

**ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ЕЛЕКТРОДИНАМІЧНОЇ
ОБРОБКИ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ**

Л.М. Лобанов^{2*}, академік НАН України, І.П. Кондратенко^{1**}, чл.-кор. НАН України,
В.М. Михальський^{1***}, чл.-кор. НАН України, М.О. Пашин^{2****}, докт.техн.наук,
О.М. Карлов^{1*****}, канд.техн.наук, В.В. Чопик^{1*****}, канд.техн.наук,
О.Л. Міходуй^{2*****}, канд.техн.наук

¹ Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна,

e-mail: dep7ied@ukr.net

² Інститут електрозварювання ім. Є.О.Патона НАН України,
вул. Казимира Малевича, 11, Київ, 03150, Україна,

e-mail: svarka2000@ukr.net

Визначено склад двоканального імпульсного джерела живлення для електродинамічної обробки зварних з'єднань, яка полягає в одночасній дії на обмежену ділянку шва електричного струму і стискаючого силового впливу електродом таких величин, за яких стає можливим проявлення електропластичного ефекту. Задля створення силового тиску використовується лінійний електромеханічний перетворювач індукційного типу. Тривалість стискаючої фази силового імпульсу обирається більшою за тривалість струмового імпульсу, що зменшує вірогідність розриву електричного кола і виділення теплової енергії. Шляхом керованої затримки початку струмового імпульсу досягається синхронізація обох факторів виникнення електропластичного ефекту. Запропоновано паралельне включення напівпровідникових приладів, які комутують розрядні кола, з почерговою їхньою роботою, що в умовах експлуатації електротехнічного обладнання з частотою находження імпульсів до 10 Гц зменшує теплове навантаження. Експериментальними дослідженнями встановлено двократно збільшення кількості циклів до руйнування зразків у разі симетричного вигину. Порівняння двоканальної і одноканальної електродинамічної обробки виявило подвійне зменшення витрат електроенергії в двоканальному пристрої. Бібл. 8, рис. 3, табл. 1.

Ключові слова: електродинамічна обробка, силова топологія генератора імпульсів, теплове навантаження напівпровідникових приладів, синхронізація факторів впливу.

Вступ. Методи електрофізичної обробки суднових і транспортних зварних конструкцій зі сплавів на основі алюмінію отримали в останній період суттєвий розвиток завдяки реалізації електродинамічної обробки (ЕДО) [1], теоретичне і практичне обґрунтування якої вперше виконано в Україні. Реалізація ЕДО стала можливою на основі застосування сучасних систем електроживлення з використанням мікропроцесорного керування і чисельних методів розрахунку електродних пристроїв, які дають змогу поєднати розрахунок нестационарного електромагнітного процесу та перехідні процеси в електричних колах імпульсних систем. При цьому використання ЕДО в суднокорпусних і транспортних зварних конструкціях направлено, перш за все, на підвищення їхньої довговічності. Вирішення проблеми уповільнення розвитку втомного руйнування виявляється актуальним для подовження ресурсу як нової, так і техніки, що знаходиться в експлуатації.

Підвищення опору втоми конструкційних матеріалів пов'язують з наведенням поля стискаючих напружень в зоні передбачуваного руйнування. Результатом ЕДО є зниження рівня залишкових зварних напружень розтягування і формування в зоні обробки шару металу з подрібненою структурою. Аналіз результатів [1-4] дає підставу припустити, що ЕДО може бути ефективним способом підвищення довговічності зварних з'єднань. Суть ЕДО полягає в одночасній дії механічного сти-

© Лобанов Л.М., Кондратенко І.П., Михальський В.М., Пашин М.О., Карлов О.М., Чопик В.В., Міходуй О.Л., 2020
ORCID ID: * <https://orcid.org/0000-0001-9296-2335>, ** <https://orcid.org/0000-0003-1914-1383>,
*** <https://orcid.org/0000-0002-8251-3111>, **** <https://orcid.org/0000-0002-2201-5137>,
***** <https://orcid.org/0000-0002-1350-1870>, ***** <https://orcid.org/0000-0002-5046-5223>,
***** <https://orcid.org/0000-0001-6660-7540>

скання і імпульсного струму високої густини [1], за якої стає можливою реалізація електропластичного ефекту [5].

