

УДК 621.791:666.1.037.42

**Л.Я. Березін**, канд. техн. наук

**Т.Р. Ганєєв**, канд. техн. наук

Чернігівський національний технологічний університет, м. Чернігів, Україна

### ОСОБЛИВОСТІ ТЕХНОЛОГІЇ ЗВАРЮВАННЯ ВУЗЛІВ МІДЬ-АЛЮМІНІЙ-СИТАЛ

**Л.Я. Березин**, канд. техн. наук

**Т.Р. Ганєев**, канд. техн. наук

Черниговский национальный технологический университет, г. Чернигов, Украина

### ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИИ СВАРКИ УЗЛОВ МЕДЬ-АЛЮМИНИЙ-СИТАЛЛ

**Leonid Berezin**, PhD in Technical Sciences

**Timur Hanieiev**, PhD in Technical Sciences

Chernihiv National Technological University, Chernihiv, Ukraine

### FEATURES OF WELDING TECHNOLOGY OF COPPER-ALUMINUM-SITALL UNITS

*Запропоновано особливості технології виготовлення у твердій фазі вузлів мідь-алюміній-ситал з використанням дифузійного зварювання у вакуумі та зварювання в електричному полі.*

**Ключові слова:** технологія, зварювання, тверда фаза, мідь, алюміній, ситал.

*Предложены особенности технологии изготовления в твердой фазе узлов медь-алюминий-ситалл с использованием диффузионной сварки в вакууме и сварки в электрическом поле.*

**Ключевые слова:** технология, сварка, твердая фаза, медь, алюминий, ситалл.

*Are offered features manufacturing technology nodes to the solid phase copper-aluminum-sitall using diffusion welding in vacuo and welding in the electric field.*

**Key words:** technology, welding, solid phase, copper, aluminum, glass ceramics.

**Постановка проблеми.** У деяких сучасних електронних та іонних приладах є необхідність отримання прецизійних вузлів при температурах, що не перевищують задану межу. Наприклад, приєднання мідних анодів до ситалового корпусу лазерних гіроскопів, де температура отримання нероз'ємного з'єднання не повинна перевищувати 723 К. Використання дифузійного зварювання у вакуумі (ДЗВ) не дозволяє вирішити поставлене завдання. Так, для отримання з'єднань неметалів (ситали, кварцове скло, кераміки) з міддю температура зварювання повинна бути значно більше 723 К (у більшості випадків вона більше 1000 К). При цьому товщина міді повинна бути не більше 0,5 мм, що пов'язано з виникненням великих зварювальних напружень. Поява цих напружень в основному викликана різницею в ТКЛР матеріалів, що зварюються, та товщиною металу. Чим вища температура зварювання, тим більше негативний вплив вказаних факторів [1].

Вирішити питання, що розглядається, могло б дозволити використання зварювання в електричному полі (ЗЕП) високої напруги [2].

**Мета та завдання роботи.** Метою цієї роботи було встановлення можливості отримання в твердій фазі вакуумщільних вузлів ситалу СО-115М з міддю товщиною не менше 1,5 мм при температурах зварювання, що не перевищують 723 К з використанням ДЗВ та ЗЕП. Для досягнення поставленої мети вирішувалися три завдання:

- 1) отримання з'єднання ситал-мідь напряду;
- 2) поетапне отримання з'єднання ситал-мідь з використанням проміжної прокладки з використанням ДЗВ і ЗЕП;
- 3) отримання з'єднання ситал-мідь з використанням проміжної прокладки з використанням ДЗВ і ЗЕП за один технологічний цикл.

**Виклад основного матеріалу досліджень.** На першому етапі роботи дослідження щодо отримання зварних з'єднань ситал-мідь напряду (без проміжної прокладки) при температурах зварювання  $T_{зв} \leq 723$  К дали негативний результат. ЗЕП відбувається в атмосфері повітря при нормальному атмосферному тиску. В цих умовах під час нагріву на поверхні міді утворюється окис міді, який не дозволяє створити якісного зварного з'єднання.

На другому етапі роботи проводилися дослідження щодо отримання зварного з'єднання ситал-мідь з використанням проміжної прокладки та використання ДЗВ і ЗЕП. За проміжну прокладку був використаний алюміній марки А999 (ГОСТ 11069–71), як матеріал, що має непогану здатність до дифузійного зварювання у вакуумі з безкисневою міддю марки МБ (ГОСТ859-66) та гарну деформаційну здатність (табл.).

