

5. *Технология* электрической сварки металлов и сплавов плавлением / под ред. акад. Б. Е. Патона. – М. : Машиностроение, 1974. – 768 с.
6. *Гудремон Э.* Специальные стали / Э. Гудремон. – М. : Metallurgia, 1966. – Т. 1. – 736 с.
7. *Пентегов И. В.* Метод расчета падения напряжения по длине вылета электрода с учетом нелинейности теплофизических параметров / И. В. Пентегов, О. И. Петриенко // Автоматическая сварка. – 2002. – № 4. – С. 30-33.
8. *Петров Г. Л.* Теория сварочных процессов (с основами физической химии) : учебник для ВУЗов / Г. Л. Петров, А. С. Тумарев. – М. : Высш. школа, 1977. – 392 с.
9. *Кирьянов Д. В.* MathCAD 14 / Д. В. Кирьянов. – СПб. : БХВ-Петербург, 2007. – 704 с.
10. *Дятлов В. И.* Элементы теории переноса электродного металла при электродуговой сварке / В. И. Дятлов // Новые проблемы сварочной техники : сб. статей. – К. : Техника, 1964. – С. 167-182.
11. *Петров А. В.* Перенос металла в дуге при сварке плавящимся электродом в среде защитных газов / А. В. Петров // Автоматическая сварка. – 1955. – № 2. – С. 26-33.

УДК 621.791:666.1.037.42

Л.Я. Березін, канд. техн. наук

Чернігівський державний технологічний університет, м. Чернігів, Україна

КРИТЕРІЇ ЯКОСТІ ЗВАРЮВАННЯ В ЕЛЕКТРИЧНОМУ ПОЛІ ВИСОКОЇ НАПРУГИ

Надано критерії попереднього, проміжного, заключного контролю якості зварювання і рекомендації для їх використання. Показано вплив процесів поляризації діелектрика на якість зварних з'єднань.

Ключові слова: зварювання в електричних полях, критерії якості зварювання, поляризація діелектрика.

Представлены критерии предварительного, промежуточного, заключительного контроля качества сварки и рекомендации для их применения. Показано влияние поляризационных процессов в диэлектрике на качество сварных соединений.

Ключевые слова: сварка в электрических полях, критерии качества сварки, поляризация диэлектрика.

Presented criteria of preliminary, intermediate, final quality control of welding and the recommendation for their application. Is shown the influence of processes of polarization in dielectric on quality of welding connections.

Key words: welding in electric fields, criterion of quality of welding, polarization dielectric.

Постановки проблеми. Зварювання в електричному полі (ЗЕП) високої напруги дозволяє отримувати прецизійні, герметичні вузли з матеріалів з різкими відмінностями у фізико-хімічних властивостях, які задовольняють найжорсткіші технічні умови [1]. Також необхідно зазначити, що отримання заданих властивостей зварного вузла можливе під час дотримання певних вимог. Це питання ще не мало системного підходу і тому потребує додаткового розгляду.

Мета та завдання роботи. Розробити комплекс технологічних і технічних заходів, які б дозволяли отримувати якісні зварні з'єднання з різнорідних матеріалів у твердій фазі в електричному полі високої напруги під час забезпечення найжорсткіших технічних вимог.

Виклад основного матеріалу досліджень. Для отримання якісного зварного з'єднання при ЗЕП потрібно проводити поетапний контроль:

- попередній контроль заготовок майбутнього вузла;
- проміжний контроль у процесі зварювання;
- контроль правильності експлуатації зварювального обладнання;
- заключний контроль готового виробу.

Попередній контроль. Попередній контроль заготовок майбутнього зварного вузла повинен включати:

- контроль геометричних розмірів деталей, що входять до складу вузла;
- контроль мікрошорсткості поверхонь, що зварюються;
- контроль якості очищення поверхонь, що зварюються.

Питання впливу мікрошорсткості поверхні діелектрика (скла, ситалів) на якість зварних з'єднань досліджувалося в [2]. Для отримання якісного зварного з'єднання повер-

хня під зварювання повинна мати середнє арифметичне відхилення профілю $R_a \leq 0,02$ мкм. Після шліфування, полірування й очищення [3] з партії зразків, що були зроблені, беруть декілька зразків для визначення мікросорсткості поверхні за допомогою профілографа-профілометра типу А1 моделі 252. При цьому треба мати на увазі, що в межах однієї партії зразків, що були відполіровані, величина R_a буде різною. На рис. 1 наведена крива частот розподілення параметра R_a у межах однієї промислової партії механічної обробки ситалу СО-115М.

