

## РОЗДІЛ III. ЗВАРЮВАННЯ ТА МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

УДК 621.791:666.1.037.42

DOI: 10.25140/2411-5363-2018-2(12)-94-102

*Леонід Березін, Михайло Руденко*

### ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ ЗВАРЮВАННЯ ДІЕЛЕКТРИКІВ З АЛЮМІНІЄМ В ЕЛЕКТРИЧНОМУ ПОЛІ ВИСОКОЇ НАПРУГИ

**Актуальність теми досліджень.** Використання зварювання в електричному полі високої напруги для виготовлення прецизійних приладів, наприклад, лазерних гіроскопів, що працюють у важких умовах (вібрації, удари, перепади температур тощо).

**Постановки проблеми.** Сучасні знання про особливості утворення зварного з'єднання при використанні зварювання в електричному полі високої напруги не дозволяють повноцінно оптимізувати процес зварювання й отримувати зварні з'єднання необхідної якості.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Отримання якісних зварних з'єднань зварюванням в електричному полі високої напруги пов'язано з величиною мікросорсткості поверхні діелектрика, якістю її очищення, активізацією процесів поляризації діелектрика, електростатичною взаємодією та утворенням перехідного шару зі складних оксидів між матеріалами, що з'єднуються.

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Отримання перехідного шару зі складних оксидів, посилення електростатичної взаємодії між матеріалами, що з'єднуються, підвищує міцність зварних з'єднань, однак експериментальних і теоретичних даних для керування цими процесом ще недостатньо.

**Постановка завдання.** Дослідження факторів, що дозволять оптимізувати процеси утворення перехідного шару зі складних оксидів та електростатичної взаємодії між матеріалами, що з'єднуються.

**Викладення основного матеріалу.** Досліджено вплив хімічного очищення діелектрика перед зварюванням на процеси утворення перехідного шару зі складних оксидів та електростатичної взаємодії між матеріалами, що з'єднуються.

**Висновки відповідно до статті.** Встановлено, що хімічне комбіноване очищення діелектрика перед зварюванням дає змогу створити на діелектрику приповерхневий шар із кислотними властивостями і високоомну плівку, які посилюють окислювально-відновлювальну реакцію та електростатичну взаємодію між матеріалами, що з'єднуються.

**Ключові слова:** зварювання; очищення; діелектрик; окислювально-відновлювальна й електростатична взаємодія; міцність зварного з'єднання.

Табл.: 2. Рис.: 5. Бібл.: 10.

**Актуальність проблеми.** Для виготовлення прецизійних приладів, наприклад лазерних гіроскопів, необхідно до моноблока із ситалу СО-115 М герметично приварити катод з алюмінію А999. Такі прилади часто працюють у важких умовах (вібрації, удари, перепади температур тощо), тому до зварних з'єднань у таких випадках висувають жорсткі технічні вимоги для їх виготовлення.

**Постановки проблеми.** Якість зварювання діелектриків з алюмінієм в електричному полі високої напруги в атмосфері повітря (ЗЕП) залежить від багатьох факторів: величини мікросорсткості поверхні діелектрика, якості її очищення, повноти реалізації процесів поляризації в діелектрику, інтенсивності електростатичної взаємодії, утворення перехідного шару з складних оксидів між матеріалами, що з'єднуються, тощо. Однак сучасний експериментально-теоретичний досвід не дозволяє повною мірою керувати цими процесами. Дослідження основних факторів, які відповідають за оптимізацію процесів утворення перехідного шару зі складних оксидів та електростатичної взаємодії між матеріалами, що з'єднуються, забезпечать підвищення якості зварних з'єднань [1; 2].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У попередніх дослідженнях [3; 4] встановлені особливості утворення зварного з'єднання при використанні ЗЕП. Надана гіпотеза механізму утворення зварного з'єднання діелектрика з металом, яка передбачає такі стадії процесу:

- фізична взаємодія – утворення фізичного контакту між поверхнями, що зварюються за рахунок електронної, іонної та дипольної поляризацій діелектрика;
- хімічна взаємодія – термоелектрична активація поверхонь та встановлення хімічних зв'язків між поверхнями, що з'єднуються, і утворенням нероз'ємного з'єднання;

## TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

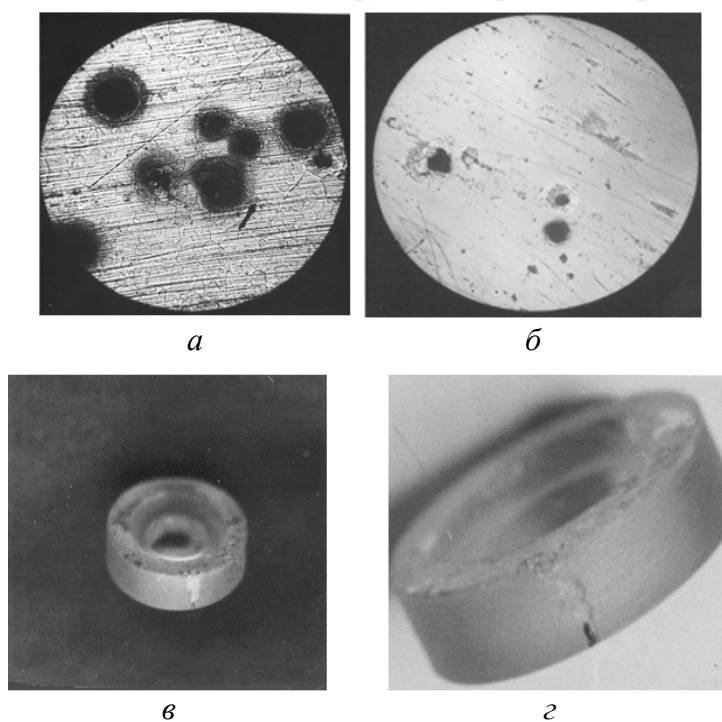
- об'ємна взаємодія – зміцнення з'єднання за рахунок реалізації в діелектрику міграційної поляризації та утворення перехідного шару з комплексних сполук за рахунок протікання електрохімічних реакцій між поверхнями, що з'єднуються.

Отримання чистої поверхні діелектрика, яка повинна мати мікросорсткість  $R_a \leq 0,02$  мкм, є необхідною умовою якісного зварного з'єднання, але не достатньою. Основними чинниками, від яких буде залежати максимальна якість зварного шва, це повнота проходження процесів:

- поляризації в діелектрику і пов'язаною з цим електростатичною взаємодією між матеріалами, що зварюються;

- утворення перехідного шару з комплексних сполук за рахунок електрохімічної взаємодії між поверхнями, що з'єднуються, в основі якої лежить кислотно-відновлювальна реакція.

При використанні зовнішніх електричних полів суттєвий негативний вплив на з'єднання матеріалів можуть мати іонізаційні процеси [5; 6]. Проведені попередні дослідження показали, що під час зварювання у площині зварювання (між діелектриком і алюмінієм) можуть достатньо активно реалізуватися іонізаційні й електророзрядні процеси, які заважають встановленню фізичного контакту (рис. 1, а, б). Активність цих процесів може бути настільки великою, що утворюються поверхневі струми, відбувається місцеве руйнування діелектрика і при неправильно вибраних температурі зварювання й величині електричної напруги фізичний контакт між поверхнями, що зварюються, не утворюється і взагалі відбувається повне порушення процесу зварювання (рис. 1, в, з).

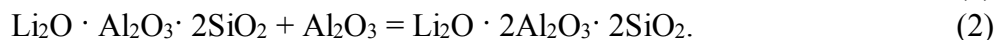


*Рис. 1. Сліди дії іонізаційних і електророзрядних процесів під час зварювання у випадку неправильно вибраних параметрів температури й величини електричної напруги зварювання:*

*а – у площині зварювання фізичний контакт взагалі не утворився (x140); б – у локальних місцях утворюються непровари (пропали); в, з – сліди дії електричних розрядів, відповідно на торцевій та боковій поверхнях ситалу*

Встановлено [6], що після зварювання в електричному полі ситалу СО-115М з алюмінієм, у перехідній зоні, що досліджувалася розпиленням у середовищі аргону з використанням електронного мікроскопу (x15000), зафіксовано перехідну зону з комплекс-

них сполук. Ситал СО-115М відноситься до системи  $\text{Li}_2\text{O} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$ , а на поверхні алюмінію присутня плівка  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (амфотерний оксид). Під час зварювання між поверхнями, що з'єднуються, протікають реакції:



Перехідна зона, що утворюється під час зварювання, являє собою шарової речовини зі складних оксидів:  $\text{Li}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ ,  $\text{Li}_2\text{O} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ .

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Процесами електростатичної та об'ємної взаємодій при ЗЕП в основному керують за рахунок відповідних значень параметрів температури й напруженості електричного поля (термоелектрична активація). Для покращення якості з'єднань при ЗЕП необхідні знання інших факторів, які б дозволили більш оптимально курувати вказаними процесами, наприклад: керування процесами електростатичної взаємодії між матеріалами, що зварюються, за рахунок зменшення впливу іонізаційних процесів; інтенсифікація процесу утворення перехідного шару на онові кислотнo-відновлювальної реакції між поверхнями, що з'єднуються, тощо.

**Мета статті.** У роботі ставилося за мету дослідити вплив хімічного очищення ситалу не тільки на якість очищення поверхні діелектрика під час зварювання, але й пов'язати це з процесами іонізації в зоні зварювання та утворенням перехідного шару між матеріалами, що зварюються.

**Виклад основного матеріалу.** Для вирішення поставлених питань було досліджено 16 варіантів мийних засобів для ситалу СО-115М (табл. 1).

