

В. І. Білобородченко, А. Є. Забранський, С. О. Миронов

Національний університет "Львівська політехніка",  
кафедра зварювального виробництва, діагностики та відновлення металоконструкцій

## ОПТИМІЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЇ ТОЧКОВОГО КОНДЕНСАТОРНОГО ЗВАРЮВАННЯ ПЛОЩИННИХ ВИРОБІВ ІЗ СПЛАВУ АМГ-6

© Білобородченко В.І, Забранський А.Є., С.О. Миронов, 2018

doi

**Мета** полягає у конструкторсько-технологічній оптимізації процесу точкового конденсаторного зварювання площинних елементів зі сплаву АМГ-6 завтовшки 400мкм. **Актуальність** полягає у необхідності проведення науково-прикладних досліджень, зумовлена вимогами до зменшення масо-габаритних показників зварних виробів прицевійного приладобудування на основі використання алюмінієвих сплавів малих товщин з одночасною строгою вимогою до збереження їхніх експлуатаційних показників. Проблему можна вирішити переходом до зварювання конденсаторними дозаторами енергії, створеними на основі глибокої модернізації електричної частини існуючого серійного обладнання для контактного мікрозварювання імпульсом змінного струму. Останнє потребує крім конструкторського опрацювання також дослідження технологічних аспектів точкового конденсаторного зварювання, особливо коли обмежено кількість регульованих установчих параметрів режиму. Втрата гнучкості регулювання передбачає вибір обґрунтованого критерію оцінювання якості зварювання та базового параметра опису формування якісної зварної точки. Це однозначно дає змогу узгодити установчі параметри машини з плинними показниками процесу зварювання (струм, форма струму, час зварювання) за заданого зусилля стискання електродів.

**Методика.** Обґрунтування вибору способу руйнівного контролю зварного з'єднання та оцінювання якості за зовнішніми показниками зварної зони виробу. Статистичний аналіз впливу вхідних показників зварюваних деталей. Вибір базового параметра оцінювання процесу формування якісного зварного з'єднання – жорсткість режиму. Розрахунок теплового стану зони зварювання за стандартною моделлю та лінійною моделлю тепловідведення в електроди дає змогу визначити показники форми імпульсу струму та їх часовий розподіл. Визначення установчих параметрів режиму за такими показниками та електричних конструктивних елементів модернізованого устаткування. Експериментальна оптимізація комбінації установчих параметрів машини для забезпечення якісного режиму зварювання. Аналіз моделей впливу установчих параметрів режиму на показники оцінної якості зварного з'єднання. Вибір найефективніших установчих параметрів, що задовольняють вимоги на зварне з'єднання та бездефектне (відсутність виплесків) проведення зварювання.

**Результати.** 1. Основним дестабілізуючим фактором, що визначає початкові умови зварювання, є стан поверхневих плівок на деталях. Останній може бути оцінений через розкид мікротвердості ( $HB = 79,9 \pm 16,74$  кг/мм<sup>2</sup>; розкид  $\pm 21$  %) та контактний опір  $R_0 = 18,6 \pm 13,8$  мОм; розкид  $\pm 67$  %; 2. Базовим параметром оптимізації режиму зварювання є критерій жорсткості, за яким можна встановити час зварювання  $t = 6$ мс; 3. З використанням стандартної моделі теплового стану зони зварювання та лінійної моделі формування зварного ядра заданих геометричних розмірів за переважаючого тепловідведення у масу електродів можна розрахувати енергетичний стан зони зварювання та плинні параметри режиму (амплітудне значення струму  $I = 2600$ А), а також визначити геометрію імпульсу струму; 4. Використання плинних параметрів режиму та критеріїв подібності, типових для розряду ємності на нерозгалужені ланцюги можна визначити граничні значення установчих параметрів режиму ( $50 \leq C_p \leq 300$ мкФ,  $50 \leq K_T \leq 300$ ) та перевірити придатність конструктивних елементів розрядного контуру модернізованого обладнання для забезпечення заданої форми та параметрів струму зварювання; 5. Представлення відгуків оцінювання якості виробу через сумісне вирішення парної зміни установчих параметрів режиму дає змогу обмежити зону експериментального пошуку їх оптимальних значень за конструктивно накладеної умови незмінності напруги зарядки в усьому діапазоні зміни коефіцієнта трансформації та величини зарядної ємності; 6. Найбільш впливовими та такими, що мають однозначний напрямок дії на оцінку якості зварного з'єднання, є коефіцієнт трансформації та зусилля стискання електродів. Останнє бажане фіксувати незмінним через вплив на початкові умови зони зварювання; 7. Величина зарядної ємності має гостро виражений оптимум, що не дає змоги її ефективного використання як регулюючого параметра для певного конструктивного рішення зарядної частини електричної схеми машини; 8. Між базовим показником міцності зварного з'єднання – діаметром литого ядра

$d_{\text{я}}$  та кутом повороту  $\varphi^0$  зварених пластин деталей при вибіркових руйнівних випробовуваннях на кручення існує статистично значущий кореляційний зв'язок, що дає змогу обмежити оцінку якості одним параметром, який не потребує додаткових технологічних операцій з виявлення та визначення характеристик зварного ядра. **Наукова новизна.** Доведено, що достатньою та необхідною умовою для оптимізації режиму зварювання є встановлення показника його жорсткості. **Практична значущість.** Спростити розрахунок режимів зварювання і забезпечити, за решти однакових умов, його якісні показники на модернізованому обладнанні.

**Ключові слова:** алюмінієві сплави, контактне точкове конденсаторне зварювання, теплові моделі, установчі та плинні параметри режиму, оптимізація режимів зварювання, вибір показників якості з'єднання.

**Постановка проблеми.** Алюмінієві сплави широко застосовуються у зварних виробках приладобудування та електропромисловості. Фізико-механічні та електричні властивості таких матеріалів, а саме: високі показники тепло- та електропровідності, значне температурне лінійне розширення, здатність до інтенсивного окислення, втрата механічної міцності при підвищених температурах потребують використання високоенергетичних концентрованих зварювальних джерел енергії [1]. Останнє дає змогу значною мірою зменшити негативні впливи циклу зварювання: деформаційну втрату міцності, широкий температурний діапазон кристалізації, накопичення у рідкому металі інших включень тощо та забезпечити, за мінімальної зони термовпливу, показники міцності зварного з'єднання на рівні 70–80 % основного металу [1].

Конструктивне рішення низки виробів завтовшки стінки 200–500 мкм передбачає контактне точкове зварювання. За решти однакових умов, для точкових з'єднань цього діапазону товщин переважаючим є забезпечення такого рівня міцності, що не перевищує величини неприпустимих деформаційних напружень самого виробу, тобто потребує утворення литого ядра оптимальних розмірів із мінімальною зоною термічного впливу [1].

Практичні рекомендації з вибору оптимальних режимів точкового зварювання алюмінієвих сплавів передбачають густину струму на рівні не менше 1КА/мм<sup>2</sup>, зусилля стискання електродів 59–98 МПа; для ущільнення металу ядра додаткового прикладання зусилля обтискання на рівні 150–300 % технологічного та критично малого часу зварювання з модуляцією струму для запобігання утворенню виплесків [1].

