

ЗВАРЮВАННЯ У ТВЕРДІЙ ФАЗІ В ЕЛЕКТРОСТАТИЧНОМУ ПОЛІ ВУЗЛІВ КРЕМНІЙ-СКЛО-КРЕМНІЙ

Досліджено особливості виготовлення вузлів кремнієвих ємнісних датчиків тиску. Розроблено технологію виготовлення багатошарових вузлів типу кремній-скло-кремній за один цикл зварювання, що забезпечує досягнення рівномірності обох зварних з'єднань у вузлі.

Вступ

До основних типів датчиків тиску можна віднести кремнієвий ємнісний датчик тиску, конструктивна схема якого наведена на рис. 1 [1].

Він складається з двох кремнієвих мембран, що з'єднуються між собою боросилікатним склом, яке необхідне для покращення діелектричних властивостей між пластинами конденсатора. Датчик має металізацію на протилежних зовнішніх поверхнях, необхідну для його електричного з'єднання з приладами реєстрації сигналу.

Останнім часом перспективним способом поєднання кремнію зі склом є спосіб зварювання у твердій фазі, який може здійснюватися в атмосфері повітря, при невисоких температурах (наприклад, нижче температури плавлення евтектики кремній-алюміній), з використанням незначних зовнішніх зусиль стиснення та з прикладенням електростатичного поля високої напруги, принцип якого зрозумілий з рис. 2. В основу процесу покладені нагрів матеріалів, поверхні яких відполіровані, і прикладення високої електричної напруги, причому повинна дотримуватися полярність: на кремній подається «плюс», а на скло – «мінус». Відмінною особливістю способу є можливість його застосування для зварювання матеріалів, один з яких повинен бути діелектриком, що включає оксиди лужних матеріалів (боросилікатне скло).

Аналіз досліджень та публікацій

Як вказується в [2], всі явища, що відбуваються при зварюванні кремнію зі склом, пов'язані з рухомістю

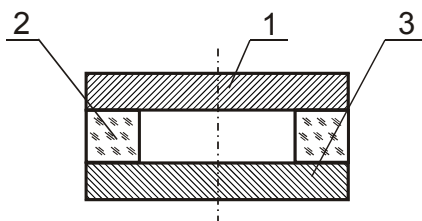


Рис. 1. Вузол ємнісного датчика тиску:

1 – перша кремнієва мембрана; 2 – шар боросилікатного скла; 3 – друга кремнієва мембрана

іонів натрію. У процесі електролізу скла під дією електричного поля в прианодній області скла, що безпосередньо прилягає до анода, залишаються некомпенсовані заряди аніонів кисню ($\text{Na}_2\text{O} \rightarrow 2\text{Na} + \text{O}^{2-}$), які беруть участь в утворенні з'єднання скла з кремнієм на основі окислювальних процесів. До від'ємного електрода виходять позитивно заряджені іони $+$ і нейтралізуються на поверхні скла, утворюючи на ньому шар гідроксиду, який при подальшому зварюванні з'єднання кремній-скло з другою кремнієвою мембраною розтравлює зону зварювання, тобто погіршує якість зварювання [3].

Автори роботи [3] запропонували спосіб поетапного зварювання (рис. 3), метою якого є виключення гідроксидів натрію на поверхні скла, що зварюється, при виготовленні багатошарових вузлів.

Деталь з напівпровідника встановлюють у контакт з деталлю із лужного скла та розміщують їх у зварювальній камері. Потім до деталі з напівпровідника прикладають позитивний потенціал, а до деталі з лужного скла – від'ємний. Деталі нагрівають до температури зварювання і здійснюють ізотермічну витримку. Після зварювання деталі охолоджують, з вільної сторони скла механічною обробкою видаляють шар, перенасичений

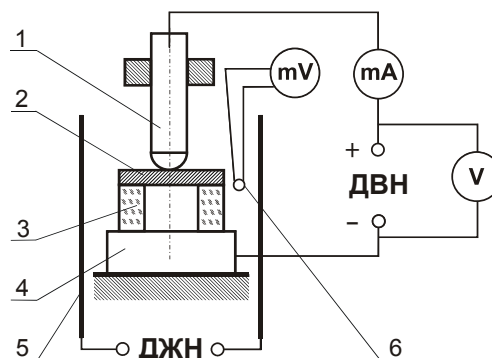


Рис. 2. Схема зварювання в твердій фазі в електростатичному полі:

1 – електрод; 2 – кремнієва деталь; 3 – скляна деталь; 4 – столик; 5 – нагрівач; 6 – термопара; ДЖН – джерело живлення нагрівача; ДВН – джерело високої напруги

