

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

Investigation of induction heating of connected with tension metal details

Mathematical model for numerical investigation of electromagnetic, heat and mechanical processes during induction heating of planted with tension metal details was proposed. Electromagnetic process in model is described by differential equations in terms of complex vector magnetic potential at applied voltage, that allow to coordinate directly induction system with power source. Heat problem is formulated as nonstationary equation of heat conductance with internal sources of heat from eddy currents, induced in material of details. Internally mechanical process presented by differential equation of mechanical equilibrium, solving of which allow determine thermomechanical tensions and deformations during heating. As an example the process of dismantling of aluminum disks from steel hub of the support roller of crawler vehicle have been investigated, namely the process of heating of details with the help of proposed electromagnetic system, that consist of two coils and common magnetic conductor. References 11, figures 4, table.

Key words: induction heating, mathematical model, multiphysical modeling, electromagnetic system, dismantling of planted with tension details.

Надійшла 14.02.2018

Received 14.02.2018

УДК 620.179:621.373.5

ОБРОБКА ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ ІМПУЛЬСНИМ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИМ ПОЛЕМ ПРИ СИЛЬНОМУ СКІН-ЕФЕКТІ

Ю.М. Васецький¹, докт. техн. наук, І.П. Кондратенко², чл.-кор. НАН України,

О.М. Пашин³, канд. техн. наук, К.К. Дзюба⁴, асп.

1, 2, 4 – Інститут електродинаміки НАН України,

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

yuriy.vasetsky@gmail.com

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

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

Розглянуто можливість застосування безконтактного індукційного способу введення імпульсного струму в алюмінієвий лист для обробки зварного шва, при якому завдяки дії магнітного тиску в матеріалі виникають механічні напруження і протікають індуквані струми високої густини. Отримано оцінки необхідної величини струму індуктора, розподілу магнітного тиску і густини індукваного струму по ширині листа з використанням розрахункової моделі прямолінійного струмового провідника кругового перерізу. Встановлено, що при сильному скін-ефекті магнітний тиск досягає межі плинності лише за умови надвисокої густини струмового контура. Обґрунтовано доцільність застосування імпульсного електромагнітного поля для обробки шва струмами високої густини або використання комбінованого способу з одночасним застосуванням вказаного та електродинамічного способів впливу на шов. Бібл. 9, рис. 8.

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

Створення та впровадження якісно нових технологічних процесів у галузі металообробки з метою підвищення міцності, корозійної стійкості, експлуатаційних характеристик зварних конструкцій вимагає пошуку нових ефективних способів обробки металів і сплавів. На сьогодні відомим є факт суттєвого позитивного впливу імпульсного електричного струму (ІЕС) та імпульсного електромагнітного поля (ІЕМП) на механічні властивості металевих матеріалів [1]. Останнім часом створено низку високопродуктивних технологічних методів обробки конструкційних матеріалів із застосуванням впливу ІЕС та ІЕМП, які дають змогу інтенсифікувати процес обробки та дають більш високі результати по відношенню до традиційної термообробки [2], наприклад, підвищення пластичності більш ніж у три рази. Крім того, перспективним напрямком застосування ІЕС та ІЕМП є створення значних електродинамічних зусиль у металі, що призводить до появи необхідних для впливу на зварний шов

механічних напружень. Обробка металевих виробів електромагнітним полем, що створює в металі магнітний тиск, який наближається до межі плинності, сприяє зниженню рівнів напружених станів та підвищує пластичність [3].

Застосування зазначених вище методів обробки є ефективним способом покращення корозійної стійкості металів, регулювання напружено-деформованих станів у зварних конструкціях, пов'язаних з явищами фазових перетворень в металі, залишкових формозмін, появи тріщин у конструкціях. Особливо вразливими є області переходу шва до основного матеріалу, де можуть виникати осередки втомного руйнування [4]. Обробка зварного шва ІЕС позитивно впливає на зниження напружено-деформованих станів металевих конструкцій, про що свідчать проведені наукові та експериментальні дослідження [3].

Забезпечити протікання в металі струму значної величини за допомогою безконтактного способу введення енергії можна використовуючи індукційний метод. При цьому напруженість індукованого електричного поля і відповідно густини струмів пропорційна швидкості зміни поля в часі. Тому доцільним є застосування швидкоплинного імпульсного електромагнітного поля. У такому полі в металі з високою електропровідністю поле і струм існують у тонкому поверхневому шарі і у випадку, коли товщина цього шару є значно меншою, ніж товщина металевого листа, має місце сильний скін-ефект.