Задовольнити умови якості виробу, враховуючи вищевикладене, можна за допомогою імпульсних дозаторів енергії. Проте механічний привід та особливості систем регулювання електричних параметрів режиму зварювання, ланцюги комутації розрядного струму типових імпульсних зварювальних дозаторів енергії малої потужності, – як змінного струму, так й з конденсаторним накопиченням енергії – не дають змоги реалізувати повною мірою такі умови. Додатковими факторами, що впливають на якість з'єднання малих перерізів, є варіація показників вхідних матеріалів: коливання товщини для деталей до 700 мкм завтовшки становить  $\pm 21\%$ ; не регламентований нормативними документами розкид твердості та стану поверхні, що оцінюється коливанням величини початкового контактного опору (відмінність у 2–4 рази від медіанного залежно від зусилля стискання та способу підготування поверхні під зварювання) [1].

Коливання показників зварюваних матеріалів спричиняють нестабільність складових суперпозиції температурного поля в часі зварювання, чим порушується основна вимога якісного формування зварного з'єднання: рівність кількості тепла  $Q_{\text{зт}}$ , необхідної та достатньої для формування зварної точки, кількості тепла, що виділяється у зоні зварювання  $Q_{\text{зз}}$  [1].

Оптимізаційна задача ускладнюється також у тому випадку, коли при модернізації існуючого обладнання зварювання імпульсом змінного струму до конденсаторного дозувальника енергії закладено жорстку умову незмінності напруги зарядки ємностей  $U_c$ . Останнє зменшує кількість плавно керованих установчих параметрів режиму (залишається тільки зусилля стискання електродів  $P_c$ ), різко обмежується поле вибору прийнятних значень дискретних установчих параметрів режиму – коефіцієнта трансформації  $K_T$  та величини зарядної ємності  $C_p$ . Тим самим

вимушено не виконується основна вимога раціонального проектування конденсаторних машин за накопиченою енергією заряду  $E_{opt}$  [1]

$$E_{opt} = \frac{C_{p\min} \cdot U_{c\max}^2}{2} = \frac{C_{p\max} \cdot U_{c\min}^2}{2} \quad (1)$$

**Мета роботи** полягає у конструкторсько-технологічній оптимізації процесу точкового конденсаторного зварювання площинних елементів зі сплаву АМг-6 завтовшки 400 мкм.

**Виклад основного матеріалу.** В основу розв'язання задачі оптимізації покладено умову забезпечення максимальної рівномірності зварного з'єднання з основним матеріалом з урахуванням положення про мінімальне деформування виробу відповідно до закладених нормативних вимог.

У такому випадку є чинною умова подібності робочої поверхні електроду до товщини металу  $\delta \equiv d_e$ , відповідно до якої діаметр зварної точки має становити  $d_T = k_\delta \cdot d_e$ , де  $k_\delta = 0,65\text{--}0,7$ . З іншого боку, враховуючи умови руйнівних випробовувань зварного з'єднання, діаметр умовного круглого литого ядра точки повинен становити  $d_{Ty} = (3\text{--}5)\delta$ , а для випробовувань на відрив або кручення такий показник має становити  $d_{Ty} = 6\delta$ . Звідси  $d_{Ty} \geq d_T = k_\delta \cdot d_e$ , а  $2,8 \leq d_e \leq 3,4$  мм. У такому випадку припустимий діапазон коливання розмірів литого ядра за умови забезпечення міцності становить 1,9–2,1 мм.

Оцінювали якість зварювання статичними руйнівними випробовуваннями на розтяг та кручення за умови подібності зварних зразків за геометричними, механічними та фізичними параметрами до виробу. Мінімальну кількість зразків обирали відповідно до [5]

$$n_{\min} = \frac{m \cdot \Delta W_m \cdot K_w^2}{I_{P(\alpha)}^2} \cdot \left(1 \pm \frac{1}{\sqrt{2m}}\right)^2, \quad (1)$$

де  $m$  – кількість випробовуваних зразків установчої партії;  $I_{P(\alpha)}^2$  – максимальне припустиме відхилення середнього параметру  $M$  оцінки міцності за довірчої імовірності  $\alpha = 0,95$ ;

$$\Delta W_m = M_{\max} - M_{\min}; \quad K_w = \frac{t(n-1)}{d_m \sqrt{m}}; \quad t - \text{табличне значення критерію Стюдента}; \quad Q_0 = \frac{\pi D h_0^3 p}{8 \mu l} -$$

табличний коефіцієнт оцінювання середнє квадратичного відхилення за кількість  $m$  випробовувань.

Випробовування на розтяг (зрізання/виривання) зварної точки регламентовані для оцінювання якості точкових з'єднань [1], також було доповнено руйнівними випробовуваннями на кручення (параметр – кут повороту однієї пластини відносно защемленої другої). Під час таких випробовувань у зоні зварювання (лите ядро та зона термовпливу) виникає різно орієнтований плоский напружений стан, більш інформативний за характером поверхонь руйнування.

Результати випробовувань використано для створення модельних керуючих зв'язків між установчими параметрами режиму та показниками якості зварного з'єднання.

Вплив стану вхідних матеріалів розглядали за такими показниками: товщина пластин, мікротвердість, початковий контактний опір (рис. 1, а–в).

Коливання товщини вхідного матеріалу лежить у межах нормативного допуску, проте в часі зварювання зумовлює різну теплову потужність роботи струму на лінійному опорі, що можна оцінити, у першому наближенні, за зміною медіани опору за циліндричної моделі протікання зварювального струму

$$R_{med} = \frac{8k \cdot \delta \cdot \rho}{\pi \cdot d_e^2} = 6,7 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}, \quad (2)$$

де  $\rho$  – питомий опір зварюваного матеріалу;  $k = 0,88$  – коефіцієнт розтікання струму.

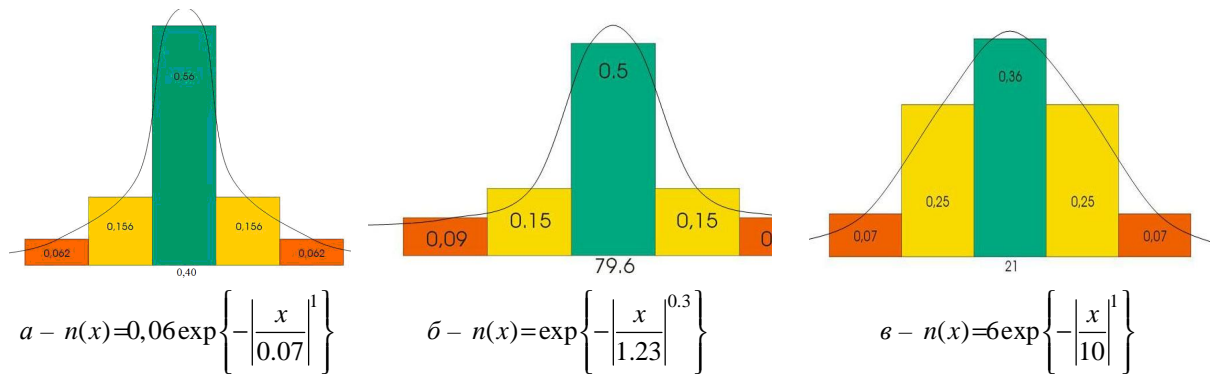


Рис. 1. Центровані щільності розподілення вихідних параметрів зварюваних матеріалів:  
 А – товщина матеріалу  $\delta = 0,4 \pm 0,066$  мм; розкид товщини  $\pm 10$  %; б – мікротвердість матеріалу  
 $HB = 79,9 \pm 16,74$  кг/мм<sup>2</sup>; розкид  $\pm 21$  %; в – початковий контактний  
 опір  $R_0 = 18,6 \pm 13,8$  мОм; розкид  $\pm 67$  %

