

К. т. н. О. Ф. БОНДАРЕНКО

Україна, м. Київ, Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

E-mail: bondarenkoaf@gmail.com

УЗГОДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ЗВАРЮВАЛЬНИХ ІМПУЛЬСІВ З ПРОГРАМОЮ ТИСКУ ЕЛЕКТРОДІВ ТА ЕЛЕКТРОФІЗИЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ В ЗВАРЮВАЛЬНОМУ КОНТАКТІ

На основі аналізу електрофізичних процесів, які протікають в зварювальному контакті, та впливу на них параметрів імпульсів зварювального струму з метою їхнього максимального взаємозгодження уточнено закон зміни потужності імпульсу. Для досягнення найкращої якості зварювання надано рекомендації щодо формування фронту та спаду імпульсу залежно від конкретних умов зварювання, параметрів зварюваних деталей та вимог до отримуваних з'єднань. Обґрунтовано доцільність узгодження закону зміни потужності імпульсу з програмою зміни тиску електродів, а також зі зміною опору зони зварювання.

Ключові слова: контактне зварювання, форма імпульсу, зварювальний струм, закон зміни потужності, програма тиску електродів.

Важливою технологічною операцією для багатьох сучасних виробництв, зокрема машинобудування, електронної промисловості, приладобудування, є контактне зварювання, різновид якого, мікрозварювання, застосовується при створенні мікромініатюрних конструкцій, особливо відповідального призначення, як то мікросхеми, електронні компоненти тощо [1–6]. Зварні з'єднання в таких конструкціях, вочевидь, мають характеризуватися підвищеними показниками якості, наприклад відсутністю виплесків застиглого металу, пропалень та непроварів, повторюваністю параметрів зварних точок, що досягається узгодженням параметрів імпульсів зварювального струму з електрофізичними процесами в зварювальному контакті [7–11].

Одним з найпоширеніших способів покращення якості зварних з'єднань є згладжування переднього фронту зварювального імпульсу задля забезпечення плавного введення енергії в зварювальний контакт. При цьому переважно використовується лінійний закон зміни струму $i_{зв}$, іноді – напруги на зварювальних електродах $u_{зв}$ [12–14]. Він забезпечує прийнятні для багатьох застосувань показники якості з'єднань і є простим в реалізації. На **рис. 1** показано приклади зварювальних імпульсів з формуванням фронтів за лінійним законом.

Проте в результаті експериментів було визначено, що кращих показників якості зварних з'єднань можна досягти, якщо формувати не струм або

Роботу виконано за підтримки Міністерства освіти і науки України (ДБ № 0119U100189).

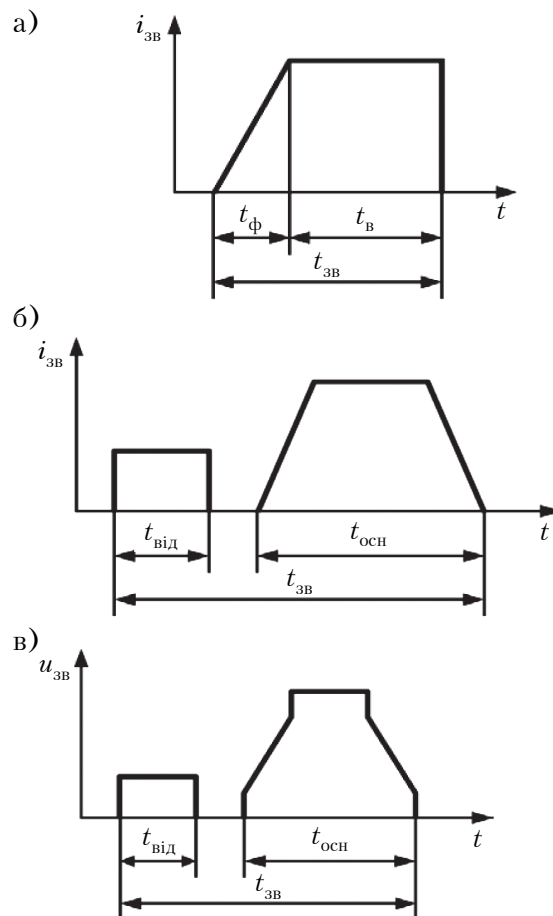


Рис. 1. Приклади використання лінійного закону зміни струму (а, б) та напруги (в) у часі для згладжування фронту зварювального імпульсу:

t_{ϕ} , t_b , $t_{від}$, $t_{осч}$ – тривалість формування фронту, вершини, підігрівального та основного імпульсів відповідно

напругу, а потужність зварювального імпульсу [1–3, 12, 15–21]. Подальші теоретичні та лабораторні дослідження дозволили встановити, що знизити вірогідність виплесків в процесі зварювання можна завдяки реалізації ступеневих законів зміни потужності імпульсу [1, 2, 12–14, 20].

В [2] зазначається, що на початковому етапі процесу зварювання впродовж часу t_ϕ (інтервал від t_0 до t_1 на **рис. 2**), необхідного для стабілізації площі контакту зварюваних деталей, потужність зварювального струму $p_{зв}(t)$ слід збільшувати пропорційно часу з показником ступеню n , після чого підтримувати на постійному максимальному рівні $P_{зв\max}$ до виділення достатньої кількості енергії, оскільки площа зварювального контакту в подальшому залишається практично незмінною (інтервал від t_1 до t_2). Такий закон зміни потужності зварювального струму описується формулою

$$p_{зв}(t) = \begin{cases} P_{зв\max} \cdot \left(\frac{t}{t_\phi}\right)^n, & t_0 \leq t \leq t_1; \\ P_{зв\max}, & t_1 \leq t \leq t_2. \end{cases} \quad (1)$$

Показник ступеню n закону зміни потужності $p_{зв}(t)$ визначається електричним опором та твердістю матеріалів зварюваних деталей, їхньою схильністю до окиснення, товщиною та конфігурацією деталей, станом їхніх поверхонь, зусиллям стиснення електродів, і тому зрозуміло, що для різних умов зварювання оптимальне значення n має бути різним. Також відомо, що в деяких випадках оптимальний режим зварювання може бути досягнутий за дробового значення n [2].