Апаратно ЕДО здійснюється за допомогою лінійного електромеханічного перетворювача індукційного типу [1], в якому імпульс струму формується в тому ж перехідному процесі, що і стискаючий силовий імпульс. При цьому амплітуда імпульсу струму не співпадає в часі з амплітудою імпульсу сили. Такі пристрої будемо називати *одноканальними пристроями для ЕДО*. В той же час канали для формування імпульсів струму і сили запропоновано розділити, такі системи отримають назву – *двоканальні пристрої для ЕДО*. В них силовий імпульс має більшу тривалість, ніж імпульс струму, який передається через спеціальний електрод і зсунутий в часі по відношенню до силового імпульсу. В такому пристрої підвищується надійність контакту електрода з поверхнею оброблюваної деталі (імпульс струму повинен закінчуватись до настання фази електродинамічного відштовхування, яка характерна для електромеханічних перетворювачів індукційного типу) завдяки одночасності імпульсних впливів. Причому доступне ручне чи автоматичне регулювання сили імпульсного струму та позиціонування в часі моментів амплітудного значення сили струму та амплітудного значення силового впливу. Доцільність забезпечення одночасності силового і струмового впливів необхідно дослідити з позицій наслідків зміни механічних характеристик зварних з'єднань. На теперішній час таке дослідження можна здійснити лише експериментальним шляхом.

Тому **метою роботи** є розроблення двоканального пристрою для ЕДО в складі імпульсного джерела живлення і електродного пристрою та визначення впливу ЕДО з застосуванням двох каналів і порівняння характеристик одно- та двоканальних пристроїв.

Успіхи в застосуванні електродинамічної обробки зварних з'єднань спонукають до розширення перспективного методу обробки на неперервні процеси, за яких електродинамічна обробка виконується в процесі зварювання плавленням.

В роботі [6] встановлено розміри зони ефективної електродинамічної обробки, яка визначається амплітудою імпульсного струму та геометрією електрода. За умови, коли електродинамічна обробка виконується в процесі зварювання плавленням (тобто неперервно), необхідно узгодити частоту імпульсів струму та динамічного тиску зі швидкістю переміщення зварювального пристрою. Відомо, що швидкість переміщення пристрою для зварювання плавленням в автоматичному режимі становить 10-30 м/год. Виходячи з цього параметра, частота повторення імпульсів джерела живлення приладу ЕДО з врахуванням результатів роботи [6] повинна бути 2÷5 Гц. За такої частоти повторення імпульсів теплове циклічне навантаження на напівпровідникові прилади перевищить граничні показники, що призведе до їхнього теплового зношування, а згодом і руйнування. Загалом, з урахуванням перспективного використання ЕДО для різноманітних металів і сплавів, джерела живлення повинні генерувати імпульси струму з амплітудою до 10 кА, тривалістю 0,5-1,5 мс і частотою повторення до 10 Гц. Сучасні напівпровідникові прилади загальнопромислового призначення не розраховані на роботу в таких режимах, що вимагає або застосування спеціальних заходів на кшталт інтенсивного охолодження (включаючи рідинне), або інших заходів, за яких вартість устаткування можна зменшити.

За умови забезпечення неперервної роботи приладу для ЕДО в роботі запропоновано низку технічних рішень для двоканальних імпульсних джерел струму, які дають змогу дотримуватися допустимих теплових режимів обладнання.

Розробка напівпровідникового перетворювача для генератора розрядних імпульсів включає в себе низку задач, вирішення яких можна розділити на декілька етапів.

Розроблення силової схеми включає в себе розрахунок та визначення всіх елементів силової схеми з допоміжними, снаберними, пускозарядними колами включно. Такий розрахунок проводиться для визначення максимальних та середніх значень струму та напруги на елементах силової схеми: розрахунок режимів перевантаження та аварійних режимів; розрахунок значень індуктивних та ємнісних елементів схеми; створення моделі силової схеми для подальшого визначення її параметрів; початковий вибір основних елементів схеми, які стануть базою для побудови теплової моделі та виконання теплових розрахунків. Крім цього, *вибір силових напівпровідникових структур* визначає силову топологію (геометрію) та загальну компоновку, яка утворює схему перетворювача, тому необхідно врахувати паразитні опори та індуктивності струмових провідників. Виходячи з загальних позицій, теплове навантаження напівпровідників вимагає максимального рознесення силових елементів у просторі (якомога далі один від одного). Утворені в такий спосіб паразитні елементи схеми ставлять під питання можливість комутації струмів заданої величини (для прикладу: провідник довжиною 10 см продукує паразитну індуктивність близько 40 нГн і у разі комутації струму 650 А

протягом 100 нс викликає перенапругу в 260 В). Це лише лінійний елемент схеми, але якщо взяти до уваги реальні контури силової схеми, то паразитна індуктивність взагалі може не дозволити здійснювати комутацію струму. Збільшення тривалості комутації призведе до збільшення втрат на перемикання, що, в свою чергу, призведе до перегріву та необхідності рознесення гарячих частин силової схеми між собою. Геометрія силової топології повинна враховувати тепловий розподіл та паразитні лінії. Таким чином, розробка напівпровідникового перетворювача утворює комплекс задач, вирішення яких залежить від обраної концепції охолодження, типу напівпровідників та технологічних можливостей виробництва.

