

ВИБІР ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА ІНДУКЦІЙНОГО ТИПУ ДЛЯ ЕЛЕКТРОДИНАМІЧНОЇ ОБРОБКИ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ

І.П. Кондратенко^{1*}, чл.-кор. НАН України, А.В. Жильцов^{2**}, докт.техн.наук,
М.О. Пашин^{3***}, канд.техн.наук, В.В. Васюк²

¹- Інститут електродинаміки НАН України,

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

e-mail: dep7ied@ukr.net

²- Національний університет біоресурсів і природокористування України,

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

e-mail: azhilt@gmail.com

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

вул. К. Малевича, 11, Київ-150, 03680, Україна.

Визначено особливості конструкції електромеханічного перетворювача індукційного типу при застосуванні його в технологічному комплексі для електродинамічної обробки зварних з'єднань, що полягає в одночасній дії на обмежену ділянку поверхні зварного шва імпульсного електричного струму і механічної сили. Вказано величини густини струму і сили, за яких можливі перетворення механічних характеристик електропровідних середовищ. Встановлено взаємозв'язки конструктивних параметрів електромеханічного перетворювача з величиною електродинамічної сили та густиною струму при заданих величинах напруги на ємнісному накопичувачі та тривалості розрядного процесу. Визначено доцільний розмір відбитку електрода при електродинамічній обробці зварних з'єднань з алюмінієвих сплавів. Бібл. 7, рис. 5.

Ключові слова: електромеханічний перетворювач індукційного типу, зварювальні напруження, електродинамічна сила, густина струму.

Якість нероз'ємних зварних з'єднань значною мірою визначається проявами термодформаційних явищ у зоні зварного шва. В окремих випадках зварювальні напруження і деформації зумовлюють деформацію і навіть руйнування зварної конструкції і, як наслідок, впливають на надійність і довговічність роботи технологічного обладнання [7]. Тому зниження зварювальних напружень є актуальною задачею, яка може вирішуватися різними способами подальшої обробки: прокатка, проковка, термічна обробка та інші. Переліченим способам обробки зварного шва притаманні певні недоліки, наприклад, необхідність створення енерго- та металомісткого технологічного обладнання, обмеження при обробці великогабаритних конструкцій та значні витрати енергії [4].

Перспективним шляхом підвищення ресурсу зварних з'єднань, що характеризується відносною простотою застосування та низькими витратами енергії, є електродинамічна обробка. При цьому за умови, коли густина струму в металі досягає величини більше 10^9 А/м² та при накладанні стискаючих зусиль на рівні 20 кН, проявляється ефект електропластичності, який полягає в релаксації напружено-деформованого стану металевих матеріалів [1, 6].

При проходженні струму через оброблюваний метал та дії імпульсної електромагнітної сили ініціюються деформаційні процеси, взаємодія яких зі зварювальними напруженнями викликає залишкові пластичні деформації. Наслідком цієї взаємодії є зниження рівня залишкових напружень розтягу або їх перетворення у напруження стискання, що позитивно впливає на подовження ресурсу зварних з'єднань. Перевагами застосування даної обробки є також можливість здійснення локальної дії, що дозволить обробляти об'єкти будь-якої форми та розмірів при невеликих витратах енергії.

Здійснення електродинамічної обробки доцільно проводити за допомогою електромеханічного перетворювача індукційного типу [2, 3], в якому імпульс сили передається в метал за допомогою спеціального металевого електрода зі сплаву, який не змочується металом, що обробляється. Так щодо алюмінієвих сплавів найбільш придатним виявляється вольфрамовий електрод. У разі виникнення іскрових чи дугових процесів з виділенням у місці контакту енергії, якої буде достатньо для розплавлення металу з нижчою температурою плавлення, рідкий метал не буде змочувати поверхню електрода. Таким чином, термін можливої експлуатації електрода подовжується.

Габарити електромеханічного перетворювача повинні відповідати вимогам до ручного інструменту, тобто у разі необхідності оператор має утримувати його у руці за допомогою спеціального

приспосовування. У той самий час геометрія електроду також прив'язується до технологічного призначення – обробки зварного шва. Тобто, якщо ширина зварного шва зазвичай коливається в межах від кількох міліметрів до 10-15 мм, то і діаметр електроду має бути співрозмірним.