В [2] також вказано, що теоретичне обчислення показника ступеню n є дуже складним, оскільки він залежить від надто багатьох пара-

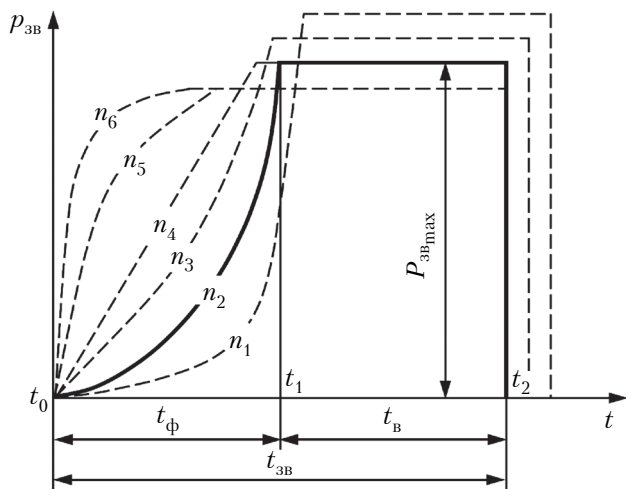


Рис. 2. Приклади форми імпульсів, в яких на етапі формування фронту потужність змінюється пропорційно часу з показником ступеню n_i

метрів, а кількісні значення деяких з них найчастіше взагалі неможливо встановити напевне, і тому пропонується визначати цей показник емпіричним шляхом на підготовчому етапі зварювання, проводячи серії експериментів. Звичайно, такий підхід складно назвати зручним, оскільки, якщо змінюються умови зварювання, технолог кожного разу має практично «наосліп» перебирати всі можливі варіанти значень показника n .

Отже очевидно, що закон зміни потужності потребує подальших досліджень для встановлення відповідності між фактичними умовами зварювання та необхідним показником ступеню на етапі формування фронту, а також для врахування електрофізичних процесів, які протікають у зварювальному контакті на заключному етапі, коли відбувається охолодження зварного з'єднання.

Метою даної роботи є узгодження закону зміни потужності зварювальних імпульсів з електрофізичними процесами у зварювальному контакті задля досягнення найкращої якості зварюваних з'єднань, а також внесення якомога більшої визначеності в процес попереднього підбору параметрів зварювального імпульсу.

Уточнення закону зміни потужності зварювальних імпульсів відповідно до умов зварювання

Виходячи з наявних даних, спочатку спробуємо встановити рекомендовані діапазони значень показника ступеню n , які можуть бути застосовані для певних умов зварювання.

Відомо [20], що для попередження виплесків металу в процесі контактного зварювання необхідно забезпечувати сталість інтенсивності тепловиділення, що припадає на одиницю площі фактичного контакту $s_k(t)$ поверхонь зварюваних деталей. Оскільки інтенсивність тепловиділення $q(t)$ є пропорційною потужності зварювального струму, цю умову можна записати наступним чином:

$$\frac{q(t)}{s_k(t)} = \frac{k \cdot p_{зв}(t)}{s_k(t)} = \text{const}, \quad (2)$$

де k – коефіцієнт пропорційності.

З урахуванням того, що на початковому етапі площа фактичного контакту зварюваних деталей в результаті пробою поверхневих оксидних плівок та зминання мікронерівностей поступово збільшується (**рис. 3**), для підтримання виконання співвідношення (2) потужність зварювального струму також має поступово наростати. З рівняння (2) видно, що чим повільніше збільшується площа фактичного контакту, тим повільніше потрібно нарощувати кількість теплової енергії, що вводиться в контакт.



Рис. 3. Змінання мікронерівностей поверхонь зварюваних деталей

Виходячи зі сказаного, для попередження виплесків на початковому етапі зварювання можна запропонувати дотримуватись наступних загальних рекомендацій.

Коли деталі мають високу шорсткість поверхні та/або високу твердість матеріалу, та/або матеріал деталей є легко окислюваним, а також коли неможливо досягти значного зусилля стиснення зварювальних електродів, зміна площі справжнього контакту на етапі зварювання відбувається повільно, тому у таких випадках необхідно забезпечувати плавне наростання потужності зварювального імпульсу, тобто показник ступеню n в формулі (1) доцільно встановлювати більшим за одиницю.

Якщо ж, навпаки, якість обробки поверхонь зварюваних деталей є високою і, відповідно, шорсткість є незначною, матеріал деталей є достатньо м'яким та/або слабо окислюваним, та/або зусилля початкового стиснення електродів є значним, прийнятним буде більш швидке введення теплової енергії в зварювальний контакт, і показник ступеню n допустимо встановлювати меншим за одиницю.

Якщо конфігурація зварюваних деталей є такою, що передбачає малу площу контактування (наприклад, зварювання прутків круглого перетину навхрест), потрібно здійснювати введення енергії в контакт більш плавно, ніж у випадках, коли площа контактування є доволі великою (наприклад, зварювання пластин).

Наведені рекомендації для зручності зведені у **таблицю**.

Наступний етап – формування зварювального імпульсу (інтервал від t_1 до t_2 на рис. 2). З урахуванням майже незмінного характеру опору зони зварювання під час формування зварного ядра [20, 22] умова (2) також підтверджує необхідність підтримувати потужність зварю-

вального імпульсу на постійному рівні до відділення в контакт потрібної для зварювання кількості енергії.

Заключному етапу зварювання зазвичай приділяють менше уваги, ніж початковому, тому після завершення інтервалу, на якому підтримується постійний рівень потужності, зварювальний струм здебільшого просто вимикають [12, 18–20]. Проте відомі приклади, коли спад зварювального імпульсу також формують [11, 12, 23]. Завдяки сучасному електронно-оптичному обладнанню нещодавно з'явилась можливість отримати дані, які свідчать про дуже важливу роль заключного етапу утворення зварного з'єднання з точки зору його міцності [24, 25]. Аналіз мікрошліфів зварних з'єднань показав наявність безпосередньої залежності якості з'єднання від режиму охолодження зони зварювання. Правильно підібраний режим охолодження на заключному етапі зварювання сприяє формуванню рівномірної мікроструктури ядра, здатен запобігти утворенню механічних напруг та усадкових порожнин. Оптимальний режим охолодження визначається матеріалами зварюваних деталей та програмою зміни тиску зварювальних електродів. У зв'язку з цим, доцільно використовувати емпіричний підбір оптимального закону зміни потужності зварювального імпульсу на етапі його спаду для кожного окремого випадку, подібно до того, як це було запропоновано для етапу формування фронту. При цьому можна дотримуватись наступних рекомендацій.

В тих випадках коли необхідно надати зварним з'єднанням пружних властивостей (наприклад, при виробництві електромеханічних фільтрів), охолоджувати контакт слід якомога швидше, для чого, відповідно, після завершення формування зварного ядра (пласка ділянка імпульсу) необхідно різко знизити зварювальний струм. Якщо ж пріоритетом є однорідність структури з'єднання та відсутність залишкової напруги, охолодження слід здійснювати повільно, формуючи плавний спад зварювального імпульсу, дію якого можна порівняти з процесом відпалу.

