

РОЗДІЛ III. ТЕХНОЛОГІЇ ЗВАРЮВАННЯ

УДК 621.791.01:666.1.037.42

Леонід Березін, Ірина Прибитько, Тимур Ганєєв

ВПЛИВ ФІЗИЧНОГО КОНТАКТУ НА УТВОРЕННЯ ЗВАРНОГО З'ЄДНАННЯ В ТВЕРДІЙ ФАЗІ ДІЕЛЕКТРИКІВ З МЕТАЛАМИ

Leonid Berezin, Irina Prybytko, Timur Hanieiev

ВЛИЯНИЕ ФИЗИЧЕСКОГО КОНТАКТА НА ОБРАЗОВАНИЕ СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ В ТВЕРДОЙ ФАЗЕ ДИЭЛЕКТРИКОВ С МЕТАЛЛАМИ

Leonid Berezin, Irina Prybytko, Timur Hanieiev

PHYSICAL CONTACT INFLUENCE ON FORMATION OF THE WELDING CONNECTION IN HARD PHASE OF DIELECTRICS WITH METALS

Надані результати досліджень з визначення оптимальних умов утворення фізичного контакту й отримання якісного зварного з'єднання ситалів і скла з алюмінієм у процесі зварювання в зовнішніх електричних полях високої напруги.

Ключові слова: фізичний контакт, зварювання в електричних полях, поляризація діелектрика, скло, ситали, алюміній.
Рис.: 8. Табл.: 2. Бібл.: 9.

Представлены результаты исследований по определению оптимальных условий образования физического контакта и получения качественного сварного соединения ситаллов и стекол с алюминием при сварке во внешних электрических полях высокого напряжения.

Ключевые слова: физический контакт, сварка в электрических полях, поляризация диэлектрика, стекло, ситаллы, алюминий.

Рис.: 8. Табл.: 2. Библ.: 9.

The results of studies to determine the optimal conditions for the formation of physical contact and produce quality weld glass ceramics and glasses when welding aluminum in external electric fields of high voltage.

Key words: physical contact, welding electric field, the polarization of the dielectric, glass, glass ceramics, aluminum.

Fig.: 8. Tabl.: 2. Bibl.: 9.

Постановка проблеми. У теорії процесів зварювання загальноприйнятим є двостадійний процес утворення зварного з'єднання [1]:

- механічна взаємодія (утворення фізичного контакту);
- хімічна взаємодія (утворення хімічних зв'язків, фізико-хімічні процеси, протікання яких забезпечує утворення якісного зварного з'єднання). Якість утворення фізичного контакту відіграє особливо важливу роль під час зварювання у твердій фазі (дифузійне зварювання у вакуумі, зварювання в електричних полях тощо).

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми. Для таких матеріалів, як скло і ситали при з'єднанні їх з металами в електричному полі високої напруги питання про утворення фізичного контакту як у теоретичному, так і у практичному плані ще не достатньо розкрито і потребує подальших досліджень [2].

Мета статті. В цій роботі ставилося за мету визначити оптимальні умови для утворення фізичного контакту й отримання якісного зварного з'єднання ситалів і скла з алюмінієм у процесі зварювання в зовнішніх електричних полях високої напруги.

Виклад основного матеріалу досліджень. Головними факторами, що перешкоджають утворенню фізичного контакту під час зварювання у твердій фазі, є:

- наявність мікрошорсткості та її величина;
- забрудненість поверхонь, що зварюються.

У початковий момент зварювання у твердій фазі два тіла контактують в окремих точках (рис. 1).

У загальному випадку розрізняють такі види контакту двох тіл:

- 1) фізичний контакт (відстань між поверхнями сумірна з розмірами елементарної кристалічної решітки тіл, що з'єднуються);
- 2) механічний контакт (роз'ємне з'єднання з товщиною межових шарів від частин міліметра до частин мікрметра);

3) електричний контакт (будь-який механічний, крізь який протікає електричний струм);

4) контакт з'єднання – це механічний контакт, перетворений у процесі зварювання у нероз'ємне з'єднання;

5) фактичний контакт (та частина механічного контакту, по якому забезпечується фізичний контакт).