На сьогодні виконано роботи по розробці на основі методу інтегральних рівнянь об'єктно-орієнтованих програм розрахунку компонент електромагнітного поля і електрофізичних характеристик електромеханічного перетворювача індукційного типу для зниження залишкових напружень методом електродинамічної обробки [5].

Метою роботи є визначення можливих геометричних параметрів електромеханічного перетворювача індукційного типу для електродинамічної обробки зварних з'єднань, що забезпечують необхідні умови для ефективного зменшення залишкового напруженого стану металевих конструкцій.

Матеріали та методика досліджень. Конструктивними елементами електромеханічного перетворювача індукційного типу для електродинамічної обробки металу (рис. 1) є котушка індуктивності I і масивний електропровідний диск 4 , що розміщується співвісно з котушкою. В центрі диска жорстко закріплено мідний стержень 5 , на кінці якого встановлюється вольфрамовий електрод 6 . Котушка індуктивності I і диск 4 розміщені в корпусі 2 та закриваються знизу кришкою 3 з отвором, діаметр якого перевищує діаметр електроду 6 для вільного руху останнього через отвір. Кінець електроду має поліровану закруглену з певним радіусом поверхню. Причому радіус закруглення може перевищувати радіус електроду. Котушка індуктивності I ущільнюється в корпусі 2 еластичним матеріалом. Електромагнітна система під прямим кутом розміщується по відношенню до об'єкта 7 . Для створення надійного початкового електричного контакту «електрод-зразок» на корпусі приладу зверху закріплено вантаж 9 . Статичне навантаження приладу призводить до того, що внаслідок початкової пластичної деформації місце контакту електроду і зразка виявляється не точкою, а обмеженою колом ділянкою. Діаметр цього кола визначається як механічними властивостями матеріалів, що дотикаються, так і величиною початкового статичного навантаження. Слід звернути увагу також на зміну площі контакту під час здійснення електродинамічної обробки. Ця обставина потребує додаткового дослідження, яке виходить за рамки цієї статті. Але виконані попередні експериментальні дослідження виявили залежність якості електродинамічної обробки від площі контактної площадки. Встановлено також, що електричний опір контактного переходу і відповідно площа контакту змінюється лише за час проходження першої третини довжини імпульсу струму і до настання максимального значення величини струму. Це дає підставу вважати площу контакту незмінною, а величину електричного опору такою, що відповідає встановленому режиму, а саме 0,2–0,3 мОм.

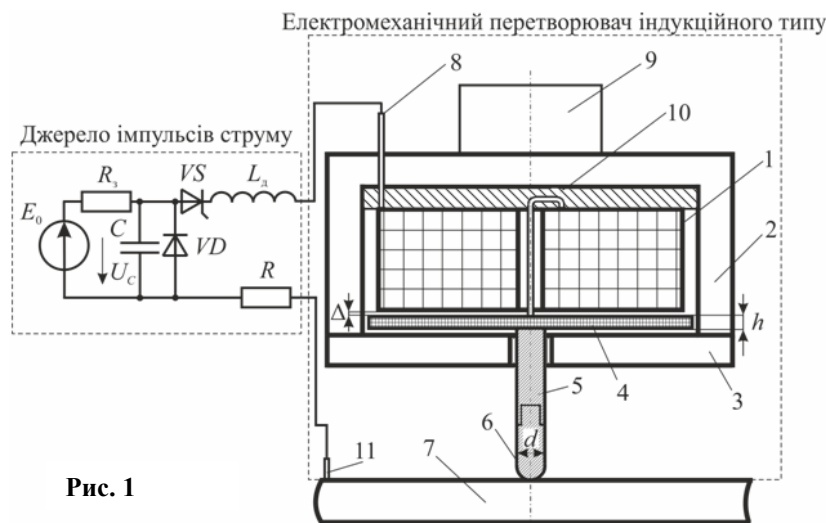


Рис. 1

Для підведення до електродного пристрою струму використовуються виводи котушки 8 , 10 та контакт із зразком 11 . Живиться електромеханічний перетворювач від генератора імпульсів струму.

