 2\frac{a}{d}} \right]^2 \quad (16)$$

Механічне напруження розтягу $\sigma = \sigma_T$ досягається при визначеному амплітудному значенні струму індуктора I_m на момент часу, коли $2\omega t = \pi/4$. Крім амплітуди I_m імпульс струму характеризується циклічною частотою ω або тривалістю імпульсу $t_{imp} = \pi/\omega$, необхідні величини яких згідно з (3) залежать від товщини алюмінієвого листа h та обраного «коєфі-

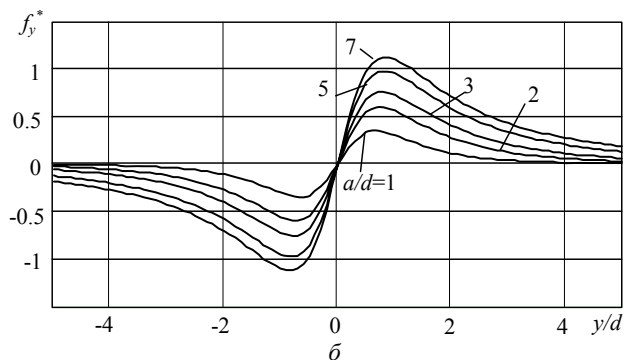
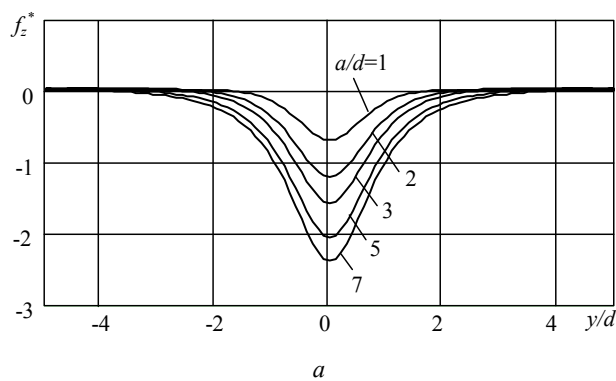


Рис. 5

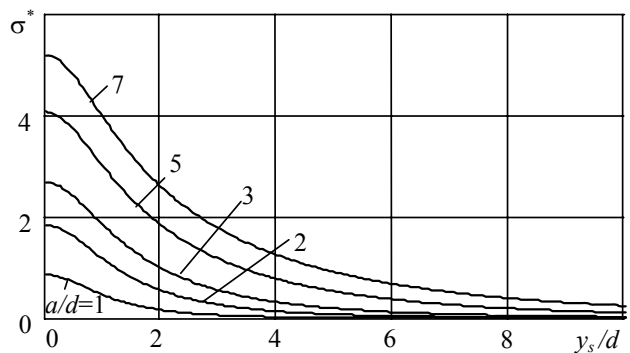


Рис. 6

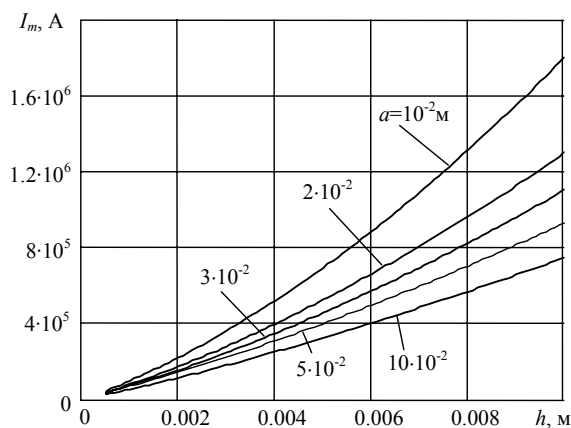


Рис. 7

цієнта непрозорості» k_d . На рис. 7 та 8 показано як параметри імпульсу струму залежать від товщини алюмінієвого листа.

На рис. 7 наведено залежності максимального струму індуктора I_m для випадку, коли механічні напруження розтягу досягають межі плинності для алюмінію залежно від товщини металеві штаби h при «коефіцієнті непрозорості» $k_d = 0,3$, $d_h = 10^{-3}$ м і різних розмірах індуктора a . На рис. 8 зображено тривалість імпульсу струму t_{imp} залежно від товщини металеві штаби h у разі різних значень «коефіцієнта непрозорості» k_d і $d_h = 10^{-3}$ м.