Рис. 1. Схема механічного контакту двох твердих тіл:

a – максимальна відстань між западинами поверхонь; $\Delta F_{\phi i}$ – площа елементарного фізичного контакту;

F_n – номінальна площа контакту (площина поперечного перерізу тіл, що зварюються, в зоні зварювання); ΔF_k – елементарна контурна площа контакту (площина, у межах якої групуються окремі мікроконтакти)

Для отримання якісного зварного з'єднання необхідно, щоб номінальна площа контакту F_n дорівнювала площі фізичного контактів F_{ϕ} :

$$F_n = F_{\phi}. \quad (1)$$

Площа фізичного контакту визначається як:

$$F_{\phi} = n \Delta F_{\phi i}, \quad (2)$$

де n – кількість елементарних точкових контактів, де відбувається фізичний контакт.

Наявність мікросорсткості поверхонь, що зварюються, та різного роду шарів на них (для металу показано на рис. 2) під час зварювання у твердій фазі веде до того, що умова (1) не виконується. Більш того, на практиці, в перший момент зварювання має місце співвідношення (3):

$$F_n \gg F_{\phi}. \quad (3)$$

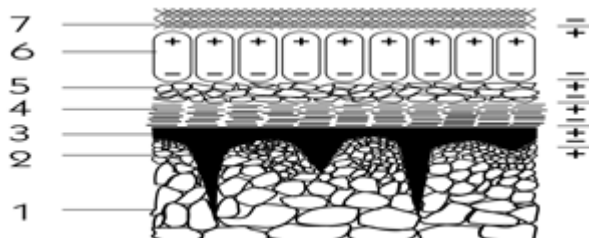


Рис. 2. Схема основних видів адсорбованих шарів на поверхні металу (узагальнений вигляд):

1 – відносно впорядкована структура металу в об'ємі; 2 – розупорядкована структура приповерхневого шару металу; 3 – оксидний шар; 4 – шар іонів кисню; 5 – молекули води; 6 – молекули жиру;

7 – пилоподібні частинки

У процесі зварювання в електричному полі середнє арифметичне відхилення профілю поверхні діелектрика (скло, ситали), що зварюється, повинна бути $R_a \leq 0,02$ мкм. Якщо ця умова не виконується отримання якісного зварного з'єднання не можливо і в багатьох випадках зварювання заготовок в загалі не відбувається [2].

Необхідна для зварювання величина мікросорсткості поверхні алюмінію визначається його механічними властивостями і товщиною. У випадку, коли зварювання в електричному полі відбувається без зовнішнього тиску метал повинен мати здібність до активної пружно-пластичної деформації. Цій умові добре відповідає алюміній марки А999. Величина мікросорсткості поверхні, що отримана за допомогою резистивного напилювання на неї алюмінію товщиною 1–2 мкм може не контролюватися. У разі використання алюмінієвої фольги товщиною не більше 0,04 мм величина мікросорст-

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

кості її поверхні повинна становити $R_a \leq 0,144$ мкм (міцність зварних з'єднань на відрив більше 25 МПа). При товщині вказаної марки алюмінію до 0,68 мм (міцність зварних з'єднань на відрив не менше 25 МПа) і до 3 мм (міцність зварних з'єднань на відрив не менше 12 МПа) величина мікрошорсткості поверхні повинна бути розмірна з мікрошорсткістю поверхні діелектрика і може бути отримана обробленням алюмінію тиском за допомогою скла або ситалу попередньо відполірованого до $R_a \leq 0,02$ мкм. При цьому відносна деформація стиску алюмінію повинна бути не менше 22 %, і характеризуватися дзеркальним блиском. Взагалі цей процес можна сумішати безпосередньо з процесом зварювання. В такому випадку у процсі зварювання необхідно використовувати зовнішній тиск на складання, що зварюється.

Визначення величини мікрошорсткості поверхонь, що зварюються, можна проводити за допомогою профілографа-профілометра типу А1 моделі 252.

На поверхні твердого тіла перед зварюванням у загальному випадку знаходяться шари оксидів, газів, жирів, молекул води та інших речовин (рис. 2). Розподіл шарів забруднень між собою у кожному випадку може відрізнятись. Наявність таких шарів не дозволяє встановити хімічні зв'язки між поверхнями, що з'єднуються.