Рекомендації щодо вибору показника ступеню n закону зміни потужності зварювального імпульсу на етапі формування фронту

Характеристика фактору впливу на процес зварювання					Рекомендоване значення n
Шорсткість поверхні деталей	Твердість матеріалу деталей	Схильність матеріалу до окиснення	Площа контакту деталей	Зусилля стиснення електродів	
значна	висока	висока	мала	незначне	$n \geq 1$
мала	низька	низька	велика	значне	$n \leq 1$

Таким чином, пропонується формувати зварювальний імпульс так, як показано на **рис. 4**, згідно з формулою

$$p_{зв}(t) = \begin{cases} P_{зв\max} \cdot \left(\frac{t}{t_{\phi}}\right)^n, & t_0 \leq t \leq t_1; \\ P_{зв\max}, & t_1 \leq t \leq t_2; \\ P_{зв\max} \cdot \left(\frac{t_{имп} - t}{t_{сп}}\right)^m, & t_2 \leq t \leq t_3. \end{cases} \quad (3)$$

де m — показник ступеню закону зміни потужності зварювального імпульсу на етапі спаду тривалістю $t_{сп}$ (інтервал від t_2 до t_3 на **рис. 4**);

$t_{имп}$ — загальна тривалість зварювального імпульсу.

Форма зварювальних імпульсів, наведених на **рис. 4**, враховує особливості електрофізичних процесів в зварювальному контакті і є максимально узгодженою з ними. Так, плавний фронт імпульсу з підбором значення показника ступеню n закону зміни потужності забезпечує на початковому етапі поступове введення належної кількості енергії для зварювання впродовж найбільш нестабільної фази формування первинного контакту. Плоска вершина зварювального імпульсу забезпечує підтримування постійного енерговиділення в контакті на достатньо стабільному, з точки зору величини контактної опору, етапі формування зварного ядра. Плавний спад імпульсу з підбором показника ступеню m забезпечує таке охолодження місця зварювання, яке гарантує міцність та однорідність структури з'єднання.

Очевидно, що тривалість основних ділянок зварювального імпульсу, фронту, вершини та

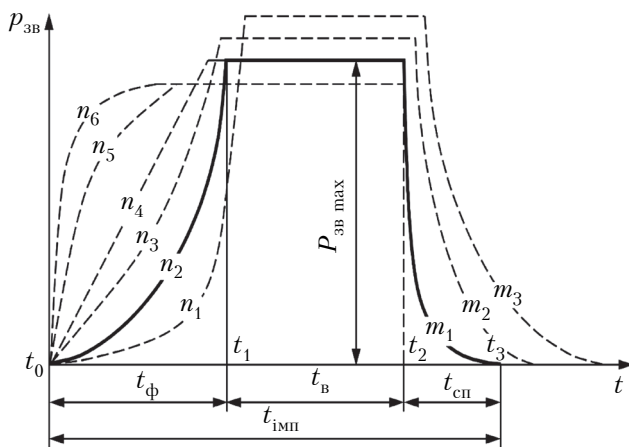


Рис. 4. Приклади форми імпульсів, в яких на етапах формування фронту та спаду потужність змінюється пропорційно часу з показником ступеню n_i та m_i відповідно

спаду має бути узгоджена з технологічними умовами зварювання. Як було зазначено раніше, одним з найважливіших факторів впливу на протікання та результат процесу контактного зварювання є тиск зварювальних електродів, і для покращення якості зварних з'єднань застосовують спеціальні програми його зміни в процесі зварювання [1, 26–30]. Розглянемо можливість узгодження параметрів зварювальних імпульсів з програмою зміни тиску зварювальних електродів.

Узгодження параметрів зварювальних імпульсів з програмою зміни тиску зварювальних електродів

На первинній стадії зварювання тиск електродів має бути значним, щоб забезпечити якнайшвидше руйнування оксидних плівок та мікронерівностей на поверхнях зварюваних деталей і тим самим стабілізувати контактний опір. Далі, з моменту початку формування зварного ядра тиск слід суттєво зменшити (навіть до нуля), бо надмірний тиск в зоні зварювання за наявності рідкої фази металу може призвести до утворення дефектів. На завершальній стадії тиск знову необхідно збільшити для проковування місця зварювання, що підвищить міцність з'єднання.

Графіки зміни сили стиснення $f_{ст}$ зварювальних електродів згідно з описаною програмою представлено на **рис. 5** для двох випадків.

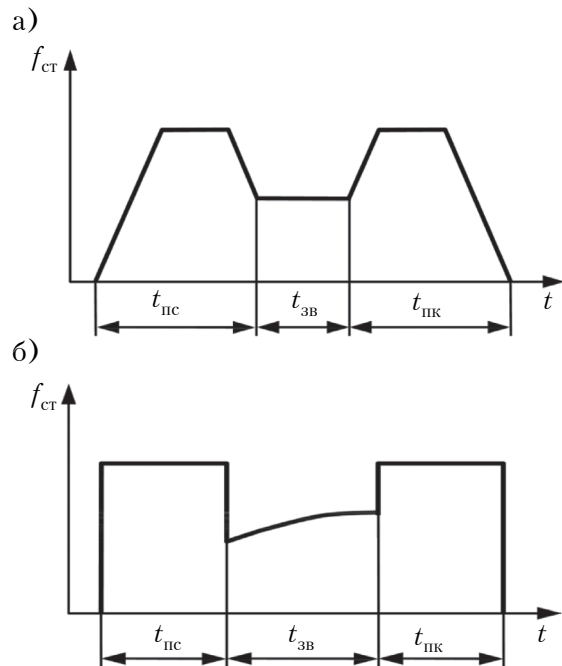


Рис. 5. Варіанти (а, б) зміни сили стиснення зварювальних електродів згідно з заданою програмою: $t_{пс}$ — тривалість попереднього стиснення електродів; $t_{зв}$ — тривалість основного етапу зварювання (формування ядра); $t_{пк}$ — тривалість кінцевої обробки (проковування)

В першому (рис. 5, а) використовується поступове збільшення та зменшення тиску, відповідно, на початку та в кінці зварювання, а також під час переходу від однієї стадії до іншої впродовж зварювального циклу. В другому випадку (рис. 5, б) на початковій та завершальній стадіях до зварювального контакту прикладається максимальний стабільний тиск, а на стадії формування ядра — попередньо зменшений до мінімуму тиск плавно нарощується до моменту початку проковування.