Два останні параметри оцінювання вхідного стану зварюваного металу однозначно вказують на переважний вплив оксидної плівки і мішаний тип провідності контактного поділу в початковий момент протікання імпульсу струму. За зусиль стискання, типових для зварювання малих товщин, початковий контактний опір зумовлений насамперед не геометрією поверхні ( $3,2 \leq R_z \leq 6,3$  мкм), а ступенем зміни плівки та її дефрагментацією, що створює квазіметалеву або металеву провідність контактного поділу [1].

За прийнятої моделі півкульового опису контактування нерівностей профілю поверхні початковий контактний опір зони деталей – деталей становить

$$R_{\partial\partial} = 0,89 \cdot \rho_i \cdot \sqrt{\frac{HB_i}{P_e}}, \quad (3)$$

де  $R_{\partial\partial}$  – контактний опір;  $\rho_i$  – питомий опір;  $i$  – матеріал контактного поділу (плівка або метал);  $HB_i$  – твердість плівки або металу;  $P_e$  – зусилля стискання електродів.

Відповідно для плівки  $R_{\partial\partial} = 14 \cdot (10^{13} - 10^{14})$  Ом (повна ізоляція), а для металевому контакту  $R_{\partial\partial} = 3,3 \cdot 10^{-6}$  Ом. У реальних умовах початкового контактування деталей у зоні зварювання за типових значень підготування поверхонь та технологічно доцільних зусиль стискання існує квазіметалева провідність. Остання зумовлена наявністю у площі контактування  $\alpha$ -плям провідності.

Контактний опір одиничної  $\alpha$  – плями провідності можна оцінити за її розміром  $a$  та присутності в її межах зони чисто металевому контакту з опором  $R_\mu$  і зони провідності тонкої оксидної плівки з опором  $R_{nl}$  [1, 6]

$$a = \sqrt[3]{\frac{1,5 P_e (1 - \mu^2)}{2 E}}; R_\alpha = R_\mu + R_{nl} = \frac{\rho}{2a} + \frac{\sigma_{nl}}{\pi \cdot a^2} = 9 - 12 \text{ мкОм}, \quad (4)$$

де  $\mu$  – коефіцієнт Пуассона;  $E$  – модуль пружності;  $\rho$  – питомий опір металу;  $\sigma_{nl}$  – питомий поверхневий опір плівки.

Для розрахунку прийнято: а) плівка має природну двошарову структуру (шар безпосередньо розташований на поверхні металу завтовшки 0,01–0,03 мкм та пухкий зовнішній шар завтовшки 200–300 мкм); б) деталі механічно вичищено та знежирено.

Оптимізацію установчих параметрів режиму зварювання (коефіцієнт трансформації  $K_T$ , величина зарядної ємності  $C_p$ , зусилля стискання електродів  $P_e$ ) при  $U_c = \text{const}$  проведено з урахуванням практичних рекомендацій [1], а також критеріїв подібності, коректних для конденсаторних машин малої потужності з нерозгалуженим контуром розряду, за базового критерію оптимуму – жорсткості режиму  $F_0$

$$F_0 = \frac{a \cdot t}{\delta^2}; I \equiv K_T \cdot U_c \cdot \sqrt{C_p}; t \equiv \frac{\sqrt{C_p}}{K_T}, \quad (5)$$

де  $a$  – температуропровідність металу;  $\delta$  – товщина деталі;  $t$  – час дії переднього фронту (зварювального) імпульсу струму;  $I$  – амплітудне значення струму зварювання.

Критерій жорсткості  $F_0=5$  прийнято за умови поміркованості зростання фронту імпульсу струму, загального часу розряду 10–15 мс, а також забезпечення ширини зони термовпливу  $h = 4\sqrt{at}$  в межах 0,9–2 мм. Отже, за оптимум часу зварювання прийнято  $t=6$ мс.

Достатність та коректність обраного часу дії переднього фронту імпульсу струму перевірено за двома модельними описами теплового стану в зоні зварювання: 1) стандартна модель умовного розподілу температури у зоні зварювання та кількості тепла  $Q_{zt}$ , достатнього і необхідного для формування зварної точки

$$Q_{zt} = \frac{\pi \cdot d_e^2}{2} \cdot \delta \cdot c_\mu \cdot \gamma_\mu \cdot T_{nl}^0 + \pi \cdot x_{zme} (d_e + x_{zme}) \cdot \delta \cdot c_\mu \cdot \gamma_\mu \cdot T_{nl}^0 / 2 + \frac{\pi \cdot d_e^2}{2} \cdot x_e \cdot c_e \cdot \gamma_e \cdot T_{nl}^0 / 8 = 3,6 \text{ Дж}, \quad (6)$$

де  $c_\mu$   $c_e$  – відповідно теплоємність зварюваного металу та металу електрода;  $\gamma_\mu$   $\gamma_e$  – їхня питома вага;  $x_{zme}$   $x_e$  – ширина зони тепловідведення за заданого часу зварювання ( $h = 4\sqrt{at}$ , – відповідно температуропровідність зварюваного матеріалу та металу електрода);  $T_{nl}^0$  – температура плавлення зварюваного металу;

2) модель осьового поширення теплоти з базовим відведенням останньої у тіло електродів [2]

$$T_{x,t}^0 = T_{\max}^0 \left( 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^y e^{-y^2} dy \right), \quad (7)$$

де  $T_{x_i,t}^0$  – зміна температурного стану у  $i$ -й реперній точці  $x_i$ ;  $x_1 = 0,45\delta$ ,  $x_2 = 0,55\delta$ ;  $T_{\max}^0 = T_{nl}^0 + (200 \dots 400 \text{ } ^\circ\text{C})$ ;  $y = x / 2\sqrt{at}$  – рухома координата зміни просторового положення фронту плавлення металу (переміщення границі ядра) в часі зварювання.

Миттєві різниці температур між реперними точками в часі зварювання становлять  $\Delta T = \frac{(T_1^0 - T_2^0)}{x_2 - x_1}$ , а середній градієнт температур між ними  $\Delta T_l^0 = k_1 \sum \frac{\Delta T_i}{n}$ ;  $k_1 = 1.2 \dots 1.3$ .  $\Delta T_l^0 = 4,2 \cdot 10^7 \text{ } ^\circ\text{C/м}$ .