Загалом під час очищення скла і ситалів, крім самого очищення, відбувається зміна мікрошорсткості поверхонь (за рахунок розтравлювання) і зміна кислотності поверхні, що буде зварюватися. Внаслідок присутності лужноземельних металів скло і ситали всередині об'єму мають основні властивості. Під дією вологи навколишнього середовища (молекул води), хімічних розчинів під час очищення скла має місце вилугування модифікаторів, які в подальшому змиваються з поверхні скла у вигляді лужних розчинів. Тому приповерхневий шар скла являє собою сітку зі склоутворювача (наприклад, оксид кремнію SiO_2), у порах якого знаходиться кремнієва кислота, яка володіє кислотними властивостями, тому поверхня тіла в такому випадку має кислотні властивості. Крім того, в наслідок механічного оброблення (полірування, шліфування) поверхневий шар скла і ситалів покрито сіткою мікротріщин, тому міцність зварних з'єднань на основі скла і ситалів для багатьох випадків у 2–10 разів менша, ніж міцність самого об'єму.

Результати проведених досліджень [3] показали, що оптимальний варіант очищення поверхні ситалу (наприклад, СО-115М) перед зварюванням з алюмінієм в електростатичному полі, це оброблення полірованої поверхні ситалу за схемою: ацетон – неорганічний розчин з основними властивостями ($\text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ [50]+ KOH [10]+ Na_2CO_3 [20]+рідке скло) – хромова суміш ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ [99]+ H_2SO_4). Вказане комбіноване очищення забезпечує найбільш ефективне очищення та видалення мікротріщин у приповерхневому шарі скла та ситалів.

Для поверхні алюмінію товщиною 1–2 мкм, що отримана за допомогою резистивного напилювання на діелектрик, очищення не проводиться. Очищення алюмінієвої фольги безпосередньо перед зварюванням достатньо проводити протиранням технічним спиртом (найкращі результати якості зварювання досягаються при товщині фольги до 0,04 мм). Для алюмінію, що піддавався пресуванню, очищення краще проводити у вигляді травлення в NaOH ($200 \text{ г} \cdot \text{л}^{-1}$), при цьому діелектрик, який використовується для оброблення алюмінію тиском, повинен бути очищеним за пропонованою вище схемою. Особливу увагу треба приділяти контролю якості щодо підготовки до зварювання поверхонь, що з'єднуються [4].

Експериментально встановлено, що для утворення фізичного контакту при товщині алюмінію до 0,04 мм зовнішній тиск на складання, що зварюється, не потрібен (зварювання без тиску). У випадку використання більших товщин алюмінію, особливо більше 0,1 мм, необхідно використовувати зовнішній тиск (зварювання з тиском).

У роботах [4; 5] встановлено, що на утворення фізичного контакту і міцність зварного з'єднання діелектрика з металом визначальний вплив мають процеси поляризації, що реалізуються в діелектрику під час зварювання. На це вказує зміна міцності зварного з'єднання і характер спаду густини струму абсорбції в діелектрику під час зварювання, який характеризує протікання в ньому процесів поляризації. Крім того, була отримана емпірична залежність питомої сили відриву $\sigma_{від}$ алюмінієвої фольги (рис. 3, а) від величини мікрошорсткості матеріалів, що зварюються, і яка має вигляд (4):

$$\sigma_{від} = \frac{B}{R_{ac}^2}, \quad (4)$$

де B – константа, яка знайдена емпіричним шляхом і залежить від виду складань під зварювання та діапазону величин мікрошорсткості поверхонь, що зварюються;

R_{ac}^2 – сумарна величина середніх арифметичних відхилень профілю поверхонь алюмінію і діелектрика.



Рис. 3. Схеми випробувань на відрив

Під час зварювання без використання зовнішнього стиску зразків, що зварювалися, встановлено, що вже в перші 10 с зварювання досягається до 90 %, після 7 хвилин зварювання – не менше ніж 95 % міцності з'єднання, яке було отримано після 60 хвилин подачі електричної напруги на зразки, що зварюються. Після випробувань на відрив (рис. 3, б) після 10 с зварювання на поверхні ситалу в зоні зварювання відсутні явні ознаки утворення зварного з'єднання (рис. 4, а). Є лише окремі зони, де відбувається схоплення поверхонь, що зварювалися. Через 7 хвилин зварювання (рис. 4, з) виривання із ситалу вже має місце по всій номінальній площині з'єднання (схема зварювання рис. 5) і характер виривання вказує, що утворення якісного зварного з'єднання відбулося. При подальшій подачі електричної напруги (7–60 хв) на зразки, що зварюються, величина і характер виривання практично не змінюється.