До зварювання зразки зберігаються в ексикаторі. Безпосередньо перед зварюванням поверхню під зварювання протирають технічним ацетоном або технічним етиловим спиртом.

Якість очищення поверхонь, що зварюються, має особливо велике значення під час використання прецизійних методів зварювання у твердій фазі. Окрім того, під час очищення відбувається контакт поверхні скла або ситалу з хімічними розчинами, результатом якого є зміна властивостей їх поверхонь і приповерхневого шару. Враховуючи, що одним з етапів утворення зварного з'єднання скла і ситалів з металами є кислотно-відновлювальна взаємодія між поверхнями, що зварюються, то до процесу хімічного очищення треба відноситися обережно. Це питання стосовно ЗЕП ще потребує додаткових досліджень. Вплив видів очищення (одноразове, комбіноване) на міцність з'єднань, що були отримані ЗЕП, проводилися в роботі [3] й один з найкращих варіантів надано в роботі [4]. У загальному випадку під час очищення, окрім самого очищення, відбувається зміна мікросорсткості поверхонь (за рахунок розтравлювання) і зміна кислотності поверхні (рН), що буде зварюватися. За результатами досліджень була розроблена методика, що дозволяє якісно проконтролювати вказані процеси і може бути рекомендована під час проведення досліджень, а деякі з рекомендованих критеріїв і для промислового використання.

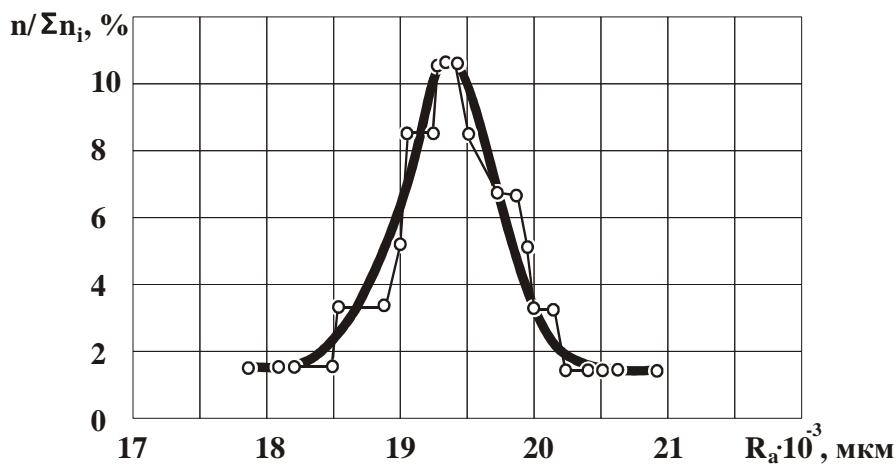


Рис. 1. Крива частот розподілення параметра R_a у межах однієї партії механічного оброблення ситалу: n – кількість зразків однієї партії, що мають однакові значення R_a ; Σn_i – загальна кількість зразків у межах однієї партії (58 штук)

Методика визначення якості очищення поверхонь скла та ситалів включає комплекс критеріїв:

- здатність поверхні матеріалу після очищення до змочування дистильованою водою, яке визначається методом розриву водної плівки;
- здатність поверхні матеріалу після очищення до змочування дистильованою водою, яке визначається за крайовим кутом змочування методом лежачої краплі;
- визначення зміни ступеня кислотності (основності) поверхні, в порівнянні зі станом до очищення, за допомогою крайового кута змочування спеціальними реагентами методом лежачої краплі;

- зміна ваги зразків, забруднених контрольованим складом, до та після очищення;
- візуальний огляд контрольованої поверхні неозброєним оком та за допомогою мікроскопа під час збільшення $\times 16$, $\times 100$ (наприклад, МБС-9, МИМ-7);
- зміна мікросорсткості (для виявлення залишкового забруднення на контрольованій поверхні та можливого її розтравлювання хімічними розчинами).

Методика, що розглядається, може використовуватися під час проведення досліджень, коли ще невідомий оптимальний варіант очищення.

Перед початком досліджень необхідно проводити попереднє очищення зразків та їх забруднення контрольованим складом.

Оцінювання здатності поверхні матеріалу після очищення до змочування дистильованою водою за методом розриву водної плівки проводиться за допомогою визначення часу (t_p), через який відбудеться руйнування водної плівки на поверхні зразка після його занурення у дистильовану воду (якісне очищення, коли водна плівка не руйнується протягом 60 с та більше після витягнення зразка з води).