Досягнення теплового балансу (похибка між  $T^0(x_1)$  та  $T^0(x_1)$  становить 2 %) між реперними точками (рис.2) характеризує граничне переміщення зони плавлення металу, а теплофізичні та геометричні параметри литого ядра дозволяють розрахувати теплову роботу струму та його розподіл у часі зварювання (геометрія форми імпульсу).

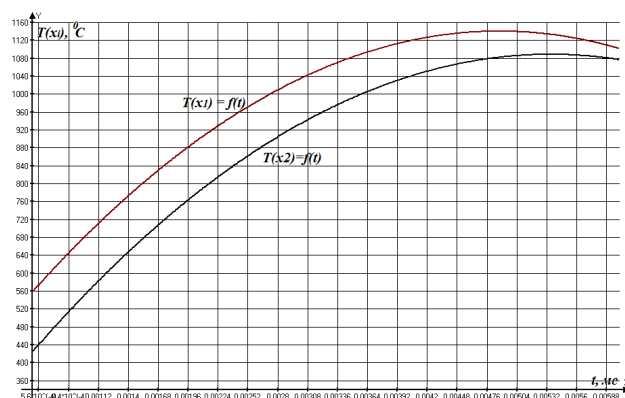


Рис. 2. Залежність температурного стану  $T^0(x_i)$  у реперних точках залежно від часу дії зварювального імпульсу струму  $t$

За об'єму литого ядра  $V=101 \cdot 10^{-9} \text{ м}^3$  та його поверхневої площі тепловідведення  $S=235 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$  кількість тепла, необхідна та достатня для приведення такої маси металу у рідкий стан до заданої температури  $T_{\text{max}}^0$  становить  $Q_p = V \cdot \gamma \cdot c \cdot T_{\text{max}}^0 = 3,62 \text{ Дж}$  за кількості відведеної теплоти з поверхні ядра  $Q_B = \lambda \cdot \gamma \cdot c \cdot \Delta T_d^0 \cdot t = 5,51 \text{ Дж}$ . Отже, кількість енергії, що забезпечується роботою струму для формування литого ядра становить  $Q_{\Sigma} = 9,1 \text{ Дж}$ . Відповідно до цієї умови кількість електрики

становить  $q_k = \frac{Q_{\Sigma}}{U_{\Pi}} = 31 \text{ К}$ , де  $U_{\Pi}$  – напруга плавлення зварюваного матеріалу. Для нормалізованих умов роботи струму на розрядний нерозгалужений контур номінальна кількість електрики становить  $q_{\text{ном}} = 10 \text{ К}$  за питомої кількості електрики, що припадає на 1А амплітуди зварювального струму  $\Delta q_{\text{ном.амп.}} = (1,4-3,0) \cdot 10^{-3} \text{ К/А}$ . Тобто, потрібна питома кількість електрики та амплітудне значення струму становлять

$$\Delta q_{\text{амп.}} = \Delta q_{\text{ном.амп.}} \cdot \left( \frac{q_k}{q_{\text{ном}}} \right)^{(1,8 \dots 2,0)}; I_a = \frac{q_k}{\Delta q_{\text{амп.}}} = 2600 \text{ А.} \quad (8)$$

Швидкість набігання фронту імпульсу струму нормалізована в межах 4,5–8А/мс (рис. 3). Прийнята за умови регулювання параметрів струму лише внаслідок зміни коефіцієнта трансформації та величини зарядної ємності швидкість набігання 4,5–5,5 А/мс. Останнє дає змогу запобігти утворення виплесків та надмірної деформації виробу в зоні зварювання. Зварювання відбувається в межах дії переднього фронту набігання струму; задній (неробочий) фронт імпульсу визначається співвідношенням залишкової енергії конденсаторів та параметрами розрядного контуру.

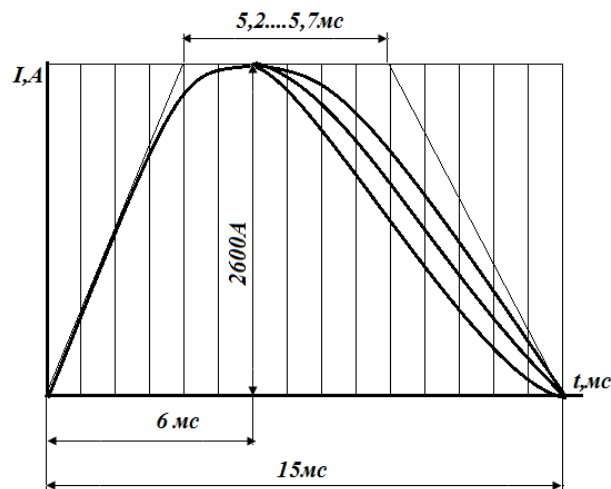


Рис.3. Технологічно доцільні форми імпульсу струму зварювання (розбудова за еквівалентною трапецією [2])

Отримані розрахункові дані з часового розподілу струму зварювання перевірено за стандартною моделлю і відповідного їй ефективного значення струму

$$I_{\text{ef}} = \sqrt{\frac{Q_{\text{зм}}}{\kappa_R \cdot R_{\text{ззк}} \cdot t}} = 1800 \text{ А,} \quad (9)$$

де  $\kappa_R = 1,2-1,4$  – коефіцієнт, що враховує зміну опору зони зварювання в процесі формування зварного з'єднання;  $R_{\text{ззк}} = \frac{8 \cdot \kappa_{\text{pc}} \cdot \delta \cdot \rho'_{\mu}}{\pi d_e^2} = 10,2 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}$  – опір зони зварювання в кінці зварювального циклу;  $\kappa_{\text{pc}} = 0,88$  – коефіцієнт, що враховує розтікання струму поза центральний стовпчик стандартної моделі;  $\rho'_{\mu}$  – питомий опір зварюваного металу при температурі плавлення.

Для конденсаторного розряду на зварювальний трансформатор через нерозгалужені ланцюги чинне  $I = I_{ef} \cdot \sqrt{2} = 2590$  А. Порівняно з (8) похибка становить 1 %, що дає змогу під час розрахунку величин установчих параметрів режиму оперувати такими поточним параметрами зварювання: час зварювання 6мс, амплітудне значення струму 2600 А.

Для подальшої експериментальної оптимізації режиму зварювання визначено діапазон зміни установчих параметрів машини, розробленої на основі модернізації зварювально-монтажного пристрою ССП-1, призначеного для зварювання імпульсом змінного струму. Для проектування машини використано методики [3,4] та закладено такі показники плинних параметрів режиму: амплітудне значення струму  $I=2600$  А, час досягнення амплітудного струму (час зварювання)  $t=6$  мс, напруга зарядки  $U_c=const=600$  В, цикл зварювання  $T=1$  с.

Тривалий струм розряду становить

$$I_{mp} = 1,2 \cdot I \sqrt{\frac{t}{T}} = 242 \text{ А.} \quad (10)$$

З іншого боку,  $I_{mp} = \sqrt{\frac{C_p \cdot U_c^2}{R'' \cdot T}}$ , отже, приведений до зварювального контуру активний опір ланцюга розряду становить  $R'' = 925 \cdot 10^{-6}$  Ом, а мінімальна приведена індуктивність ланцюга встановлена відповідно  $L'' = R'' \cdot t = 5,6 \cdot 10^{-6}$  Гн.