Метою роботи є проведення оцінки необхідних величин тривалості та амплітуди ІЕС, розподілу індукованих струмів та механічних напружень в електропровідному листі, створених струмовим контуром певної модельної геометрії за умови сильного скін-ефекту в металевому середовищі. Конкретні дослідження проведемо для листа з алюмінієвого сплаву АМгб [3], що застосовується на практиці при обробці ІЕС тонколистових стикових зварних з'єднань.

Загальні оцінки параметрів процесу. Імпульс струму та необхідна густина струму на металевій поверхні. Для проведення оцінки параметрів суттєвими є характеристики імпульсу струму по відношенню до того, як затухає магнітне поле в електропровідному середовищі. У випадку гармонічного в часі поля це питання вирішується шляхом порівняння

товщини електропровідного матеріалу h і глибини проникнення поля $\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu \mu_0 \gamma}}$, яка зменшується зі збільшенням циклічної частоти $\omega = 2\pi f$ та електропровідності матеріалу γ [5].

Якщо $h \geq (2...3)\delta$, то має місце сильний скін-ефект і можна вважати, що поле затухає в товщі листа. При цьому струми, що індукуються в листі, створюють магнітне поле, яке практично повністю компенсує первинне поле індуктора. Завдяки малій глибині проникнення струмів будемо нехтувати перехідним процесом дифузії магнітного поля в електропровідне середовище [6, 7].

У випадку імпульсного струму магнітне поле може бути представлено всім спектром частот. Однак практично завжди для оцінок у спектрі можна виділити характерну частоту або досить вузький діапазон частот, що з енергетичної точки зору характеризує значну частину імпульсу магнітного поля. Саме для таких частот справедливим залишається представлення про сильний скін-ефект.

Виберемо імпульс струму у вигляді позитивної півхвилі синусоїдальної форми

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

для якого тривалістю імпульсу є $t_{imp} = \pi/\omega$.

При сильному скін-ефекті імпульс має бути швидкодіючим [7], тобто у співвідношенні, яке пов'язує циклічну частоту ω – характерну частоту частотного спектра імпульсу, з товщиною h алюмінієвого листа $h = k_d \delta$, «коефіцієнт непрозорості» k_d повинен задовольняти умові $k_d > 2...3$ або

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

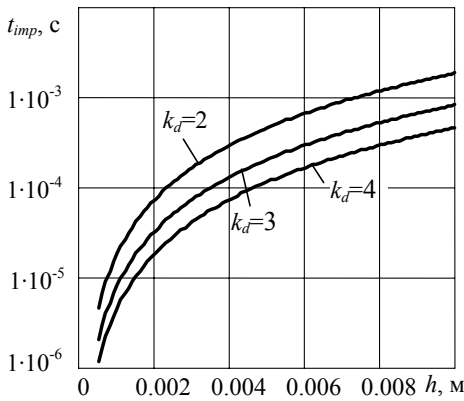


Рис. 1

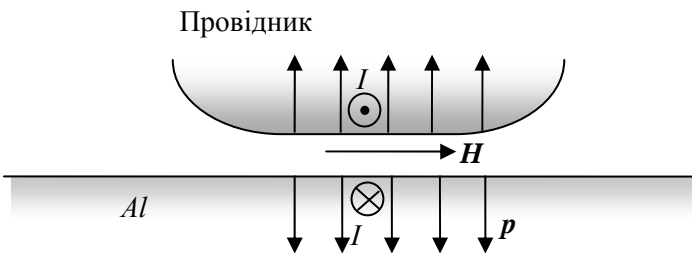


Рис. 2

На рис. 1 наведено залежності максимальних значень тривалості імпульсу струму t_{imp} залежно від товщини металевих листа h при обраному «коефіцієнті непрозорості» k_d .

Розглянемо спочатку електромагнітні процеси з точки зору силового впливу на електропровідне тіло.

При протіканні імпульсного струму в умовах сильного скін-ефекту струми концентруються на металевих поверхнях як в алюмінієвому листі, так і в провідниках індуктора, причому вони спрямовані у протилежних напрямках (рис. 2). Вектор напруженості магнітного поля \mathbf{H} на поверхнях орієнтований по дотичній до металевих поверхонь. Взаємодія поверхневих струмів і магнітного поля створює сили, які спрямовані по нормалі до поверхонь, що проявляються як магнітний тиск p , величина якого [8]

$$p = \frac{\mu_0 H^2}{2}. \quad (3)$$

Слід відзначити, що при сильному скін-ефекті індукований струм у поверхневому шарі електропровідного листа визначається величиною магнітного поля на поверхні, а не його похідною в часі. Це означає, що максимальне магнітне поле, густина струму та тиск магнітного поля визначаються максимальним значенням струму індуктора, а не швидкістю його зростання.