Визначення здатності поверхні матеріалу після очищення до змочування дистильованою водою досить ефективно визначається за допомогою крайового кута змочування Θ методом лежачої краплі. Розтікання краплі по поверхні, що досліджується ($\Theta \rightarrow 0$), вказує на якісне очищення.

Під час визначення зміни ваги зразків до та після очищення вимірювання ваги можна проводити на рівноплечих вагах моделі ВЛР-200 г, які мають ціну поділення шкали 1 мг, ціну поділення ділильного приладу – 0,05 мг, погрішність вимірювання маси за шкалою – не більш 0,15 мг.

Ефективність очищувальної дії мийного засобу оцінюється параметром ΔM :

$$\Delta M = \frac{m_2 - m_3}{m_2 - m_1} \cdot 100\% , \quad (1)$$

де m_1 , m_2 , m_3 – маси зразків, відповідно, до забруднення, забрудненого й очищеного, г.

Зміну мікросорсткості можна визначати за допомогою профілограф-профілометра. Для кожного зразка повинен проводитися вхідний контроль після механічного оброблення та попереднього очищення на визначення параметра R_a поверхні, що досліджується. Для ситалу і скла перед забрудненням контрольованою речовиною величина мікросорсткості повинна становити $R_a = 0,019 \pm 0,001$ мкм.

Під час зварювання в електростатичному полі для отримання вакуумщільних з'єднань скла і ситалів між собою та з металами якісне очищення перших має місце за умови:

- $\Delta M \geq 100\%$;
- $t_p \geq 60$ с;
- $\Delta R_a \rightarrow 0$, де ΔR_a – зміна мікросорсткості поверхні, що контролюється, після хімічного очищення:

$$\Delta R_a = \frac{R_{a_2} - R_{a_1}}{R_{a_1}} \cdot 100\% , \quad (2)$$

де R_{a_1} і R_{a_2} – середнє арифметичне відхилення профілю поверхні, відповідно, до забруднення та після очищення;

- $\Theta \rightarrow 0$;
- відсутності мікрочастинок забруднень на поверхні, що контролюється, в полі зору окуляра мікроскопа ($\times 16$, $\times 100$).

В умовах виробництва, коли вже відомий оптимальний варіант очищення матеріалів, що зварюються, достатньо використовувати вибірковий контроль з використанням визначення мікросорсткості, здатності поверхні матеріалу після очищення до змочування дистильованою водою, яке визначається методом розриву водної плівки і візуальний огляд контрольованої поверхні неозброєним оком і зі збільшенням $\times 16$, $\times 100$ за допомогою мікроскопа.

Проміжний контроль. Під час проведення досліджень було зафіксовано, що під час зварювання в електричному полі величина струму, що проходить крізь скло, ситал (подаліше діелектрик), під час зварювання змінюється аналогічно зміні струму абсорбції (струму, що спадає), який є наслідком поляризаційних процесів у діелектриках, які включені під постійну електричну напругу. На рис. 2 показано графік повного струму i крізь діелектрик, струму абсорбції $i_{абс}$ і наскрізного струму $i_{нас}$ під часу його включення під постійну електричну напругу U [5]:

$$i = i_{нас} + i_{абс} . \quad (3)$$

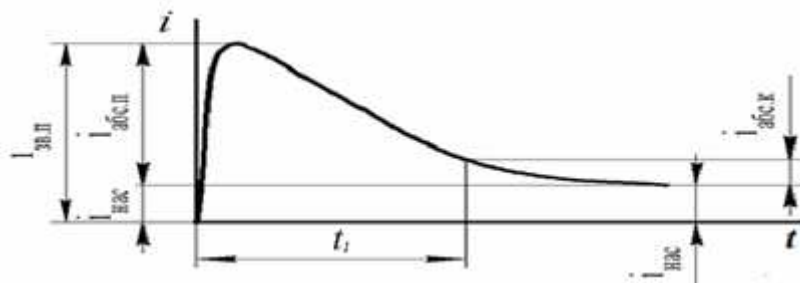


Рис. 2. Залежність повного струму крізь діелектрик від часу включення під постійну електричну напругу: $i_{нас}$ – наскрізний струм провідності крізь діелектрик; $i_{абс п}$, $i_{абс к}$ – початковий та кінцевий струми абсорбції, який зафіксовано через час t_1

У загальному випадку наскрізний струм (струм провідності) встановлюється в діелектрику залежно від напруги U за час $t \rightarrow \infty$ і визначається за формулою (4), а струм абсорбції за формулою (5):

$$i_{нас} = \frac{U}{R_0} , \quad (4)$$

де R_0 – опір діелектрика;

$$i_{абс} = U_{сехс} \left(\frac{t}{\tau} \right) , \quad (5)$$

де s – провідність діелектрика, що відповідає струму абсорбції;

τ – стала часу струму абсорбції (час протягом якого $i_{абс}$ зменшується в $e = 2,718$ разів і дорівнює піддотичній до графіка $i_{абс}(t)$).

