

## НЕСТАЦІОНАРНІ ЕЛЕКТРОФІЗИЧНІ ПРОЦЕСИ В СИСТЕМАХ ЗНИЖЕННЯ ЗАЛИШКОВИХ НАПРУЖЕНЬ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ

Л.М.Лобанов<sup>1</sup>, акад. НАН України, І.П.Кондратенко<sup>2\*</sup>, чл.-кор. НАН України, А.В.Жильцов<sup>3\*\*</sup>,  
докт.техн.наук, О.М.Карлов<sup>2</sup>, канд.техн.наук, М.О.Пашин<sup>1</sup>, канд.техн.наук, В.В.Васюк<sup>3</sup>,  
В.А.Яшук<sup>1</sup>

<sup>1</sup>- Інститут електрозварювання ім. Є.О.Патона НАН України,  
вул. Боженко, 11, Київ-150, 03680, Україна,

<sup>2</sup>- Інститут електродинаміки НАН України,  
пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна,

e-mail: [dep7ied@ukr.net](mailto:dep7ied@ukr.net)

<sup>3</sup>- Національний університет біоресурсів і природокористування України,

вул. Героїв оборони, 12, Київ, 03041, Україна.

e-mail: [azhilt@gmail.com](mailto:azhilt@gmail.com)

*Розроблено тривимірну інтегро-диференціальну математичну модель процесу розрядження ємності на електромагнітну систему з послідовно з'єднаних котушки індуктивності і електроду. Магнітне поле котушки збуджує вихрові струми в електропровідній пластині, що встановлюється під котушкою, внаслідок чого виникає електромагнітна сила, яка притискає електрод до поверхні. Визначено оптимальні параметри контуру для створення електродинамічного тиску. Проведено електродинамічну обробку зварних з'єднань, визначено режими, за яких в області зварного шва досягається трансформація зусиль розтягування на зусилля стискання, підвищується більше ніж у 2 рази втомна міцність зварного з'єднання при циклічному навантаженні. Бібл. 9, рис. 9.*

**Ключові слова:** залишкові зварювальні напруження, електродна система, імпульс струму, рівняння Максвелла, метод інтегральних рівнянь, електродинамічні сили.

**Вступ.** Однією з основних причин зниження ресурсу металевих конструкцій є залишкові зварювальні напруження, що негативно впливають на характеристики втомної міцності, корозійної стійкості та залишкові формозміни [9]. У зварному шві та зоні навколо шва мають місце напруження розтягу, що є близькими до порогу плинності металу. Існує ціла гама методів зниження залишкових зварювальних напружень, такі як термічна, вібраційна та ультразвукова обробки, попереднє пружне навантаження та ін. [6]. Дані методи мають певні недоліки: необхідність створення енерго- та металомісткого технологічного обладнання, обмеження при обробці великогабаритних конструкцій та значні витрати енергії.

Перспективним шляхом підвищення ресурсу зварних з'єднань, що характеризується відносною простотою застосування та низькими витратами енергії, є їхня обробка імпульсами електричного струму та електромагнітного поля різної тривалості та інтенсивності. Відомо, що при протіканні через металеві матеріали імпульсів струму щільністю більше  $10^9$  А/м<sup>2</sup> та при накладанні стискаючих зусиль реалізується ефект електропластичності [1], за якого підвищується їхня статична та втомна міцності, відбувається релаксація їхнього напружено-деформованого стану та зміна інших механічних характеристик.

Одним із методів реалізації імпульсного електромагнітного впливу є електродинамічна обробка, що базується на одночасній дії імпульсних електродинамічної сили та електричного струму. За рахунок прямого проходження струму через оброблюваний метал та дії імпульсної електромагнітної сили у ньому ініціюються деформаційні процеси, взаємодія яких зі зварювальними напруженнями викликає залишкові пластичні деформації. Результатом взаємодії є зниження рівня залишкових напружень розтягу або їхнє перетворення у напруження стискання, що позитивно впливає на подовження ресурсу зварних з'єднань.

У роботі [5] розроблено концепцію електротехнічного комплексу для зниження залишкових напружень при застосуванні електродинамічної обробки, до складу якого входять електродна система індукційного типу [3] та генератор імпульсів струму (рис. 1). Принцип дії пристрою полягає у накопиченні електричного заряду в конденсаторі  $C$ , що відбувається при живленні від стабілізованого джерела постійної напруги  $E_0$  через великий опір  $R_3$ , та наступного швидкого розрядження цього

конденсатора через індуктивність  $L = L_d + L_k$  та електродну систему, де  $L_k$  – індуктивність котушки  $I$ , яка конструктивно входить до електродної системи,  $L_d$  – додаткова індуктивність, величину якої можна змінювати для надання розряду певної тривалості. Одне з призначень котушки індуктивності – це задання параметрів імпульсу розрядного струму. Інше – створення електродинамічного тиску електрода  $6$  на поверхню зразка  $7$ . Така сила виникає в момент проходження імпульсу струму за рахунок взаємного відштовхування струмів у котушці індуктивності  $I$  та вихрових струмів, що виникають у диску  $4$  при взаємодії з магнітним полем котушки. У центрі диску жорстко закріплено мідний стержень  $5$ , в який вмонтовано вольфрамовий електрод  $6$ . Як швидкодіючий комутуючий елемент використовується керований тиристор  $VS$  відповідного класу. Струм у розрядному колі визначається за падінням напруги на безіндуктивному шунті з опором  $R_{ш}$ . Електродний пристрій розміщується в корпусі з електроізоляційного матеріалу  $2$  з кришкою  $3$ , через яку проходить стержень  $5$ . Для підведення до електродного пристрою струму використовуються виводи  $8, 9$ .

У зв'язку з тим, що під час перехідного процесу розряду ємності електродинамічна сила притискання згодом набуває від'ємного значення (диск  $4$  притягається до котушки  $I$ ), виникає загроза розриву електричного контакту електрода з поверхнею зразка. Це може призвести до виникнення електродугових процесів з виділенням теплової енергії в зоні контакту, що є неприпустимим. Для усунення такого явища необхідно якомога більше знизити від'ємну електродинамічну силу. Природа цієї сили пов'язана з величиною похідної від величини струму в контурі і зміною її знаку. Отже, чим повільніше буде змінюватися струм у контурі після проходження максимального свого значення, тим меншою буде від'ємна сила. Такий процес є характерним для аперіодичного розряду конденсатора на  $R-L$  коло. Але останнє припущення пов'язано зі збільшенням активного опору кола і відповідним небажаним зменшенням величини струму. Тому запропоновано це протиріччя розв'язувати засобами перетворювальної техніки. Найпростіше воно реалізується встановленням зворотного діоду  $VD$  паралельно ємності  $C$ . При цьому певний час, до моменту переходу напруги на конденсаторі через нуль, діод знаходиться в закритому стані, а потім відкривається і продовження перехідного процесу відбувається вже у колі, до якого входять лише індуктивність і активний опір.