Таблиця 1

*Зміст компонентів у розчинах [ $\text{г} \cdot \text{л}^{-1}$ ], (%) мийних засобів, що використовувалися*

Номер мийного засобу	Хімічний склад
1	Чотирьоххлористий вуглець – $\text{CCl}_4$ , (100)
2	Ацетон технічний – $\text{CH}_3 \cdot \text{CH} \cdot \text{CH}_3$ , (100)
3	Бензол – $\text{C}_6\text{H}_6$ ; (100)
4	Хлороформ – $\text{CHCl}_3$ , (100)
5	$\text{KOH}$ [25]
6	$\text{NaOH}$ (20)
7	$\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ [99]+ $\text{H}_2\text{SO}_4$ , густина 1,84, 100 мл
8	Мийний засіб “Лотос М” [70]
9	$\text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ [50]+ $\text{KOH}$ [10]+ $\text{Na}_2\text{CO}_3$ [20]+рідке скло
10	$\text{TMC} - 31$ [80]
11	$\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ [99]+ $\text{H}_2\text{SO}_4$ , густина 1,84; 300 мл+дист. $\text{H}_2\text{O}$ , 4000 мл
12	$\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ [99]+ $\text{H}_2\text{SO}_4$ , густина 1,84; 300 мл+дист. $\text{H}_2\text{O}$ , 400 мл
13	$\text{HNO}_3$ (68)
14	$\text{HF}$ (5)
15	$\text{HF}$ (1)
16	$\text{H}_2\text{SO}_4$ , густина 1,84

Для визначення якості очищення поверхні ситалу використовували методи: розриву водної плівки; лежачої краплі (визначення краєвого кута змочування); зміни маси до та після очищення зразків; виявлення наявності забруднень на поверхні за методом профілографування; візуальний огляд неозброєним оком, а також за допомогою мікроскопа МБС-9 (x16). Оскільки на міцність зварного з'єднання значно впливає величина мікросорсткості поверхонь, що зварюються, тому паралельно з визначенням якості очищення визначалася зміна мікросорсткості поверхні ситалу до та після очищення (наприклад, збільшення мікросорсткості можливе за рахунок розтравлення поверхні). Для вимірювання величини мікросорсткості використовувався профілограф-профілометр типу А1 моделі 252.

Встановлено, що для забезпечення якісного очищення потрібно використовувати комбіноване очищення (перевірено 20 схем комбінованого очищення ситалу, табл. 2).

## TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

З погляду забезпечення найбільшої міцності зварного з'єднання, при забезпеченні якісного очищення за вибраними критеріями [7], є такі варіанти очищення:

- органічний розчин (технічний ацетон) – лужний розчин ( $\text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ [50] +  $\text{KOH}$ [10] +  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ [20]+рідке скло) – хромова суміш ( $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ [99]+ $\text{H}_2\text{SO}_4$ ), ([ ] – зміст компонентів у розчинах,  $\text{г} \cdot \text{л}^{-1}$ );

- органічний розчин (технічний ацетон) – мийний засіб «Лотос М» [35] – хромова суміш ( $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ [99]+ $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) + дист.  $\text{H}_2\text{O}$  –  $\text{HF}$  (1%);

- органічний розчин (технічний ацетон) – мийний засіб «Лотос М» [70].

Таблиця 2

## Схеми комбінованого очищення ситалу

Варіанти	Послідовність операцій і номер мийного засобу (в дужках) за таблицею 1				
	Очищення		Промивання у воді		Сушіння
	Органічний розчинник	Хімічний розчин	Гаряча	Холодна	
1	1(3); 3(2)	5(7);8(16)	6	7,9	2,4;10
2	1(2)	3(9);6(12)	4;7	5,8	2,9
3	1(2)	3(10);6(12)	4;7	5,8	2,9
4	1(2)	3(9);6(7)	4;7	5,8	2,9
5	1(2)	3(10);6(7)	4;7	5,8	2,9
6	1(4)	3(8)	4	5	2,6
7	1(4)	3(8);6(11)	4;7	5,8	2,9
8	1(3); 3(1)	5(8);8(13)	6	7,9	2,4;10
9	1(2)	3(8);6(12)	4;7	5,8	2,9
10	1(4); 3(1)	5(8);8(11)	6;9	7;10	2,4;11
11	1(2)	3(9);6(11)	4;7	5,8	2,9
12	1(2)	3(8);6(7)	4;7	5,8	2,9
13	1(2)	3(8);6(12); 9(15)	4;7	5,8;10	2;11
14	1(2)	3(6);6(14)	4	5,7	2,8
15	1(2)	3(8)	4	5	2,6
16	1(2)	3(5);6(13)	4	5,7	2,8
17	1(4); 3(1)	5(8);8(16)	6	7,9	2,4;10
18	1(4); 3(1)	5(8);8(7)	6;9	7;10	2,4;11
19	1(4)	3(9);6(7)	4;7	5,8	2,9
20	1(2)	-	-	-	2

Якість зварних з'єднань визначали за допомогою механічних випробувань на відрив (рис. 2) на спеціально сконструйованій розривній машині. Зусилля відриву визначали за допомогою силовимірювача – динамометричної скоби ДС-02 з індикатором годинникового типу ИЧ-10 (рис. 3).