Таблиця

*Властивості матеріалів, що зварювалися [3; 4; 5]*

Матеріал	Властивість				
	$E \cdot 10^3$ , МПа	$\sigma_b$ , МПа	$\delta$ , %	$\alpha \cdot 10^7$ , $K^{-1}$	$T_{пл}$ , К
СО-115М	93,8	100	–	2,5 – 6 (323К – 693 К)	–
МБ	11,5	200-240	45-55	170 (293 – 393 К)	1356
А999	7,1·10	50	49	276,8 (293 – 773 К)	933,2

Процес отримання зварного з'єднання ситал-мідь з використанням проміжної алюмінієвої прокладки був розділений на два етапи:

- 1 – отримання вузла мідний виріб (анод) – алюмінієва прокладка з використанням ДЗВ;
- 2 – зварювання вузла мідь-алюміній з ситаловим корпусом приладу з використанням ЗЕП.

Для реалізації першого етапу було випробувано деякі рекомендовані варіанти режимів зварювання ДЗВ [1] у діапазонах: температура зварювання  $T_{зв} = 673 - 873$  К; питомий тиск зварювання  $P_{зв.пит.} = 5 - 10$  МПа; витримка при температурі зварювання і під тиском  $t_{зв} = 10 - 60$  хв; величина вакууму  $1,3 \cdot 10^{-1} - 1,33 \cdot 10^{-3}$  Па. Цей етап зварювання включав технологічні операції: вхідний контроль матеріалів, що зварювалися; механічне оброблення та знежирення поверхонь, що будуть зварюватися; складання вузла; відпалювання міді; зварювання; контроль якості. Відпрацювання оптимального режиму ДЗВ мідь-алюміній проводилося на зразках-імітаторах з наступними механічними випробуваннями на розтяг (рис. 1). Товщина алюмінію перед ДЗВ з міддю була  $0,7 \pm 0,1$  мм. Як основний режим ДЗВ для реальних вузлів був вибраний:  $T_{зв} = 698 \pm 5$  К;  $P_{зв.пит.} = 10$  МПа;  $t_{зв} = 10$  хв; вакуум  $2,7 \cdot 10^{-2}$  Па. Для вказаного режиму зварювання міцність з'єднань на розтяг була не менше 30 МПа, що задовольняє технічним умовам на виготовлення багатьох приладів.

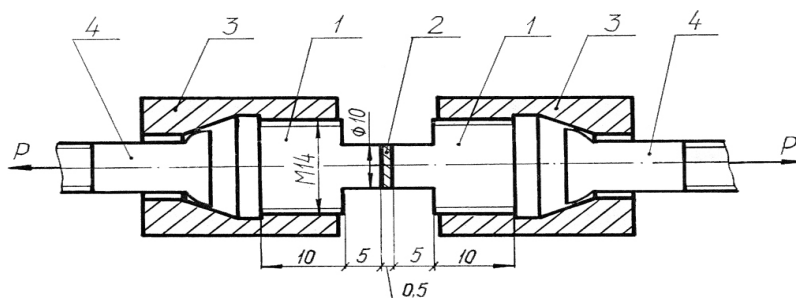


Рис. 1. Схема випробувань зразків-імітаторів для визначення оптимального режиму ДЗВ мідь-алюміній: 1 – зразки з міді; 2 – алюмінієва прокладка; 3 – гайка; 4 – гвинт з шаровою опорою

Для відпрацювання режимів ДЗВ з реальним мідним виробом (анод лазерного гіроскопа) використовувався пристрій, що зображено на рис. 2.