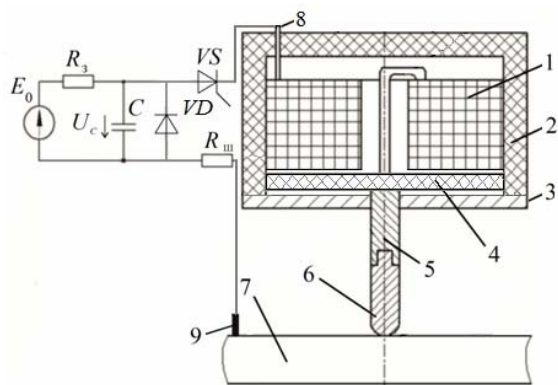


Рис. 1

безпечення параметрів струмових імпульсів, достатніх для ефективного регулювання залишкового напруженого стану металевих конструкцій.

**Математична модель.** На рис. 2 показано ескіз електромагнітної системи та наведено електрофізичні параметри середовищ:  $R, L, C$  – електричні параметри електричного кола;  $R = R_k + R_d$ ,  $R_k$  – активний опір котушки,  $R_d$  – додатковий опір, величину якого можна змінювати для надання розряду певної тривалості;  $U_C$  – напруга на конденсаторі  $C$ ;  $VS$  – тиристор;  $\mu_0$  – магнітна постійна,  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м;  $\gamma_1$  – питома провідність матеріалу масивного диску  $D_1$ ;  $\gamma_2$  – питома провідність матеріалу електрода  $D_2$ ;  $\gamma_3$  – питома провідність матеріалу пластини  $D_3$ ;  $D_0$  – зовнішній простір;  $D_w$  – котушка індуктивності. Котушку виконано з провідника прямокутного перерізу  $a \times b$ , де  $a, b$  – розміри проводу вздовж радіусу та осі симетрії котушки відповідно; кількість витків позначимо через  $N_w$ .

У загальному випадку задача розрахунку параметрів струмів у колі та масивних провідниках вимагає розв'язання рівнянь Максвелла в тривимірній необмеженій області. Крайова задача у цьому

Застосування методу електродинамічної обробки, таким чином, потребує розробки методів розрахунку взаємопов'язаних електрофізичних процесів – розряду ємності на розгалужене електричне коло з напівпровідниковими елементами та створення необхідних з технологічних міркувань електродинамічних зусиль у зоні контакту електрода і зразка, що обробляється.

**Метою статті** є розробка математичної моделі нестационарного електрофізичного процесу електродинамічної обробки зварних з'єднань та встановлення на її основі конструктивних, електричних і режимних характеристик для за-

випадку (в термінах векторний магнітний потенціал  $\vec{A}$  та скалярний електричний потенціал  $\varphi$ ) має вигляд (рис. 2)

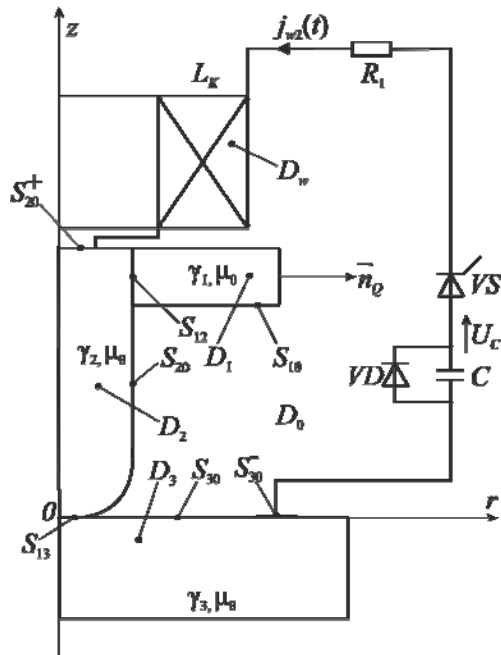


Рис. 2

$$\Delta \vec{A} = -\mu_0 \vec{\delta}_W, \quad Q \in D_W; \quad (1)$$

$$\Delta \vec{A} = -\mu_0 \vec{\delta}_q, \quad Q \in D_q, \quad q = 1, 2, 3, \quad (2)$$

$$\vec{\delta}_q = \gamma_q \left( -\text{grad} \varphi - \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \right);$$

$$\Delta \vec{A} = 0, \quad Q \in D_0; \quad (3)$$

$$[\vec{n}_Q, \text{rot} \vec{A}^-] = [\vec{n}_Q, \text{rot} \vec{A}^+], \quad Q \in S; \quad (4)$$

$$[\vec{n}_Q, \vec{A}^-] = [\vec{n}_Q, \vec{A}^+], \quad Q \in S; \quad (5)$$

$$\Delta \varphi_q = 0, \quad Q \in D_q, \quad q = 1, 2, 3; \quad (6)$$

$$\varphi^+ = \varphi^- \text{ на } S; \quad (7)$$

$$-\gamma_2 \frac{\partial A_{n_Q}^+}{\partial t} - \gamma_2 \frac{\partial \varphi^+}{\partial n_Q} = \delta_{n_Q}^+ \text{ на } S_{20}^+; \quad (8)$$

$$-\gamma_3 \frac{\partial A_{n_Q}^+}{\partial t} - \gamma_3 \frac{\partial \varphi^+}{\partial n_Q} = \delta_{n_Q}^- \text{ на } S_{30}^-; \quad (9)$$

$$-\gamma^+ \frac{\partial A_{n_Q}}{\partial t} - \gamma^+ \frac{\partial \varphi^+}{\partial n_Q} = -\gamma^- \frac{\partial A_{n_Q}}{\partial t} - \gamma^- \frac{\partial \varphi^-}{\partial n_Q}, \quad Q \in S; \quad (10)$$