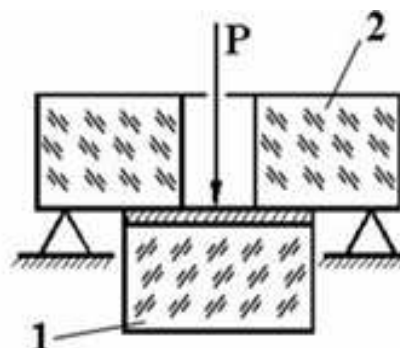


Рис. 2. Принципова схема механічних випробувань на відрив зварних з'єднань ситал-алюміній-ситал:

1 – мембрана; 2 – основний ситал

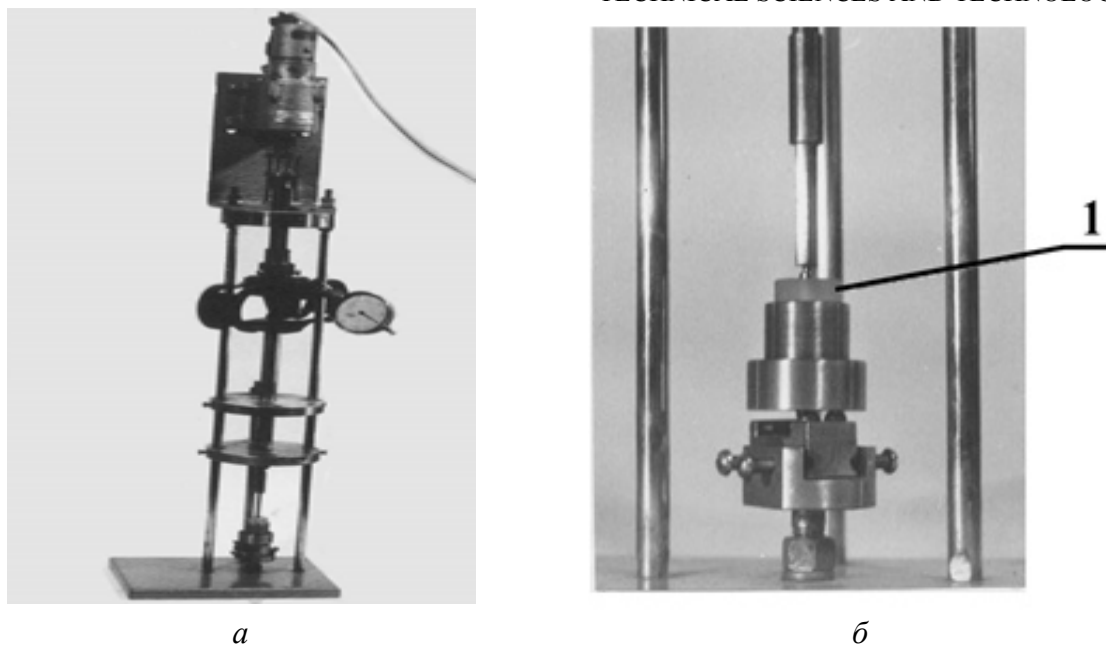


Рис. 3. Установка для механічних випробувань на відрив:  
а – загальний вигляд; б – пристрій для установки вузла 1, що випробується

Після очищення ситалу методом лежачої краплі оцінювали ступінь кислотності його поверхні шляхом нанесення кислих (основних) рідин на поверхні, що досліджувалися [8]. Для визначення крайового кута змочування  $\theta$  використовувалось спеціальне обладнання (рис. 4). Кращим вважається варіант, коли при нанесенні рідини з основними властивостями крайовий кут змочування був найменшим, тобто перед зварюванням поверхня зразка під зварювання мала більшу кислотність.