При цьому треба мати на увазі, що у застосовуваних програмах зміни тиску зварювальних електродів не передбачено відстеження величини сили стиснення в процесі зварювання, а отже, і її автоматичне регулювання залежно від поведінки навантаження. Принаймні, відомості щодо цього у відкритих джерелах не зустрічаються.

Відсутність спеціальних законів формування зміни тиску зварювальних електродів з його автоматичним регулюванням безумовно є недоліком існуючих систем. Це можна пояснити труднощами, пов'язаними з тим, що тривалість контактної мікрозварювання дуже мала (може складати одиниці мілісекунд), тоді як механічна система досить інерційна і зазвичай не може забезпечити ефективне використання зворотних зв'язків контурів регулювання для точного відпрацювання заданої програми в межах даного часу [27, 31, 32].

У програмі зміни тиску зварювальних електродів найчастіше застосовуються прості закони зміни параметрів імпульсів зварювального струму

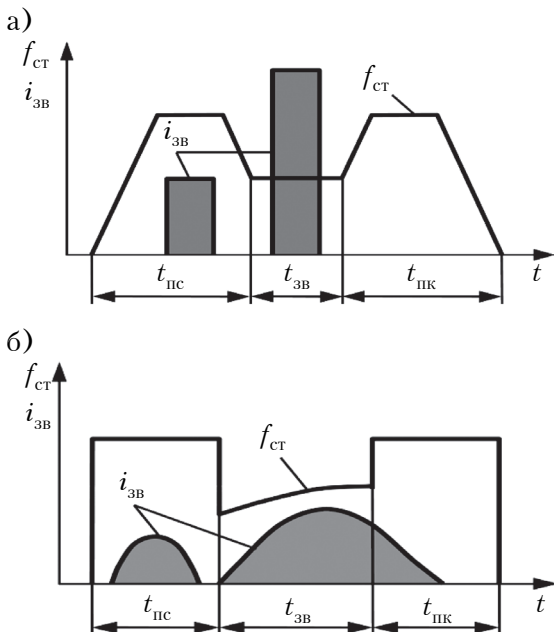


Рис. 6. Варіанти (а, б) зміни сили стиснення зварювальних електродів згідно з заданою програмою, суміщені з імпульсами зварювального струму

му, форма яких в цих випадках є прямокутною або визначається розрядом ємнісного накопичувача. На рис. 6 представлено суміщення наведених на рис. 5 графіків зміни тиску електродів з імпульсами зварювального струму $i_{зв}(t)$. При цьому в наведених прикладах форма імпульсів є нерегульованою, хоча й в них застосовані імпульси попереднього підігріву. Очевидно, що найбільш ефективним буде випадок максимального узгодження параметрів імпульсів зварювального струму з програмою зміни тиску електродів $f_{ст}(t)$, тобто коли у характерних інтервалах формування електричних імпульсів їхні параметри знаходяться у повній відповідності до основних стадій програми $f_{ст}(t)$.

На рис. 7 наведено приклад взаємоузгоджених змін потужності зварювального імпульсу $p_{зв}(t)$, тиску зварювальних електродів $f_{ст}(t)$ та опору зони зварювання $r_{зз}(t)$, який відображає зміни електрофізичних процесів в зварювальному контакті. Так, спочатку, з метою активації поверхонь деталей через часткове руйнування оксидних плівок та змінання мікронерівностей, впродовж інтервалу попереднього стиснення $t_{пс}$ здійснюється максимальний тиск на деталі у

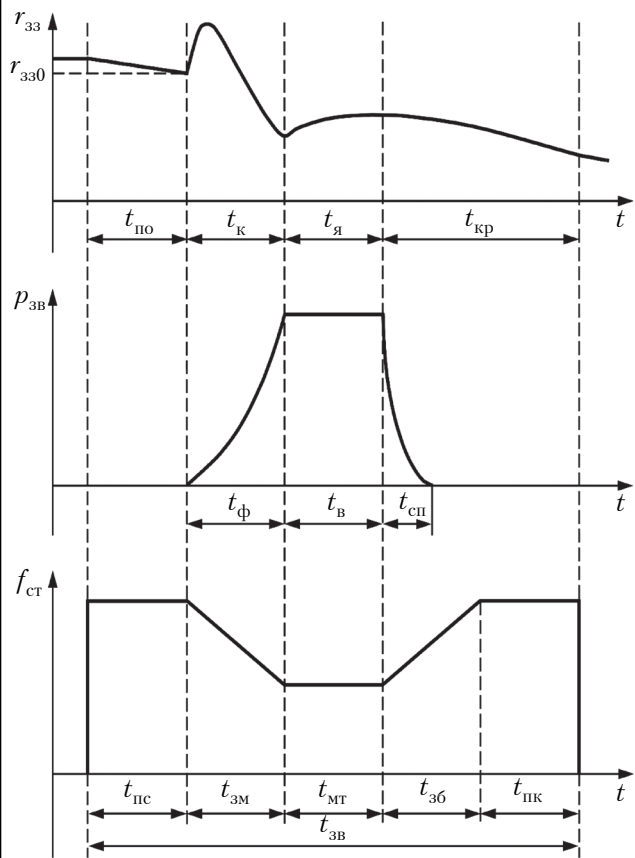


Рис. 7. Зміни опору у зоні зварювання $r_{зз}(t)$, потужності зварювального імпульсу $p_{зв}(t)$ та сили стиснення електродів $f_{ст}(t)$, узгоджені між собою

відсутності зварювального струму. При цьому опір зони зварювання r_{33} дещо зменшується через збільшення площі справжнього контакту поверхонь зварюваних деталей і в кінці інтервалу $t_{по}$ досягає значення r_{330} , яке є початковим для процесу зварювання.

Далі, впродовж інтервалу $t_{3м}$ здійснюється поступове зменшення сили стиснення електродів до певного мінімального рівня і одночасне плавне формування фронту ($t_{ф}$) зварювального імпульсу $p_{зв}$. Інтервал зменшення тиску $t_{3м}$ відповідає інтервалу формування первинного контакту $t_{к}$, впродовж якого відбуваються найбільші зміни опору зони зварювання. Отже, $t_{3м} = t_{ф} = t_{к}$.

Наступний інтервал $t_{3мт}$, впродовж якого підтримується постійне мінімальне значення тиску зварювальних електродів, узгоджено в часі з протяжністю (тривалістю) вершини зварювального імпульсу $t_{в}$. Цей інтервал відповідає фазі поступової стабілізації опору зони зварювання, що свідчить про формування зварного ядра ($t_{я}$). Тобто, $t_{3мт} = t_{в} = t_{я}$.