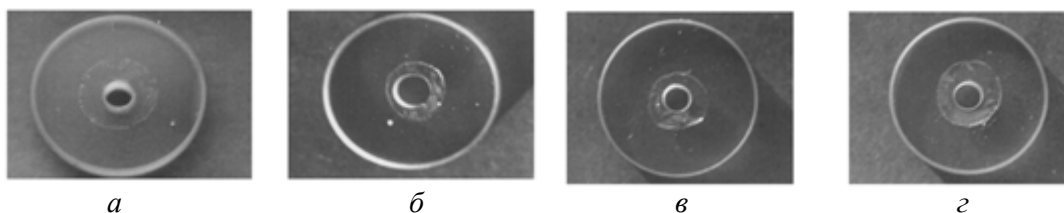


Рис. 4. Вплив часу подачі електричної напруги на характер виривань з ситалу при механічних випробуваннях: а – 10 с; б – 60 с; в – 300 с; з – 420 с

У результаті процесу поляризації діелектрика на його поверхнях накопичуються електричні заряди і, як наслідок (рис. 6), утворюється подвійний електричний шар на границі контакту двох поверхонь, що зварюються. Між поверхнями виникають сили Кулона [6]:

$$F = \frac{q_1 q_2}{\varepsilon_0 \varepsilon_r 4\pi R^2} R_0, \quad (5)$$

де F – механічна сила, що діє між двома зарядами q_1 і q_2 ;

R – відстань між зарядами;

ε_0 – електрична стала;

ϵ_r – відносна діелектрична проникливість матеріалу діелектрика (чим більша величина ϵ_r , тим більші q_1 і q_2);

R_0 – одиничний вектор, який направлено по прямій, що з’єднує точкові заряди.

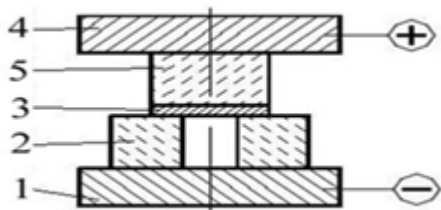


Рис. 5. Схема зварювання:

- 1 – електрод-катод; 2, 5 – ситал;
- 3 – алюмінієва прокладка;
- 4 – електрод-анод

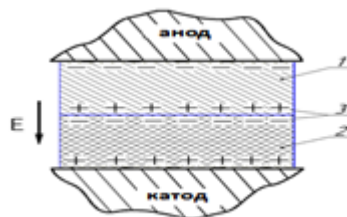


Рис. 6. Схема утворення подвійного електричного шару:

- E – напруженість зовнішнього електричного поля; 1 – метал; 2 – діелектрик; 3 – подвійний електричний шар

При розгляді питання про утворення подвійного електричного шару між склом (ситалом) і алюмінієм треба враховувати хімічний склад і властивості діелектрика та оксиду алюмінію, що знаходиться на поверхні алюмінієвої деталі і безпосередньо контактує з діелектриком.

Оксид алюмінію (Al_2O_3) хоча і є напівпровідником n -типу, але має не погані діелектричні властивості з $\epsilon_r=9,5 - 10$. Діелектричну проникливість ситалів і скла необхідно розглядати для кожного конкретного випадку. Для процесів зварювання взагалі, у тому числі і для зварювання в електричних полях, часто використовуються ситали сподуменового складу (наприклад, ситал СО-115М), які мають $\epsilon_r=5,5 - 7,8$ та боросилікатне скло (наприклад, Пірекс), для яких $\epsilon_r=4,3 - 5,0$.

Хімічні склади ситалу СО-115М та скла Пірекс наведені в таблицях 1 і 2.

Таблиця 1

Хімічний склад ситалу СО-115М

Хімічна сполука	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	LiO ₂	K ₂ O	Fe ₂ O ₃	As ₂ O ₃	Sb ₂ O ₃
Масова частка, %	66,0	20,9	4,0	4,0	3,0	0,1	0,5	0,5

Таблиця 2

Хімічний склад скла Пірекс

Хімічна сполука	SiO ₂	Al ₂ O ₃	B ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	CaO	Fe ₂ O ₃
Масова частка, %	80,5	2,0	12	4,0	1,0	0,5	0,1 - 0,2

Як бачимо з (4) і (5) для випадку, що розглядаються, головними параметрами, від яких буде залежати процес утворення фізичного контакту, є величина мікросморсткості поверхонь R_a , яка буде визначати відстань між зарядами R , та відносна діелектрична проникливість ϵ_r , яка визначає кількість зарядів на поверхнях, що зварюються. Встановлено, що для повноцінної реалізації процесу поляризації й утворення фізичного контакту його діелектрична проникливість повинна бути не менше 5 (у крайньому випадку не менше 4). Спроба зварити напряду кварцове скло ($\epsilon_r = 3,8$) з алюмінієм не дало позитивних результатів.