$$A(\infty) = 0, \quad (11)$$

де  $\vec{\delta}_W$  – миттєва густина струму в обмотці котушки  $D_W$ ;  $\vec{\delta}$  – миттєва густина вихрових струмів;  $\vec{n}_Q$  – зовнішня нормаль у точці  $Q$  границі масивного провідника;  $\vec{A}^+$ ,  $\vec{A}^-$  – граничні значення векторного магнітного потенціалу в точці  $Q$  при наближенні до неї із внутрішньої (зовнішньої) сторони масивного провідника;  $\varphi^+$ ,  $\varphi^-$  – значення скалярного електричного потенціалу в точці  $Q \in S$  при наближенні до неї із внутрішньої (зовнішньої) сторони масивного провідника  $D_q$ ,  $q = 1, 2, 3$ ;  $A_{n_Q}^+$ ,  $A_{n_Q}^-$  – миттєве значення проекції векторного магнітного потенціалу на зовнішню нормаль  $\vec{n}_Q$  у точці  $Q \in S$  при наближенні до неї із внутрішньої (зовнішньої) сторони масивного провідника  $D_q$ ,  $q = 1, 2, 3$ ;  $\gamma^+$ ,  $\gamma^-$  – питома провідність матеріалу внутрішньої (зовнішньої) області стосовно границі  $S$ ;  $S_{20}^+$ ,  $S_{30}^-$  – частина границь  $S_{20}$ ,  $S_{30}$ , на яких задано значення нормальної компоненти густини струму  $\delta_{n_Q}^+$  й  $\delta_{n_Q}^-$  (місця контактів в електромагнітній системі, до яких приєднується ділянка кола, що складається з ємності, котушки та активного опору); питома провідність оточуючого масивні тіла повітря приймається рівною нулю.

Якщо струм  $j_W(t)$  в обмотці котушки  $D_W$  відомий, то проекція густини струму в місцях контакту  $S_{20}^+$ ,  $S_{30}^-$  знаходиться так:

$$\delta_{n_Q}^+(t) = -\frac{j_W(t)}{S_{10}^+}, \quad \delta_{n_Q}^-(t) = \frac{j_W(t)}{S_{30}^-}, \quad (12)$$

де  $S_{20}^+$ ,  $S_{30}^-$  – площа контакту в області  $S_{20}^+$ ,  $S_{30}^-$ .

Систему рівнянь (1) – (11) треба доповнити рівняннями електричного кола за другим законом Кірхгофа для миттєвих значень струму і напруги в  $RLC$ -контурі:

– до моменту  $t_1$  спрацювання діода  $VD$

$$j_W(t)R_k + \frac{d\Psi(t)}{dt} + \frac{1}{C} \int_0^t j_W(t)dt + u_C(0_+) + \varphi_{S_{20}} - \varphi_{S_{30}} = 0, \quad 0 < t < t_1; \quad (13)$$

$$j_W(0_+) = j_W(0_-) = 0, \quad u_C(0_+) = u_C(0_-); \quad (14)$$

– після моменту  $t_1$  спрацювання діода  $VD$

$$j_W(t)R_k + \frac{d\Psi(t)}{dt} = 0, \quad t_1 < t, \quad j_W(t_{1+}) = j_W(t_{1-}) = 0. \quad (15,16)$$

Тут  $j_W(t) = \delta_W(t)\Delta S_W$  – струм у котушці  $D_W$ ;  $\Delta S_W = a \cdot b$  – площа витка;  $\Psi(t)$  – миттєве потокозчеплення магнітного поля, що створює як струм у витках котушки, так і наведені ним вихрові струми в масивному диску, зі струмом котушки;  $u_C(0_-)$  – початкове значення напруги на ємності  $C$ ;  $\varphi_{S_{20}}, \varphi_{S_{30}}$  – електричні потенціали, які визначають падіння напруги на контакті електрода з поверхнею зразка (приймається рівною нулю).

Активний опір обмотки котушки визначається формулою

$$R_k = \frac{2\pi\rho}{a \cdot b} \sum_{i=1}^{N_W} r_i, \quad (17)$$

де  $\rho$  – питомий опір матеріалу, з якого виконано обмотку котушки;  $r_i$  – радіус витка визначається відстанню між віссю  $Oz$  та центром  $i$ -го витка.

Якщо котушка, електрод і пластина представляють собою циліндричні масивні тіла, що мають спільну вісь обертання, з якої надалі сполучається вісь  $z$  циліндричної системи координат  $r, \alpha, z$  (рис. 2), то результуюче тривимірне електромагнітне поле може бути знайдено накладанням перехрещених двовимірних електромагнітних полів

$$\vec{E}(r, z, t) = E_\alpha(r, z, t)\vec{e}_\alpha, \quad \vec{\delta}(r, z, t) = \delta_\alpha(r, z, t)\vec{e}_\alpha, \quad (18)$$

$$\vec{A}(r, z, t) = A_\alpha(r, z, t)\vec{e}_\alpha, \quad \vec{B}(r, z, t) = B_r(r, z, t)\vec{e}_r + B_z(r, z, t)\vec{e}_z, \quad (19)$$

$$\text{та} \quad \vec{E}(r, z, t) = E_r(r, z, t)\vec{e}_r + E_z(r, z, t)\vec{e}_z, \quad \vec{\delta}(r, z, t) = \delta_r(r, z, t)\vec{e}_r + \delta_z(r, z, t)\vec{e}_z, \quad (20)$$

$$\vec{A}(r, z, t) = A_r(r, z, t)\vec{e}_r + A_z(r, z, t)\vec{e}_z, \quad \vec{B}(r, z, t) = B_\alpha(r, z, t)\vec{e}_\alpha, \quad (21)$$

де  $\vec{E}$  – напруженість електричного поля, В/м;  $\vec{\delta}$  – густина струму, А/м<sup>2</sup>;  $\vec{B}$  – магнітна індукція, Тл;  $r, z$  – координати циліндричної системи координат, м;  $t$  – час, с;  $\vec{e}_z, \vec{e}_\alpha, \vec{e}_r$  – орти циліндричної системи координат.

Визначення  $\alpha$ -компоненти вихрових струмів у масивних провідниках **Ошибка! Источник ссылки не найден.**, обумовлених струмами в обмотці  $D_W$ , зводиться до розв'язку інтегро-диференційного рівняння [8]

$$\frac{\delta_\alpha(Q, t)}{\gamma(Q)\lambda} + \frac{\partial}{\partial t} \int_S \delta_\alpha(M, t) T(Q, M) dS_M = -\frac{\partial}{\partial t} \int_{S_W} \delta_{W\alpha}(M, t) T(Q, M) dS_M, \quad Q \in S, \quad (22)$$