Тоді робоча ємність становить

$$C_p = \left(\frac{I}{U_c}\right)^2 \cdot R'' \cdot t \cdot e = 300 \text{ мкФ.} \quad (11)$$

Нижньою межею діапазону регулювання, з конструктивних умов прийнято  $C_{pmin} = 50$  мФ.

Коефіцієнт трансформації знайдено відповідно

$$K_T = \frac{U_c}{I \cdot R''} \cdot 2 \cos \gamma \cdot \exp(-\gamma \text{ctg} \gamma) = 200 \quad (12)$$

Нижньою межею з конструктивних умов прийнято  $50 \leq K_T \leq 300$ .

Придатність існуючого трансформатора для його модернізації під конденсаторний розряд перевірено відповідно [1] за площею  $S$  перерізу магнітопроводу

$$S = 3,12 \cdot \frac{C_p \cdot U_c}{B_{max}} \cdot 10^{-8} = 350 \text{ см}^2, \quad (13)$$

де  $B=1,8$ Т – індукція матеріалу магнітопроводу.

Експериментальна оптимізація режиму зварювання за сумісним впливом установчих параметрів на модернізованому обладнанні демонструє (рис. 4, а–в) існування двох дискретних поверхонь оцінювання якості. Останнє дає змогу обмежити під час подальшої оптимізації діапазон задавання параметрів режиму, вибрати найефективнішу оцінку якості та визначити зони її локальних максимумів. Це еквівалентне до вибору дозвільної зміни установчих параметрів режиму в межах допустимого відхилення величини оцінювання якості.

Як впливає з рис. 4, б, в найприйнятнішими оцінками якості володіють діаметр зварного ядра та кут повороту зварених пластин. Оскільки визначення діаметра ядра потребує додаткових технологічних операцій (металографічний аналіз), то в умовах виробництва найпридатнішими та оперативними є вибіркові випробовування на кут повороту (випробовування на кручення у горизонтальній площині зварених деталей).

Дослідження (рис. 5–7) функціональних залежностей оцінок якості типу

$$\Pi_{i\text{я}} = f(\Pi_{i\text{у}}); \Pi_{j\text{опт}}, \quad (14)$$

де  $\Pi_{i\text{я}}$  – параметр оцінювання якості ( $i \equiv P_p; d_{\text{я}}; \phi^0$ );  $\Pi_{i\text{у}}$  – досліджуваний установчий параметр режиму зварювання ( $i_{\text{у}} \equiv C_p; K_T$ );  $\Pi_{j\text{опт}}$  – оптимальні значення стаціонарних параметрів оптимізації дає змогу їх описати у вигляді уніфікованої аналітичної моделі вигляду  $y(x) = ax^2 + bx + c$  із достатніми статистичними характеристиками на рівні  $P=0,95$  довірчої імовірності (таблиця)

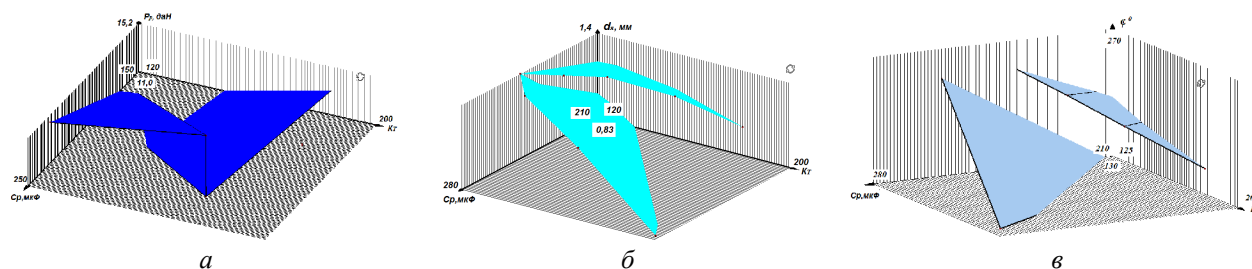


Рис. 4. Залежність оцінок якості зварювання від установчих параметрів режиму:

$$a - P_p = f(C_p, K_T); \quad б - d_{я} = f(C_p, K_T); \quad в - f^0 = f(C_p, K_T)$$

### Аналітичні моделі залежності параметрів якості від установчих параметрів режиму зварювання

Функціонал	Модель	Кореляція, $R^2$	Стандартне відхилення, $S$
$P_p = f(C_p);$ $K_T = 200, P_e = 20$ даН	$-(6,6857143 \cdot 10^{(-)}) \cdot x^2 + 0,3156571 \cdot x - 22,595$	0,924	0,54263
$d_{я} = f(C_p);$ $K_T = 120, P_e = 20$ даН	$-(3,9285714 \cdot 10^{(-4)}) \cdot x^2 + 0,1915476 \cdot x - 21,9541667$	0,911	0,06054
$f^0 = f(C_p);$ $K_T = 120, P_e = 20$ даН	$-0,0895833 \cdot x^2 + 43,8065476 \cdot x - 5108,9583333$	0,954	0,9681
$P_p = f(K_T);$ $C_p = 250, P_e = 20$ даН	$-(5,6818182 \cdot 10^{(-4)}) \cdot x^2 + 0,1387424 \cdot x + 6,7842424$	0,975	0,1945
$d_{я} = f(K_T);$ $C_p = 250, P_e = 20$ даН	$-(4,978355 \cdot 10^{(-5)}) \cdot x^2 + 0,0089974 \cdot x + 1,0402857$	0,997	0,0035
$f^0 = f(K_T);$ $C_p = 250, P_e = 20$ даН	$0,0048377 \cdot x^2 - 3,4597186 \cdot x + 615,4857143$	0,983	0,692
$P_p = f(P_e);$ $C_p = 250, P_e = 20$ даН	$-0,047619 \cdot x^2 + 2,0785714 \cdot x - 7,7380952$	0,963	0,225
$d_{я} = f(P_e);$ $K_T = 120, C_p = 250$	$-0,0065152 \cdot x^2 + 0,2363939 \cdot x - 0,7161818$	0,999	0,007
$f^0 = f(P_e);$ $K_T = 120, C_p = 250$	$1,7867965 \cdot x^2 - 104,4495671 \cdot x + 1637,1272727$	0,998	0,203

Результати проведених досліджень демонструють вплив установчих параметрів режиму зварювання на формування термодеомаційного циклу, зокрема: а) зміна інтенсивності та перерозподіл складових суперпозиції температурного поля в часі протікання імпульсу струму (контактні та лінійні теплові генератори); б) тепловідведення із зони нагрівання; в) деформування виробу в зоні зварювання; г) взаємодія зварюваних матеріалів з металом електродів (масоперенесення, утворення виплесків).