Величини сил електростатичного притягання (внутрішні сили стиску) двох поверхонь, що утворюються у процесі зварювання, достатньо для забезпечення активної пружно-пластичної деформації мікровиступів на поверхні алюмінію та руйнуванню мікровиступів на поверхні скла або ситалу й утворенню фізичного контакту. Процес проходить з великою швидкістю (час встановлення фізичного контакту порівняний з часом реалізації процесів поляризації в діелектрику). Руйнування приповерхневих шарів металу сприяє утворенню активних центрів з ненасиченими зв'язками. В роботі [7] вказано, що деформація мікровиступів відбувається шляхом збільшення їх радіусу в наслідок розтягнення периферійних ділянок, а не стиску, як при дифузійному зварюванні у вакуумі. Сам процес зближення поверхонь, що зварюються, при накладанні

зовнішнього електричного поля може бути зафіксований по зникненню інтерференційних смуг рівної товщини. Все це і забезпечує зближення двох поверхонь до атомарного рівня (фізичного контакту) і підготовлює поверхні до утворення хімічних зв'язків.

Постає питання, які види поляризації задіяні у процесах, що розглядаються? В загальні розрізняють миттєві та уповільнені види поляризації. До миттєвих видів поляризації (характерна для твердих кристалічних та аморфних матеріалів і мають електронну та йонну поляризації) відносять ті, час встановлення яких менше 10–12 с. У загальному випадку вважається, що скло і матеріали, що містять скло фазу (ситали) мають електронну і йонну релаксаційні види поляризації. Час встановлення уповільнених видів поляризації досягає декілька хвилин і більше.

Залежно від механізму поляризації діелектриків, яка реалізується під впливом зовнішнього електричного поля, поділяють на певні види [6].

Електронна – час реалізації 10^{-15} – 10^{-14} с, реалізується в усіх діелектриках і є зміщенням орбіталей електронів, є оборотною (не пов'язана з втратами).

Йонна – час реалізації 10^{-13} – 10^{-12} с і являє собою зміщення вузлів кристалічної структури на величину, меншу, ніж величина сталої решітки або іонів відносно один одного, що складають гетерополярну (йонну) молекулу, є оборотною (не пов'язана з втратами).

Наявність лужних оксидів і особливо TiO_2 ($\epsilon_r=6,7$) і збільшенні їх концентрації у склі (ситали) посилює йонне зміщення, внутрішнє електричне поле і електронну поляризацію. Йонна й електронна поляризації є деформаційними видами поляризації і, як правило, не залежать від температури.

Електронно-релаксаційна (теплова) – характерна для твердих діелектриків (особливо, де є TiO_2), які містять дефекти або домішкові іони, що здатні захоплювати електрони (час реалізації 10^{-8} – 10^{-6} с).

Йонно-релаксаційна (теплова) – зміщення іонів, які слабо закріплені у вузлах структури скла, ситалів та інших діелектриків, або знаходяться між вузлами. Такі зміщення значно більші ніж при пружній йонній поляризації (час реалізації 10^{-6} – 10^{-4} с).

Дипольна (орієнтаційна) – час реалізації частки секунди (приблизно 10^{-10} – 10^{-5} с) і більше (залежно від розмірів диполів, густини речовини тощо), протікає з втратами на подолання сил зв'язку і внутрішнього тертя, пов'язана з орієнтацією диполів у зовнішньому електричному полі і сильно залежить від температури.

Експериментально встановлено, що у склі і ситалах безпосередньо у процесі зварювання у приповерхневому шарі присутні молекули води, які можуть виділятися у площині діелектрик-алюміній, якщо параметри режиму зварювання не забезпечили повного протікання процесів поляризації і, як наслідок, не встановлення фізичного контакту за умовою (1). У таких місцях під час зварювання відбувається десорбція молекул води у вигляді пари і локальне збільшення тиску (здуття алюмінію над поверхнею ситалу (рис. 7, а). Після охолодження в місцях непроварів, ці пари адсорбуються на поверхні діелектрика (рис. 7, б).