Певний вплив на значення амплітуди імпульсу струму, у разі якого механічні напруження розтягу досягають межі плинності, має відстань від ближнього до металеві поверхні провідника індуктора. Це ілюструє рис. 9, на якому зображено залежності максимального струму індуктора I_m , коли механічні напруження розтягу досягають межі плинності для алюмінію залежно від товщини металеві штаби h у разі різних відстаней між струмопроводом індуктора і металеві штабою d_h та у разі розмірів індуктора $a = 3 \cdot 10^{-2}$ м і «коефіцієнта непрозорості» $k_d = 0,3$.

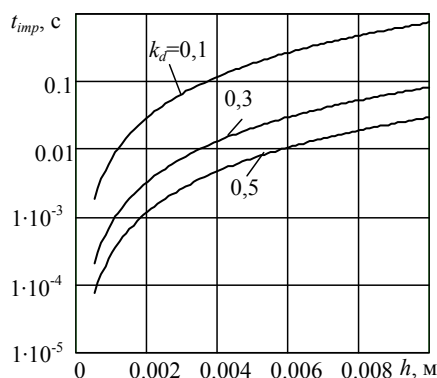


Рис. 8

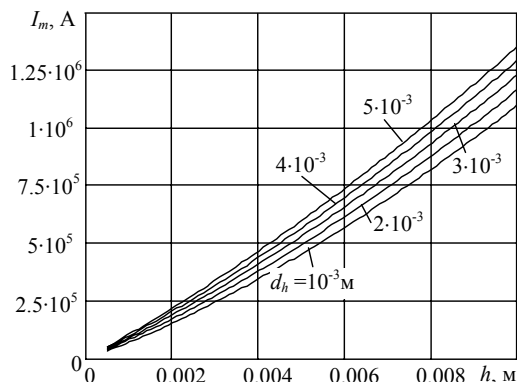


Рис. 9

Проаналізуємо показники, які можуть мати певні значення, а саме густину струму в електропровідному середовищі, і наведемо результати порівняння зміни в часі густини струму і механічних напружень.

На рис. 10 показано залежності розподілених за електропровідним листом амплітудних значень густини струму j_{mx} у разі досягнення механічних напружень розтягу $\sigma = \sigma_T$ у початковий момент часу $t = 0$ від координати y для різної товщини листа h у разі відстані між провідником і листом 10^{-3} м, розмірів індуктора $a = 3 \cdot 10^{-2}$ м і $k_d = 0,3$.

Як видно, амплітуда густини струму під провідниками індуктора у разі досягнення механічних напружень розтягу, що дорівнює межі плинності для алюмінію $\sigma_T = 10^8$ Па, виявляється в цілому вищою за значення 10^9 А/м². Значення 10^9 А/м² може бути також достатнім для обробки зварного шва і досягається у разі менших струмів індуктора, особливо внаслідок обробки алюмінієвого листа досить малої товщини.

На рис. 11 наведено часові залежності густини струму і механічних напружень розтягу під струмопроводами індуктора у разі $y = 0$, товщини листа $h = 3 \cdot 10^{-3}$ м, відстані між проводом і поверхнею листа 10^{-3} м, $a = 3 \cdot 10^{-2}$ м і досягнення механічних напружень розтягу

$\sigma = \sigma_T$. Видно, що у випадку слабого скін-ефекту максимуми густини струму і механічних напружень досягаються в різні моменти часу – максимум густини струму в листі має місце при максимумі похідної від струму, тобто при $t = 0$, а максимум механічних напружень при максимумі похідної від квадрату струму, тобто у разі $t = \pi/2\omega$.