Головною причиною появи струму абсорбції є поляризація діелектрика (упорядковане зміщення зарядів в діелектрику) [5]. В цьому випадку мова йде про види поляризації, для встановлення яких потрібен певний час.

Під час досліджень (зварювали ситал СО-115М з ситалом СО-115М через прошарок алюмінію) фіксували зміну величини струму, що проходить крізь складання і визначали величину густини струму. На рис. 3 показано зміна густини струму від часу зварювання. Після досягнення відповідної температури зварювання на деталі, що зварювалися, подавали електричну напругу, яка б забезпечувала початкову задану величину густини струму $j_{зв.п}$. Як бачимо з графіків, під час досягнення максимального значення густини струму

плавно спадає. Під час збільшення температури нагріву спад (зміна) густини струму Δj (6) збільшується.

На рис. 4 показано в узагальненому вигляді графік зміни густини струму від часу зварювання.

У зв'язку з цим, як допоміжний параметр під час вивчення особливостей ЗЕП діелектриків з іншими матеріалами, було використано величину Δj :

$$\Delta j = j_{зв.н} - j_{зв.к}, \quad (6)$$

де $j_{зв.н}$ та $j_{зв.к}$ – густина струму, що проходить крізь зону зварювання, відповідно, відразу після подачі електричного потенціалу на деталі, що зварюються, і в момент, що передує вимкненню зовнішнього електричного поля.

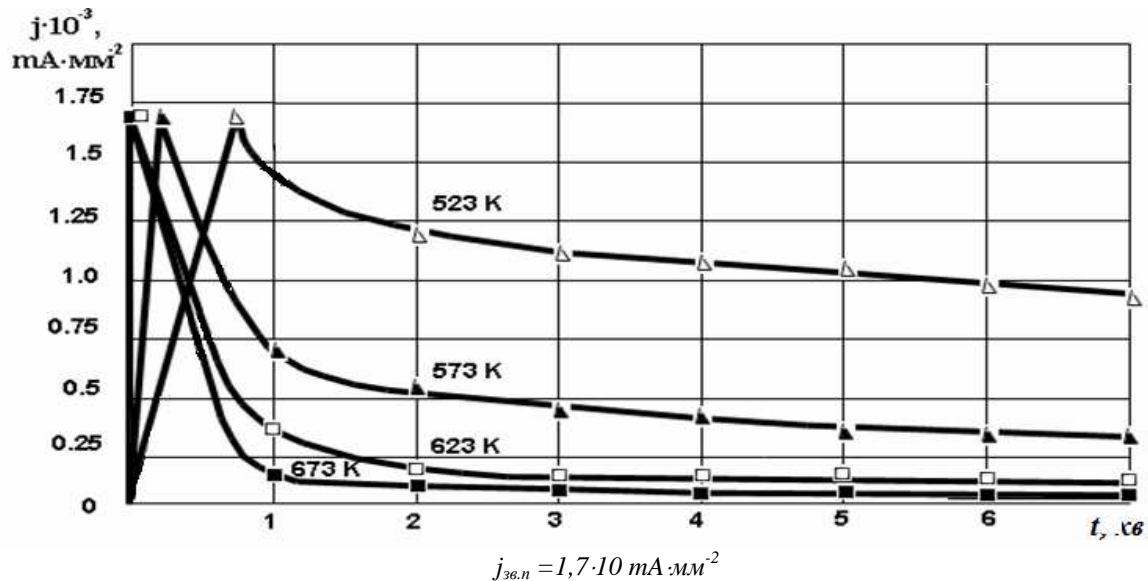


Рис. 3. Залежність густини струму від часу та температури зварювання

Величина Δj може характеризувати густину струму абсорбції ($\Delta j = \Delta j_{абс.}$) і повноту протікання поляризаційних процесів. Із врахуванням формули (3) формулу (6) можна представити в такому вигляді:

$$\Delta j_{абс} = (j_{абс.н} + j_{нас}) - (j_{абс.к} + j_{нас}) = j_{абс.н} - j_{абс.к}, \quad (7)$$

де $j_{абс.н}$, $j_{абс.к}$ та $j_{нас}$ – густина струму абсорбції в початковий та кінцевий моменти зварювання і густина наскрізного струму ($j_{нас} = const$);

$\Delta j_{абс}$ – зміна струму абсорбції протягом усього циклу подачі електричної напруги (рис. 4).