Якщо вважати, що магнітний тиск має створювати механічні напруження стискання, які досягають значень межі плинності, наприклад, для алюмінію $p = \sigma_T = 10^8$ Па, то напруженість магнітного поля повинна дорівнювати

$$H = \sqrt{\frac{2\sigma_T}{\mu_0}} = 1,262 \cdot 10^7 \text{ А/м}. \quad (4)$$

У цьому випадку поверхнева густина струму дорівнює напруженості поля $j_s = H$. Однак при подачі імпульсу струму (1) його густина розподіляється за глибиною нерівномірно, затухаючи від свого максимального значення на поверхні алюмінієвого листа. У цій статті не ставиться за мету знайти точний розподіл струму за глибиною. Оцінки необхідної густини струму отримуємо, виходячи з усередненого значення \bar{j} , яку визначимо як рівномірно розподілену в межах глибини проникнення поля δ , що відповідає сталому розподілу гармонічного поля [5]. Зазначимо, що при такому припущенні амплітуда густини струму на поверхні j_0 пов'язана із усередненим значенням як $j_0 = \sqrt{2}\bar{j}$ [8]. З урахуванням того, що за циклічну частоту поля прийнято циклічну частоту струму ω (1), враховуючи вирази (2) і (4), маємо середнє значення \bar{j} густини струму:

$$\bar{j} = \frac{H}{\delta} = \frac{k_d}{h} \sqrt{\frac{2\sigma_T}{\mu_0}}. \quad (5)$$

Як зазначалось, принцип електромагнітної обробки полягає в силовому впливі на металеву штабу та впливі на зварний шов струму необхідної густини. Вираз (5) дає змогу знайти густину струму, за якої досягається напруження стискання, порівнянне з межею плинності алюмінію, і одночасно порівняти це значення з тими, які необхідні для забезпечення впливу на метал струму високої густини. На рис. 3 наведено усереднену за глибиною густину струму

му \bar{j} в алюмінієвому листі залежно від товщини h , для якої виконуються умови сильного скін-ефекту.

Як видно з рис. 3, при досягненні межі плинності для алюмінію густина струму більш як на порядок (для товщини листа $h \leq 4 \cdot 10^{-3}$ м) перевищує значення $j \sim 10^9$ А/м², яке вважається достатнім для виникнення ефекту електропластичності [1]. Ця обставина дає змогу стверджувати, що перетворення механічних властивостей металу із застосуванням впливу струму високої густини може виявитися більш доцільним порівняно з електродинамічним впливом і використанням магнітного тиску. Однак ефективним може виявитися і комбінований вплив обох факторів.

Розрахункова модель з прямолінійним струмовим провідником кругового перерізу, розташованим паралельно плоскому алюмінієвому листу. Індуктор з ІЕС, що створює магнітне поле, звичайно (щоб не збільшувати індуктивність) виконується як одновиткова система з провідниками з матеріалу з високою електропровідністю, наприклад, міді. Тому сильний скін-ефект має місце як в алюмінієвому листі, так і в провідниках електромагнітної системи, що змушує розглядати електромагнітний процес сукупно. У зв'язку з цим для отримання оцінок параметрів електромагнітного процесу доцільно певним чином спростити розрахункову модель, але так, щоб не знехтувати суттєвими характеристиками.

Вибір конкретної конфігурації провідників індуктора, який створює імпульс електромагнітного поля на поверхні алюмінієвого листа, може бути зроблений у результаті детального аналізу декількох факторів, у тому числі з урахуванням джерела живлення. Однак у цьому дослідженні ставиться мета отримання основних оцінок густини струму і силових факторів впливу на зварний шов електропровідного листа в умовах сильного скін-ефекту. Тому розглянемо розрахункову модель, коли верхня частина контура індуктора слабо впливає на розподіл струму по поверхні алюмінієвого листа, що має місце, коли відстань між провідниками в декілька разів перевищує розміри їх поперечного перерізу та відстань між провідником і металевим листом. Таке припущення дає змогу розглядати спрощену розрахункову модель у вигляді прямолінійного провідника, орієнтованого паралельно плоскій поверхні поділу середовищ (рис. 4). Розрахункова модель є відомою моделлю плоскопаралельного поля прямолінійних струмів [5, 8].

Будемо розглядати ідеальний скін-ефект, коли в розрахунках поля нехтують глибиною скін-шару порівняно з іншими геометричними розмірами. В той же час для більш детального аналізу можна було б застосувати асимптотичний метод розрахунку, який одночасно є і більш складним [9]. Однак для оцінок достатнім є використання моделі ідеального скін-ефекту.