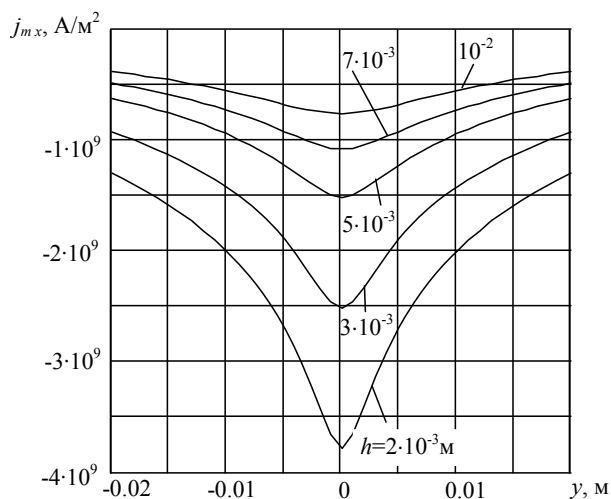


Рис. 10

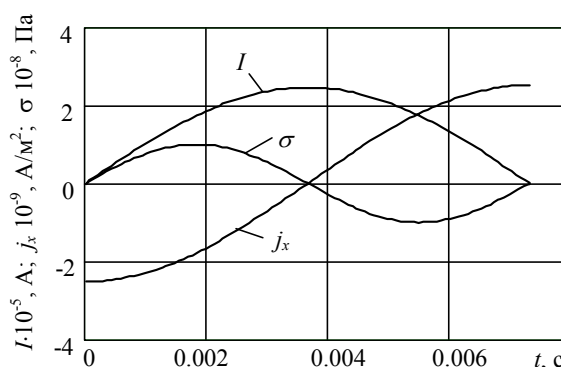


Рис. 11

Висновки. 1. У разі безконтактного індукційного способу введення струму в металеву штабу в умовах слабого скін-ефекту в зварному шві виникають механічні напруження як стиску в нормальному до поверхні напрямку, так і розтягу вздовж поверхні в напрямі, перпендикулярному зварному шву, причому механічні напруження розтягу перевищують напруження стиску, що може сприяти зниженню напружено-деформованих станів у зварній конструкції.

2. Амплітуда густини струму під провідниками струмового контура при досягненні механічних напружень розтягу на рівні межі плинності для алюмінію $\sigma_T = 10^8$ Па виявляється вищою за значення 10^9 А/м², яке може бути достатньою величиною для проявлення ефекту електропластичності в зварному шві й дає можливість зменшення струму індуктора. Особливістю застосування слабого скін-ефекту є однакова за товщиною величина густини індукovanого струму в електропровідному листі, що може виявитися позитивним фактором вказаного способу обробки зварних з'єднань імпульсним електричним струмом.

1. Баранов Ю.В., Троицкий О.А., Авраамов Ю.С. Физические основы электроимпульсной и электропластической обработок и новые материалы. Москва: МГИУ. 2001. 844 с.
2. Васецкий Ю.М. Электродинамика. Основные понятия, потенциальные та квазистационарные поля. Київ: Вид-во Нац. авіац. ун-ту «НАУ-друк». 2009. 160 с.
3. Васецкий Ю.М., Кондратенко І.П., Пашин О.М., Дзюба К.К. Обработка зварних з'єднань імпульсним електромагнітним полем при сильному скін-ефекті. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*. 2018. Вип. 49. С. 68–76.
4. Кнопфель Г. Сверхсильные импульсные магнитные поля: пер. с англ. Москва: Мир. 1972. 392 с.
5. Лобанов Л.М., Пашин Н.А., Логинов В.П., Покляцкий А.Т. Влияние электроимпульсной обработки на остаточное формирование тонколистовой сварочной конструкции. *Автоматическая сварка*. 2010. №3. С. 13–17.
6. Михайлов В.М. Импульсные электромагнитные поля. Харьков: Вища школа. Изд-во при Харьк. ун-те. 1979. 140 с.
7. Поливанов К.М. Теоретические основы электротехники. Часть 3. Теория электромагнитного поля. Москва: Энергия. 1969. 352 с.
8. Степанов Г.В., Бабуцкий А.И. Влияние импульсного электрического тока высокой плотности на прочность металлических материалов и напряженно-деформированное состояние элементов конструкций. Киев: Наукова думка. 2014. 279 с.

УДК 620.179:621.373.5

Ю.М. Васецкий¹, докт. техн. наук, **И.П. Кондратенко²**, чл.-корр. НАН Украины, **И.Л. Мазуренко³**, канд. техн. наук, **Н.А. Пащин³**, канд. техн. наук.