де  $\delta_\alpha(Q, t)$  – миттєве значення  $\alpha$ -компоненти густини вихрових струмів у точці  $Q$ ;  $\delta_\alpha(M, t)$  – аналогічно в точці  $M$ ;  $\lambda = \mu_0/(2\pi)$ ;  $\gamma(Q) = \gamma_1$ , якщо  $Q \in S_1$ ;  $\gamma(Q) = \gamma_2$ , якщо  $Q \in S_2$ ;  $\gamma(Q) = \gamma_3$ , якщо  $Q \in S_3$ ;  $\delta_{W\alpha}(M, t)$  – миттєве значення  $\alpha$ -компоненти густини струму в обмотці  $D_W$ ;  $S$  – поперечний переріз масивних провідників меридіанною площиною;  $S_W$  – те саме для котушки;

$$T(Q, M) = f(k)\sqrt{r_M/r_Q}; \quad (23)$$

$f(k)$  визначається виразом

$$f(k) = \left(\frac{2}{k} - k\right)K(k) - \frac{2}{k}E(k); \quad k^2 = \frac{4r_Q r_M}{(r_Q + r_M)^2 + (z_Q - z_M)^2}, \quad (24)$$

де  $K(k), E(k)$  – повні еліптичні інтеграли відповідно першого й другого роду модуля  $k$ ;  $r_M, z_M$  – координати в циліндричній системі координат точки  $M$ ;  $r_Q, z_Q$  – аналогічно точки  $Q$ .

Рівняння (22) розв'язується сумісно з рівняннями електричного кола (13)–(16).

Потокозчеплення магнітного поля у рівняннях (13), (15), що створює як струм у витках котушки, так і наведені ним вихрові струми в масивному диску, зі струмом  $i$ -го витка котушки визначається у такий спосіб [2]:

$$\Psi_i(t) = \int_S \vec{B}(Q,t) d\vec{S}_Q = \int_S \text{rot} \vec{A}(Q,t) d\vec{S}_Q = \oint_l A(Q,t) dl_Q = 2\pi A_\alpha(Q_i,t) r_{Q_i}, \quad i = 1, 2, \dots, N_W,$$

де  $S$  – площа витка зі струмом,  $l$  – його контур;  $r_{Q_i}$  – радіус  $i$ -го витка котушки;  $A_\alpha(Q_i,t)$  – миттєве значення  $\alpha$ -компоненти векторного магнітного потенціалу в точці  $Q_i$ , що розташована у центрі  $i$ -го витка котушки.

Потокозчеплення з усіма витками котушки знаходиться шляхом їхнього підсумовування

$$\begin{aligned} \Psi(t) &= \sum_{i=1}^{N_W} \Psi_i(t) = 2\pi \sum_{i=1}^{N_W} A_\alpha(Q_i,t) r_{Q_i} = \\ &= \mu_0 \sum_{i=1}^{N_W} r_{Q_i} \int_S \delta_\alpha(M,t) T(Q_i,M) dS_M + \mu_0 \sum_{i=1}^{N_W} r_{Q_i} \int_{S_W} \delta_{\alpha W}(M,t) T(Q_i,M) dS_M. \end{aligned} \quad (25)$$

Таким чином, підставляючи вираз (25) у співвідношення (13), (15), приходимо до системи рівнянь (22), (13), (15) для миттєвих значень густини струмів у котушці та миттєвих значень густини струмів у масивних провідниках, яка розв'язується чисельними методами: за просторовими змінними апроксимується методом повного осереднення, а потім за часом будуються різницеві схеми першого або другого порядку точності [2].

Якщо відомі розподіл вихрових струмів у масивних провідниках та струм в обмотці котушки, миттєва об'ємна густина електродинамічних зусиль  $\vec{f}(Q,t)$  у перерізі диску  $D_1$  із густиною струмів  $\vec{\delta}_1(Q,t)$ , який знаходиться в магнітному полі  $\vec{B}(Q,t)$ , що створюється струмами в котушці та вихровими струмами в інших масивних провідниках  $D_2$  та  $D_3$ , визначається як

$$\vec{f}(Q,t) = \vec{e}_r \delta_\alpha(Q,t) B_z(Q,t) - \vec{e}_z \delta_\alpha(Q,t) B_r(Q,t). \quad (26)$$

Тут магнітна індукція  $\vec{B}(Q,t)$  визначається згідно з виразом [7]

$$\vec{B}(Q,t) = \frac{\mu_0}{2\pi} \int_{S_W} \delta_W(M,t) \vec{b}(Q,M) dS_M + \frac{\mu_0}{2\pi} \int_{S_2 \cup S_3} \delta(M,t) \vec{b}(Q,M) dS_M,$$

$$\text{де} \quad \vec{b}(Q,M) = b_r(Q,M) \vec{e}_r + b_z(Q,M) \vec{e}_z, \quad (27)$$

$$b_r(Q,M) = \frac{(z_Q - z_M)}{r_Q \sqrt{(r_Q + r_M)^2 + (z_Q - z_M)^2}} \left[ -K(k) + \frac{r_Q^2 + r_M^2 + (z_Q - z_M)^2}{(r_Q - r_M)^2 + (z_Q - z_M)^2} E(k) \right]; \quad (28)$$

$$b_z(Q,M) = \frac{1}{\sqrt{(r_Q + r_M)^2 + (z_Q - z_M)^2}} \left[ K(k) + \frac{r_M^2 - r_Q^2 - (z_Q - z_M)^2}{(r_Q - r_M)^2 + (z_Q - z_M)^2} E(k) \right]. \quad (29)$$

Результуюча сила, що діє на масивний неферомагнітний диск  $D_1$ , обчислюється як

$$\vec{F}(t) = \int_{S_1} \vec{f}(Q,t) dS_Q. \quad (30)$$

Визначення  $r$ - та  $z$ -компонент вихрових струмів у масивних провідниках (20), обумовлених струмами в обмотці  $D_W$ , зводиться до розв'язку інтегро-диференційних рівнянь [8]

$$\frac{\vec{\delta}(Q,t)}{\gamma(Q)\lambda} + \frac{\partial}{\partial t} \int_S \vec{\delta}(M,t) T(Q,M) dS_M - \frac{1}{\epsilon_0 \mu_0 L} \int_L \sigma(M,t) \vec{\xi}(Q,M) dL_M = -\frac{\partial}{\partial t} \int_{S_W} \vec{\delta}_W(M,t) T(Q,M) dS_M,$$

$$Q \in S, \quad S = S_1 \cup S_2 \cup S_3; \quad (31)$$

$$\frac{\chi(Q)\mu_0\epsilon_0}{\pi} \frac{\partial}{\partial t} \int_S (\vec{\delta}(M,t) \cdot \vec{n}_Q) T(Q,M) dS_M + \sigma(Q,t) + \frac{\chi(Q)}{\pi} \int_L \sigma(M,t) (\vec{\xi}(Q,M) \cdot \vec{n}_Q) dL_M =$$

$$= -\frac{\chi(Q)\mu_0\varepsilon_0}{\pi} \frac{\partial}{\partial t} \int_{S_W} (\bar{\delta}_W(M,t) \cdot \bar{n}_Q) T(Q,M) dS_M - F(Q,t), \quad Q \in L \cup L_{10}^+ \cup L_{30}^-; \quad (32)$$