Відсутність нормальної складової індукції поля на плоскій поверхні призводить до пошуку розв'язку задачі для магнітного поля у вигляді суперпозиції односпрямованих струмів $j_x \mathbf{e}_x$ в області $z > 0$ і протилежно спрямованих дзеркально відбитих від межі поділу середовищ струмів $j_{1x} \mathbf{e}_x = -j_x \mathbf{e}_x$.

Сумарний струм дорівнює нулю, і така система струмів створює магнітне поле, векторний потенціал якого має тільки одну поздовжню складову [5]:

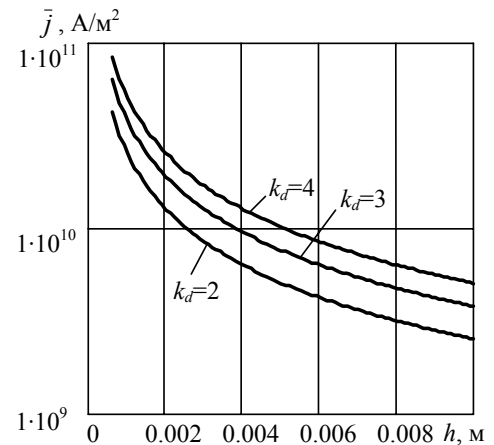


Рис. 3

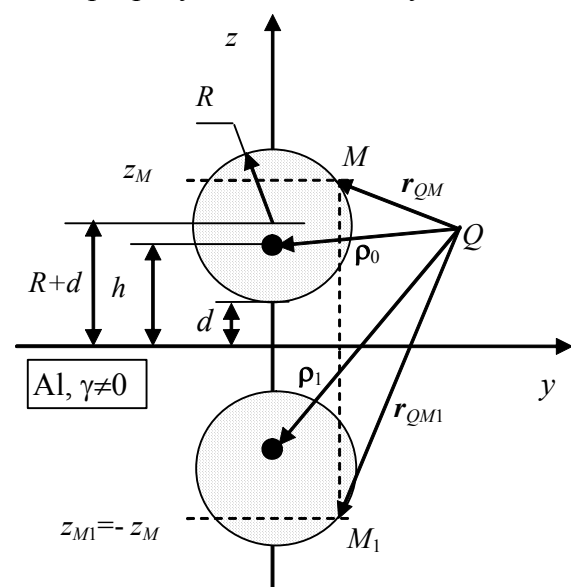


Рис. 4

$$A_x(Q) = \frac{\mu_0}{2\pi} \int_S j_x(M) \ln \frac{|r_{M_1} - r_Q|}{|r_M - r_Q|} dS_M, \quad (6)$$

де позначення у виразі (6) зрозумілі з рис. 4.

Лінії поля, дотичні до яких є паралельними векторам індукції, визначаються з умови

$$A_x(y, z) = \text{const}. \quad (7)$$

При цьому з (6) отримуємо $A_x(y, z=0) = 0$. Звідси випливає, що значення $A_x(y, z)$ дає потік магнітного поля через поверхню одиничної довжини вздовж осі x , обмежену з двох інших сторін прямою на електропровідній поверхні, і прямою, яка проходить через обрану точку з координатами (y, z) .

Якщо сильний скін-ефект проявляється в алюмінієвому листі і в провідниках індуктора, то в (6) джерела поля розташовані тільки на поверхні провідників з поверхневою густиною $\mathbf{j}_S = j_S \mathbf{e}_x$, а інтегрування проводиться вздовж лінії l межі провідників:

$$A_x(Q) = \frac{\mu_0}{2\pi} \int_l j_S(M) \ln \frac{|r_{M_1} - r_Q|}{|r_M - r_Q|} dl_M. \quad (8)$$

Крім того, у цьому випадку поверхня провідника є поверхнею сталого значення $A_x = \text{const}$ і відповідно сталого значення потоку магнітного поля.

У даному дослідженні оцінку параметрів будемо отримувати для моделі, в якій вважається, що провідник являє в перерізі коло, тобто припускається, що умова $A_x(y, z) = \text{const}$ на поверхні провідника дає лінії у вигляді кіл. Відомо, що в цьому випадку таке ж поле створюється прямолінійним зосередженим струмом $I \mathbf{e}_x$, що протікає над поверхнею з ідеальною електропровідністю [5, 8], тобто ці магнітні поля є еквівалентними одне одному. Причому в цьому випадку всі лінії $A_x(y, z) = \text{const}$ при будь-якому значенні сталої мають форму кіл.

Знайдемо взаємне розташування провідника кругового перерізу та еквівалентного зосередженого провідника зі струмом.