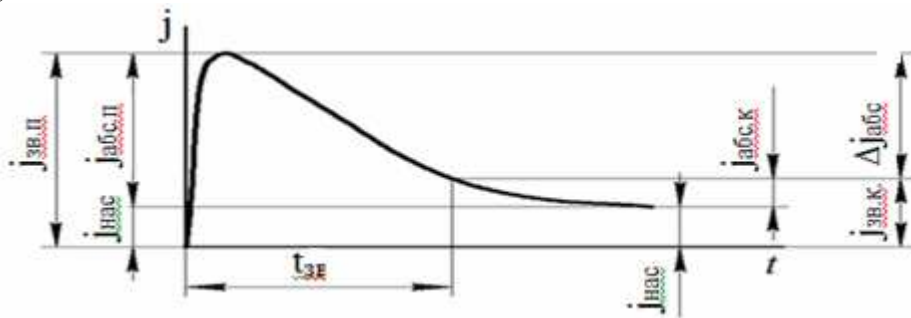


Рис. 4. Залежність густини повного струму крізь діелектрик від часу зварювання:
 $j_{зв.н}$, $j_{зв.к}$ – початкова та кінцева густина повного струму зварювання; $\Delta j_{абс}$ – зміна густини струму абсорбції за час ($t_{зв}$) перебування діелектрика під напругою

На рис. 5 надано графік залежності міцності зварних з'єднань і густини струму, що проходить крізь діелектрик, від часу зварювання.

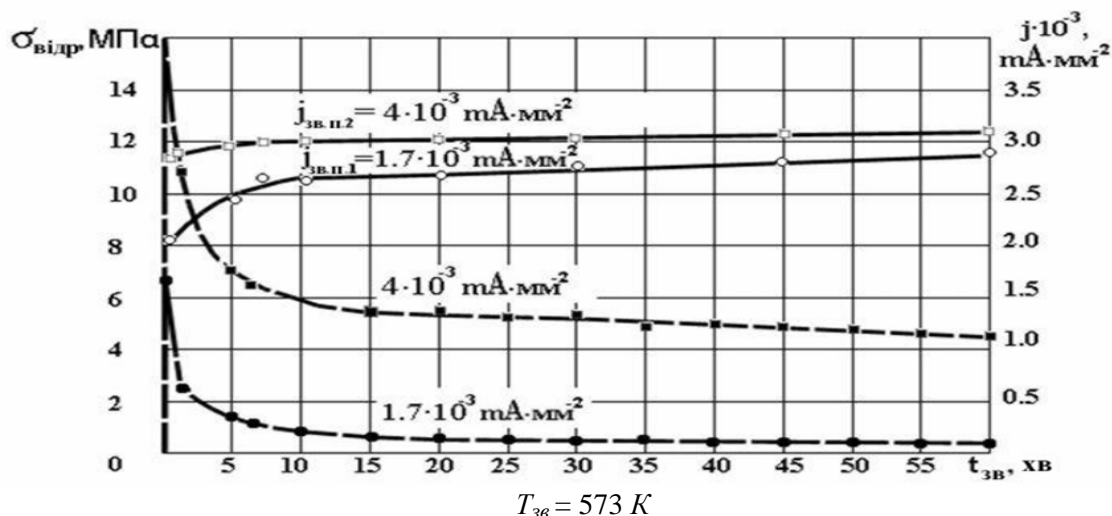


Рис. 5. Залежність міцності зварного з'єднання на відрив (—) і зміни густини струму (---) від часу зварювання

Графіки, що наведені на рис. 5, отримані за допомогою накладання залежностей $\sigma_{\text{відр}}(t_{\text{зв}})$ і $j(t_{\text{зв}})$. Є очевидним, що характер збільшення міцності зварного з'єднання збігається з характером спаду густини струму абсорбції. Працездатні з'єднання вже можна отримати при $t_{\text{зв}} = (5 - 10)$ хв, тобто, коли відбулася основна частина спаду струму абсорбції (коли $\Delta j = \Delta j_{\text{абс}} \rightarrow \text{max}$). Подальша витримка під напругою веде до збільшення міцності з'єднання.