де  $\bar{\delta}(Q,t)$  – миттєве значення густини вихрових струмів у точці  $Q$ ;  $\bar{\delta}(M,t)$  – аналогічно в точці  $M$ ;  $\lambda = \mu_0/(2\pi)$ ;  $\gamma(Q) = \gamma_1$ , якщо  $Q \in S_1$ ;  $\gamma(Q) = \gamma_2$ , якщо  $Q \in S_2$ ;  $\gamma(Q) = \gamma_3$ , якщо  $Q \in S_3$ ;  $L$  – слід від перерізу меридіанною площиною границі  $D$  масивних провідників;  $T(Q,M)$  – ядро інтегро-диференційного рівняння як функція координат точок  $Q, M$  визначається виразом (23);  $\varepsilon_0 \approx 8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м,  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м – діелектрична та магнітна постійні;  $\sigma(M,t)$  – миттєве значення густини простого шару електричних зарядів у точці  $M$  границі  $S$ ;  $\bar{n}_Q$  – зовнішня нормаль у точці  $Q$  до границі масивного провідника.

У рівняннях (31) – (32) введено позначення

$$\chi(Q) = \begin{cases} \frac{\gamma^+(Q) - \gamma^-(Q)}{\gamma^+(Q) + \gamma^-(Q)}, & \text{якщо } Q \in L; \\ 1, & \text{якщо } Q \in L_{10}^+ \cup L_{30}^-; \end{cases} \quad F(Q,t) = \begin{cases} 0, & \text{якщо } Q \in L; \\ \frac{2\varepsilon_0}{\gamma_1} \delta_{n_Q}^+(t), & \text{якщо } Q \in L_{10}^+; \\ \frac{2\varepsilon_0}{\gamma_3} \delta_{n_Q}^-(t), & \text{якщо } Q \in L_{30}^-. \end{cases}$$

Тут  $\delta_{n_Q}^+(t), \delta_{n_Q}^-(t)$  визначаються за виразами (12)

$$\bar{\xi}(Q,M) = \bar{e}_r \xi_r(Q,M) + \bar{e}_z \xi_z(Q,M),$$

$$\text{де } \xi_r(Q,M) = \frac{r_M}{r_Q \sqrt{(r_M + r_Q)^2 + (z_M - z_Q)^2}} \left\{ \frac{r_M^2 - r_Q^2 + (z_M - z_Q)^2}{(r_Q - r_M)^2 + (z_M - z_Q)^2} E(k) - K(k) \right\}, \quad (33)$$

$$\xi_z(Q,M) = \frac{2r_M(z_M - z_Q)}{r_Q \sqrt{(r_M + r_Q)^2 + (z_M - z_Q)^2} \cdot \left[ (r_Q - r_M)^2 + (z_M - z_Q)^2 \right]} E(k). \quad (34)$$

Система рівнянь (31), (32) розв'язується сумісно с системою рівнянь (22), (13), (15), з якої визначається миттєве значення струму  $j_W(t)$  в обмотці  $D_W$  для визначення  $\delta_{n_Q}^+(t), \delta_{n_Q}^-(t)$  за виразами (12), що входять до рівняння (32). Для розв'язку системи інтегро-диференційних рівнянь (31), (32) використовуються чисельні методи, аналогічні розв'язку системи рівнянь (22), (13), (15).

Адекватність і достовірність математичного моделювання нестационарного процесу в електромагнітній системі була підтверджена експериментальними дослідженнями, які виконувалися на дослідному зразку розробленого пристрою. За мету експериментів ставилося дослідження процесу розрядження в колі та співставлення результатів з розрахунковими значеннями.

Параметри електромагнітної системи: внутрішній діаметр котушки 20 мм; зовнішній діаметр котушки 92 мм; висота котушки 6 мм; кількість витків котушки 18, розмір поперечного перерізу витка  $a \cdot b = 2 \times 6$  мм, коефіцієнт заповнення 0,9; діаметр мідного диску 97 мм; його товщина 3 мм; відстань між котушкою та мідним диском 0,5 мм; діаметр електроду 8 мм; висота електроду 40 мм; діаметр контактної площадки електроду з пластиною 2 мм. Електрофізичні параметри середовищ:  $\gamma_1 = 5,95 \cdot 10^7$  См/м – питома провідність мідного диску,  $\gamma_2 = 1,89 \cdot 10^7$  См/м – питома провідність вольфрамівого електроду,  $\gamma_3 = 3,74 \cdot 10^7$  См/м – питома провідність пластини (сплав АМГ6).

Проведені експериментальні дослідження процесу розрядження дозволили визначити амплітудне значення струму в розрядному колі та тривалість імпульсу, які вимірювалися на шунті з опо-

ром  $R_{ш} = 5,7$  мОм і записувалися осцилографом *Tektronix TDS 1012*. Ємність конденсатора складала  $C = 5140$  мкФ.

На рис. 3, як приклад, наведено графіки залежності струму від часу при параметрах кола:  $U_C = 500$  В,  $C = 5140$  мкФ,  $L_d = 9$  мкГн. Сумарний активний опір кола  $R$  складався з опорів провідників  $R_d = 15$  мОм та котушки  $R_k = 5,46$  мОм. На рис. 4 представлено графік залежності електродинамічної сили, що передається через контактну площадку на дослідний зразок. Як видно з наведених графіків, експериментальні та розрахункові результати з визначення величини струму в перехідному процесі розрядного кола добре узгоджуються, а сила електродинамічного притискання при досягненні максимального значення в 22 кН в момент, що співпадає з максимумом величини струму, спадає до майже нульового значення. При цьому величина від'ємної сили виявляється незначною.