Даний пристрій здійснює електродинамічну обробку, яка полягає в одночасній дії на метал електродинамічної сили та електричного струму. Величина розрядного струму і його тривалість визначаються електричними параметрами розрядного кола: активним опором, індуктивністю, ємністю та напругою на ній.

Електродинамічна сила притискання електроду до поверхні металу визначаються величиною розрядного струму, на значення якого впливають співвідношення конструктивних розмірів елементів розрядного кола – котушки індуктивності та масивного диска.

До геометричних параметрів котушки індуктивності належать: внутрішній і зовнішній діаметри, висота, кількість витків, коефіцієнт заповнення обмотки; до геометричних параметрів диску – діаметр та його товщина. В залежності від даних параметрів змінюється характер перехідного процесу в електричному колі, що, в свою чергу, впливає на електродинамічну силу притискання електроду

до пластини та на розподіл струмів розтікання. Обмеження на розміри котушки та диску визначаються габаритними розмірами пристрою.

Основними завданнями, що вирішуються в роботі, є визначення геометричних параметрів диску, відстані між котушкою та диском, які забезпечують означену вище електродинамічну силу, та площі контакту електрода зі зварним швом для забезпечення максимального об'єму металу, у якому створюються струми розтікання з густиною більшою 10^9 А/м² та відбуваються процеси зниження залишкових напружень.

У [5] розроблено математичну модель на основі редукції крайової задачі для рівнянь Максвелла до системи інтегральних рівнянь щодо джерел магнітного поля (густина струмів у масивних тілах та густини простого шару електричних зарядів на границі масивних тіл), яка застосовується у даній роботі для розв'язання сформульованих вище завдань.

Так на рис. 2 показано криві рівних значень амплітуди електродинамічної сили (в кН), з якою масивний електропровідний диск відштовхується від котушки зі струмом, у залежності від товщини диску (h) та його діаметра (d_2) для двох значень напруги на ємності – при $U_C = 500$ В (рис. 2, а), $U_C = 700$ В (рис. 2, б). Розрахунок виконувався при наступних незмінних параметрах: внутрішній діаметр котушки $d_{win} = 20$ мм; зовнішній діаметр котушки $d_{wext} = 92$ мм; висота котушки $h_w = 6$ мм; розмір прямокутного проводу, з якого виконано обмотку котушки, $ab = 2 \times 6$ мм; кількість витків в обмотці котушки $w = 18$, вони розташовані в один шар; зазор між котушкою та диском $\Delta = 0,5$ мм; матеріал, з якого виконано неферромагнітний диск – мідь, питома провідність якої прийнята постійною $\gamma_2 = 5,95 \cdot 10^7$ См/м. Параметри розрядного кола: $C = 5140$ мкФ, додаткова індуктивність $L_d = 9$ мкГн, сумарний активний опір кола R складається з опору провідників, активних опорів котушок індуктивності, контактного переходу, вимірювального шунта і складає загалом 20,46 мОм. Додаткова індуктивність вводиться у склад розрядного кола для створення струмових імпульсів заданої тривалості (близько 4 мс) і може змінюватися шляхом включення-виключення певної кількості витків.

Аналіз залежностей, які представлено на рис. 2, а, б показує, що величина електродинамічної сили залишається незмінною після перевищення товщини диска 4 мм. Також зростання електродинамічної сили припиняється вже після незначного перевищення величини діаметра диска над зовнішнім діаметром котушки, у даному випадку більше 100 мм. Необхідно також відзначити, що зростання величини амплітуди електродинамічної сили від величини напруги на ємності відбувається швидше за квадратичний закон.