Як видно з рис. 4, зосереджений струм розташовано на висоті h від межі поділу середовищ. Згідно з (8) векторним потенціалом струму і його дзеркального відбиття є

$$A_x(y, z) = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \ln \frac{\sqrt{y^2 + (z+h)^2}}{\sqrt{y^2 + (z-h)^2}} \quad (9)$$

і відповідно циліндричні поверхні рівного значення векторного потенціалу $A_x(y, z) = \text{const}$ описуються рівнянням

$$\frac{\sqrt{y^2 + (z+h)^2}}{\sqrt{y^2 + (z-h)^2}} = k. \quad (10)$$

Останній вираз – це рівняння кіл, центри яких лежать на осі z і знаходяться на відстані $z_0 = R + d$ від поверхні $z = 0$:

$$z_0 = h \left(1 + \frac{2}{k^2 - 1} \right). \quad (11)$$

Радіусами кіл є

$$R = \sqrt{z_0^2 - h^2} = \frac{2kh}{k^2 - 1}. \quad (12)$$

При заданні радіуса провідника R і його відстані d від поверхні з виразу (12) випливає, що висота розташування еквівалентного струму визначається як

$$h = \sqrt{(d+R)^2 - R^2} = \sqrt{d^2 + 2dR}. \quad (13)$$

При цьому потік магнітного поля $\Phi = A_x$ між провідником і поверхнею

$$\Phi = A_x = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \ln \frac{\sqrt{d^2 + 2dR} + d}{\sqrt{d^2 + 2dR} - d}. \quad (14)$$

Індукція магнітного поля в довільній точці Q з урахуванням розташування еквівалентних струмів розраховується таким чином:

$$\mathbf{B}(Q) = -\frac{\mu_0 I}{2\pi} \left(\frac{\mathbf{e}_x \times \boldsymbol{\rho}_0}{|\boldsymbol{\rho}_0|^2} - \frac{\mathbf{e}_x \times \boldsymbol{\rho}_1}{|\boldsymbol{\rho}_1|^2} \right). \quad (15)$$

Зокрема, на плоскій алюмінієвій поверхні $Q(y, z=0)$ індукція магнітного поля має тільки дотичну складову:

$$\mathbf{B}(y, z=0) = \frac{\mu_0 I}{\pi} \frac{h}{y^2 + h^2} \mathbf{e}_y = \frac{\mu_0 I}{\pi} \frac{\sqrt{d^2 + 2dR}}{y^2 + d^2 + 2dR} \mathbf{e}_y. \quad (16)$$

Аналогічно легко знайти розподіл індукції за поверхнею провідника кругового перерізу. Зазначимо, що завдяки наявності не рівної нулю кривини провідника максимальна величина індукції поля на його поверхні є більшою, ніж максимальна індукція на поверхні плоского алюмінієвого листа. Зазначену обставину проілюстровано на рис. 5, на якому представлено залежності нормованих максимальних значень індукції на провіднику $B_{np \max}^*$ і на алюмінієвому листі $B_{Al \max}^*$ від співвідношення R/d .

У зв'язку з тим, що магнітний тиск визначається магнітним полем на поверхні металевої штаби і не залежить від її товщини, то і загальний струм індуктора при досягненні магнітного тиску, що дорівнює межі плинності для алюмінію $p = \sigma_T = 10^8$ Па, не залежить від товщини алюмінієвого листа. На максимальні значення індукції на поверхні електропровідної штаби впливають поперечні розміри індуктора – його радіус R і відстань d до листа.

Амплітудні значення імпульсного струму I_m , необхідного для досягнення під провідником тиску, що чисельно дорівнює межі плинності алюмінію, залежно від радіуса провідника індуктора R при різних відстанях від нього до поверхні листа d представлено на рис. 6.

Видно, що необхідна величина амплітуди імпульсу струму буде тим меншою, чим менший радіус струмового контура кругового перерізу і чим ближче він розташований до межі поділу середовищ. Це пояснюється тим, що характерний розмір області, де концентруються найбільші величини поля, прямо залежить від поперечних розмірів струмового контура, а наближеність площини поділу середовищ визначає максимальну величину поля і, як наслідок, магнітний тиск у точці, що є найближчою до нього. Разом з цим швидкість зменшення поля від його максимального значення на поверхні металевих листа також залежить від радіуса і наближеності до нього струмового контура, і тому необхідна величина тиску буде реалізована на обмеженій площині поверхні металевих листа.