Найбільш критичним за впливом на показники якості є установчий параметр – величина зарядної ємності  $C_p$ . Останнє зумовлено як її дискретним задаванням, так й інтенсивністю зростання переднього фронту імпульсу струму та його амплітудного значення. За ємності, меншої



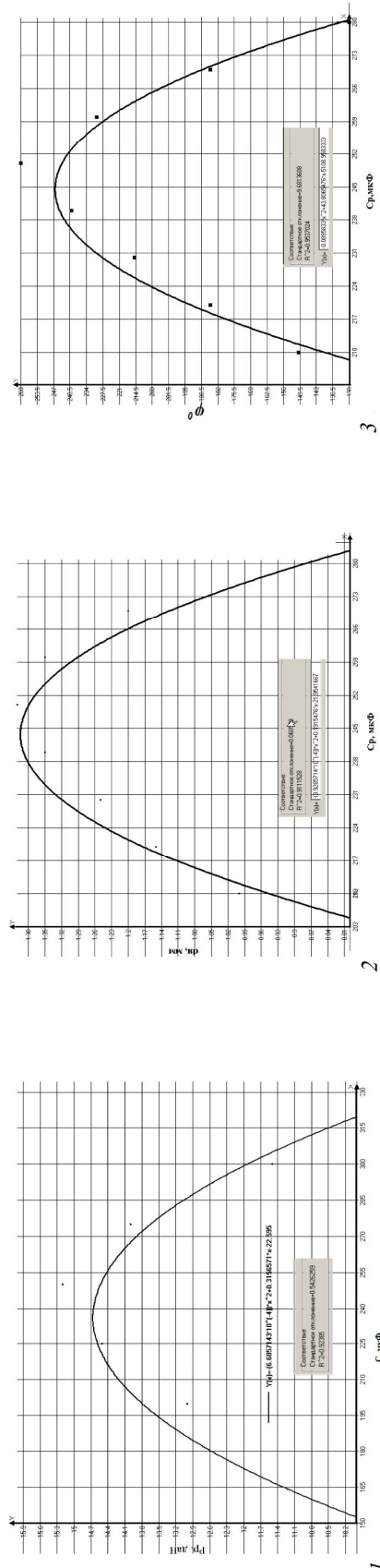


Рис. 5. Вплив величини зарядної ємності  $C_r$  на показники якості виробу: 1 – зусилля руйнування  $P_r$ , діаметр ядра точки  $d_p$ , кут повороту пластин  $\phi$

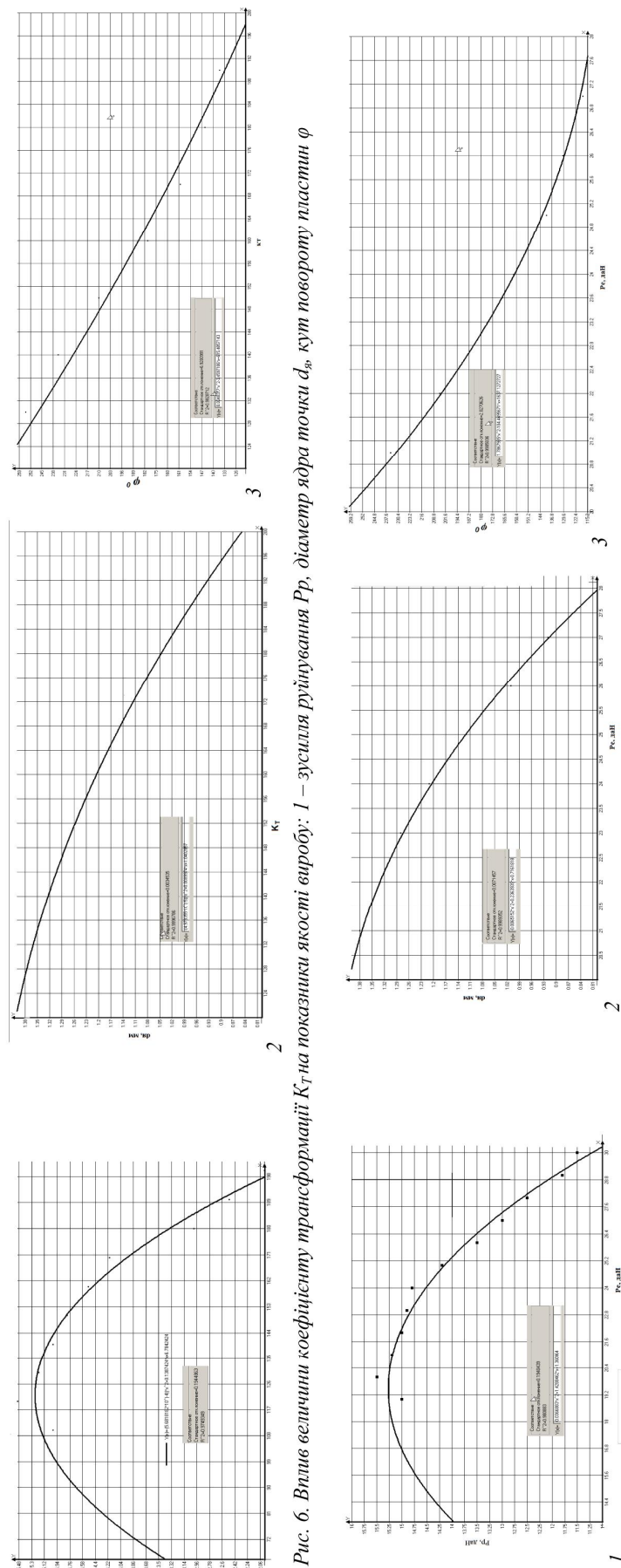


Рис. 6. Вплив величини коефіцієнту трансформації  $K_t$  на показники якості виробу: 1 – зусилля руйнування  $P_r$ , діаметр ядра точки  $d_p$ , кут повороту пластин  $\phi$

Рис. 7. Вплив величини зусилля стиснення  $P_e$  на показники якості виробу: 1 – зусилля руйнування  $P_r$ , діаметр ядра точки  $d_p$ , кут повороту пластин  $\phi$

за 230 мкФ, теплової роботи струму на контактних і лінійних опорах недостатньо для формування литої зони ядра заданого діаметра  $d_{\text{я}}$ , що забезпечує задані механічні властивості зварного з'єднання (зусилля руйнування  $P_p$  та кут кручення  $\phi^0$ ). Перевищення величини ємності за оптимальну (240 мкФ) призводить до порушення прийнятного співвідношення між прибутковим тепловим джерелом та тепловим стоком в електроди в часі зварювання: фіксується надмірне деформування деталей під електродами, а при закритичних значеннях ємності – формування піделектродних та внутрішніх виплесків, гранично до пропалення.

Величини коефіцієнта трансформації та зусилля стискання електродів характеризуються однозначним оптимумом:  $K_T = 120$ ,  $P_e = 20$  даН. Проте показники міцності в межах встановленого діапазону їх розкиду ( $d_{\text{я}} = 1,2\text{--}1,4$  мм;  $\phi^0 = 240\text{--}260^0$ ;  $P_p = 14,5\text{--}\geq 15$  даН) дають змогу ефективно коригувати процес зварювання зміною:

а) коефіцієнта трансформації за оцінкою зусилля руйнування -90–150; за діаметром ядра – 120–140, за кутом кручення – 120–130. Через дискретність задавання величини  $K_T$  та конструктивного виконання силової частини розрядного контуру рекомендована варіація коефіцієнта трансформації лежить в діапазоні 120–140. Утримування цього параметра у заданих межах характеризується достатньо плавним зростанням переднього фронту імпульсу струму за практично незмінного його амплітудного значення та поміркованого тепловідведення в електроди завдяки збільшенню теплонасичення об'єму металу під електродами;

б) зусилля стискання електродів  $P_e$  у заданих межах задавання показників оцінювання якості лежить у діапазоні 18–22 даН. Зростання величини зусилля стискання зменшує роль контактних генераторів тепла і поліпшує тепловідведення в електроди.