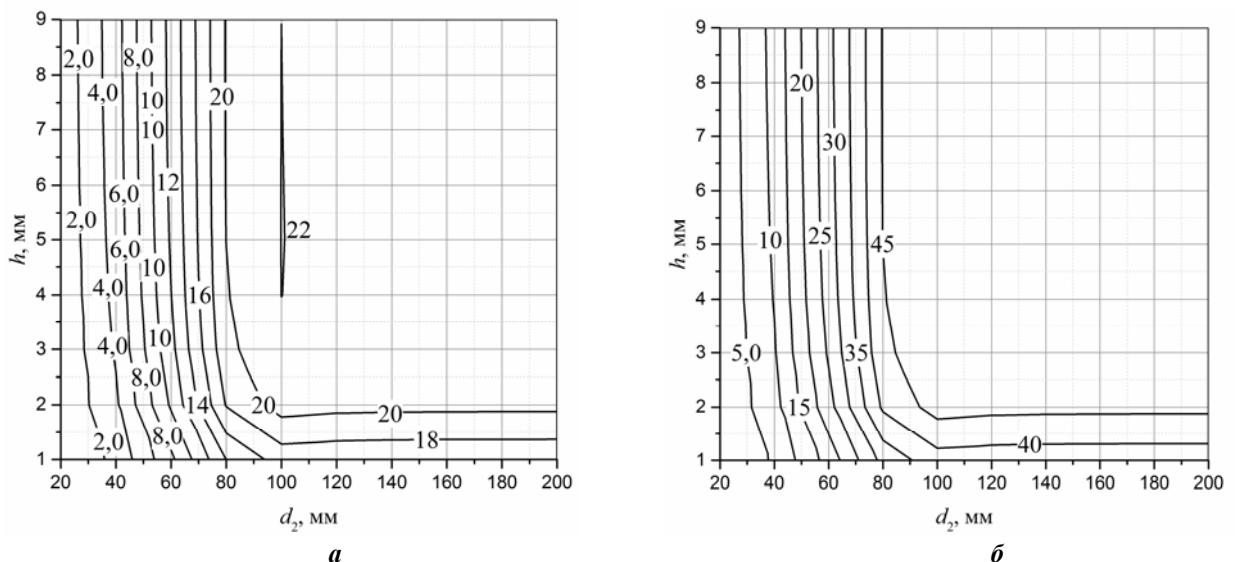


Рис. 2

Амплітуда електродинамічної сили значною мірою залежить від величини проміжку, що розділяє електропровідний диск і котушку. На рис. 3 показано графіки залежності амплітуди електромагнітної сили, що діє на масивний диск, у залежності від відстані між котушкою та диском для двох (як і вище) значень напруги на ємності – 500 В (штрих-пунктирна крива) та 700 В (суцільна

крива). Розрахунок виконувався при наведених вище геометричних та електрофізичних параметрах електромагнітної системи. В будь-якому випадку спостерігається зменшення амплітуди електродинамічної сили при одночасному зменшенні амплітуди імпульсного струму в розрядному колі, що обумовлюється зростанням індуктивності котушки внаслідок зменшення впливу масивного диску.

Одними з важливих конструктивних характеристик електромеханічного перетворювача індукційного типу є геометричні та електрофізичні параметри електрода. Враховуючи те, що ефективність електродинамічної обробки визначається, в першу чергу, не самою величиною розрядного струму, а його густиною в зоні контакту електрода з основним матеріалом, виникає необхідність у дослідженні цих процесів. На рис. 4, як приклад, у вигляді ліній рівної величини ($\times 10^9 \text{ A/m}^2$) наведено розподіл густини модуля струму в дослідному зразку в зоні контакту для моменту часу, що відповідає максимальному значенню струму в розрядному колі при зазначених вище електрофізичних та геометричних параметрах електромеханічного перетворювача ($U_C = 500 \text{ В}$, амплітудне значення розрядного струму $I_m = 6,9 \text{ кА}$) для низки значень площі контактної зони. Графіки рис. 4, а – 4, г відповідають контакту у вигляді кола, діаметрами послідовно 0,5 мм, 1 мм, 2 мм і 4 мм. Наведені залежності дозволяють визначити об'єм областей з густиною струму, що перевищує значення 10^9 A/m^2 , за якого відбувається зниження залишкових напружень у зварному шві.