Після цього впродовж інтервалу $t_{3б}$ здійснюється плавне збільшення тиску до максимального рівня, яке може повністю або частково співпадати в часі зі спадом зварювального струму ($t_{сп}$). В цей період відбувається поступове охолодження зварювального контакту та кристалізація металу ядра ($t_{кр}$), що супроводжується повільним зменшенням опору зони зварювання.

Заключним є інтервал проковування $t_{пк}$, коли у відсутності зварювального струму підтримується постійний максимальний тиск і продовжуються процеси охолодження та кристалізації.

Відтак, тривалість повного циклу зварювання $t_{зв}$ фактично дорівнює сумі часових інтервалів, що визначають тривалість програми зміни тиску зварювальних електродів:

$$t_{зв} = t_{пс} + t_{3м} + t_{3мт} + t_{3б} + t_{пк}. \quad (4)$$

Математично програма зміни тиску електродів описується так:

$$f_{ст}(t) = \begin{cases} F_{ст\max}, & t \in t_{пс}; \\ F_{ст\max} - k_1 \cdot (t - t_{пс}), & t \in t_{3м}; \\ F_{ст\min}, & t \in t_{3мт}; \\ F_{ст\min} + k_2 \cdot (t - t_{пс} - t_{3м} - t_{3мт}), & t \in t_{3б}; \\ F_{ст\max}, & t \in t_{пк}, \end{cases} \quad (5)$$

де k_1, k_2 — кутові коефіцієнти відрізків прямих на інтервалах $t_{3м}$ і $t_{3б}$ відповідно;

$F_{ст\max}, F_{ст\min}$ — максимальна та мінімальна величини стиснення електродів відповідно.

Слід звернути увагу на те, що на рис. 7 інтервали $t_{пс}$ і $t_{пк}$ показано однаковими, проте це не є

жорстко визначеним, і їхня тривалість може варіюватись. Збільшення кожного з цих інтервалів сприятиме покращенню якості зварних з'єднань. Мінімальними вимогами до їхньої тривалості є, відповідно, забезпечення прийняттого первинного значення опору r_{330} і досягнення достатньої міцності з'єднання під час проковування.

Також на рис. 7 показані однаковими й інтервали $t_{3м}$ і $t_{3б}$, і це також не є обов'язковою умовою. Вимога полягає в тому, щоб збільшення тиску на інтервалі $t_{3б}$ не здійснювалося різко, інакше це може спричинити продавлення місця формування з'єднання через присутність рідкої фази металу.

Закони поступової зміни тиску зварювальних електродів на інтервалах $t_{3м}$ і $t_{3б}$ показано лінійними, оскільки відтворення інших законів в характерних для мікрозварювання часових межах є доволі складним через інерційність механічної системи переміщення електродів.

Таким чином, для отримання якісного зварного з'єднання критично важливим є узгодженість між собою інтервалів наростання потужності зварювального струму, зменшення тиску електродів та формування первинного контакту, а також забезпечення співпадіння в часі інтервалу підтримування максимального значення потужності з інтервалом мінімального тиску електродів впродовж утворення зварного ядра.

Висновки

Проведене в роботі уточнення закону зміни потужності зварювального імпульсу дозволяє більш точно врахувати особливості електрофізичних процесів в зварювальному контакті. Так, плавний фронт імпульсу, отриманий згідно зі ступеневим законом зміни потужності з підбором значення показника ступеню n , забезпечує поступове введення необхідної кількості енергії для зварювання впродовж найбільш нестабільної, з точки зору величини контактного опору, фази формування первинного контакту. Завдяки пласкій вершині зварювального імпульсу підтримується постійне енерговиділення в контакті впродовж достатньо стабільної фази формування зварного ядра. І нарешті, плавний спад імпульсу, отриманий з підбором показника ступеню m закону зміни потужності, забезпечує належне охолодження місця зварювання, що гарантує міцність та однорідність структури з'єднання. Завдяки наданим рекомендаціям щодо формування фронту та спаду зварювального імпульсу залежно від конкретних умов зварювання, параметрів зварюваних деталей та вимог до зварюваних з'єднань можна досягти найкращої якості зварювання.

Запропонований варіант узгодження між собою змін потужності зварювального імпульсу, тиску зварювальних електродів та електрофізичних процесів в зварювальному контакті (опору зони зварювання) є обґрунтованим з точки зору впливу тиску електродів на зварювальний процес.

Узгодження формування імпульсів зварювального струму з електрофізичними процесами в контакті та з програмою тиску зварювальних електродів здатне забезпечити максимально високу якість зварних з'єднань і, відповідно, високу якість кінцевої продукції, виготовлення якої потребує використання зварювальних операцій.

ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

- Атауш В. Е., Леонов В. П., Москвин Э. Г. Микросварка в приборостроении. — Рига: РТУ, 1996.
- Бондаренко А.Ф. Формирователи импульсов тока для установок контактной микросварки / Дис. ... канд. техн. наук, спец. 15.09.12. — Алчевск: ДонГТУ, 2007. — 211 с.
- Salem M. Control and Power Supply for Resistance Spot Welding (RSW) / Electronic Thesis and Dissertation Repository, 130. — 2011. — <https://ir.lib.uwo.ca/etd/130>
- Masomtob M., Sukondhasingha R., Becker J., Sauer D.U. Parametric study of spot welding between li-ion battery cells and sheet metal connectors // Engineering Journal. — 2017. — Vol. 21, iss. 7. — P. 457–473. — <https://doi.org/10.4186/ej.2017.21.7.457>
- Matsuyama K. Application of various micro-welding processes — characteristics and recent trends // Welding International. — 2008. — Vol. 22, iss. 4. — P. 225–233. — <https://doi.org/10.1080/09507110802117602>
- Zhou Y., Hu A. From microjoining to nanojoining // The Open Surface Science Journal. — 2010. — Vol. 3, N 1. — P. 32–41. <https://doi.org/10.2174/1876531901103010032>
- Гнюсов С. Ф., Киселев А. С., Слободян М. С. и др. Формирование соединения при точечной микросварке // Сварочное производство. — 2005. — № 4. — С. 37–41.
- Gnyusov S. F., Kiselev A. S., Slobodyan M. S. et al. Formation of a joint in resistance spot microwelding // Welding International. — 2005. — Vol. 19, N 9. — P. 737–741. — <https://doi.org/10.1533/wint.2005.3510>
- Гнюсов С. Ф., Киселев А. С., Слободян М. С. и др. Влияние параметров режима точечной микросварки на структуру и свойства соединений из сплава Э110 // Известия Томского политехнического университета. — 2005. — Vol. 308, N 3. — P. 135–139. — <http://earchive.tpu.ru/handle/11683/688>
- Гнюсов С. Ф., Киселев А. С., Слободян М. С., Советченко Б. Ф. Стабилизация контактных сопротивлений при точечной микросварке // Известия Томского политехнического университета. — 2006. — Vol. 309, N 1. — P. 130–133. — <http://earchive.tpu.ru/handle/11683/1009>
- Slobodyan M. S., Kiselev A. S. Optimization of welding parameters for small-scale resistance spot welding of zirconium alloys // Materials Science Forum. — 2019. — Vol. 970. — P. 145–152. — <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.970.145>
- Fundamentals of Small Parts Resistance Welding / Amada Miyachi Inc., 2019. — http://www.amadamiyachi.com/servlet/servlet.FileDownload?retURL=%2Fapex%2Feducationalresources_fundamentals&file=01530000000Jybm
- Steinmeier D. W. 'Downsizing' in the World of Resistance Welding // Welding Journal. — 1998. — Vol. 77, N 7. — P. 39–47. — https://www.microjoining.com/articles/Downsizing_Resistance_Welding.pdf
- Steinmeier D. Resistance welding-power supply feedback mode selection / microJoining Solutions-microTipsTM, 2010. — http://www.microjoining.com/docs/1352551459_microtip_resistance_power_supply_feedback_modes.pdf
- Brown L. J., Lin J. Power supply designed for small-scale resistance spot welding // Welding Journal. — 2005. — Vol. 84, N 7. — P. 32–36. — https://app.aws.org/wj/2005/07/WJ_2005_07.pdf
- Ланкин Ю. Н. Автоматическое регулирование режима точечной сварки по электрическим параметрам // Автоматическая сварка. — 1963. — Т. 16, № 5 (122). — С. 16–19.
- Атауш В. Е., Леонов В. П. Разработка управляемых источников питания для контактной микросварки // Metinā ana un radnieciskas tehnoloģijas: starptautiskais seminārs. — Латвия, Рига. — 1996. — С. 81–85.
- Атауш В., Квасневский Д. Исследование процесса точечной контактной микросварки крестообразных соединений никелевых проволок с авторегулированием процесса по падению напряжения между электродами и сварочному току // Metināšana. Tehnoloģija, iekārtas, materiāli, radnieciskās tehnoloģijas: III starptautiskā konference. — Латвия, Рига. — 1999. — С. 162–167.
- Леонов В. П., Атауш В. Е. Малоинерционный источник питания для микросварки и пайки с обратной связью по электроэнергетическим параметрам // В кн. «Припой для пайки современных материалов» / Под ред. А. А. Россошинского. — Киев: ИЭС им. Е.О. Патона, 1985. — С. 133–139.
- А. с. 1214368 СССР. Устройство для управления процессом контактной точечной сварки / В. П. Леонов, В. Е. Атауш, Э. В. Бумбиерис, М. А. Калейс. — 1986. — Бюл. № 8.
- Yu J. New methods of resistance spot welding using reference waveforms of welding power // International Journal of Precision Engineering and Manufacturing. — 2016. — Vol. 17, N 10. — С. 1313–1321. — <https://doi.org/10.1007/s12541-016-0156-z>
- Mikno. Z., Stepien M., Grzesik B. Optimization of resistance welding by using electric servo actuator // Welding in the World. — 2017. — Vol. 61, N 3. — P. 453–462. — <https://doi.org/10.1007/s40194-017-0437-x>
- Shin S., Park D.-J., Yu J., Rhee S. Resistance spot welding of aluminum alloy and carbon steel with spooling process tapes // Metals. — 2019. — Vol. 9, N 4. — С. 410. — <https://doi.org/10.3390/met9040410>
- Patent US20130020288A12013. System and method of welding a workpiece / Moision W. C., Hetrick E. T. — <https://patents.google.com/patent/US20130020288A1/en>
- Steinmeier D. Upslope and downslope use in resistance welding / microJoining Solutions-microTipsTM, 2017. — http://www.microjoining.com/docs/1483822194_microtip_resistance_up-downslope.pdf
- Моравский В. Э., Ворона Д. С. Технология и оборудование для точечной и рельефной конденсаторной сварки. — Киев: Наукова думка, 1985.
- Письменный А. С., Пентегов И. В., Кислицын В.М и др. Устройства для ударной обработки сварного шва в процессе точечной контактной сварки // Автоматическая сварка. — 2011. — Т. 693, № 1. — С. 52–55. — <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/102306>
- Bondarenko O. F., Bondarenko Iu. V., Safronov P. S., Sydorets V. M. Current and force control in micro resistance welding machines Review and development // 2013 8th International Conference on "Compatibility and Power

Electronics (CPE)”. – 2013. – P. 298–303. – <https://doi.org/10.1109/CPE.2013.6601173>

29. Tang H., Hou W., Hu S. J. Forging force in resistance spot welding // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture. – 2002. – Vol. 216, N 7. – P. 957–968. – <https://doi.org/10.1243/09544050260174166>

30. Charde N. Forging force in resistance spot welding: analyzing the electrically generated forging force for two different electrode actuations // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2017. – Vol. 90, iss. 1–4. – P. 211–218. – <https://doi.org/10.1007/s00170-016-9352-3>

31. Бондаренко А. Ф., Сидорец В. Н., Бондаренко Ю. В. Совершенствование источников питания для контактной микросварки // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії. – 2012. – № 28. – С. 60–63.

32. Linear DC Weld Control UB29/UB29A/DC29 Operation Manual / Amada Miyachi Inc., 2013. – <http://www.amadamiyachi.com/servlet/servlet.FileDownload?retURL=%2Fapex%2Fproduct%3Fcategoryid%3Dresistance-welding%26groupid%3Drw-power-supplies%26productid%3Ddc29&file=0158000001bZNjAAM>

Дата надходження рукопису до редакції 15.11 2019 г.