Розробка теплової моделі включає в себе розрахунок та визначення суми всіх теплових навантажень на елементи силової схеми, у тому числі конденсаторні батареї, струмопровідні елементи, снабери, джерела живлення власних потреб тощо.

Визначення концепції системи охолодження. Розрахунок теплових втрат в обраному схемному рішенні дає змогу вирішити задачу реалізації перетворювача необхідної потужності в конструктивному об'ємі, який обирається з низки стандартизованих корпусів приладних шаф. Необхідно враховувати розподіл силових елементів на площі (в об'ємі) з метою ефективного охолодження та уникнення можливості перегріву внаслідок зосередження силових елементів в обмеженому об'ємі.

Після узгодження теплових режимів здійснюється визначення архітектури силової частини перетворювача, створення повних (тривимірних) креслень всіх силових елементів схеми, визначення взаємного розташування з врахуванням паразитних характеристик струмопровідних елементів, теплового навантаження та раціонального використання об'єму. Окремі елементи креслення та загальна їхня компоновка є невід'ємною частиною конструкторської роботи. Теплове моделювання та макетування, а також визначення загальної геометрії здійснюється як єдиний процес створення силової топології.

Силова топологія генератора імпульсів складається з двох ідентичних каналів (рис. 1), кожен з яких складається з розв'язуючих трансформаторів T1, T2, трифазного випрямляча (VD1-6, VD7-12), фільтра мережі Cf1-4, Cf5-8, зарядного інвертора VT11-VT14, VT21-VT24 з струмообмежувальними дроселями L1.1-L2.2, накопичувальної ємності C1, C2, комутатора VS11-VS14, VS21.1-VS24.2, розрядного кола Lлін та Lкот. Задля забезпечення теплової стійкості системи розрядного кола використано паралельні групи тиристорів. Особливість запропонованої розробки полягає в тому, що, незважаючи на паралельне включення тиристорів розрядного кола, одночасної паралельної роботи тиристорів не передбачається. Це обумовлено складністю або неможливістю забезпечення рівномірного розподілу струму в паралельно з'єднаних тиристорах, а також синхронізації моментів їхнього вмикання. Натомість використовується новий метод почергового вмикання тиристорів під час переходів між імпульсами розряду, що дає змогу підвищити частоту слідування імпульсів струму, не збільшуючи теплового навантаження на структуру окремого тиристора.

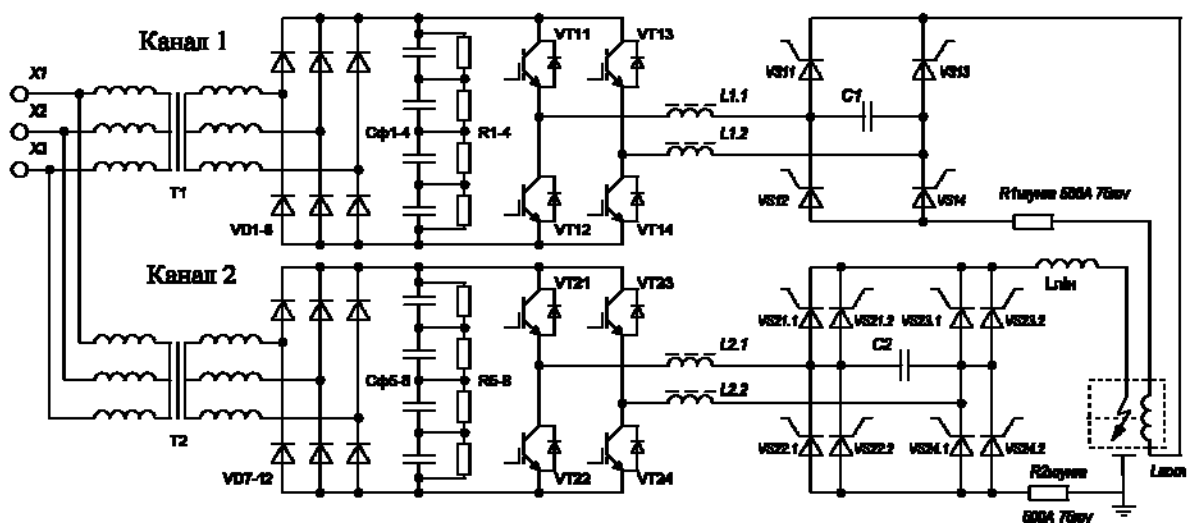


Рис. 1

Задля підвищення частоти роботи розрядного кола необхідно оцінити режим теплового навантаження тиристорів, які працюють в режимах, що перевищують гранично дозволені межі, які визначено виробником. Дослідження характеристик обраних тиристорів SKKT 250 компанії