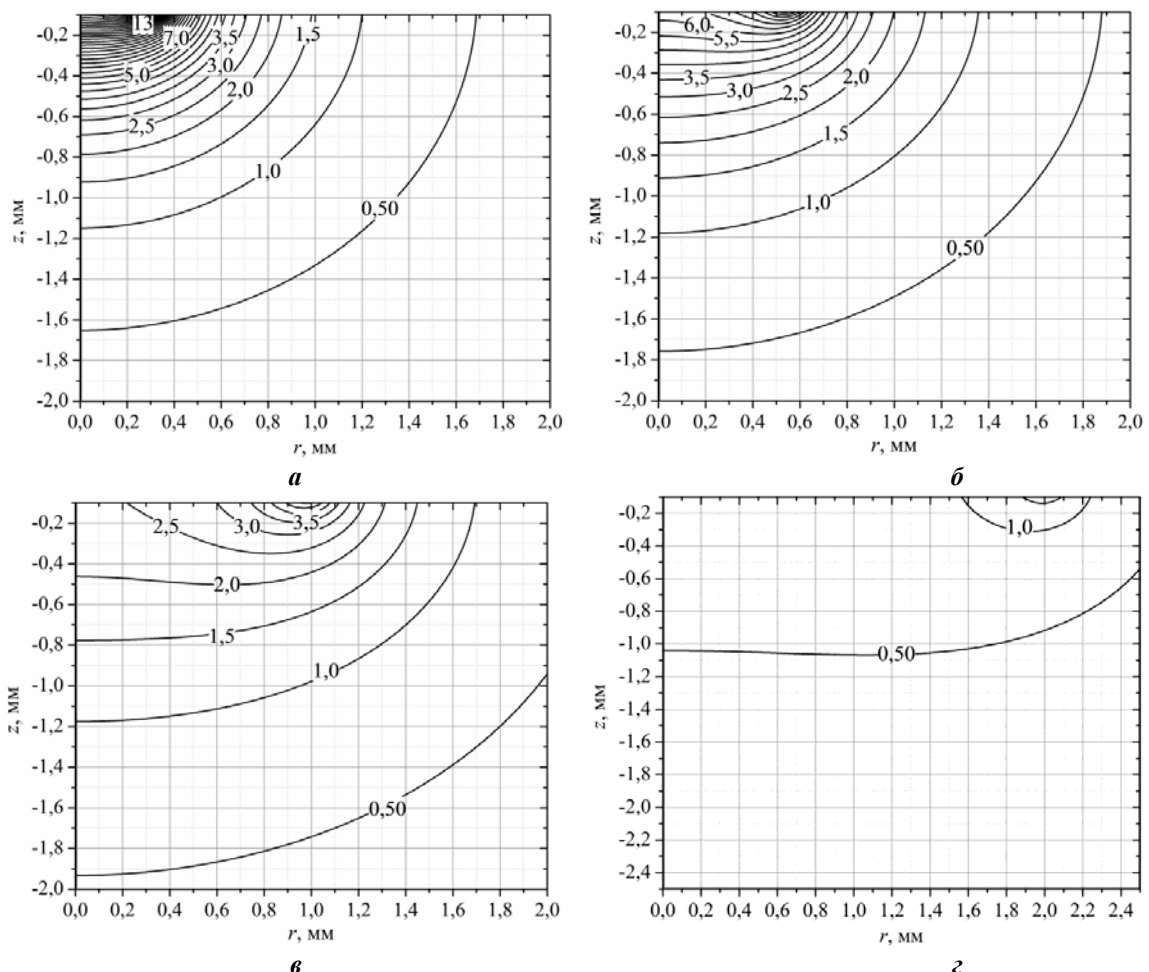
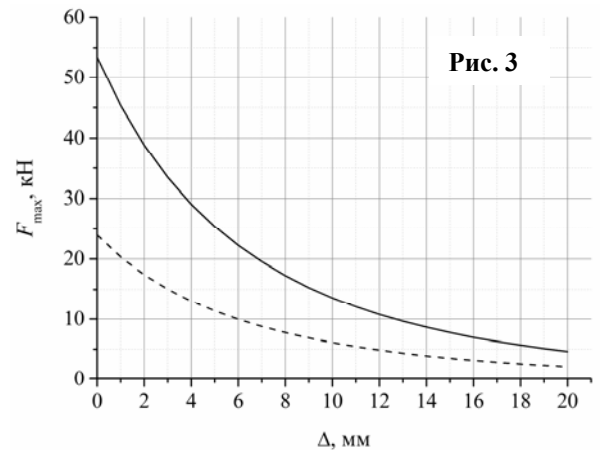


Рис. 4

На рис. 5 показано графіки залежності об'єму, де густина модуля струму перевищує значення 10^9 А/м², від діаметра контактної площадки електрода зі зварним швом при різних значеннях початкової напруги на ємності: 250, 500, 750 В. Графіки на рис. 5 отримано на підставі розрахунків, які проілюстровані на рис. 4, шляхом обчислення об'єму середовища, що знаходиться над кривою, позначеною 1,0 (10^9 А/м²). Виявляється, що при діаметрі контактної площадки $d_k = 2,25$ мм об'єм області, де створюються умови для перетворення механічного стану конструкційних матеріалів, має максимальне значення. Слід також відзначити, що при діаметрі контактної площадки більше 4–4,5 мм об'єм області, в якій модуль густини струму перевищує значення 10^9 А/м², наближається до нуля.