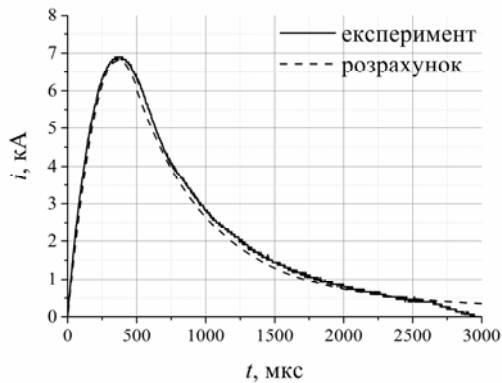


Рис. 3

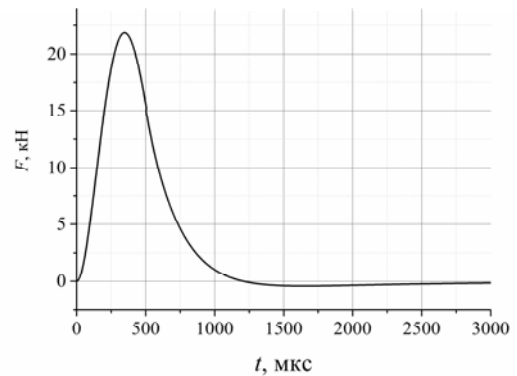


Рис. 4

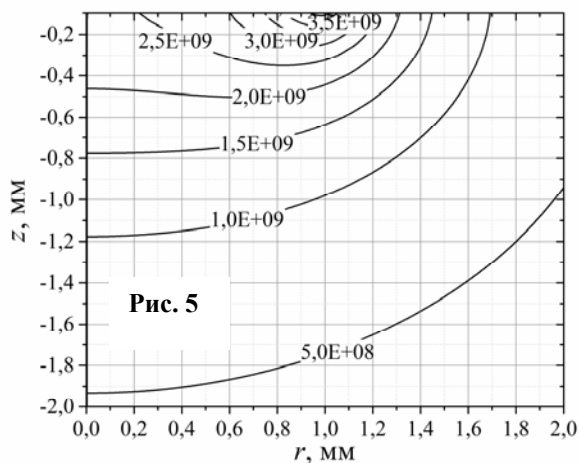


Рис. 5

За визначених вище параметрів електродинамічної обробки –  $I_{max} \approx 7$  кА та  $F_{max} \approx 22$  кН розподіл густини струму в дослідному зразку показано на рис. 5, де лініями позначено границі зон, в яких густина струму перевищує позначені на лініях величини у  $A/m^2$ . Виявляється, що густина струму перевищує  $10^9 A/m^2$  у зоні, наближеній до половини еліпсоїда обертання з великою віссю 3,4 мм та малою напіввіссю 1,2 мм. Згідно з припущенням [1] у цій зоні відбуваються електропластичні ефекти.

**Апробація розрахунків на натурних зразках зварних з'єднань.** Враховуючи результати розрахунку і експериментів, досліджувався вплив електродинамічної обробки у режимі  $U_C = 500$  В, що від-

повідає електродинамічному зусиллю  $F_{max} = 22$  кН, для зниження початкового рівня пружних напружень розтягу  $\sigma_x = 140$  МПа у плоских зразках алюмінієвого сплаву АМг6.

У роботі використовувалися натурні зразки пластин зі сплаву АМг6 розмірами 400x150x2 мм із центральним зварним швом. Зварні з'єднання виконувалися автоматичним зварюванням ТІG(Аг) у режимі, що забезпечує напругу, струм та швидкість процесу відповідно  $U_{зв} = 20$  В,  $I_{зв} = 170$  А та  $V_{зв} = 5,5$  мм/с.

З метою вивчення впливу прямого проходження імпульсного струму через зразок обробка зварного шва проводилася із використанням обладнання [5] (рис. 1). Дослідження розподілу поздовжньої компоненти  $\sigma_x$  (вздовж лінії шва) залишкових напружень у центральному поперечному перерізі зразків проводилися із використанням методу електронної спекл-інтерферометрії [4]. Розподіл  $\sigma_x$  до, а також після обробки показано на рис. 6. Так, вихідний рівень зусиль розтягування  $\sigma_x$  досягав 165 МПа (крива 1), що близько до порогу плинності  $\sigma_{0,2}$  сплаву АМг6. Після обробки, що реалізує тільки динамічний тиск (струм через електрод не проходить), рівень  $\sigma_x$  суттєво знизився (крива

2), а в зоні контакту електроду напруження розтягування трансформувалися у стискання, рівень яких сягав  $\sigma_x = -30$  МПа.

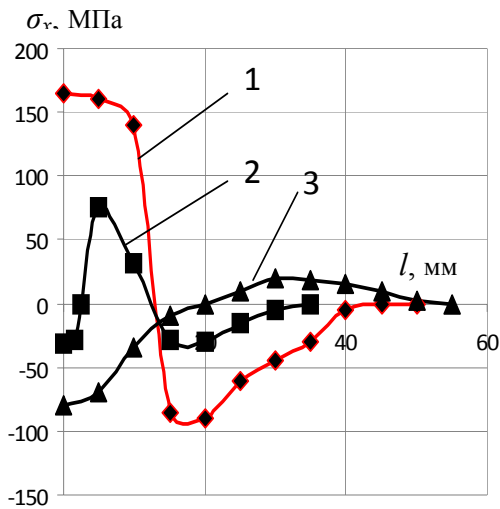


Рис. 6

При обробці металу за схемою рис. 1, що забезпечує проходження струму через метал зразка, максимальний рівень стискаючих напружень  $\sigma_x$  становив  $-80$  МПа (крива 3), а зона їхнього розповсюдження сягала близько 20 мм, гарантовано перекриваючи зону вірогідного руйнування зварного з'єднання. Таким чином, вплив прямого проходження струму через метал, згідно з механізмом, наданим у [1], стимулює деформаційні процеси, ініційовані електродинамічним тиском електроду із зусиллям  $F_{max}$ , що отримано із використанням наведеної розрахункової моделі не лише в зоні гарантованого електропластичного ефекту (густина струму перевищує  $10^9$  А/м<sup>2</sup>), а і за її межами.

Наведені на рис. 6 результати експериментальних досліджень підтверджують вплив електродинамічної обробки на суттєве зниження залишкових зварювальних напружень розтягу з супутньою їхньою трансформацією у напруження стискання.

Як відомо [9], наявність полів напружень стискання у зоні ймовірного руйнування зварних з'єднань (шов та навколошовна зона) підвищує їхній спротив втомі при циклічних навантаженнях. З метою підтвердження факту підвищення втомної міцності зварних пластин, оброблених за схемою (рис. 1), проводилися циклічні випробування зразків зварних з'єднань, геометричні характеристики яких вказані на рис. 7, де напрямок та зона обробки зварного шва позначені пунктирною стрілкою. Розподіл залишкових напружень  $\sigma_x$  у необроблених зразках був близький до наданого на кривій 1 (рис. 6), а у оброблених – на кривій 3.