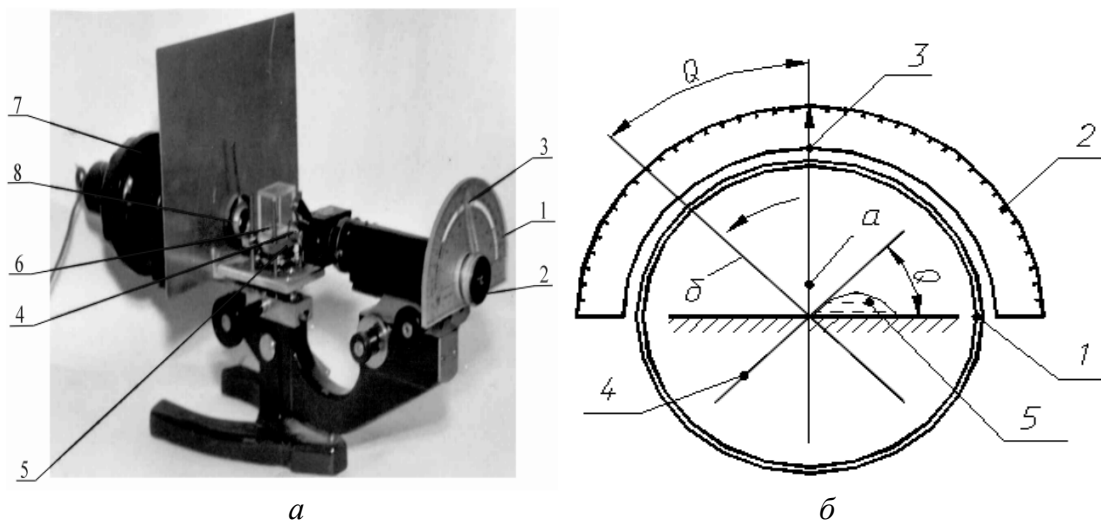


Рис. 4. Установка для визначення крайового кута змочування  $\theta$ :  
а – загальний вид установки: 1 – транспортер; 2 – окуляр; 3 – стрілка на окулярі; 4 – об'єктив;  
5 – предметний столик; б – захисний ковпачок; 7 – освітлювач; 8 – діафрагма;  
б – схема вимірювання крайового кута: 1 – окуляр; 2 – транспортер; 3 – стрілка на окулярі;  
4 – дві взаємоперпендикулярні риски (дотичні) на окулярі (а – початкове положення; б – положення при замірюванні  $\theta$ ); 5 – крапля рідини, що наносилася на поверхню очищеного ситалу

Залежність міцності з'єднання від варіанта комбінованого хімічного очищення ситалу (табл. 2) наведена на рис. 5.

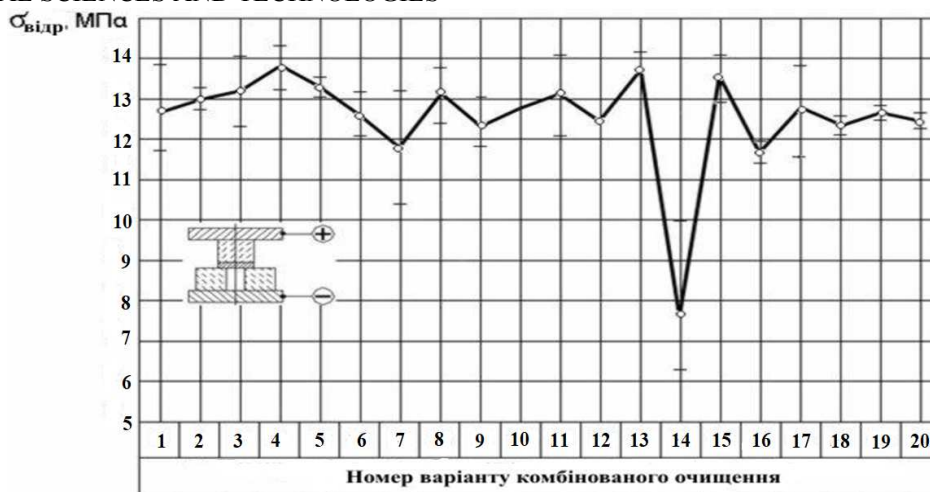


Рис. 5. Залежність міцності з'єднання від варіанту комбінованого хімічного очищення ситалу

Дослідження однократного очищення ситалу показали, що ацетон володіє непоганою здатністю до очищення (варіант 20, рис. 5) за відсутності активного впливу на мікросоротккість і хімічні властивості поверхні ситалу. Тому очищення в ацетоні може використовуватися як базовий для порівняння з іншими мийними засобами на зміну фізико-хімічного стану поверхні, що досліджується.

Хімічне очищення за варіантом 14 з використанням на завершальному етапі очищення 5%-го розчину HF призводить до сильного розтравлювання поверхні ситалу, збільшення її мікросоротккості ( $R_a > 0,02$  мкм). У цьому випадку мали найменшу міцність зварного з'єднання і великий діапазон зміни величини міцності зразків у межах однієї партії зварених складань. У площині зварювання активно реалізуються іонізаційні й електророзрядні процеси (рис. 1).

Найкращі результати по міцності зварних з'єднань мали, коли у процесі хімічного очищення використовувалася суміш сірчаної кислоти ( $H_2SO_4$ ) та дихромату калію ( $K_2Cr_2O_7$ ), варіанти 4 та 13. Окиснювач дихромат калію незначно розтравлює поверхню ситалу переважно в мікробащинах і мікротріщинах рельєфу поверхні, а сірчана кислота рівномірно впливає на поверхню ситалу. Це веде до усунення тріщинуватого шару, що утворюється після шліфування та полірування поверхні ситалу, і практично не веде до суттєвих змін параметра  $R_a$ , який було досягнуто після полірування ситалу. За варіантом 13 присутність 1%-го розчину HF на останньому етапі хімічного очищення дозволяє отримати приповерхневий шар ситалу без мікротріщин, задовільні значення мікросоротккості  $R_a$ , зникають сліди електророзрядних процесів та маємо один із найменших значень крайового кута змочування  $\theta$ .