SEMİKRON показало можливість використання останніх у розрядному колі для однократної та короткочасної комутації струмів (I_{TSM}) з амплітудою $I_{TSM} = 9000$ А за температури 25° С та $I_{TSM} = 8000$ А – за температури 130° С з тривалістю перевантаження в 10 мс для обох випадків. Додатково враховується параметр теплової стійкості тиристора ($Q = N(I_{TSM})^2 T_i / 2$), де N – кількість імпульсів за одну секунду. Тобто, параметр теплової стійкості обраного тиристора для нормованого режиму роботи буде: $Q = [10 \cdot 10^{-3} * (9000)^2] / 2 = 405000 (A^2 c)$ – за температури 25° С та $Q = [10 \cdot 10^{-3} * (8000)^2] / 2 = 320000 (A^2 c)$ – за температури 130° С.

Для визначених вище режимів роботи тиристорів з тривалістю імпульсів $550 \mu\text{с} \sim 650 \mu\text{с}$, амплітудою 10 кА та частотою повторення 10 Гц параметр теплової стійкості буде сягати:

$$Q = 10 * (0.55 \dots 0.65 \cdot 10^{-3}) * (10000)^2 / 2 = 275000 \dots 325000 (A^2 c).$$

Оскільки параметр Q , наданий виробником тиристорів, не визначено для періодичних перевантажень, а розраховані значення параметра Q близькі до максимально допустимих, очевидно, що використання однієї групи тиристорів у запропонованій схемі на частоті 10 Гц є небезпечним з міркувань дотримання температурного обмеження. Пропонується розділити роботу тиристорів на групи у такий спосіб, щоб зменшити фактичну частоту роботи кожного окремо взятого тиристора вдвічі (рис. 1).

Паралельні групи тиристорів дають змогу розподілити теплове навантаження між більшою кількістю напівпровідників, розташованих на більшій площі тепловідводу.

Роботу зарядного інвертора та розрядного кола можна описати на прикладі роботи каналу 1 (рис. 1). Трифазна мережа живить розділовий трансформатор, який призначено для підвищення напруги та гальванічної розв'язки розрядного кола. Далі встановлено випрямляч та ємнісний фільтр, який підключено до ланки постійного струму інвертора. Вихід інвертора через обмежувальні дроселі підключено до накопичувальної ємності, яка розташована в ланці змінного струму керованого випрямляча на тиристорах. Його вихід підключено до відповідного електродного пристрою. Накопичувальна ємність, керований випрямляч та електродний пристрій утворюють розрядне коло, параметри якого формують форму розрядного імпульсу струму, для чого в каналі 2 в схемі встановлено додаткову лінійну індуктивність, а в каналі 1 роль індуктивності виконує котушка електродного пристрою. Система керування постійно відслідковує полярність напруги на ємності, в залежності від якої імпульси керування зарядом та розрядом розподіляються по групам напівпровідників VT11, VT14, VS11, VS14 або VT12, VT13, VS12, VS13. Припустимо, що на поточному інтервалі полярність напруги визначено як «+» на аноді VS11, а «-» – на аноді VS13. Тоді система керування формує ШІМ послідовності, використовуючи транзистори VT11 та VT14, одночасно вмикає їх на початку періоду ШІМ та вимикає за сигналом перевищення струму. В такий спосіб здійснюється заряд накопичувальної ємності постійним струмом до необхідного значення напруги по колу VT11 – L1.1 – C1 – L1.2 – VT14. Як тільки необхідне значення напруги досягнуто, транзистори вимикаються і продовжують свою роботу в режимі підтримання заданої напруги. У разі надходження сигналу щодо необхідності розряду зарядний інвертор вимикається, і подаються імпульси керування тиристорами VS11 та VS14 відповідно до полярності. Розрядний струм проходить по колу C1 – VS11 – котушка – Шунт – VS14 – C1. На момент закінчення розрядного імпульсу струму напруга накопичувальної ємності змінює полярність на протилежну, тому у наступному циклі заряду та розряду робочими напівпровідниками стануть VT12, VT13, VS12, VS13. Для каналу 2 робочі групи тиристорів додатково розділено, але алгоритм роботи зі слідкуванням за полярністю залишається тим же, а паралельні тиристори при цьому працюють по чергово.