Після проведення електродинамічної обробки дослідні зразки встановлювалися у випробувальну машину марки УПМ-02 (рис. 8), що реалізує схему втомних іспитів на вигин (рис. 9) при симетричному циклі навантаження із частотою 14 Гц. Тут 1 – рухома зачіпка, 2 – фіксуєча пластина, 3 – зразок, 4 – лічильник циклів, 5 – нерухома зачіпка. Амплітуду циклу  $\sigma_a$  задавали у діапазоні 80–160 МПа, що відповідає діапазону експлуатаційних втомних навантажень зварних з'єднань сплаву АМг6. Випробування проводилися до появи втомної тріщини з поточною реєстрацією кількості циклів N, що відповідають початку руйнування зразків.

Криві втоми, що характеризують циклічну міцність при іспитах на вигин необроблених (крива 1) та оброблених (крива 2) зразків, показано на рис. 9. Аналізуючи наведені дані, доходимо висновку, що при максимальній амплітуді циклу  $2\sigma_a=160$  МПа кількість циклів навантаження N оброблених зразків підвищується більше, ніж у два рази. При мінімальному значенні  $2\sigma_a=80$  МПа, де вплив залишкових напружень на втомну міцність найбільш наявний, значення N підвищуються до трьох разів. Таким чином, наведення напружень стискання за електродинамічної обробки у режимі, розрахованому на базі розробленої моделі, сприяє підвищенню втомної міцності зварних з'єднань сплаву АМг6.

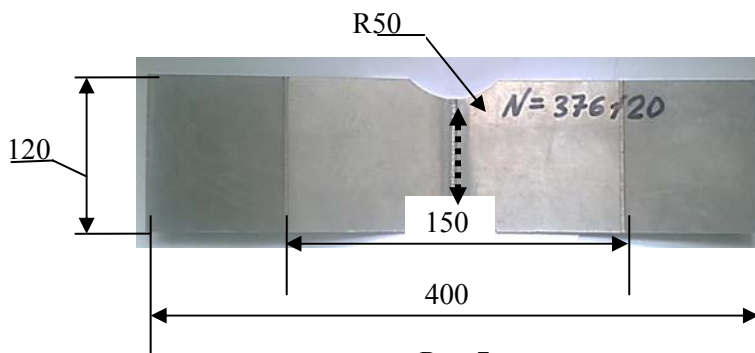


Рис. 7



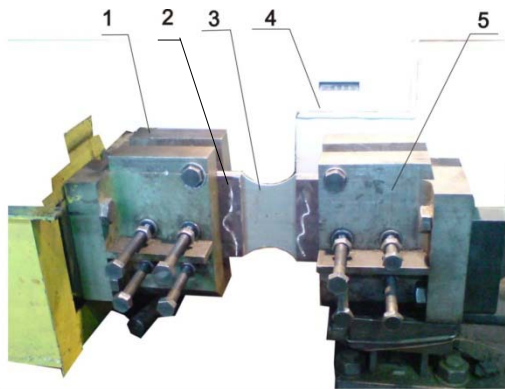


Рис. 8

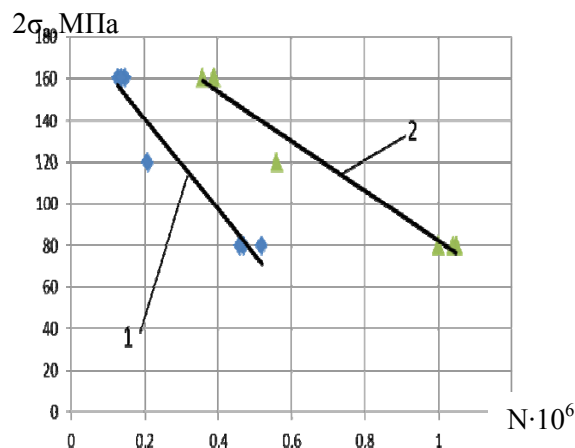


Рис. 9

### Висновки.

У роботі сформульовано початково-крайову задачу в термінах векторного магнітного потенціалу та скалярного електричного потенціалу, які з використанням теорії потенціалу та концепції вторинних джерел редуковані до інтегро-диференціального рівняння (інтегрального – за просторовими змінними, диференційного – за часом).

Інтегро-диференціальне рівняння розв'язували з використанням апроксимації за просторовими змінними методом повного усереднення, а для розв'язку у часі застосовувалася різницева схема першого або другого порядку.

Розроблено метод розрахунку характеристик розгалуженого розрядного кола з урахуванням електродинамічної взаємодії магнітного поля котушки індуктивності з масивними неферомагнітними частинами електродного пристрою. Визначено величину та форму струму в перехідному процесі розряду ємнісного накопичувача, шунтованого зворотнім діодом, величину електродинамічної сили, що притискає електрод до металевих зразка та розподіл густини струму в зразку. Визначено границі області в металевому зразку, яка відповідає умовам виникнення електропластичного ефекту.

Встановлено, що електродинамічна обробка зварних з'єднань у режимі, розрахованому із застосуванням розробленої розрахункової моделі, сприяє суттєвому зниженню поздовжньої компоненти  $\sigma_x$  залишкових напружень розтягу від 165 МПа з супутньою їхньою трансформацією у напруження стискування, значення яких досягає  $-80$  МПа.

Наведення напружень стискування за електродинамічної обробки у режимі, розрахованому з використанням розробленої моделі, сприяє підвищенню втомної міцності зварних з'єднань сплаву АМгб при симетричному вигині у 2–3 рази в залежності від амплітуди циклу навантаження.

1. Баранов Ю.В., Троїцкий О.А., Авраамов Ю.С., Шляпин А.Д. Физические основы электроимпульсной и электропластической обработок и новые материалы. – М.: МГИУ, 2001. – 844 с.

2. Боженко А.И., Петрушенко Е.И. Моделирование на ЭВМ переходных процессов в осесимметричных устройствах с немагнитными проводниками с учетом симметричности исходного интегро-дифференциального уравнения. – К.: Ин-т электродинамики АН УССР, 1984. – 51 с. (Препринт / АН УССР, Ин-т электродинамики; 372)

3. Болюх В.Ф., Олексенко С.В., Щукин И.С. Сравнительный анализ линейных импульсных электромеханических преобразователей электромагнитного и индукционного типа. – Техн. электродинамика. – 2016. – № 5. – С. 46–48.

4. Лобанов Л.М., Пивторак В.А., Савицкий В.В., Ткачук Г.И. Методика определения остаточных напряжений в сварных соединениях и элементах конструкций с использованием электронной спекл-интерферометрии // Автоматическая сварка. – 2006. – № 1. – С. 10–13.

5. Лобанов Л.М., Пащин Н.А., Черкашин А.В., Миходуй О.Л., Кондаратенко И.П. Эффективность электродинамической обработки алюминиевого сплава АМгб и его сварных соединений // Автоматическая сварка. – 2012. – № 1. – С. 3–7.