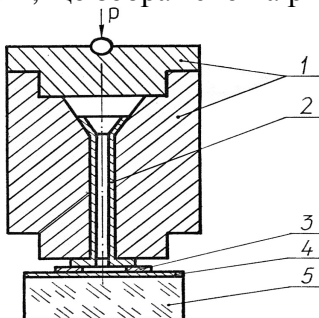


Рис. 2. Пристосування для дифузійного зварювання анода з алюмінієвою прокладкою: 1 – пристосування; 2 – анод; 3 – алюмінієва прокладка; 4 – алюмінієва фольга; 5 – кварцовий столик

На другому етапі проводили ЗЕП в атмосфері повітря мідно-алюмінієвого вузла з ситаловим корпусом з такою послідовністю технологічних операцій: знежирення, травлення і механічне оброблення поверхні алюмінію під зварювання з ситалом; хімічне очищення ситалу (рекомендації щодо очищення ситалу перед ЗЕП наведено в [6]); складання вузла; зварювання; контроль якості. Режими зварювання та особливості технології відпрацьовувалися на макетах (рис. 3 ). ЗЕП алюміній-ситал виконували без компенсаційного кільця та з компенсаційним кільцем для зменшення залишкових напружень у зоні утворення зварного з'єднання.

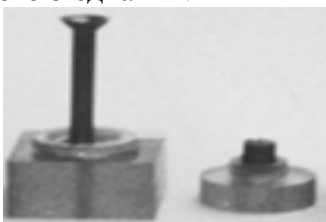


Рис. 3. Вид макетів для відпрацювання режимів зварювання

Відпрацювання режимів ЗЕП алюміній-ситал проводилося з використанням механічних випробувань на відрив. Одна із схем проведення таких випробувань наведено на рис. 4.

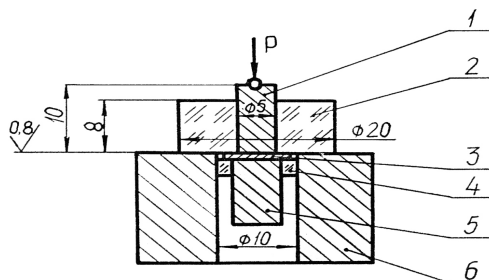


Рис. 4. Схема моделі вузла для проведення механічних випробувань на відрив: 1 – пуансон; 2 – ситал; 3 – алюмінієва прокладка; 4 – компенсаційне кільце; 5 – деталь з міді; 6 – опора

Як основний режим ЗЕП для реальних вузлів був вибраний:  $T_{зв} = 603 \pm 5$  К;  $P_{зв.пит.} = 10 - 15$  МПа; густина струму  $(4-5) \cdot 10^{-3}$  mA·мм<sup>-2</sup>;  $t_{зв} = 10$  хв. Для вказаного режиму зварювання міцність з'єднань на відрив була не менше 20 МПа.

Для зменшення питомого тиску зварювання при ЗЕП та покращення якості зварювання проводилося попереднє оброблення тиском (пресування) опорної поверхні алюмінію, що буде контактувати з поверхнею ситалового корпусу з використанням металевих полірованих шайб зі сплаву типу ВК та кварцового скла марок КВ. Дослідження показали, що використання кварцових шайб (рис. 5), поверхня яких була відполірована до  $R_a \leq 0,02$  мкм, дозволяє отримати більш якісну (дзеркальну) поверхню алюмінію з погляду величини мікрошорсткості поверхні. Перед обробленням тиском проводилося хімічне очищення алюмінію в ацетоні і розчині їдкою натру з наступним освітленням в азотній кислоті. Товщина алюмінію після пресування і перед ЗЕП знаходилася в межах 0,5–0,55 мм.

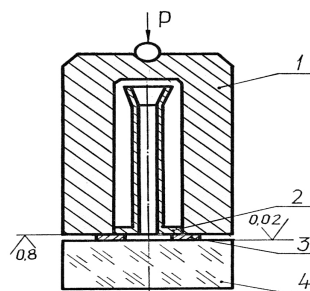


Рис. 5. Пристосування для пресування алюмінієвої прокладки: 1 – пуансон; 2 – анод; 3 – алюмінієва прокладка; 4 – матриця (кварцове скло)

Для всіх елементів та етапів зварювання проводився контроль якості [7]:

– *Попередній:*

- ✓ контроль геометричних розмірів деталей, що входять до складу вузла;
- ✓ контроль мікрошорсткості поверхонь, що зварюються (шорсткість поверхонь міді і

алюмінію під ДЗВ повинна бути  $R_a \leq 20$  мкм за ГОСТ 2789-73, шорсткість поверхні алюмінію під ЗЕП з ситалом повинна бути  $R_a \leq 0,1$  мкм, а поверхні ситалу  $R_a \leq 0,02$  мкм);

✓ контроль залишкових напружень у ситалі перед ЗЕП повинні бути не більше 0,2 МПа (вибірково);