Таким чином, джерело живлення має два незалежних канали: канал задля створення імпульсу струму і канал задля створення механічного тиску на зону зварного шва. За умови, коли між джерелом і інструментом для виконання обробки існує певна технологічна відстань, неможливо говорити про реалізацію повністю керованого джерела, тобто відкривати і закривати ключі примусово. В будь-якому випадку існує паразитна індуктивність проводів, що обумовлює функціонування джерела по принципу розрядного кола ємнісного накопичувача, в якому тривалість імпульсу визначається перехідним процесом в RLC колі з визначеними параметрами. Ємність кола є стабільною величиною, активний опір визначається як еквівалентна величина, що складається з опору провідників, опору $p-n-p$ переходу напівпровідникового приладу, активного опору

індуктивності і величиною індуктивності, яка також складається з кількох складових – індуктивності з'єднуючих провідників і власне індуктивності котушки. Умовами створення електротехнічного комплексу передбачається, що канал імпульсу струму формує імпульси струму тривалістю 550 мкс, а амплітуда імпульсу може досягати 10 кА і визначається величиною напруги на ємнісному накопичувачі. Таким чином, очевидним є жорстко встановлена тривалість імпульсу. Якщо параметри кола, що перелічені вище, задані, то стають зрозумілими вимоги до величини індуктивності кола струмового імпульсу. Перш за все, це стосується стабільності величини тривалості імпульсу чи, інакше кажучи, стабільності величини індуктивності кола. Через те, що дросель може бути розміщеним в приладній шафі, до його конструкції пред'являються вимоги щодо лінійності і незалежності від характеристик оточуючого середовища. На думку розробників, найбільш придатним у цьому випадку є дросель на основі тороїдної конфігурації. Відомі вирази для розрахунку величини індуктивності котушки з тороїдними обмотками наведено в [7]. Вони дають змогу розрахувати величину індуктивності з певними припущеннями, що стосуються товщини струмового шару тощо. В цьому дослідженні, зважаючи на досить значну величину струму в розрядному колі, провідники тороїдної котушки виконуються з масивних елементів, що обумовлює особливий підхід до розрахунку величини індуктивності і конструкції такої котушки.

Моделювання електрофізичних процесів в розрядних колах комплексу для ЕДО повинно проводитися з урахуванням динамічного змінення потокозчеплення магнітного поля індуктивних елементів зі своєю обвиткою і поверхневих явищ в електродному пристрої індуктивного типу. Результати такого моделювання є предметом окремого дослідження. Тут зупинимось лише на результатах моделювання відносно співвідношення в часі силового тиску, що формується в електродному пристрої і живиться каналом 1, і імпульсу струму в розрядному колі каналу 2. На рис. 2 показано, як змінюються в часі величини струму в каналі 2 – I_2 (суцільна крива) і нормальної сили F_z в електромеханічному перетворювачі індукційного типу (штрих-пунктирна крива), що живиться каналом 1.

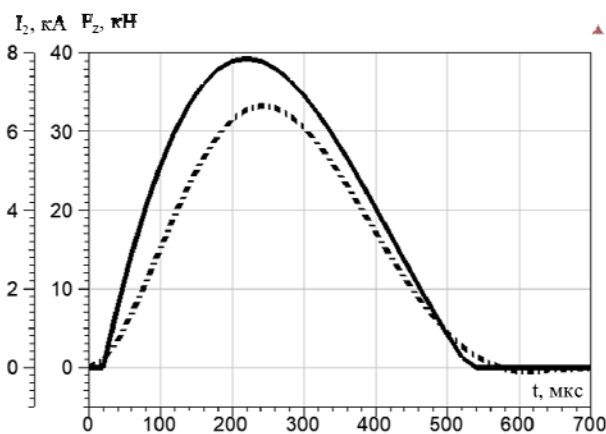


Рис. 2

зварного з'єднання доцільно початок струмового імпульсу засобами керування каналу 1 зсунути в часі ще на 20 мкс. За цих обставин в момент часу 240 мкс від початку силового імпульсу в наведеному прикладі буде досягатися збіг в часі амплітудних значень струму і силового тиску.