Оскільки величина зусилля стискання, незважаючи на можливість неперервного задавання, є визначальною для початкових умов протікання струму та його роботи на контактних опорах і лишається незмінною за весь цикл зварювання, єдиним регульованим установчим параметром режиму в конкретному випадку точкового конденсаторного зварювання з постійним рівнем напруги зарядки та величини ємності конденсаторів є коефіцієнт трансформації.

З огляду на практичну реалізацію технології зварювання, важливо вибрати універсальний показник якості, що однозначно пов'язує геометричні параметри ядра литої зони з механічною роботоздатністю виробу і такого, що легко реалізується у виробничих умовах.

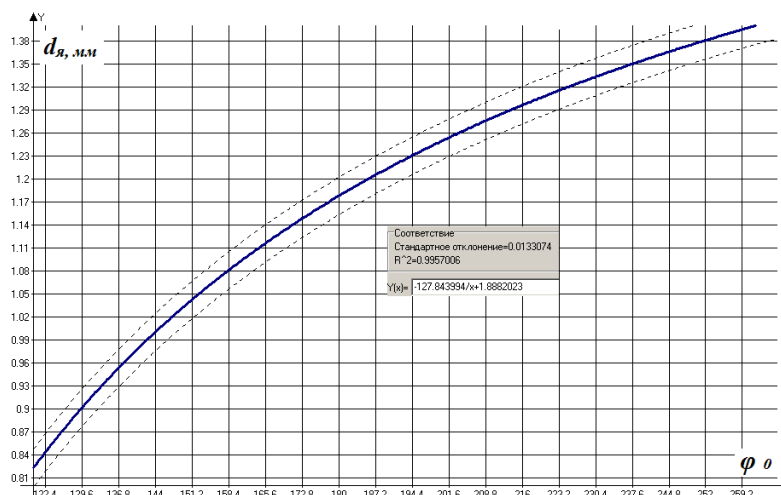


Рис. 8. Залежність прогнозованої величини діаметра ядра  $d_{\text{я}}$  литої зони при механічних випробовуваннях на кручення (кут  $\phi^0$ ) за зміни коефіцієнта трансформації  $K_T$ :  $d_{\text{я}} = -127.843994/x + 1.8882023$ ;  $S = 0.01331$ ;  $R^2 = 0.996$ ;  $P = 0.95$ .

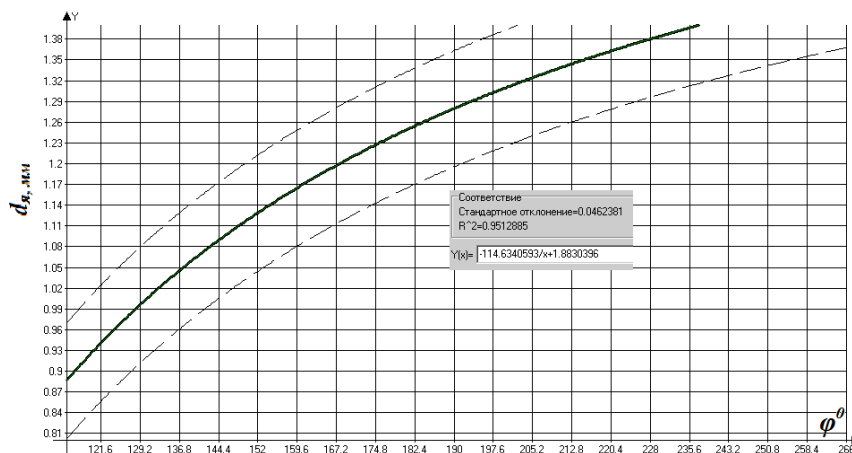


Рис. 9. Залежність прогнозованої величини діаметра ядра  $d_{я}$  литої зони при механічних випробовуваннях на кручення (кут  $\phi^0$ ) за зміни зусилля стискування електродів  $P_e$ :  $d_{я} = -114.6340593/x + 1.8830396$ ;  $S = 0.0462$ ;  $R^2 = 0.9513$ ;  $P = 0.95$

Аналіз функціоналів  $d_{я} = f(j)$ ,  $K_T = \text{var}$ ;  $d_{я} = f(j)$ ,  $P_e = \text{var}$  (рис. 8, 9) демонструє достатній статистичний кореляційний зв'язок за незмінного оптимального значення величини ємності. Останнє є достатньою та необхідною умовою для вибіркового механічного руйнівних випробовувань на кручення зварних виробів.

**Висновки:** 1. Основним дестабілізуючим фактором, що визначає початкові умови зварювання, є стан поверхневих плівок на деталях. Останній можна оцінити через розкид мікротвердості ( $HB = 79,9 \pm 16,74$  кг/мм<sup>2</sup>; розкид  $\pm 21$  %) та контактний опір  $R_0 = (18,6 \pm 13,8)$  мОм; розкид  $\pm 67$  %. Прийнятною технологічною операцією для їх стабілізації у цьому випадку є механічне підготування поверхонь до зварювання. 2. Базовим параметром оптимізації режиму зварювання є критерій жорсткості, за яким можна встановити час зварювання  $t = 6$  мс. 3. Використання стандартної моделі теплового стану зони зварювання та лінійної моделі формування зварного ядра заданих геометричних розмірів за переважаючого тепловідведення у масу електродів дає змогу розрахувати та підтвердити величини енергетичного стану зони зварювання та плинних параметрів режиму, що його задовольняють (амплітудне значення струму  $I = 2600$  А, час досягнення амплітудного струму (час зварювання)  $t = 6$  мс.), а також визначити геометрію імпульсу струму. 4. Використання плинних параметрів режиму та критеріїв подібності, типових для розряду ємності на нерозгалужені ланцюги, дає змогу визначити граничні значення установчих параметрів режиму ( $50 \leq C_p \leq 300$  мкФ,  $50 \leq K_T \leq 300$ ) та перевірити придатність конструктивних елементів розрядного контуру модернізованого обладнання для забезпечення заданої форми та параметрів струму зварювання; 5. Представлення відгуків оцінювання якості виробу через сумісне рішення парної зміни установчих параметрів режиму дає змогу обмежити зону експериментального пошуку їхніх оптимальних значень за конструктивно накладеної умови незмінності напруги зарядки в усьому діапазоні зміни коефіцієнта трансформації та величини зарядної ємності. 6. Найбільш впливовими та такими, що мають однозначний напрямок дії на оцінку якості зварного з'єднання, є коефіцієнт трансформації та зусилля стискування електродів. Останнє бажано фіксувати незмінним через вплив на початкові умови зони зварювання. 7. Величина зарядної ємності має гостро виражений оптимум, що не дає змогу її ефективно використовувати як регулюючий параметр за певного конструктивного рішення зарядної частини електричної схеми машини. 8. Між базовим показником міцності зварного з'єднання – діаметром литого ядра  $d_{я}$  та кутом повороту  $\phi^0$  зварених пластин деталей при вибіркового руйнівних випробовуваннях на кручення існує статистично значущий

кореляційний зв'язок, що дає змогу обмежити оцінку якості одним параметром, який не потребує додаткових технологічних операцій з виявлення та визначення характеристик зварного ядра.