Найменший кут змочування піж час оцінювання ступеня кислотності поверхні ситалу після очищення мали за варіантом 4 комбінованого очищення (найбільш кислотна поверхня). У цьому випадку на останньому етапі хімічного очищення використовувалась суміш сірчаної кислоти та дихромату калію. Це створює необхідні умови для кислотно-відновлювальної реакції оксидів приповерхневого шару ситалу з  $Al_2O_3$ . Крім того, присутність при очищенні ситалів та скла, які містять лужні метали, сірчаної кислоти забезпечує отримання приповерхневого шару з підвищеним електричним опором за рахунок відбирання води [9]. Така високоомна плівка стає основним діелектриком при електростатичній взаємодії, на який переключується максимальна напруженість електричного поля і виключає можливість розвитку іонізаційних процесів у повітряному просторі між поверхнями, що взаємодіють [10]. Зменшуються витрати електричної потужності в зоні зварювання за рахунок зменшення поверхневої електро-

провідності й утворення поверхневих струмів. У такому випадку відсутні сліди пропалів (фізичний контакт утворювався по всій площині контакту матеріалів, що зварювалися). Посилюється електростатична взаємодія між поверхнями, що з'єднуються. Отримані результати можуть бути ще одним підтвердженням, що електрична активація при ЗЕП є основним видом при загальній термоелектричній активації процесу.

Дослідження показали, що величина крайового кута змочування  $\theta$ , а значить і фізико-хімічні властивості поверхні, визначаються не тільки розчинами, що використовувалися на останньому етапі очищення, а є результатом комплексної дії усіх мийних засобів у межах варіанта комбінованого очищення. Здебільшого результуюче значення  $\theta$  є проміжним між значеннями, яке характеризує поверхню після дії кожного окремого розчину, що входили до комбінованого варіанта. Водночас треба правильно вибрати варіант комбінованого очищення (послідовність використання розчинів) та розчин, який треба задіяти на останньому етапі очищення діелектрика.

#### **Висновки відповідно до статті.**

1. Підтверджено гіпотезу механізму утворення зварного з'єднання діелектриків із металами при зварюванні в електричному полі високої напруги, а саме, що основними етапами утворення зварного з'єднання є електростатична взаємодія та окислювально-відновлювальна реакція між матеріалами, що зварюються.

2. Електрична енергія під час зварювання в електричному полі є основним видом активації, при загальній термоелектричній активації процесу.

3. Встановлено вплив хімічного очищення ситалу перед зварюванням на процеси електростатичної взаємодії, за рахунок впливу на іонізаційні процеси в зоні зварювання та утворення перехідного шару між матеріалами, що зварюються, за рахунок впливу на ступінь кислотності приповерхневого шару ситалу.

4. Визначено оптимальний варіант очищення ситалу перед зварюванням, який, крім якісного очищення, забезпечує кислотні властивості поверхні діелектрика перед наступним зварюванням з алюмінієм, зменшує електричні втрати в зоні зварювання, оптимізує електростатичну взаємодію між поверхнями, що з'єднуються, і дозволяє отримати якісне зварне з'єднання.

#### **Список використаних джерел**

1. К вопросу электроадгезионного соединения некоторых материалов электронной техники / В. А. Варенцов, В. А. Пиходченко, В. Н. Таиров, Г. М. Дзюбенко, В. З. Шаповал, А. П. Коржавый // Электронная техника. Сер. Материалы. – 1983. – Вып. 10 (183). – С. 57–59.

2. Хоменко Н. Н. Получение неразъемных соединений кремния с материалами / Н. Н. Хоменко. – Чернигов : ВСНТО, 1986. – 67 с.

3. Шлифер С. Е. Использование экзоелектричного эффекта при соединении германия и кремния со стеклом в электрическом поле / С. Е. Шлифер, В. П. Антонов, А. Г. Браун // Достижения и перспективы развития диффузионной сварки : материалы XII Всесоюзной науч.-техн. конф. – М., 1987. – С. 124–128.

4. Березін Л. Я. Особливості механізму утворення зварних з'єднань при зварюванні в електричному полі високої напруги / Л. Я. Березін // Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем (Чернігів, 24-27 квітня, 2017 р.) : збірник матеріалів VII Міжнародної наук.-практ. конф. : тези докл. – Чернігів, 2017. – С. 59–61.

5. Хоменко Н. Н. Влияние некоторых факторов на технологичность и надежность соединений кремния со стеклом / Н. Н. Хоменко // Электронная техника. Сер. Материалы. – 1983. – Вып. 11 (184). – С. 75–77.