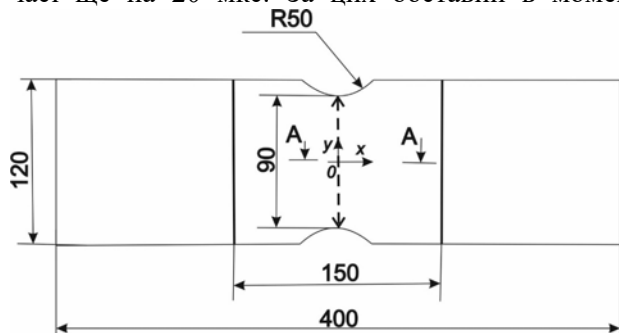


Рис. 3

Силовий імпульс має тривалість у часі близько 700 мкс, причому фаза притискання електроду триває близько 570 мкс, а згодом напрямок силової дії змінюється на протилежний – інтервал 570-700 мкс. Струмовий імпульс по відношенню до силового розпочинається на 20 мкс пізніше та закінчується до настання фази відштовхування. Таким чином, з самого початку струмового імпульсу вже створені умови задля надійного контакту електрода з оброблюваним зразком і не створюються передумови для розриву електричного кола, що може супроводжуватися явищами утворення електричної дуги з вивільненням теплової енергії. Задля синхронізації силового і струмового факторів впливу на напружений стан зварних з'єднань алюмінієвого сплаву АМг6 з використанням одно- і двоканального пристроїв ЕДО проводилися на зразках стикових з'єднань, розміри яких вказано на рис. 3. Зразки товщиною $\delta=2$ мм виконували автоматичним зварюванням TIG (Ar) за напруги дуги $U_{зв}=20$ В, зварювального струму $I_{зв}=170$ А і швидкості зварювання $V_{зв}=5,5$ мм/с. Обробка виконувалася вздовж вісі зварного шва (вісь y) в напрямку «від центру до крайків»

Дослідження впливу ЕДО на опір втоми зварних з'єднань алюмінієвого сплаву АМг6 з використанням одно- і двоканального пристроїв ЕДО проводилися на зразках стикових з'єднань, розміри яких вказано на рис. 3. Зразки товщиною $\delta=2$ мм виконували автоматичним зварюванням TIG (Ar) за напруги дуги $U_{зв}=20$ В, зварювального струму $I_{зв}=170$ А і швидкості зварювання $V_{зв}=5,5$ мм/с. Обробка виконувалася вздовж вісі зварного шва (вісь y) в напрямку «від центру до крайків»

(стрілка на рис. 3), застосовуючи *одно- та двоканальні пристрої* для ЕДО.

Перед обробкою обидві головки зразка «жорстко» фіксувалися розподіленим навантаженням на складальній плиті вздовж перерізу *A-A* (рис. 3), виключаючи можливі кутові деформації пластини. Значення зарядної напруги U_{1+P} і ємності C_{1+P} для режиму одноканальної обробки, U_1, U_P і C_1, C_P – для режиму двоканальної обробки представлено у таблиці. Під час обробці кожного зразка виконувалися по 40 розрядних циклів, що забезпечувало рівномірне електропластичне деформування шва довжиною 90 мм (рис. 3). Величину енергії однократного заряду E_1 і після серії зарядів – E_{40} для обох варіантів ЕДО також наведено у таблиці, де відображені значення напруги, ємності і енергії розряду та кількості циклів до руйнування зразків зварних з'єднань зі сплаву АМгб після ЕДО.

Проводилися втомні випробування зразків з довжиною робочої частини 150 мм (рис. 3). Для цього використовувалася випробувальна машина марки УПМ-02. Реалізовувалася схема випробувань на вигин у разі симетричного циклу навантаження з частотою 14 Гц. Амплітуда напружень циклу $2\sigma_a$ задавалася 160 МПа, а навантаження проводилося протягом інкубаційного періоду [8] до реєстрації кількості циклів N , що відповідають початку руйнування зразків.

Аналізуючи дані таблиці, можна бачити, що одно- і двоканальна ЕДО (рядки 2 і 3) забезпечують підвищення кількості циклів до руйнування N зразків зварних з'єднань зі сплаву АМгб відповідно у 1,9 і 2,2 рази у порівнянні з необробленими пластинами (рядок 1). Але при цьому підвищення величини N за двоканальній ЕДО у порівнянні з одноканальною досягається за удвічі менших значеннях енергії однократного заряду E_1 і їхньої серії ΣE_{40} . Це можна пояснити тим фактом, що у разі двоканальної ЕДО струмовий імпульс по відношенню до силового розпочинається пізніше та закінчується до настання фази відштовхування. Таким чином, за двоканальній ЕДО з самого початку дії струмового імпульсу створено умови задля синхронізації силового і струмового факторів впливу на напружений стан зварного з'єднання.