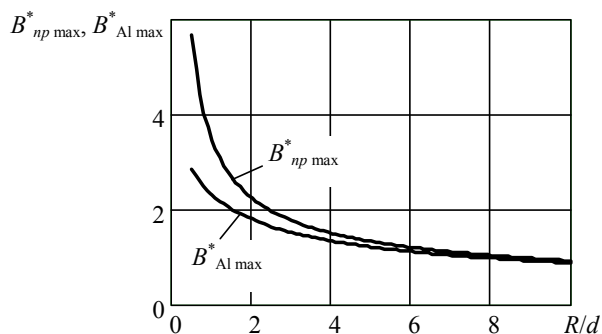


Рис. 5

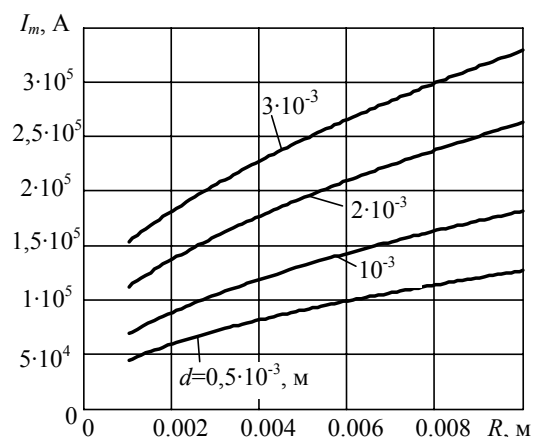


Рис. 6

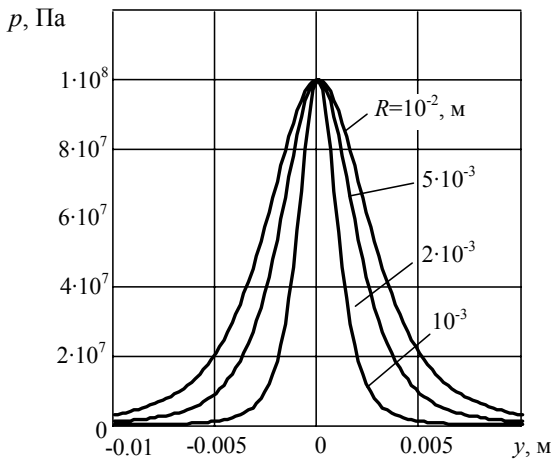


Рис. 7

Розподіл амплітудного значення магнітного тиску по алюмінієвому листу при різних радіусах струмового контура R і відстані від нього до металевої поверхні $d = 10^{-3}$ м і при максимальному тиску, який дорівнює межі плинності для алюмінію $p = \sigma_T = 10^8$ Па, представлено на рис. 7.

Як видно з рис. 7, якщо шов досить широкий і необхідно забезпечити механічні напруження на всій його ширині, то і радіус струмового контура має бути відповідного розміру, зі збільшенням якого суттєво зростає і необхідна амплітуда імпульсу струму.

Згідно з виразом (5) досягнення певного значення магнітного тиску на електропровідне тіло

безпосередньо пов'язано з визначеною величиною густини струму в поверхневому шарі. Ця характеристика є важливою при застосуванні впливу на зварний шов струму високої густини. Тому наведемо результат розрахунку розподілу густини струму в алюмінієвому листі при умовах, коли максимальні механічні напруження стискання досягають межі плинності алюмінію.

На рис. 8 представлено розподіл середньої за глибиною густини струму \bar{j} у напрямку, перпендикулярному до зварного шва при відстані від струмового контура до електропровідної поверхні $d=10^{-3}$ м і «коефіцієнті непрозорості» $k_d=3$ для двох випадків: а) при різних радіусах індуктора R і товщині листа $h=3 \cdot 10^{-3}$ м; б) при різній товщині листа h і радіусі індуктора $R=3 \cdot 10^{-3}$ м.

З рисунків видно, що у випадку сильного скін-ефекту при досягненні тиску магнітного поля, рівного межі плинності для алюмінію, густина струму в електропровідному листі значно перевищує «критичне» значення 10^9 А/м², особливо для листів малої товщини. Суттєвим є також перевищення «критичного» значення не тільки безпосередньо під контуром, а й у межах певного поперечного розміру, що є важливим для обробки шва конкретної ширини. Тому саме застосування впливу на зварний шов струмами високої густини може виявитися більш доцільним з точки зору його реалізованості. При цьому потрібні амплітуди струму можуть виявитися меншими, ніж ті, що необхідні для досягнення механічних напружень на рівні 10^8 Па. Однак більш аргументований висновок може бути зроблений після проведення досліджень, у першу чергу у випадку, коли глибина проникнення поля стає порівнянною з товщиною алюмінієвих листів, оскільки в такому випадку струм розподіляється більш рівно-

номірно, ніж при сильному скін-ефекті.