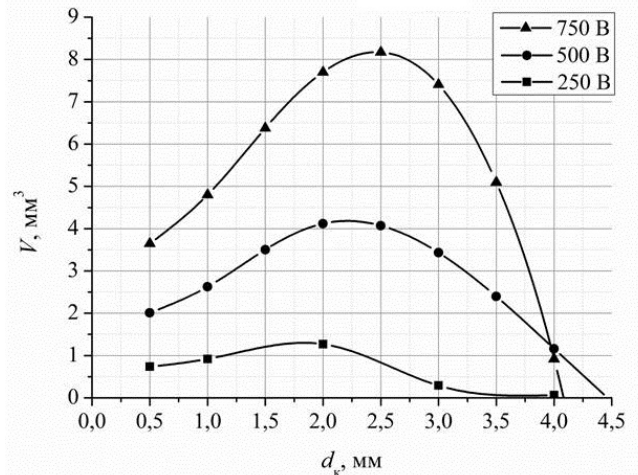


Рис. 5

З урахуванням того, що площу контактної зони та її діаметр можна заздалегідь передбачити шляхом вибору діаметра електрода і радіуса його закруглення, очевидною рекомендацією проведеного дослідження є виконання електрода діаметром $d = 2 - 2,5$ мм та радіусом закруглення $(2-3)d$.

Висновки. На основі математичного моделювання електрофізичних процесів в електромеханічному перетворювачі індукційного типу для електродинамічної обробки зварних з'єднань обґрунтовано доцільні геометричні параметри масивного диску та площі контакту, за яких створюються необхідні умови для зниження залишкових напружень у зварному шві.

1. Баранов Ю.В., Троицкий О.А., Авраамов Ю.С., Шляпин А.Д. Физические основы электроимпульсной и электропластической обработок и новые материалы. – М.: МГИУ, 2001. – 844 с.
2. Болюх В.Ф., Данько В.Г. Лінійні електромеханічні перетворювачі імпульсної дії. – Харків: НТУ «ХПИ», 2006. – 260 с.
3. Болюх В.Ф., Олексенко С.В., Щукин И.С. Сравнительный анализ линейных импульсных электро-механических преобразователей электромагнитного и индукционного типов // Технічна електродинаміка. – 2016. – № 5. – С. 46–48.
4. Буркин С.П., Шимов Г.В., Андрускова Е.А. Остаточные напряжения в металлопродукции. – Екатеринбург: Изд-во Уральского ун-та, 2015. – 248 с.
5. Лобанов Л.М., Кондратенко І.П., Жильцов А.В., Карлов О.М., Пащин М.О., Васюк В.В., Яцук В.Я. Нестационарные электрофизические процессы в системах снижения остаточных напряжений сварных соединений // Технічна електродинаміка. – 2016. – № 6. – С. 10–19.
6. Лобанов Л.М., Пащин Н.А., Черкашин А.В., Миходуй О.Л., Кондратенко І.П. Эффективность электродинамической обработки алюминиевого сплава Амгб и его сварных соединений // Автоматическая сварка. – 2012. – № 1. – С. 3–7.
7. Чернышев Г.Н., Попов А.Л., Козинцев В.М., Пономарев И.И. Остаточные напряжения в деформируемых твердых телах. – М.: Наука, 1996. – 240 с.