- ✓ контроль якості очищення поверхонь, що зварюються;

– *Проміжний:*

- ✓ дотримання величин усіх параметрів режиму зварювання для ДЗВ і ЗЕП (для ЗЕП особливо густини повного струму та спаду густини струму);

- ✓ контроль експлуатації зварювального обладнання (вибірково);

– *Заключний контроль:*

- ✓ механічні випробування на відрив;
- ✓ візуальний огляд звареного вузла неозброєним оком та за допомогою лупи;

- ✓ металографія;

✓ повторні нагріви до заданих температур (для окремих макетів та для реальних зварних конструкцій);

✓ термоудари в камері тепла та холоду (для окремих макетів та для реальних зварних конструкцій);

✓ механічні діяння на вібростенді (для окремих макетів та для реальних зварних конструкцій);

✓ механічні удари на ударному стенді (для окремих макетів та для реальних зварних конструкцій);

- ✓ поляризаційно-оптичні обстеження вузлів (для окремих макетів та для реальних зварних конструкцій);
- ✓ перевірка на вакуумщільність (для окремих макетів та для реальних зварних конструкцій).

Враховуючи прецизійність реальних вузлів і приладів, велика увага повинна приділятися етапу підготовки деталей вузлів і відповідному технологічному оснащенню. Так, наприклад, під час виготовлення вузла анода лазерних гіроскопів непаралельність поверхонь алюмінієвої прокладки під ДЗВ з міддю і ЗЕП з ситалом повинна бути не більше 0,05 мм на довжині 100 мм. Товщина алюмінієвої прокладки під ДЗВ –  $0,7 \pm 0,05$  мкм, а перед ЗЕП –  $0,5 \pm 0,1$  мм. Механічне оброблення поверхонь алюмінієвої прокладки і мідного анода під ДЗВ доцільно проводити в пристосуваннях, що зображені на рис. 6.

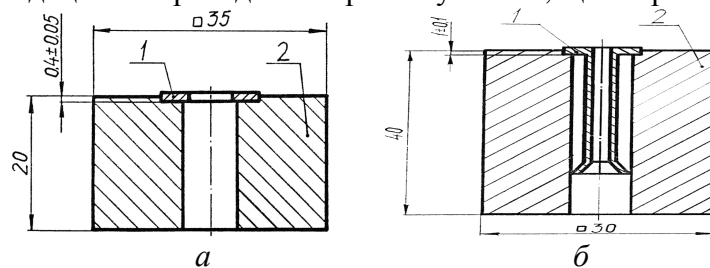


Рис. 6. Пристосування для механічного оброблення поверхонь: а – для алюмінієвої прокладки; б – для мідного анода; 1 – деталь, що обробляється, 2 – пристосування

Для зварювання реальних об'єктів (приварювання вузла мідний анод-алюмінієва прокладка до ситалового моноблока лазерного гіроскопа) використовувався спеціальний кондуктор (рис. 7).

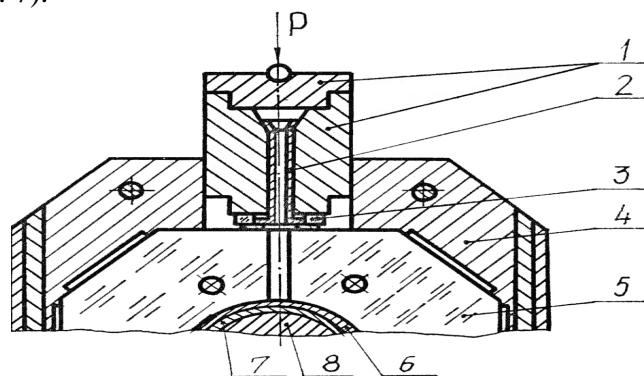


Рис. 7. Кондуктор для зварювання в електричному полі анода з моноблоком: 1 – пристосування для вузла анод-алюмінієва прокладка – перший електрод; 2 – вузол анод-алюмінієвої прокладки; 3 – компенсаційне кільце; 4 – кондуктор; 5 – моноблок; 6 – підкладка; 7 – підкладка з алюмінієвої фольги; 8 – другий електрод

Дослідження та випробування макетів та реальних об'єктів показали можливість використання поетапного варіанта отримання якісних вузлів мідь-алюміній-ситал та промислового його використання. Для напрацьованих режимів зварювання та при забезпеченні всіх технологічних особливостей процесу було досягнуто в 100 % випадках дотримання технічних вимог до реальних вузлів після відповідних випробувань. Режими зварювання обираються відповідно до форми, розмірів та властивостей елементів вузла. Всі етапи процесу отримання вузлів мідь-алюміній-ситал у два етапи реалізуються на відповідному зварювальному обладнанні (установки для дифузійного зварювання та зварювання в електричному полі) [8] та технологічному оснащенні.