Треба також зазначити, що отриману оцінку густини струму було реалізовано в межах глибини проникнення поля, яка в цій постановці вважається малою порівняно з товщиною листа з алюмінію. Для більш повної оцінки можливості застосування зазначеного підходу необхідно розглянути також випадок, коли використову-

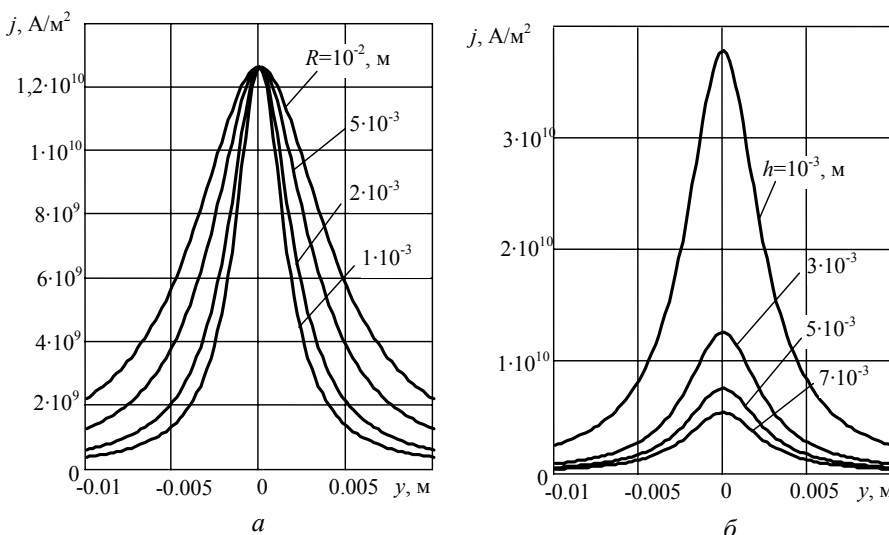


Рис. 8

ються імпульси струму при глибині проникнення поля, яка є порівнянною з товщиною листа. У такому випадку густина струму буде меншою, ніж та, що отримана при сильному скін-ефекті, але на даному етапі досліджень лише відмітимо таку можливість.

Висновки. 1. Безконтактний індукційний спосіб введення струму в металеву штабу для обробки зварного шва може бути реалізований із застосуванням імпульсного магнітного поля з тривалістю, за якої електромагнітне поле практично повністю затухає в межах товщини штаби, тобто має місце сильний скін-ефект для характерного діапазону частот імпульсу.

2. В умовах сильного скін-ефекту дія магнітного поля, яке індукується імпульсним струмом індуктора, проявляється в створенні в металевій штабі механічного напруження, спрямованого нормально до поверхні. Величина магнітного тиску може досягти під індуктором величин, які порівнянні з межею плинності алюмінію, що може сприяти зниженню напружено-деформованих станів у зварній конструкції.

3. Амплітуда густини струму під провідниками контура за умови досягнення механічних напружень стискання 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. Цей факт може бути підставою для використання імпульсного магнітного поля для обробки зварних швів струмами високої густини або комбінованого способу із одночасним застосуванням вказаного та електродинамічного способів впливу на шов.

1. Степанов Г.В., Бабуцкий А.И. Влияние импульсного электрического тока высокой плотности на прочность металлических материалов и напряженно-деформированное состояние элементов конструкций. Киев: Наук. думка, 2014. 279 с.
2. Баранов Ю.В., Троицкий О.А., Авраамов Ю.С. Физические основы электроимпульсной и электропластической обработок и новые материалы. Москва: МГИУ, 2001. 844 с.
3. 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.
4. Панин В.Е. Основы физической мезомеханики. *Физ. мезомеханика*. 1998. Т.1. С. 5–22.
5. Поливанов К.М. Теоретические основы электротехники. Часть 3. Теория электромагнитного поля. Москва: Энергия, 1969. 352 с.
6. Кнопфель Г. Сверхсильные импульсные магнитные поля: пер. с англ. Москва: Мир, 1972. 392 с.
7. Михайлов В.М. Импульсные электромагнитные поля. Харьков: Вища шк. Изд-во при Харьк. ун-те, 1979. 140 с.
8. Васецкий Ю.М. Электродинамика. Основні поняття, потенціальні та квазістаціонарні поля. Київ: Вид-во Нац. авіац. ун-ту «НАУ-друк», 2009. 160 с.
9. Vasetskyi Yu. Mazurenko I., Dziuba K. Conditions for Application of Asymptotic Method to Electromagnetic Field Analysis in System of “a Current Loop – an Electroconducting Body”. *Computational Problems of Electrical Engineering*. 2014. Vol. 4. N 1. P. 91–96.