DOI: 10.15222/ТКЕА2019.5-6.51
УДК 621.791.76/.79: 621.791.03

А. Ф. БОНДАРЕНКО

Украина, г. Киев, КПИ им. Игоря Сикорского
E-mail: bondarenkoaf@gmail.com

СОГЛАСОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ СВАРОЧНЫХ ИМПУЛЬСОВ С ПРОГРАММОЙ ДАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОДОВ И ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ В СВАРОЧНОМ КОНТАКТЕ

На основе анализа электрофизических процессов, протекающих в сварочном контакте, и влияния на них параметров сварочных импульсов с целью их максимального взаимного согласования уточнен закон изменения мощности импульса. Для достижения наилучшего качества сварки даны рекомендации по формированию фронта и спада импульса в зависимости от конкретных условий сварки, параметров свариваемых деталей и требований к получаемым соединениям. Обоснована целесообразность согласования закона изменения мощности импульса с программой изменения давления электродов, а также с изменением сопротивления зоны сварки.

Ключевые слова: контактная сварка, форма импульса, сварочный ток, закон изменения мощности, программа давления электродов.

DOI: 10.15222/ТКЕА2019.5-6.51
UDC 621.791.76/.79: 621.791.03

О. F. BONDARENKO

Ukraine, Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute
E-mail: bondarenkoaf@gmail.com

COORDINATION OF WELDING PULSE PARAMETERS WITH ELECTRODE PRESSURE PROGRAM AND ELECTROPHYSICAL PROCESSES IN WELDING CONTACT

Resistance welding is an important technological operation for many modern industries, including mechanical engineering, electronics and instrument making. Micro resistance welding is used in producing of microstructures for critical purposes, such as electronic components, circuits, etc. It is obvious that welded joints in such structures should be characterized by such high quality indicators as the absence of solid metal splashes, burnouts, faulty fusions, and the repetitiveness of dimensions of welding spots, which are achieved by coordinating the parameters of welding current pulses with electrophysical processes in welding contact.

Thus, in this paper, the authors analyze electrophysical processes taking place in the welding contact and the effect of the welding current pulse parameters on these processes, in order to mutually coordinate them. This allows specifying the law of pulse power change, which makes it possible to take into account the features of electrophysical processes in the welding contact to the full extent. The smooth rise of the pulse power, obtained according to the exponent law with selection of the optimal exponent n value, provides gradual input of energy required for welding during the most unstable phase of primary contact formation.

Due to the flat top of the welding pulse, the constant energy input to the contact is maintained during a rather stable phase of welding core formation. Finally, the smooth pulse fall obtained by selecting the optimal exponent m value of the power change law provides the proper cooling of the welding spot, which guarantees the strength and uniformity of the joint structure. To achieve the best welding quality, the recommendations

are given regarding the formation of rise and fall of the pulse, depending on specific welding conditions, parameters of the welded parts and requirements for the obtained joints.

The paper shows that it is a useful practice to coordinate the pulse power change law with the program of changing the pressure of the electrodes, and with changing the resistance of the welding zone. The proposed example of coordination between welding pulse power change, welding electrode pressure and electrophysical processes in the welding contact (resistance of the welding zone) is substantiated in terms of the influence of the electrode pressure on the welding process. This practice can provide the highest quality of welded joints and thus the highest quality of the end products manufactured by welding.

Keywords: resistance welding, pulse shape, welding current, power change law, electrode pressure program.

REFERENCES

1. Ataush V. Ye., Leonov V. P., Moskvina E. G. *Mikrosvarka v priborostroyeniі* [Micro welding in instrument making]. Riga, RTU, 1996. (Rus)
2. Bondarenko O. F. *Formirovateli impul'sov toka dlya ustanovok kontaktnoy mikrosvarki* [Current pulses generators for micro resistance welding machines]. Thesis in the specialty 15.09.12, Alchevsk, DonSTU, 2007, 211 p. (Rus)
3. Salem M. *Control and Power Supply for Resistance Spot Welding* (RSW). Electronic Thesis and Dissertation Repository, 130, 2011. <https://ir.lib.uwo.ca/etd/130>
4. Masomtob M., Sukondhasingha R., Becker J., Sauer D.U. Parametric study of spot welding between li-ion battery cells and sheet metal connectors. *Engineering Journal*, 2017, vol. 21, iss. 7, pp. 457–473. <https://doi.org/10.4186/ej.2017.21.7.457>
5. Matsuyama K. Application of various micro-welding processes – characteristics and recent trends. *Welding International*, 2008, vol. 22, iss. 4, pp. 225–233. <https://doi.org/10.1080/09507110802117602>
6. Zhou Y., Hu A. From microjoining to nanojoining. *The Open Surface Science Journal*, 2010, vol. 3, no. 1, pp. 32–41. <https://doi.org/10.2174/1876531901103010032>
7. Gnyusov S. F., Kiselev A. S., Slobodyan M. S. et al. [Formation of a joint in resistance spot microwelding]. *Svarochnoe Proizvodstvo*, 2005, no. 4, pp. 37–41. (Rus)
8. Gnyusov S. F., Kiselev A. S., Slobodyan M. S. et al. Formation of a joint in resistance spot microwelding. *Welding International*, 2005, vol. 19, no. 9, pp. 737–741. <https://doi.org/10.1533/wint.2005.3510>
9. Gnyusov S. F., Kiselev A. S., Slobodyan M. S. et al. [Effect of spot micro-welding mode parameters on the structure and properties of compounds of alloy Э110]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2005, vol. 308, no. 3, pp. 135–139. <http://earchive.tpu.ru/handle/11683/688> (Rus)
10. Gnyusov S. F., Kiselev A. S., Slobodyan M. S., Sovetchenko B. F. [Stabilization of contact resistances during spot welding]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2006, vol. 309, no. 1, pp. 130–133. <http://earchive.tpu.ru/handle/11683/1009> (Rus)
11. Slobodyan M. S., Kiselev A. S. Optimization of welding parameters for small-scale resistance spot welding of zirconium alloys. *Materials Science Forum*, 2019, vol. 970, pp. 145–152. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.970.145>
12. Amada Miyachi Inc. *Fundamentals of Small Parts Resistance Welding*, 2019. http://www.amadamiyachi.com/servlet/servlet.FileDownload?retURL=%2Fapex%2Feducationalresources_fundamentals&file=0153000000Jybm
13. Steinmeier D. W. 'Downsizing' in the World of Resistance Welding, *Welding Journal*, 1998, vol. 77, no. 7, pp. 39–47. https://www.microjoining.com/articles/Downsizing_Resistance_Welding.pdf
14. Steinmeier D. Resistance Welding-Power Supply Feedback Mode Selection. *microJoining Solutions-microTips™*, 2010. http://www.microjoining.com/docs/1352551459_microtip_resistance_power_supply_feedback_modes.pdf
15. Brown L. J., Lin J. Power supply designed for small-scale resistance spot welding. *Welding Journal*, 2005, vol. 84, no. 7, pp. 32–36. https://app.aws.org/wj/2005/07/WJ_2005_07.pdf
16. Lankin Yu. N. [Automatic control of the spot welding mode by electrical parameters]. *Avtomaticheskaya Svarka*, 1963, vol. 16, no. 5 (122), pp. 16–19. (Rus)
17. Ataush V. Ye., Leonov V. P. [Development of controlled power supplies for contact welding]. *Metināšana un radnieciskās tehnoloģijas: starptautiskais seminārs*, Riga, Latvija, 1996, pp. 81–85. (Rus)
18. Ataush V. Ye., Kvasnevskii D. [Investigation of the process of spot contact microwelding of cruciform joints of nickel wires with auto-regulation of the process according to the voltage drop between the electrodes and the welding current]. *Metināšana. Tehnoloģija, iekārtas, materiāli, radnieciskās tehnoloģijas: III starptautiskā konference*, Riga, Latvija, 1999, pp. 162–167. (Rus)
19. Leonov V. P., Ataush V. Ye. [Investigation of the process of spot contact microwelding of cruciform joints of nickel wires with auto-regulation of the process according to the voltage drop between the electrodes and the welding current]. In the book "Pripoi dlya payki sovremennykh materialov" [Solders for soldering modern materials], ed. by A. A. Rossoshinskiy, Kyiv, E. O. Paton Electric Welding Institute, 1985, pp. 133–139. (Rus)
20. Leonov V. P., Ataush V. Ye. et al. *Ustroystvo dlya upravleniya protsessom kontaktnoy tochechnoy svarki* [Device for controlling the process of resistance spot welding]. *Pat. 1214368 USSR*, 1986, bull. no. 8. (Rus)
21. Yu J. New methods of resistance spot welding using reference waveforms of welding power», *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2016, vol. 17, no. 10, pp. 1313–1321. <https://doi.org/10.1007/s12541-016-0156-z>
22. Mikno. Z., Stepien M., Grzesik B. Optimization of resistance welding by using electric servo actuator. *Welding in the World*, 2017, vol. 61, no. 3, pp. 453–462. — <https://doi.org/10.1007/s40194-017-0437-x>
23. Shin S., Park D.-J., Yu J., Rhee S. Resistance spot welding of aluminum alloy and carbon steel with spooling process tapes. *Metals*, 2019, vol. 9, no. 4, p. 410. <https://doi.org/10.3390/met9040410>