Значення $\Delta j_{\text{абс}}$ має границі як у мініальному, так і максимальному значеннях. Величина $\Delta j_{\text{абс}}$ нижче цієї границі не дозволить у повному обсязі реалізуватися поляризаційним процесам і будемо мати недостатню міцність зварного з'єднання. Перевищення, а це, як правило, пов'язано з підвищенням електричної напруги, веде до активізації електророзрядних процесів у зоні зварювання і порушення самого процесу [6]. Умови протікання електророзрядних процесів залежать від багатьох факторів: властивостей атмосфери, в якій проводиться зварювання; величини мікросорсткості поверхонь вузла та їх забрудненості; форми вузла, що зварюється; теплофізичних властивостей матеріалів, що зварюються; температури зварювання тощо. Визначення вказаних границь повинно проводитися для конкретних умов зварювання в попередніх дослідженнях. Мінімальне значення $\Delta j_{\text{абс}}$, за якого зварені вузли залишалися герметичними, і вилив при механічних випробуваннях по ситалу становив $1,0 \cdot 10^{-3} \text{ mA} \cdot \text{мм}^{-2}$, а максимальне – $5,5 \cdot 10^{-3} \text{ mA} \cdot \text{мм}^{-2}$ (вказані величини залежать від конкретних умов зварювання).

Під час зварювання в атмосфері повітря ($T_{\text{зв}} = 573 \text{ K}$, $t_{\text{зв}} = 5$ хв, форма вузла наведена на рис. 6, поз. 2-4) при початковій густині струму $j_{\text{абс. н}} = 1,7 \cdot 10^{-3} \text{ mA} \cdot \text{мм}^{-2}$ з'єднання залишалися працездатними ($\sigma_{\text{від}} \geq 10 \text{ МПа}$) під час зміни густини струму абсорбції $1,35 \cdot 10^{-3} \text{ mA} \cdot \text{мм}^{-2}$. Збільшення часу зварювання і початкової густини струму веде до збільшення $\Delta j_{\text{абс}}$ і міцності зварного з'єднання.

У загальному випадку діапазон зміни $\Delta j_{\text{абс}}$, у межах якого можна отримати якісне зварне з'єднання, залежить від діелектричної проникливості діелектрика, температури зварювання, початкової густини струму, часу подачі електричної напруги, форми вузла, що зварюється, властивостей атмосфери, в якій проводиться процес зварювання тощо.

Порівнюючи графіки залежності струму, густини струму від часу подачі напруги (рис. 2-4) та розглядаючи їх у взаємозв'язку з графіками зміни міцності від часу подачі напруги, можна зробити висновок про пряму залежність міцності зварного з'єднання

при ЗЕП від процесів поляризації, що проходять у ситалі (діелектрику) під час зварювання.

Проведені дослідження дозволяють стверджувати, що величину Δj_{abc}^j можна розглядати як критерій якості зварювання під час проведення зварювальної операції. Про зміну Δj_{abc}^j можна безпосередньо судити за зміною величини густини струму (величині струму) протягом виконання технологічної операції зварювання. У процесі зварювання, окрім контролю температури зварювання, необхідно проводити контроль величини спаду струму, що проходить срізь діелектрики, що зварюються.

Контроль експлуатації зварювального обладнання. Контроль експлуатації обладнання повинен проводитися відповідно до інструкцій, що надаються разом з документацією на обладнання (періодичні огляди, діагностика приладів, що входять до складу зварювальної установки тощо).

Заключний контроль. Заключний контроль зварного з'єднання може бути двох видів:

- контроль моделі (макета);
- контроль реального об'єкта.

Метод модулювання є достатньо поширеним під час проведення досліджень та використовується під час відпрацювання оптимальних режимів зварювання. Найбільш бажаним варіантом є використання методу масштабного моделювання. За цим методом виготовляється модель зварної конструкції (вузла) значно менших розмірів з витримкою подібності: форми, режимів зварювання, температурних полів, деформацій і переміщень.

Використання моделей дозволяє проводити дослідження з використанням випробувань, що руйнують, і визначати механічні характеристики зварного вузла.

ЗЕП у більшості використовується для отримання прецизійних вузлів, складові яких мають достатньо велику вартість і виготовлені з дефіцитних матеріалів. Тому метод моделювання є достатньо привабливим для випадків, що розглядаються. Приклад однієї з таких моделей наведено на рис. 6.