6. Хоменко Н. Н. Свойства соединений стекла с кремнием, полученного сваркой в электростатическом поле высокого напряжения / Н. Н. Хоменко, О. В. Гнатюк // Сварочное производство. – 1982. – № 12. – С. 22–23.

7. Варенцов В. А. Исследование границы электроадгезионных соединений некоторых материалов электронной техники / В. А. Варенцов., А. П. Коржавый, В. Ф. Бритун // Электронная техника. Сер. Материалы. – 1983. – Вып. 3(185). – С. 36–39.

## TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

8. Обработка поверхности и надежность материалов / под ред. Дж. Бурке, Ф. Вайса ; пер. англ. Э. М. Лазарева и др. ; под ред. О. А. Банных ; [Парриш П., Херглотц Х., Хадсон Дж. и др.]. – М. : Мир, 1984. – 132 с. : ил.

9. *Стевелс Дж.* Электрические свойства стекла / Дж. Стевелс. – М. : Иностранная литература, 1961. – 89 с.

10. *Косогова Н. П.* Исследование сил притяжения в электростатических крепежных устройствах : дис. ... канд. техн. наук / Н. П. Косогова. – Л., 1972. – 182 с.

## References

1. Varentsov, V. A., Pihodchenko, V. A., Tairov V. N., Dzyubenko, G. M., Shapoval, V. Z., Korzhaviy, A. P. (1983). K voprosu elektroadgezionnogo soedineniia nekotorykh materialov elektronnoi tekhniki [To the question of electro-adhesion connection of some materials of electronic technique]. *Elektronnaiia tehnika – Electronic technique. Series Materials*, 10, 57–59 [in Russian].

2. Homenko, N. N. (1986). *Poluchenie nerazemnykh soedinenii kremniia s materialami [Receiving one-piece compounds of silicon with materials]*. Chernigiv: VSNTO [in Russian].

3. Shlifer, S. E. (1987). Ispolzovanie ekzoelektretного эффекта pri soedinenii germaniia i kremniia so steklom v elektricheskom pole [Using of ekzoelektretny effect for connection of germanium and silicon with glass in the electric field]. Proceeding from *Dostizheniia i perspektivy razvitiia diffuzionnoi svarki: materialy XII Vsesoiuznoi nauchno-tehnicheskoi konferentsii – Achievements and prospects of development of diffusive welding: materials of the 12th All-Union scientific and technical conference* (pp. 124–128). Moscow [in Russian].

4. Berezin, L. Ya. (2017). Osoblyvosti mekhanizmu utvorennia zvarnykh ziednan pry zvariuvanni v elektrychnomu poli vysokoi napruhy [Features of the mechanism of the formation of a welding joint in an electric field of high voltage]. *Kompleksne zabezpechnnia yakosti tekhnologicnykh protsesiv ta system: sbirnyk materialiv VII mizhnarodnoi naukovopraktychnoi konferentsii – Comprehensive securing of the quality of technological processes and systems: materials of the VII International scientific and practical conference* (pp. 59–61). Chernihiv [in Ukrainian].

5. Homenko, N. N. (1983). Vliianie nekotorykh faktorov na tehnologichnost i nadezhnost soedinenii kremniia so steklom [Influence of some factors on technologicalness and reliability of connections of silicon with glass]. *Elektronnaiia tehnika – Electronic technique. Series Materials*, 11, 75–77 [in Russian].

6. Homenko, N. N., Gnatyuk, O. V. (1982). Svoistva soedinenii stekla s kremniem, poluchennogo svarkoy v elektrostatičeskom pole vysokogo napriazheniia [Properties of connections of glass with Silicon obtained by welding in high-voltage electrostatic field]. *Svarochnoe proizvodstvo – Weldingproduction*, 12, 22–23 [in Russian].

7. Varentsov, V. A., Korzhavii, A. P., Britun, V. F. (1983). Issledovanie granitsy elektroadgezionnykh soedinenii nekotorykh materialov elektronnoi tekhniki [Research of the electroadhesion connections boundary of the some electronic techniques materials]. *Elektronnaiia tehnika – Electronic technique. Series Materials*, 3, 36–39 [in Russian].

8. Burke, Dzh., Vaissa, F. (Eds.). (1984). *Obrabotka poverhnosti i nadezhnost materialov [Processing of a surface and reliability of materials]*. Moscow: Mir [in Russian].

9. Stevels, Dzh. (1961). *Elektricheskie svoistva stekla [The electric properties of the glass]*. Moscow: Inostrannaia literatura [in Russian].

10. Kosogova, N. P. (1972). *Issledovanie sil prityazheniya v elektrostatičeskikh krepzhnykh ustroistvakh [The research of the attractive power in the electrostatic fastening devices]*. (Doctor's thesis). Leningrad [in Russian].