У випадку забезпечення умови (1) молекули води залишаються у приповерхневому шарі (верхні шари структурної сітки склофазу) діелектрика і маючи дипольний механізм поляризації з $\epsilon_r=81$ здатні активно брати участь в утворенні подвійного електричного шару (рис. 6). Встановлено [4], що зі збільшенням температури суттєво збільшується густина струму абсорбції, яка характеризує повноту протікання поляризаційних процесів, і збільшується міцність зварних з'єднань.

Міграційна поляризація – час реалізації вимірюється у хвилинах і більше (є поляризацією уповільненої дії), обумовлена присутністю в матеріалах шарів з різною провідністю, пов'язана з перерозподілом вільних зарядів в об'ємі діелектрика, виникненню

об'ємних зарядів, особливо при високих градієнтах напруги, має великі втрати і веде до накопичення електричних зарядів на границі розподілу різних діелектриків.

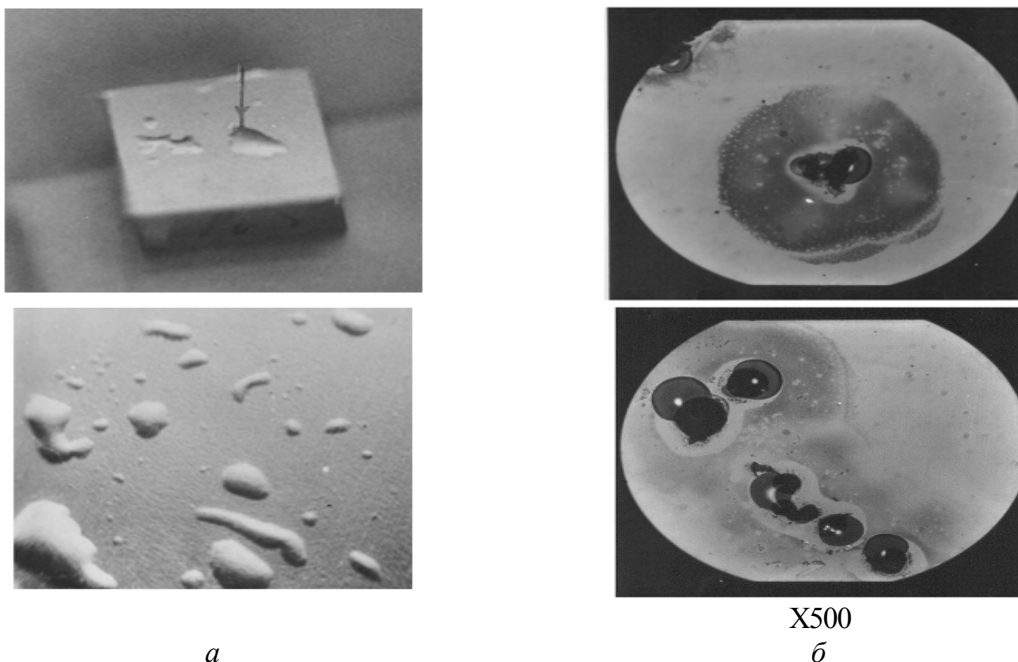


Рис. 7. Здуття алюмінію й утворення крапель води

Встановлено, що під час зварювання у площині зварювання (між діелектриком і алюмінієм) активно реалізуються електророзрядні процеси, які заважають встановленню фізичного контакту [8] (рис. 8) і у разі неправильно вибраних температурі зварювання і величини електричної напруги взагалі можуть привести до його не утворення. Водночас сам факт утворення нероз'ємного з'єднання, що супроводжується електророзрядними процесами свідчить про те, що електростатичні сили, що виникають, здатні визвати пластичну деформацію алюмінію й утворити фізичний контакт швидше ніж почнуть реалізуватися електророзрядні процеси.

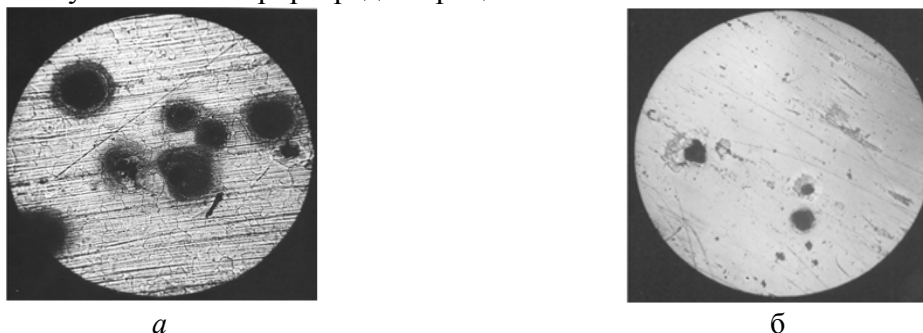


Рис. 8. Сліди дії електророзрядних процесів на поверхні алюмінію у площині зварювання (пропали): а – фізичний контакт не утворився; б – у місцях пропалів неповари, x140