УДК 620.179:621.373.5

ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ИНДУКЦИОННОГО ТИПА ДЛЯ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

И.П. Кондратенко¹, чл.-корр. НАН Украины, А.В. Жильцов², докт.техн.наук, Н.А.Пащин³, канд.техн.наук, В.В. Васюк²

¹- Институт электродинамики НАН Украины,
пр. Победы, 56, Киев, 03057, Украина,
e-mail: dep7ied@ukr.net

²- Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины,
ул. Героев обороны, 12, Киев, 03041, Украина,
e-mail: azhilt@gmail.com

³- **Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины,
ул. К. Малевича, 11, Киев-150, 03680, Украина.**

Определены особенности конструкции электромеханического преобразователя индукционного типа при применении его в технологическом комплексе для электродинамической обработки сварных соединений, которая заключается в одновременном действии на небольшой ограниченный участок поверхности сварного шва импульсного электрического тока и механической силы. Указаны величины плотности тока и силы, при которых возможно преобразование механических характеристик электропроводных сред. Установлены взаимосвязи конструктивных параметров электромеханического преобразователя с величиной электродинамической силы и плотностью тока при заданных величинах напряжения на емкостном накопителе и длительности разрядного процесса. Установлен целесообразный размер отпечатка электрода при электродинамической обработке сварных соединений из алюминиевых сплавов. Библ. 7, рис. 5.

Ключевые слова: электромеханический преобразователь индукционного типа, сварочные напряжения, электродинамическая сила, плотность тока.

SELECTING INDUCTION TYPE ELECTROMECHANICAL CONVERTER FOR ELECTRODYNAMIC PROCESSING OF WELDS

I.P. Kondratenko¹, A.V. Zhylytsov², N.A. Pashchyn³, V.V. Vasyuk²

¹ - **Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine,
pr. Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine, e-mail: dep7ied@ukr.net**

² - **National university of life and environmental sciences of Ukraine,
str. Heroyiv oborony, 12, Kyiv, 03041, Ukraine, e-mail: azhilt@gmail.com**

³ - **Paton Welding Institute NAS of Ukraine,
str. K. Malevycha, 11, Kyiv-150, 03680, Ukraine.**

The features of electromechanics transformer construction of induction type are specified at application of it in a technological complex for electrodynamic treatment of the weld-fabricated connections, that consists in the simultaneous operating on a small limit area of surface of the weld-fabricated joint by impulsive electric current and mechanical force. Magnitude of current density and force, at which transformation of mechanical descriptions environments is possible, are indicated. Interrelationships of structural parameters of electromechanics transformer with by the size of electrodynamic force and current density at the set voltage magnitude on a capacity storage and width of discharge process are defined. It is defined that the diameter of contact mark at electrodynamic treatment of the weld-fabricated joints from aluminium alloys must make 2 - 2,5 mm. References 7, figures 5.

Key words: electromechanics transformer of induction type, welding tensions, electrodynamic force, current density.

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

2. Bolyukh V.F., Danko V.G. Linear electromechanical pulse action converters. – Kharkiv: Natsionalnyi Tekhnichnyi Universytet "KhPI", 2006. – 260 p. (Ukr)

3. Bolyukh V.F., Oleksenko S.V., Shchukin I.S. Comparative analysis of linear pulse electromechanical converters of electromagnetic and induction types // Tekhnichna Elektrodynamika. – 2016. – No 5. – Pp. 46 – 48. (Rus)

4. Burkin S.P., Shimov G.V., Andryukova E.A. Residual stresses in metal products. – Ekaterinburg: Izdatelstvo Uralskogo Universiteta, 2015. – 248 p. (Rus)

5. Lobanov L.M., Kondratenko I.P., Zhylytsov A.V., Karlov A.M., Pashchin N.A., Vasyuk V.V., Yashchuk V.Y. Unsteady electrophysical processes in systems for reducing residual stress of welded joints // Tekhnichna Elektrodynamika. – 2016. – No 6. – Pp. 10–19. (Ukr)

6. Lobanov L.M., Pashchin N.A., Cherkashin A.V., Mikhoduy O.L., Kondarenko I.P. Efficiency of electrodynamic treatment of aluminum alloy Amg6 and its welded joints // Avtomaticheskaya svarka. – 2012. – No 1. – Pp. 3–7. (Rus)

7. Chernyshev G.N., Popov A.L., Kozintsev V.M., Ponomarev I.I. Residual stresses in deformable solids. – Moskva: Nauka, 1996. – 240 p. (Rus)

Надійшла 07.04.2017
Остаточний варіант 07.06.2017