№	Особливості обробки зразків	$U_{1+P}, В$	$U_1/U_P, В$	$C_{1+P}, мкФ$	$C_1/C_P, мкФ$	$E_1, Дж$	$\Sigma E_{40}, кДж$	$N, тис. циклів$
1	без обробки	-	-	-	-	-	-	168
2	одноканальна ЕДО	430	-	5140	-	475	19,0	326
3	двоканальна ЕДО	-	370/200	-	2570/2570	176/51	9,0	376

За відсутності синхронізації факторів впливу можливою є вірогідність утворення електричної дуги з вивільненням теплової енергії, що фіксується під час експериментальних досліджень. Таким чином, за одноканальної ЕДО певна частина E_1 і ΣE_{40} витрачається на паразитні процеси, які не оптимізують напружений стан металу, що обробляється, та можуть негативно впливати на його структуру. За двоканальної ЕДО синхронізація факторів впливу виключає витрати запасеної енергії на паразитні процеси, характерні для одноканальної схеми ЕДО. Це підтверджують результати порівняння рядків 2 і 3 таблиці.

Висновки. Розроблено стратегію побудови двоканальних імпульсних джерел струму для електродинамічної обробки зварних з'єднань з покровою комутацією розрядних кіл, що дає змогу підвищити частоту слідування імпульсів струму, не збільшуючи теплового навантаження на окремий напівпровідниковий прилад завдяки забезпеченню топологічної ідентичності під час переходу між розрядними імпульсами.

Порівняння енергетичних витратних характеристик одноканальної та двоканальної схем електродинамічної обробки шва стикових зварних з'єднань сплаву АМгб виявило подвійне зменшення витрат електроенергії в двоканальному пристрої, що відбувається через синхронізацію струмового і стискаючого механічного впливів, а також через усунення втрат енергії у вигляді електродугових явищ.

Встановлено, що в результаті електродинамічної обробки металу шва стикових зварних з'єднань сплаву АМгб кількість циклів до руйнування зразків у разі симетричного вигину підвищується майже вдвічі в порівнянні з необробленими.

За результатами порівняльної оцінки одноканальної і двоканальної електродинамічної обробки зварних з'єднань сплаву АМгб встановлено, що підвищення довговічності у разі використання двоканальної схеми визначається керованою синхронізацією складових електродинамічної дії таких, як струмовий та стискаючий силовий імпульси.

Роботу виконано за держбюджетною темою «Розробка та виготовлення джерела імпульсного струму та виконавчого механізму комплексу для електродинамічної обробки зварних з'єднань, яка виконується в процесі зварювання плавленням» (шифр – «Ресурс-2») цільової комплексної програми наукових досліджень НАН України “Надійність і довговічність матеріалів, конструкцій, обладнання та споруд” (КПКВК 6541230).

1. Lobanov, L., Kondratenko, I., Zhiltsov, A., Pashchin, N., and Mikhodui, O. Development of Post-weld Electrodynamic Treatment Using Electric Current Pulses for Control of Stress-Strain States and Improvement of Life of Welded Structures, *Materials Performance and Characterization*. 2018. Vol. 7, No 4. Pp. 2379-1365. DOI: <https://doi.org/10.1520/MPC20170092> .

2. Кныш В.В., Клочков И.Н., Пашуля М.П., Мотрунич С.И. Повышение сопротивления усталости тонколистовых сварных соединений алюминиевых сплавов высокочастотной проковкой. *Автоматическая сварка*. 2014. № 5. С.22 – 29.

3. Финкель В.М., Иванов В.М., Головин Ю.И. Залечивание трещин в металлах скрещенным электрическим и магнитным полями. *Проблемы прочности*. 1983. № 4. С.54-58.

4. Кныш В.В. Определение циклической долговечности элементов конструкций при торможении усталостных трещин. *Автоматическая сварка*. 2000. № 9-10. С. 73-75.

5. 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.

6. Кондратенко І. П., Жильцов А. В., Пашин М. О., Васюк В. В. Вибір параметрів електромеханічного перетворювача індукційного типу для електродинамічної обробки зварних з'єднань. *Технічна електродинаміка*. 2017. № 5. С. 83–88. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2017.05.083>

7. Калантаров П.Л., Цейтлин Л.А. Расчет индуктивностей. Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1986. 488 с.

8. Яковлева Т.Ю. Локальная пластическая деформация и усталость металлов. Київ: Наукова думка. 2003. 238 с.

УДК 621.3:539.3

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Л.М.Лобанов² академик НАН Украины, И.П.Кондратенко¹, чл.-кор. НАН Украины, В.М.Михальский¹, чл.-кор. НАН Украины, Н.А.Пашин², докт.техн.наук, А.Н.Карлов¹, канд.техн.наук, В.В.Чопик¹, канд.техн.наук, О.Л.Миходуй², канд.техн.наук.

¹ Институт электродинамики НАН Украины, пр. Победы, 56, Киев, 03057, Украина.

E-mail: dep7ied@ukr.net

² Институт электросварки им. Е.О.Патона НАН Украины, ул. Казимира Малевича, 11, Киев, 03150, Украина.