Час формування таких розрядів, як показано в роботі [9], $10^{-7} - 10^{-5}$ с. Це дозволяє зробити висновок, що у становленні фізичного контакту беруть участь іонна та електронна деформаційні і релаксаційні (теплові), а також дипольна поляризація. Враховуючи, що скло і ситали взагалі відносять до матеріалів з релаксаційними видами поляризації, можна вважати, з електронних і іонних видів поляризації перевагу мають теплові їх види, а враховуючи особливості властивостей і складу приверхневих шарів склофазы визначальну роль слід надати дипольній поляризації.

У більшості видів поляризації діелектрика після припинення дії прикладеної до нього електричної напруги зміщені заряди мають тенденцію до повернення в початковий стан.

За рахунок утворення подвійного електричного шару і виникнення сил тяжіння між поверхнями, що зварюються (сили Кулона), повернення зарядів у початковий стан зразу не відбувається. У багатьох випадках такий стан може зберігатися відносно довгий час (до декілька днів). За рахунок «стікання» зарядів з подвійного електричного шару їх кількість на поверхнях, що з'єднуються, зменшується і через певний час відбувається довільне роз'єднання поверхонь. Для збереження подвійного електричного шару повинно відбутися схоплення поверхонь (утворення хімічних зв'язків), що і відбувається зразу після утворення фізичного контакту в процесі зварювання в електричному полі. Протягом подальшої витримки зразків під напругою продовжується накопичення зарядів у подвійному електричному шарі за рахунок міграційної (високовольтної) поляризації діелектрика. Збільшення електростатичних сил тяжіння веде до утворення фізичного контакту в місцях, де він не утворився в перші секунди зварювання. Паралельно з цим проходить комплекс фізико-хімічних процесів (електродифузія, електрохімічні реакції), що остаточно формує зварне з'єднання. Вказані процеси найбільш активно проходять у перші 7–10 хвилин після подачі електричної напруги на складання, що зварюється. При подальшій витримці під напругою зміцнення зварного з'єднання відбувається усього на декілька відсотків. Отримані таким чином зварні з'єднання зберігають свою цілісність десятки років за наявності різного роду зовнішніх навантажень (термоудари, механічні удари, вібрації).

Таким чином, можна припустити, що на утворення зварного з'єднання під час зварювання діелектриків з алюмінієм в електричному полі високої напруги має великий вплив реалізація в діелектрику й оксиді алюмінію, що знаходиться на поверхні алюмінієвої деталі, електронної та йонної (деформаційної і теплової), дипольної і міграційної поляризацій, що забезпечується відносною діелектричною проникливістю не менше 5, величиною електричної напруги, температурою і часом зварювання. За утворення фізичного контакту треба вважати відповідальними миттєві види поляризації (йонну та електронну деформаційні і переважно теплові йонну та електронну поляризацію), при визначальній ролі дипольної поляризації. За загальний час зварювання відповідає час встановлення міграційної поляризації.

Висновки і пропозиції. Результати проведених досліджень дозволяють зробити такі висновки:

1. Один з головних етапів утворення зварного з'єднання ситалів і скла з металами при зварюванні в електричному полі високої напруги – утворення фізичного контакту.

2. Головними умовами утворення якісного фізичного контакту є:

– досягнення заданої величини мікросорсткості поверхонь діелектрика, що зварюються, ($R_a \leq 0.02$ мкм) і механічне оброблення поверхні алюмінію, характер якої залежить від його пружно-пластичних властивостей і товщини;

– забезпечення якісного очищення поверхонь, що зварюються (для ситалів і скла це – оброблення полірованої поверхні за схемою: ацетон – неорганічний розчин з основними властивостями ($\text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}[50] + \text{KOH}[10] + \text{Na}_2\text{CO}_3[20] + \text{рідке скло}$), хромова суміш – ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7[99] + \text{H}_2\text{SO}_4$), а для конструкційного алюмінію очищення у вигляді травлення в NaOH ($200 \text{ г} \cdot \text{л}^{-1}$);

– забезпечення протікання в діелектрику електронної та йонної поляризації (деформаційних і переважно теплових), при визначальній ролі дипольної поляризації.