Для отримання з'єднання ситал-мідь через проміжну прокладку з використанням ДЗВ і ЗЕП за один технологічний цикл було розроблено спеціалізоване зварювальне обладнання – комбінована установка, яка дозволяє проводити на ній ДЗВ і ЗЕП [8]. У

зварювальну установку відразу завантажується вузол мідь-алюміній-ситал. Усі елементи вузла проходять попередню підготовку, як і для двоетапного зварювання. На першій стадії процесу зварювальна установка працює в режимі дифузійного зварювання міді з алюмінієм. Одночасно, під час витримки, відбувається оброблення тиском поверхні алюмінію, що контактує з поверхнею ситалового елемента вузла. При цьому величина зовнішнього тиску підбирається достатньою для ДЗВ міді з алюмінієм та забезпечення утворення фізичного контакту алюміній-ситал перед наступною стадією процесу – ЗЕП алюмінію з ситалом. Зварювання в електричному полі відбувається за режимами, як і для двоетапного зварювання після зменшення температури до заданої величини. Роботи в цьому напрямку, які проводилися тільки для макетів, дали позитивні результати. Під час цих досліджень була встановлена можливість отримання вузлів мідь-алюміній-ситал за один технологічний цикл в одну стадію за рахунок поєднання процесів ДЗВ і ЗЕП. Однак потрібні додаткові дослідження для зниження температури на першій стадії зварювання з використанням ДЗВ (відпалювання міді) до допустимих значень згідно з технічними вимогами ( $T_{зв} \leq 723 \text{ K}$ ).

### Висновки

1. Розглянуто можливі варіанти отримання герметичних з'єднань мідь-алюміній-ситал з використанням дифузійного зварювання у вакуумі та зварювання в електричному полі.

2. Проаналізовано можливість промислового застосування технології поетапного зварювання мідних анодів із ситаловим корпусом приладу через алюмінієву прокладку в два етапи: отримання вузла мідь-алюміній з використанням дифузійного зварювання у вакуумі і зварювання вузла мідь-алюміній з використанням зварювання в електричному полі.

3. Охарактеризовано технологічні особливості і наведено практичні рекомендації для отримання зварних з'єднань мідь-алюміній-ситал як на етапі проведення досліджень, так і для реальних промислових умов.

4. Показано можливість отримання з'єднання ситал-мідь через проміжну алюмінієву прокладку з використанням ДЗВ і ЗЕП за один технологічний цикл на спеціалізованій зварювальній установці.

### Список використаних джерел

1. *Диффузионная сварка материалов* : справочник / под ред. Н. Ф. Казакова. – М. : Машиностроение, 1981. – 271 с.
2. *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.
3. *Материалы в машиностроении. Выбор и применение* / под ред. Л. П. Лужникова. – М. : Машиностроение, 1967. – Т. 1. – 304 с.
4. *Структура и свойства полуфабрикатов из алюминиевых сплавов* : справочник / З. Н. Арчакова, Г. А. Балахонцев, И. Г. Басова и др. – 2-е изд. перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1984. – 408 с.
5. *Физические свойства металлов и сплавов* / Б. Г. Лившиц и др. – М. : Metallurgiya, 1980. – 320 с.
6. *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. 102–111.
7. *Березін Л. Я.* Критерії якості зварювання в електричному полі високої напруги / Л. Я. Березін // Вісник ЧДТУ. Серія «Технічні науки». – Чернігів, 2013. – № 1 (63). – С. 103–111.
8. *Березін Л. Я.* Обладнання для проведення процесу зварювання в зовнішніх електричних полях високої напруги / Л. Я. Березін // Вісник ЧДТУ. Серія «Технічні науки». – Чернігів, 2013. – № 2 (65). – С. 94–103.