UDC 621.791:666.1.037.42

Leonid Berezin, Mikhail Rudenko

## OPTIMIZATION OF WELDING PROCESS OF DIELECTRICS WITH ALUMINIUM IN THE HIGH VOLTAGE ELECTRIC FIELD

**Urgency of the research.** Use of the welding in a high voltage electric field for the manufacture of precision instruments, such as laser gyroscopes, which operate under difficult conditions (vibration, shock, temperature variations, etc.).

**Target setting.** Modern knowledge about the peculiarities of the welding by using the high voltage electric field does not allow to fully optimize the welding process and obtain quality weld.

**Actual scientific researches and issues analysis.** The production of the welding by using the high voltage electric field is related to the micro-roughness of the dielectric surface, the quality of its cleaning, activation of the dielectric polarization processes, electrostatic interaction, and oxides layer between the surfaces of the materials to be welding.



**Uninvestigated parts of general matters defining.** The Obtaining of transitional layer of complex oxides, the enhancement of the electrostatic interaction between materials which connect increases the strength of welded joints, but experimental and theoretical data are not yet sufficient to control this process.

**The research objective.** Research of factors which will allow to optimize processes of formation of a transitional layer of complex oxides and electrostatic interaction between connected materials.

**The statement of basic materials.** The influence of chemical purification of dielectric before welding on the processes of formation of transition layer from complex oxides and electrostatic interaction between materials which connect was investigated.

**Conclusions.** It is established that the chemical combined purification of dielectric before welding allows to create on dielectric a near-surface layer with acid properties and a high-resistance layer which strengthen redox reaction and electrostatic interaction between materials which connect.

Table: 2. Fig.: 5. References: 10.

УДК 621.791:666.1.037.42

Леонід Березин, Михаил Руденко

## ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА СВАРКИ ДИЭЛЕКТРИКОВ С АЛЮМИНИЕМ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

**Актуальность темы исследований.** Использование сварки в электрическом поле высокого напряжения для изготовления прецизионных приборов, например, лазерных гироскопов, которые работают в трудных условиях (вибрации, удары, перепады температур и другие).

**Постановки проблемы.** Современные знания об особенностях образования сварного соединения при использовании сварки в электрическом поле высокого напряжения не позволяют полноценно оптимизировать процесс сварки и получать сварные соединения требуемого качества.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Получение качественных сварных соединений сваркой в электрическом поле высокого напряжения связано с величиной микрошероховатости поверхности диэлектрика, качеством ее очистки, активизацией процессов поляризации диэлектрика, электростатического взаимодействия и образованием переходного слоя из сложных оксидов между соединяемыми материалами.

**Выделение неисследованных частей общей проблемы.** Получение переходного слоя из сложных оксидов, усиление электростатического взаимодействия между соединяемыми материалами повышает прочность сварных соединений, однако экспериментальных и теоретических данных для управления этим процессом еще недостаточно.

**Постановка задачи.** Исследование факторов, которые позволят оптимизировать процессы образования переходного слоя из сложных оксидов и электростатического взаимодействия между соединяемыми материалами.

**Изложение основного материала.** Исследовано влияние химической очистки диэлектрика перед сваркой на процессы образования переходного слоя из сложных оксидов и электростатического взаимодействия между соединяемыми материалами.

**Выводы в соответствии со статьей.** Установлено, что химическая комбинированная очистка диэлектрика перед сваркой позволяет создать на диэлектрике приповерхностный слой с кислотными свойствами и высокоомную пленку, которые усиливают окислительно-восстановительную реакцию и электростатическое взаимодействие между соединяемыми материалами.

**Ключевые слова:** сварка; очистка; диэлектрики; окислительно-восстановительное и электростатическое взаимодействие; прочность сварного соединения.

Табл.: 2. Рис.: 5. Библ.: 10.

**Березин Леонид Якович** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры сварочного производства та автоматизованого проектування будівельних конструкцій, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14035, Україна).

**Березин Леонид Яковлевич** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры сварочного производства и автоматизированного проектирования строительных конструкций, Черниговский национальный технологический университет (ул. Шевченко, 95, г. Чернигов, 14035, Украина).

**Berezin Leonid** – PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Welding and Automated Engineering Design of Building Constructions, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenka Str., 14035 Chernihiv, Ukraine).

E-mail: berezinl@ukr.net

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0178-2895>

Scopus Author ID: H-6200-2014

**Руденко Михайло Миколайович** – старший викладач кафедри сварочного производства та автоматизованого проектування будівельних конструкцій, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14035, Україна).

**Руденко Михаил Николаевич** – старший преподаватель кафедры сварочного производства и автоматизированного проектирования строительных конструкций, Черниговский национальный технологический университет (ул. Шевченко, 95, г. Чернигов, 14035, Украина).

**Rudenko Mikhail** – Senior teacher of the Department of Welding and Automated Engineering Design of Building Constructions, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenka Str., 14035 Chernihiv, Ukraine).

E-mail: rudenko.bear@gmail.com

ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9542-7792>

Scopus Author ID: G-6235-2014