3. Загальний час зварювання визначається встановленням міграційної поляризації.

4. Отримання якісного зварного з'єднання забезпечується відносною діелектричною проникливістю діелектрика не менше 5, величиною електричної напруги, температурою зварювання і часом зварювання (часом дії електричного поля).

Список використаних джерел

1. *Теория сварочных процессов* : учеб. для высших учебных заведений по специальности «Оборудование и технология сварочного производства» / В. Н. Волченко, В. М. Ямпольский, В. А. Винокуров и др. ; под ред. В. В. Фролова. – М. : Высшая школа, 1988. – 559 с.
2. *Березин Л. Я.* Особенности предварительной подготовки к сварке титала с алюминием в узлах приборов / Л. Я. Березин, В. Г. Панаётов, О. Г. Усышкин // *Технология авиационного приборостроения*. – 1987. – № 3-4. – С. 31–33.
3. *Березин Л. Я.* Вплив хімічного очищення поверхні титалу на якість з'єднання з алюмінієм зварювання в електростатичному полі / Л. Я. Березин, С. В. Олексієнко, Т. М. Недей // *Вісник ЧДТУ. Серія «Технічні науки»*. – 2004. – № 21. – С. 130–135.
4. *Березин Л. Я.* Критерії якості зварювання в електричному полі високої напруги / Л. Я. Березин // *Вісник ЧДТУ. Серія «Технічні науки»*. – 2013. – № 1(63). – С. 103–111.
5. *Березин Л. Я.* Отримання вакуумцільних з'єднань із титалів та кварцового скла в газорозрядних пристроях / Л. Я. Березин, С. О. Мороз // *Вісник ЧДТУ. Серія «Технічні науки»*. – 2007. – № 30. – С. 70–79.
6. *Тареев Б. М.* Физика диэлектрических материалов : учеб. пособие для вузов / Б. М. Тареев. – М. : Энергоиздат, 1982. – 320 с.
7. *Пондеромоторное взаимодействие* при образовании электроадгезионного контакта / Н. П. Косонова, В. А. Приходченко, В. Н. Таиров, А. Ф. Хомылев // *XVII Симпозиум по механоэмиссии и механохимии твердых тел*. – Ташкент, 1981. – Ч. 2. – С. 36–39.
8. *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.
9. *Лучников А. П.* Процессы релаксации адгезии в контакте твердого тела с активным полимером / А. П. Лучников, В. Ф. Лысакова // *VIII Всесоюзный симпозиум по механоэмиссии и механохимии твердых тел (1–3 сентября 1981 г.)*. – Таллин, 1981. – С. 19.

Березин Леонід Якович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри зварювального виробництва та автоматизованого проектування будівельних конструкцій, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14027, Україна).

Березин Леонид Яковлевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры сварочного производства и автоматизированного проектирования строительных конструкций, Черниговский национальный технологический университет (ул. Шевченко, 95, м. Чернигов, 14027, Украина).

Berezin Leonid – PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Department of Welding Technology and CAD/CAM/CAE Systems of Building Structures, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenka Str., 14027 Chernihiv, Ukraine).

E-mail: berezinl@ukr.net

Прибытько Ирина Олександрівна – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри зварювального виробництва та автоматизованого проектування будівельних конструкцій, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14027, Україна).

Прибытько Ирина Александровна – кандидат технических наук, доцент, доцент, доцент кафедры сварочного производства и автоматизированного проектирования строительных конструкций, Черниговский национальный технологический университет (ул. Шевченко, 95, м. Чернигов, 14027, Украина).

Prybytko Irina – PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Department of Welding Technology and CAD/CAM/CAE Systems of Building Structures, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenka Str., 14027 Chernihiv, Ukraine).

E-mail: prybytko_ira@ukr.net

Ганєєв Тимур Рашитович – кандидат технічних наук, доцент, доцент, кафедри зварювального виробництва та автоматизованого проектування будівельних конструкцій, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14027, Україна).

Ганєев Тимур Рашитович – кандидат технических наук, доцент, доцент, кафедры сварочного производства и автоматизированного проектирования строительных конструкций, Черниговский национальный технологический университет (ул. Шевченко, 95, м. Чернигов, 14027, Украина).

Haniyev Timur – PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Department of Welding Technology and CAD/CAM/CAE Systems of Building Structures, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenka Str., 14027 Chernihiv, Ukraine).

E-mail: gatavtim@ukr.net