6. Сагалевич В.М. Методы устранения сварочных деформаций и напряжений. – М.: Машиностроение, 1974. – 248 с.

7. Тозони О.В. Расчет электромагнитных полей на вычислительных машинах. – К.: Техніка, 1968. – 252 с.

8. Kondratenko I., Zhiltsov A., Vasyuk V. Modelling of electromagnetic processes in electrotechnical complexes for reducing residual stresses // Electromechanical and energy saving system. – Kremenchuk: KrNU. – 2014. – No 3/2014 (27). – Pp. 61–67.

9. Masubuchi K. Analisis of Welded structures. – Pergamon Press, 1980. – 642 p.

УДК 620.179:621.373.5

#### НЕСТАЦИОНАРНЫЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В СИСТЕМАХ СНИЖЕНИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Л.М. Лобанов<sup>1</sup>, акад. НАН Украины, И.П. Кондратенко<sup>2</sup>, чл.-корр. НАН Украины, А.В. Жильцов<sup>3</sup>, докт. техн. наук, А.Н. Карлов<sup>2</sup>, канд. техн. наук, Н.А. Пашин<sup>1</sup>, канд. техн. наук, В.В. Васюк<sup>3</sup>, В.А. Ящук<sup>1</sup>

<sup>1</sup>- Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины,

ул. Боженко, 11, Киев-150, 03680, Украина,

<sup>2</sup>- Институт электродинамики НАН Украины,

пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина, e-mail: [dep7ied@ukr.net](mailto:dep7ied@ukr.net)

<sup>3</sup>- Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины,

ул. Героев обороны, 12, Киев, 03041, Украина, e-mail: [azhilt@gmail.com](mailto:azhilt@gmail.com)

*Разработана трехмерная интегро-дифференциальная математическая модель процесса разрядки емкости на электромагнитную систему из последовательно соединенных катушки индуктивности и электрода. Магнитное поле катушки возбуждает вихревые токи в электропроводной пластине, устанавливаемой под катушкой, в результате чего возникает электромагнитная сила, которая создает давление электрода на поверхность пластины. Установлены оптимальные параметры контура для создания прижимного усилия. Проведено электродинамическую обработку сварных соединений, определены режимы, при которых в зоне сварного шва достигается трансформация усилий растяжения на усилия сжатия, повышается более чем в 2 раза усталостная прочность сварного соединения при циклической нагрузке. Библ. 9, рис. 9.*

**Ключевые слова:** остаточные сварочные напряжения, электродная система, импульс тока, уравнения Максвелла, метод интегральных уравнений, электродинамические силы.

#### ELECTROPHYSICAL UNSTEADY PROCESSES IN THE SYSTEM TO REDUCE RESIDUAL STRESSES WELDS

L.M.Lobanov<sup>1</sup>, I.P.Kondratenko<sup>2</sup>, A.V.Zhyltsov<sup>3</sup>, O.M.Karlov<sup>2</sup>, M.O.Pashchyn<sup>1</sup>, V.V.Vasyuk<sup>3</sup>, V.A.Yashchuk<sup>1</sup>

<sup>1</sup>- Paton Welding Institut National Academy of Science of Ukraine,

vul. Bozhenko, 11, Kyiv-150, 03680, Ukraina,

<sup>2</sup>- Institut of Elektrodynamics National Academy of Science of Ukraine,

pr. Peremohy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraina, e-mail: [dep7ied@ukr.net](mailto:dep7ied@ukr.net)

<sup>3</sup>- National university of life and environmental sciences of Ukraine,

vul. Heroiv oborony, 12, Kyiv, 03041, Ukraina, e-mail: [azhilt@gmail.com](mailto:azhilt@gmail.com)

*A three-dimensional integral-differential mathematical model of the process of capacity discharge to the electromagnetic system with inductance coil and electrode, connected in series, was developed. The magnetic field of the coil excites the eddy currents in the electrically-conductive plate which is mounted under the coil, generating, as a result, the electromagnetic force which presses the electrode against the surface. The optimal circuit parameters were established to generate the pressing force. An electrodynamic treatment of welded joints was carried out, the modes were determined, at which the change of tension force to compression force is achieved, the fatigue strength of welded joints under the cyclic loading was increased more than twice. References 9, figures 9.*

**Keywords:** welding residual stresses, electrode system, current pulse, Maxwell's equations, method of integral equations, electrodynamic forces.

1. Baranov Yu.V., Troytskyy O.A., Avraamov Yu.S., Shlyapyn A.D. Physical fundamentals of electro and electroplastic treatments and new materials. – Moskva: Moskovskii gosudarstvennyi industrialnyi universitet, 2001. – 844 p. (Rus)

2. Bozhenko A.I., Petrushenko E.I. Computer simulation of transients in axisymmetric devices with non-magnetic conductors based on the symmetry of the original integrodifferential equation. – Kyiv: Institut Elektrodinamiki AN USSR, 1984. – 51 p. (Preprint / AN USSR, Institut elektrodinamiki; 372). (Rus)

3. Bolyukh V.F., Oleksenko S.V., Shchukyn I.S. Comparative analysis of linear pulsed electromagnetic and electromechanical transducers induction type // Tekhnichna Elektrodynamika. – 2016. – No 5. – Pp. 46–48. (Rus)

4. Lobanov L.M., Pyvtorak V.A., Savytskyy V.V., Tkachuk H.Y. Method of determination of residual stresses in welded joints and structural elements using electronic speckle pattern interferometry // Avtomaticheskaya svarka. – 2006. – No 1. – Pp. 10–13. (Rus)

5. Lobanov L.M., Pashchyn N.A., Cherkashyn A.V., Mykhoduy O.L., Kondratenko I.P. The effectiveness of electrodynamic machining aluminum alloy AMg6 and welded joints // Avtomaticheskaya svarka. – 2012. – No 1. – Pp. 3–7. (Rus)

6. Sahalevych V.M. Methods for removing the welding deformation and stress. – Moskva: Mashinostroenie, 1974. – 248 p. (Rus)

7. Tozony O.V. Calculation of electromagnetic fields on computers. – Kyiv: Tekhnika, 1968. – 252 p. (Rus)

8. Kondratenko I., Zhiltsov A., Vasyuk V. Modelling of electromagnetic processes in electrotechnical complexes for reducing residual stresses // Electromechanical and energy saving system. – 2014. – No 3/2014 (27). – Pp. 61–67.

9. Masubuchi K. Analisis of Welded structures. – Pergamon Press, 1980. – 642 p.

Надійшла 23.06.2016  
Остаточний варіант 05.07.2016