24. Moision W. C., Hetrick E. T. *System and method of welding a workpiece*. Patent US20130020288A12013. <https://patents.google.com/patent/US20130020288A1/en>
25. Steinmeier D. Upslope and downslope use in resistance welding. *microJoining Solutions-microTips™*, 2017. http://www.microjoining.com/docs/1483822194_micro-tip_resistance_up-downslope.pdf
26. Moravskiy V. E., Vorona D. S. *Tekhnologiya i oborudovaniye dlya tochechnoy i rel'yefnoy kondensatornoy svarki* [Technology and equipment for spot and relief capacitor welding]. Kyiv, Naukova Dumka, 1985. (Rus)
27. Pis'mennyu A. S., Pentegov I. V., Kislitsyn V. M. et al. [Devices for impact processing of a weld in the process of spot resistance welding]. *Avtomaticheskaya Svarka*, 2011, vol. 693, no. 1, pp. 52–55. <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/102306> (Rus)
28. Bondarenko O. F., Bondarenko Iu. V., Safronov P. S., Sydorets V. M. Current and force control in micro resistance welding machines Review and development. *2013 8th International Conference on "Compatibility and Power Electronics (CPE)"*, 2013, pp. 298–303. <https://doi.org/10.1109/CPE.2013.6601173>
29. Tang H., Hou W., Hu S. J. Forging force in resistance spot welding. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2002, vol. 216, no. 7, pp. 957–968. <https://doi.org/10.1243/09544050260174166>
30. Charde N. Forging force in resistance spot welding: analyzing the electrically generated forging force for two different electrode actuations. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, vol. 90, iss. 1–4, pp. 211–218. <https://doi.org/10.1007/s00170-016-9352-3>
31. Bondarenko O. F., Sydorets V. M., Bondarenko Iu. V. [Improving power supplies for contact welding]. *Visnyk Donbas'koyi derzhavnoyi mashynobudivnoyi akademiyi*, 2012, no. 28, pp. 60–63. (Rus)
32. Amada Miyachi Inc. *Linear DC Weld Control UB29/UB29A/DC29 Operation Manual*, 2013. <http://www.amadamiyachi.com/servlet/servlet.FileDownload?requestURL=%2Fapex%2Fproduct%3Fcategoryid%3Dresistance-welding%26groupid%3Drw-power-supplies%26productid%3Ddc29&file=0158000001bZnJAAAM>

Опис статті для цитування:

Бондаренко О. Ф. Узгодження параметрів зварювальних імпульсів з електрофізичними процесами в зварювальному контакті та програмою тиску електродів. *Технологія і конструювання в електронній апаратурі*, 2019, № 5-6, с. 51–60. <http://dx.doi.org/10.15222/ТКЕА2019.5-6.51>

Cite the article as:

Bondarenko O. F. Coordination of welding pulse parameters with electrode pressure program and electrophysical processes in welding contact. *Tekhnologiya i Konstruivovanie v Elektronnoi Apparature*, 2019, no. 5-6, pp. 51–60. <http://dx.doi.org/10.15222/ТКЕА2019.5-6.51>

РЕЦЕНЗЕНТИ НОМЕРА

- Гоблик Віктор Васильович*, канд. фіз.-мат. наук, доцент, Національний університет «Львівська політехніка»
- Должиков Володимир Васильович*, докт. фіз.-мат. наук, зав. кафедрою, Харківський національний університет радіоелектроніки
- Іжнін Ігор Іванович*, докт. фіз.-мат. наук, начальник лабораторії, НВП «Карат», м. Львів
- Ільчук Григорій Архипович*, докт. фіз.-мат. наук, професор, Національний університет «Львівська політехніка»
- Ніколаєнко Юрій Єгорович*, докт. техн. наук, провідний науковий співробітник, НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сикорського»
- Сафронов Павло Сергієвич*, канд. техн. наук, доцент, Одеський національний політехнічний університет
- Стевич Зоран*, докт. техн. наук, професор, Факультет технічних наук Белградського університету в Борі
- Степенко Сергій Анатолійович*, канд. техн. наук, доцент, Чернігівський національний технологічний університет
- Трофімов Володимир Євгенійович*, канд. техн. наук, доцент, Одеський національний політехнічний університет