УДК 620.179:621.373.5

Ю.М. Васецкий¹, докт. техн. наук, **И.П. Кондратенко**², чл.-корр. НАН Украины, **А.Н. Пашин**³, канд. техн. наук, **К.К. Дзюба**⁴, асп.

1, 2, 4 – Институт электродинамики НАН Украины,
пр. Победы, 56, Киев-57, 03057, Украина

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

Обработка сварных соединений импульсным электромагнитным полем при сильном скин-эффекте

Рассмотрена возможность использования бесконтактного индукционного способа введения импульсного тока в алюминиевый лист для обработки сварного шва, при котором благодаря воздействию магнитного давления в материале возникают механические напряжения и протекают индуцированные токи высокой плотности. Получены оценки необходимой величины тока индуктора, распределения магнитного давления и плотности индуцированного тока по ширине листа с использованием расчетной модели прямолинейного токового проводника круглого сечения. Установлено, что при сильном скин-эффекте магнитное давление достигает границы текучести только при условии сверхвысокой плотности тока токового контура. Обоснована целесообразность использования импульсного электромагнитного поля для обработки шва токами высокой плотности или использования комбинированного способа с одновременным применением указанного и электродинамического способов воздействия на шов. Библиограф. 9, рис. 8.

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

Yu. Vasetskyi¹, I. Kondratenko², O. Pashchyn³, K. Dziuba⁴

1, 2, 4 – Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,
Peremohy, 56, Kyiv-57, 03057, Ukraine

3 – 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 strong skin-effect

The possibility of using of contactless induction method for the introduction of pulse current into aluminum sheet for processing welding seam is considered. Due to the effect of a magnetic pressure, mechanical stresses occur in the material and induced high-density currents flow. The necessary values of the inductor current, the distribution of magnetic pressure, and the induced current density of the sheet are estimated using the design model of a rectilinear current conductor of circular cross-section. It is found that with a strong skin-effect, the magnetic pressure reaches the yield point only under the condition of an ultrahigh current density of the current contour. The expediency of using of pulse electromagnetic field for seam treatment with high-density currents or combined method with the simultaneous use of high-density currents and electrodynamics methods of action on the seam is substantiated. References 9, figures 8.

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

Надійшла 27.11.2017

Received 27.11.2017

УДК 621.315.2 : 004.94

ВЛИЯНИЕ КОРРОЗИОННЫХ ЯВЛЕНИЙ НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В ИЗОЛЯЦИИ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО КАБЕЛЯ

И.Н. Кучерявая, докт. техн. наук

Институт электродинамики НАН Украины,

пр. Победы, 56, Киев-57, 03057, Украина

e-mail: rb.irinan@gmail.com

На основе компьютерного моделирования исследовано электрическое поле в трехслойной изоляционной структуре высоковольтного кабеля с шито-полиэтиленовой изоляцией в случае коррозии металлических элементов – экрана и жилы. Рассмотрены варианты исполнения экрана в виде концентрических проволок и спиральной медной ленты. Электрические задачи решены в стандартной программе методом конечных элементов для осесимметричного представления кабеля и в поперечном его сечении. Показано влияние коррозии элементов кабеля на значение и характер изменения напряженности электрического поля в прилегающих полупроводящих слоях и основной изоляции. Библи. 15, рис. 5.

Ключевые слова: высоковольтный кабель, шито-полиэтиленовая изоляция, полупроводящие слои, коррозия жилы и экрана, компьютерное моделирование.

Введение. Ключевой проблемой эксплуатации современных кабельных систем является обеспечение их надежности и длительного срока службы. К факторам, способным снизить надежность силовых кабелей, относится ряд как внешних, так и внутренних факторов, в числе которых влияние окружающей среды, что приводит, в первую очередь, к загрязнению поверхности кабелей химическими продуктами, их проникновению совместно с влагой извне внутрь кабелей [8]. Неблагоприятные условия окружающей среды (например, атмосферные воздействия или для кабелей подземной прокладки агрессивность почвы) являются причиной эксплуатационных дефектов кабелей и прежде всего коррозии их металлических элементов – токопроводящей жилы и экрана для кабелей с изоляцией из шитого полиэтилена (СПЭ), а также связанных с этим повреждений прилегающих структурных элементов [1–4, 6, 11, 12].

Деградация кабелей может происходить по причине коррозии двух видов [1, 6]: естественной (из-за повышенного влагосодержания, микробиологической агрессивности почвы и др.) и промышленной коррозии (вследствие химического загрязнения окружающей среды при наличии растворимых солей – сульфатов, нитратов, хлоридов, которые увеличивают