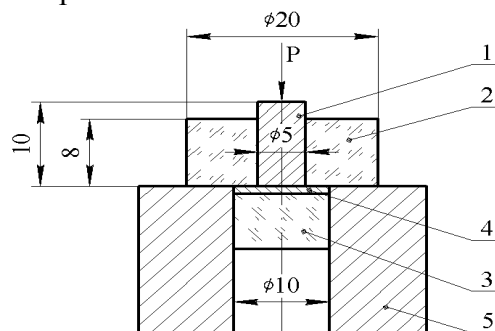


Рис. 6. Схема моделі вузла для проведення механічних випробувань на відрив: 1 – пуансон; 2-4 – макет вузла (4 – прошарок (прокладка) алюмінію, що використовувався під час зварювання); 5 – опора

Сила відриву для випадку, що розглядається, може становити декілька десятків кгс. У такому випадку використання типового обладнання для проведення механічних випробувань призводить до значної погрішності, що не допустимо. Тому було розроблено і виготовлено відповідне устаткування (рис. 7) для проведення механічних випробувань на відрив для моделей, що зображено на рис. 6. Обладнання комплектується динамометричною скобою ДС-02 і дозволяє створювати максимальний тиск на вузол, що випробується, до 2 кН (200 кгс).

Окрім механічних випробувань, для моделі проводять також інші види контролю, що і для реальних об'єктів.

Під час контролю реальних об'єктів, як правило, виключаються випробування, що руйнують. До випробувань для випадку, що розглядається, відносяться такі випробування:

візуальний огляд звареного вузла неозброєним оком та за допомогою лупи, металографія, повторні нагріви до заданих температур; термоудари в камері тепла та холоду; механічні діяння на вібростенді; механічні удари на ударному стенді; поляризаційно-оптичні обстеження вузлів, перевірка на вакуумщільність тощо [4].

Ефективним є контроль для визначення дефектів зварювання з використанням металографії для оптично прозорих об'єктів, який дозволяє без руйнування досліджувати площину зварювання (рис. 8).

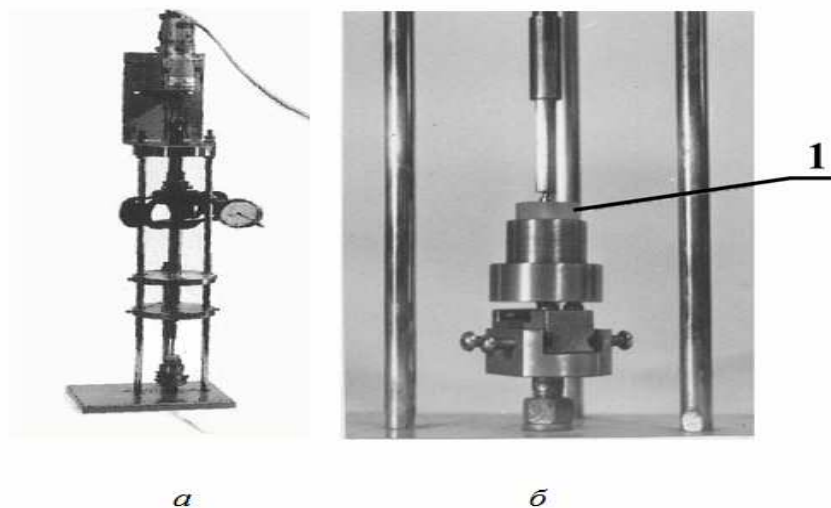


Рис. 7. Установка для механічних випробувань на відрив: а – загальний вигляд установки для механічних випробувань зварних вузлів; б – пристрій для установки вузла (макета), що випробується (поз. 1)

На рис. 8 показано стан алюмінієвої фольги, яка використовувалась як прокладка при ЗЕП вузлів ситал – алюміній – ситал, до та після зварювання. Фольга виготовлялася прокатуванням і мала товщину $0,04 \pm 0,002$ мм. На рис. 8, а зафіксовано стан алюмінію до початку зварювання. Бачимо сліди від прокатування фольги під час її виготовлення. На рис. 8, б показано стан алюмінію після зварювання (x140). У площині зварювання мають місце дефекти (непровари і пропали).

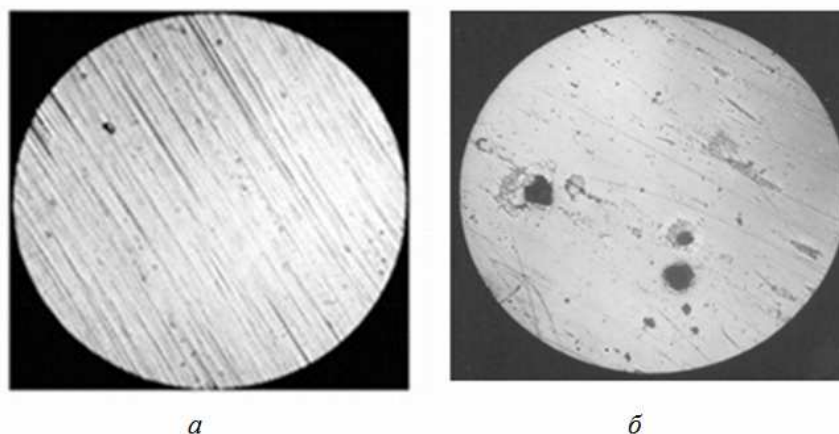


Рис. 8. Стан алюмінієвої прокладки до (а) та після зварювання (б)