1. Моравский В. Э., Ворона Д. С. *Технология и оборудование для точечной и рельефной конденсаторной сварки*. – К.: Наук. думка, 1985. – 272 с.
2. Каганов Н. Л. Расчетно – экспериментальный метод выявления требуемой геометрии импульса тока при конденсаторной сварке // Труды МВТУ 132. – С.150-157.
3. Белов А. Б. *Конденсаторные машины для контактной сварки*. – Л.: Энергоатомиздат, 1984. – 112 с.
4. Глебов Л. В., Пескарев Н. А., Файнгенбаум Д. С. *Расчет и конструирование машин контактной сварки*. – Л.: Энергоатомиздат, 1981. – 424 с.
5. Золоторевский В. С. *Механические свойства металлов*. – М.: Металлургия, 1983. – 352 с.
6. Хольм Р. *Электрические контакты / пер с англ.* – М.: Изд-во иностр. лит., 1961. – 464 с.

V. I. Biloborodchenko, A. E. Zabransky, S. A. Mironov

Department of Welding Production, Diagnostics and Restoration of Metal Structures, Institute

of Mechanical Engineering and Transport, National University "Lviv Polytechnic"

#### OPTIMIZATION TECHNOLOGY FOR SPOT CAPACITOR WELDING OF PLANAR PRODUCTS FROM AMG-6 ALLOYS

Ó Biloborodchenko V. I., Zabransky A. E., Mironov S. A., 2018

**Purpose.** It consists in the design and technological optimization of the spot condenser welding process of planar elements from AMG-6 alloy with a thickness of 400 microns. Relevance. The need for scientific and applied research is due to the requirements for reducing the mass-dimensional parameters of welded products of precision instrument-making based on aluminum alloys of small thickness with the simultaneous strict requirement to preserve their performance indicators. This can be solved by switching to welding with capacitor energy dispensers, created on the basis of a deep modernization of the electrical part of the existing serial equipment for contact micro-welding with an AC pulse. The latter requires, besides the design study, also the study of the technological aspects of spot-capacitor welding, especially when the number of adjustable parameters of the welding mode is limited. The loss of control flexibility requires the selection of a reasonable criterion for assessing the quality of welding and the basic parameter to describe the formation of a high-quality weld point. It unambiguously allows the machine parameters to be matched with current indicators of the welding process (current, current form, welding time) for a given electrode compression force.

The technique. Justification of the choice of the method of destructive testing of welded joints for assessing the quality of external indicators of the welded zone of the product. Statistical analysis of the impact of the original indicators of welded parts. The choice of the basic parameter for evaluating the process of forming a high-quality welded joint is the rigidity of the regime. The calculation of the thermal state of the welding zone according to the standard model and the linear model of the heat removal to the electrodes, which allows to determine the indicators of the shape of the current pulse and their temporal distribution. Determination of the parameters of the mode of such indicators and electrical structural elements of the upgraded equipment. Experimental optimization of the combination of machine parameters to ensure the quality of welding. Analysis of models of the influence of mode parameters on the quality parameters of a welded joint. Selection of the most effective parameters that meet the requirements for a welded joint and defect-free (no splash) welding.

**Results. 1.** The main destabilizing factors determining the initial welding conditions are the condition of the surface films on the parts. The latter can be estimated through the scatter of microhardness ( $HB = 79.9 \pm 16.74 \text{ kg/mm}^2$ ; scatter of 21 %) and the contact resistance  $R_0 = 18.6 \pm 13.8 \text{ m}\Omega$ ; scatter  $\pm 67 \%$ ; 2. The basic parameter of optimization of the welding mode is the stiffness criterion, which allows you to set the welding time = 6ms; 3. Using the standard model of the thermal state of the welding zone and the linear model of the formation of a welded core of given geometric dimensions with the prevailing heat output to the electrode mass allows calculating the energy state of the welding zone and current mode parameters (peak value of current  $I = 2600$ ), as well as determining the current pulse geometry; 4. Using the current mode parameters and similarity criteria typical for discharging capacitances to unbranched circuits, it is possible to determine the limiting values of the mode parameters ( $50 \leq C_p \leq 300 \text{ mF}$ ,  $50 \leq U \leq 300$ ) and check the suitability of the structural elements of the discharge circuit of the upgraded equipment to

ensure a given shape welding current parameters; 5. Submission of product quality assessment responses through the joint solution of a pair of mode parameter changes allows limiting the area of experimental search for their optimal values with a constructively imposed condition that the charging voltage remains constant over the whole range of variation of the transformation ratio and the value of the charging capacity; 6. The most influential and unambiguous direction in assessing the quality of a welded joint is the transformation ratio and the compression force of the electrodes. The latter is desirable to fix unchanged due to the impact on the initial conditions of the welding zone; 7. The size of the charging capacity has a sharply pronounced optimum, which does not allow its effective use as a regulating parameter in this design solution of the charging part of the electrical circuit of the machine; 8. There is a statistically significant correlation between the baseline indicator of the strength of a welded joint — the diameter of the cast core and the rotation angle  $\varphi_0$  of welded plates of parts during random torsion tests with destruction, which allows one to limit the quality assessment to one parameter that does not require additional technological operations to identify and determine characteristics welded core.

**Scientific novelty.** It is proved that a sufficient and necessary condition for optimizing the welding mode is to establish an indicator of its rigidity.

**Practical significance.** Simplify the calculation of welding modes and ensure, under other equal conditions, its quality indicators on the upgraded equipment.

**Key words:** aluminum alloys, contact spot capacitor welding, thermal models, mode parameters, welding mode optimization, choice of quality parameters for a joint.

1. Moravskiy V. E., Vorona D. S. *Tehnologiya i oborudovanie dlya tochechnoy i relefnoy kondensatornoy svarki.* – K.: Nauk. dumka, 1985. – 272 s.
2. Kaganov N. L. *Raschetno-eksperimentalny metod vyyavleniya trebuemoy geometrii impulsa toka pri kondensatornoy svarke // Trudyi MVTU 132.* – S.150-157.
3. Belov A. B. *Kondensatornyie mashinyi dlya kontaktnoy svarki.* – L.: Energoatomizdat, 1984. – 112 s.
4. Glebov L. V., Peskarev N. A., Fayngenbaum D. S. *Raschet i konstruirovaniye mashin kontaktnoy svarki.* – L.: Energoatomizdat, 1981. – 424 s.
5. Zolotarevskiy V. S. *Mehanicheskie svoystva metallov.* – M.: Metalurgiya, 1983. – 352 s.
6. Holm R. *Elektricheskie kontakty / per s angl.* – M.: Izd-vo inostr. lit., 1961. – 464 s.