1–3 – Институт электродинамики НАН Украины,
пр. Победы, 56, Киев-57, 03057, Украина

4 – Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины,
ул. Малевича, 11, Киев-150, 03150, Украина

ОБРАБОТКА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ИМПУЛЬСНЫМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ПОЛЕМ ПРИ СЛАБОМ СКИН-ЭФФЕКТЕ

Рассмотрена возможность применения бесконтактного метода воздействия импульсного электромагнитного поля на сварной шов алюминиевого листа при слабом скин-эффекте, при котором в материале возникают механические напряжения и протекают индуцированные токи высокой плотности. Получены распределения магнитного давления, механических напряжений растяжения в листе и плотности индуцированного тока на основе расчетных моделей индукторов с различным расположением токовых контуров относительно электропроводящего листа. Установлено, что при слабом скин-эффекте механические напряжения растяжения достигают предела текучести при сверхвысокой величине тока контура. Определены необходимые величины продолжительности и амплитуды импульсных токов, которые обеспечивают слабый скин-эффект в алюминиевом листе и позволяют получить необходимые механические напряжения или необходимые величины плотности индуцированного тока для эффекта электропластичности в сварном шве. Библ. 8, рис. 11.

Ключевые слова: электромагнитное поле, импульсный электрический ток, слабый скин-эффект, сварной шов, металлическая лента.

Yu. Vasetskiy¹, I. Kondratenko², I. Mazurenko³, M. Pashchyn⁴

1–3 – Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,
Peremohy, 56, Kyiv-57, 03057, Ukraine

4 – Institute of Electric Welding Paton of the National Academy of Sciences of Ukraine,
Malevich st, 11, Kyiv-150, 03150, Ukraine

TREATMENT OF WELDED JOINTS BY A PULSE ELECTROMAGNETIC FIELD WITH SMALL SKIN-EFFECT

The possibility of the use of impulse electromagnetic field for contactless treatment of weld seam on aluminum sheet in case of weak skin effect which provides mechanical stresses and induced currents of high density is described. Using several inductor models with different arrangement of current circuits the distributions of magnetic pressure, mechanical extension stresses in the sheet and the inductor current density are computed. It is established that in case of weak skin effect the mechanical extension stresses reach yield point at an extremely high values of currents in circuit. The duration and amplitude of inductor currents that provide a weak skin effect in aluminum sheet and allow to obtain required mechanical stresses or desired values of induced current density for electroplastic effect in the weld seam are calculated. References 8, figures 11.

Key words: electromagnetic field, pulse electric current, small skin-effect, weld seam, metal tape.

1. Baranov Yu.V., Troitsky O.A., Avraamov Yu.S. Physical fundamentals of electropulse and electroplastic treatments and new materials. Moskva: MGIU. 2001. 844 p. (Rus)
2. Vasetsky Yu.M. Electrodynamics. Basic concepts, potential and quasi-stationary fields. Kyiv: Vid-vo Nats. aviats. un-tu "NAU-druk". 2009. 160 c. (Ukr)
3. Vasetsky Yu., Kondratenko I., Pashchyn O., Dziuba K. Treatment of welded joints by a pulse electromagnetic field with strong skin-effect. *Pratsi Instytutu elektrodynamiky NAN Ukrainy*. 2018. Vyp. 49. P. 68-76. (Ukr)
4. Knopfel G. Superstrong pulsed magnetic fields: per. s angl. Moskva: Mir. 1972. 392 p. (Rus)
5. Lobanov L.M., Pashchyn O.N., Loginov V.P., Poklyatsky A.T. Effect of electropulse treatment on the residual formation of a thin sheet welding structure. *Avtomaticheskaya svarka*. 2010. No 3. P. 13-17. (Rus)
6. Mikhailov V.M. Pulsed Electromagnetic Fields. Kharkov: Vyshcha shkola: Izd-vo pry Khark. un-te, 1979. 140 c. (Rus)
7. Polivanov K.M. Theoretical bases of electrical engineering. Part 3. Theory of the electromagnetic field. Moskva: Energiya, 1969. 352 p. (Rus)
8. Stepanov G.V., Babutsky A.I. Impact of a high-density pulsed electric current on the strength of metallic materials and the stress-strain state of structural elements. Kyev: Naukova dumka, 2014. 279 p. (Rus)

Надійшла 11.06.2018

Received 11.06.2018