E-mail: svarka2000@ukr.net

Определен состав двухканального импульсного источника питания для электродинамической обработки сварных соединений, которое заключается в одновременном действии на ограниченный участок шва электрического тока и давящего силового воздействия электродом таких величин, при которых становится возможным проявление электропластического эффекта. Для создания силового давления используется линейный электромеханический преобразователь индукционного типа. Продолжительность сжимающей фазы силового импульса выбирается большей, чем продолжительность токового импульса, что уменьшает вероятность разрыва электрической цепи и выделения тепловой энергии. Путем управляемой задержки начала токового импульса достигается синхронизация обоих факторов возникновения электропластического эффекта. Предложено параллельное включение полупроводниковых приборов, коммутирующих разрядные цепи, однако их работа предполагается поочередной, что в условиях работы электротехнического оборудования с частотой следования импульсов до 10 Гц уменьшает тепловую нагрузку. Экспериментальными исследованиями установлено двукратное увеличение количества циклов до разрушения образцов при симметричном изгибе. Сравнение двухканальной и одноканальной электродинамической обработки выявило двойное уменьшение затрат электроэнергии в двухканальном устройстве. Библ. 8, рис. 3, табл. 1.

Ключевые слова: электродинамическая обработка, силовая топология генератора импульсов, тепловая нагрузка полупроводниковых приборов, синхронизация факторов влияния.

ELECTROTECHNICAL COMPLEX FOR ELECTRODYNAMIC PROCESSING OF WELDED JOINTS

L.M. Lobanov², I.P. Kondratenko¹, V.M. Mikhalskiy¹, M.O. Pashchin², O.M. Karlov¹, V.V. Chopyk¹, O.L. Mykhodui²

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

² E.O. Paton Electric Welding Institute of National Academy of Sciences of Ukraine,
Kazymyr Malevych St., 11, Kyiv, 03150, Ukraine. e-mail: svarka2000@ukr.net

The composition of a two-channel switching power supply for electrodynamic processing of welded joints is determined, which consists in simultaneous action on a limited area of the electric current seam and compressive force of the electrode of such values that the electroplastic effect becomes possible. A linear electromechanical induction transducer is used to create the force pressure. The duration of the compressive phase of the power pulse is chosen to be longer than the duration of the current pulse, which reduces the probability of rupture of the electrical circuit and the release of thermal energy. By controlled delay of the beginning of the current pulse, synchronization of both factors of the electroplastic effect is achieved. The parallel inclusion of semiconductor devices that switch the discharge circuit alternately is proposed, which in the conditions of operation of electrical equipment with a pulse frequency of up to 10 Hz reduces the heat load. Experimental studies have shown a twofold increase in the number of cycles before the destruction of the samples with symmetrical bending. Comparison of two-channel and single-channel electrodynamic processing revealed a twofold reduction in power consumption in a two-channel device. References 8, figures 3, table 1.

Keywords: electrodynamic processing, power topology of pulse generator, thermal load of semiconductor devices, synchronization of influencing factors

1. Lobanov, L., Kondratenko, I., Zhiltsov, A., Pashchin, N., and Mykhodui, O. Development of post-weld electrodynamic treatment using electric current pulses for control of stress-strain states and improvement of life of welded structures. *Materials performance and characterization*. 2018. Vol. 7. No 4. Pp. 2379-1365.
DOI: <https://doi.org/10.1520/MPC20170092>.

2. Knysh V.V., Klochkov I.N., Pashulya M.P., Motrunich S.I. Improvement of fatigue resistance of thin-sheet welded joints of aluminium alloys using high-frequency peening. *Automatic welding*. 2014. No 5. Pp. 22-29. (Rus)

3. Finkel V.M., Ivanov V.M., Golovin Y.I. Healing of cracks in metals by crossed electric and magnetic fields. *Strength problems*. 1983. No 4. Pp.54-58. (Rus)

4. Knysh V.V. Determination of cyclic durability of structural elements during braking of fatigue cracks. *Automatic welding*. 2000. No 9-10. Pp. 73-75. (Rus)

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

6. Kondratenko I.P., Zhyltsov A.V., Pashchyn N.A., Vasyuk V.V. Selecting induction type electromechanical converter for electrodynamic processing of welds. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2017. No 5. Pp. 83–88. (Ukr)

DOI: <https://doi.org/10.15407/technd2017.05.083>

7. Kalantarov P.L., Tsejtlin L.A. Calculation of Inductance: Reference book. Leningrad: Energoatomizdat, 1986. 488 p. (Rus).

8. Yakovleva T.Iu. Local plastic deformation and fatigue of metals. Kyiv: Naykova dymka, 2003. 238 p.(Rus).

Надійшла 02.07.2020
Остаточний варіант 12.08.2020