Точковий метод [7] металографії дозволяє визначити відносну площу дефектів у площині зварювання без руйнування моделей. На рис. 9 зафіксовано одне з положень поля зору під час визначення відносної площі пропалів і непроварів (x140).

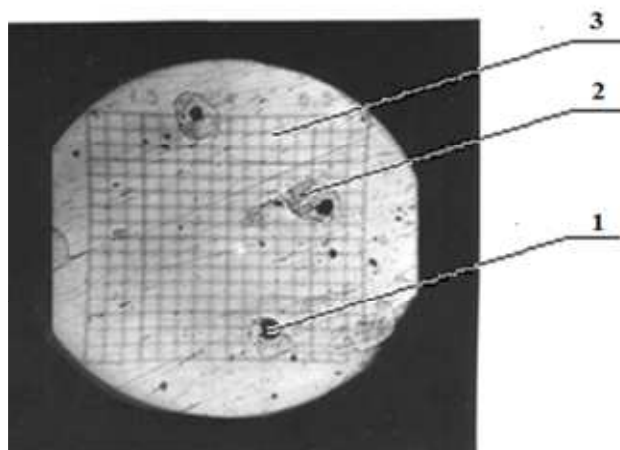


Рис. 9. Визначення кількості провалів та непроварів у площині зварювання на мікроскопі МИМ-7:
1 – провал; 2 – непровар; 3 – сітка, що встановлюється в окуляр мікроскопа і накладається на кожне поле зору

Висновки

1. Проведено системний аналіз критеріїв якості на всіх етапах виготовлення зварних вузлів під час зварювання в електричному полі високої напруги.
2. Розроблені критерії попереднього, проміжного, заключного контролю якості зварювання діелектричних матеріалів у зовнішньому електричному полі високої напруги.
3. Надані практичні рекомендації для використання критеріїв якості зварювання вузлів, що отримані зварюванням в електричному полі високої напруги, на всіх етапах його виготовлення.
4. Показано вплив процесів поляризації діелектрика, що зварюється, в зовнішньому електричному полі високої напруги на якість зварних з'єднань.

Список використаних джерел

1. Березін Л. Я. Напрямки використання зовнішніх електричних полів для отримання нероз'ємних з'єднань різномірних матеріалів / Л. Я. Березін // Вісник ЧДТУ. Серія «Технічні науки». – Чернігів, 2011. – № 4 (53). – С. 94-103.
2. Березін Л. Я. Особенности предварительной подготовки к сварке ситалла с алюминием в узлах приборов / Л. Я. Березин, В. Г. Панаєтов, О. Г. Усьшкін // Технология авиационного и агрегатостроения : производст.-техн. сб. – Саратов : НИТИ, 1987. – № 3-4. – С. 31-33.
3. Березін Л. Я. Вплив хімічного очищення поверхні ситалу на якість з'єднання з алюмінієм зварювання в електростатичному полі / Л. Я. Березін, С. В. Олексієнко, Т. М. Недей // Вісник ЧДТУ. Серія «Технічні науки». – Чернігів, 2004. – № 21. – С. 130-135.
4. Березін Л. Я. Ситали, скло в будівництві і машинобудуванні та способи їх з'єднання / Л. Я. Березін, І. О. Прибилько // Вісник ЧДТУ. Серія «Технічні науки» : наук. зб. – Чернігів, 2012. – № 4 (61). – С. 63-70.
5. Тареев Б. М. Физика диэлектрических материалов : учеб. пособие для вузов / Б. М. Тареев. – М. : Энергоиздат, 1982. – 320 с.
6. Березин Л. Я. Роль электроразрядных процессов при получении неразъемных соединений металлов с неметаллами в электростатическом поле / Л. Я. Березин, Д. И. Котельников // Электронная обработка материалов. – 1991. – № 6. – С. 64-66.
7. Салтыков С. А. Стереометрическая металлография (стереометрия металлических материалов). – М. : Металлургия, 1976. – 271 с.