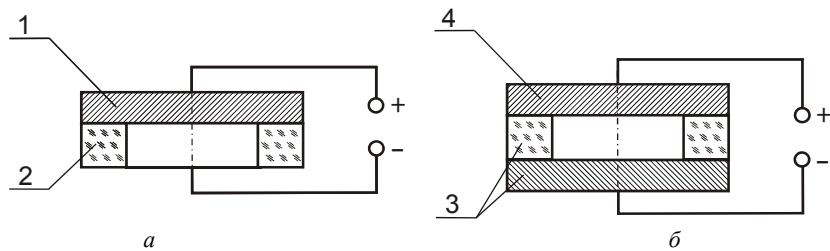


Рис. 3. Принципова схема зварювання багатошарових структур [3]:

1 – перша кремнієва мембрана; 2 – боросилікатне скло; 3 – з'єднання кремній-скло; 4 – друга кремнієва мембрана

лужними елементами, встановлюють у контакт із ним другу деталь із напівпровідника, залишаючи від'ємний потенціал на склі, нагрівають до температури зварювання і здійснюють ізотермічну витримку. Після зварювання отримане багатошарове з'єднання охолоджують та виймають із камери.

У роботі вказується на досягнення рівномірності на обох границях з'єднань кремній-скло-кремній за рахунок видалення механічною обробкою шару скла, збагаченого натрієм, а також на складність технології та високий процент відбракування виробів при поетапному поліруванні скла.

У подальшому автори роботи [4] запропонували спосіб захисту зворотної сторони скляної деталі від виходу лужних іонів при зварюванні з'єднань типу алюміній-скло-алюміній. Спосіб здійснюється таким чином. Попередньо на поверхню лужного скла, що підлягає зварюванню після зварювання з металом першої поверхні, наносять захисний шар діоксиду кремнію. Скло розміщують між поверхнями металів, здійснюють стиснення поверхонь, нагрівають до температури зварювання та прикладають до них постійну електричну напругу, полярність якої змінюють у процесі зварювання. Завдяки нанесенню захисного шару діоксиду кремнію запобігається вихід іонів натрію на поверхню скла та утворення на ньому шару гідроксиду натрію, який розтравляє зону з'єднання та знижує якість. Зварювання здійснюється за одну технологічну операцію, що дозволяє підвищити продуктивність процесу. Однак, як вказується в даній роботі, дана технологія має високу вартість і для використання в промислових умовах непридатна.

У роботі [5] при зварюванні пари віконне скло-алюмінієва фольга вказується на те, що при витримці вже отриманого з'єднання під напругою зворотної полярності при тій же температурі, міцність з'єднання суттєво знижується в початковий момент часу. При значному часі витримки міцність для даної пари матеріалів і режимів зварювання знижується приблизно на 40 %.

На таке ж зниження міцності з'єднань при їх витримці під напругою зворотної полярності вказується і в роботі [6]. У роботі також вказується про утворення лугу на катоді в результаті виділення на ньому лужних металів і їх реакції з вологою атмосфери.

Отже, ефективною технологією зварювання вузлів типу кремній-скло-кремній буде така, яка не включа-

тиме в себе операції, що призводять до збільшення собівартості робіт і до втрати напівфабрикатів у процесі виробництва, та забезпечуватиме утворення зварних з'єднань із заданим рівнем службових властивостей.

Мета роботи

Метою цієї роботи була розробка технології зварювання у твердій фазі вузлів кремній-скло-кремній, що дозволяє забезпечити рівномірність обох зварних з'єднань у вузлах.

Матеріали та методи досліджень

Оскільки матеріал, що використовується в датчику, повинен мати лінійну залежність між відносною деформацією та зміною опору в якомога ширшому діапазоні, для виготовлення чутливого елемента використовують напівпровідниковий елемент n-типу, котрий має більш лінійну характеристику при стисненні, ніж напівпровідниковий елемент p-типу [7]. Тому в роботі всі досліди проводились із використанням кремнію, легованого фосфором, марки КЭФ-4,5/0,1, вирізаного в кристалографічній площині (100), оскільки легований кремній n-типу (100) має найбільшу чутливість [7]. Як боросилікатне скло використовувались трубчаті деталі зі скла «Пірекс», яке має максимально наближений КТР до КТР кремнію. Шорсткість контактних поверхонь знаходилась у рекомендованих межах від 14 класу ($R_z = 0,025$ мкм) до 13 класу ($R_z = 0,1$ мкм). Для зварювання використовувалась модернізована промислова установка УСЭПВН 4Н. Якість зварних з'єднань оцінювалась за результатами механічних випробувань методом відриву кремнієвої мембрани від скла, а також визначенням площі зони з'єднання після розрізання діелектричного корпусу з боросилікатного скла навпіл. Зйомка зони з'єднання проводилась із торцевої сторони скляної деталі та на шліфах на оптичному мікроскопі NEOPHOT-32 за допомогою цифрової камери OLYMPUS C-3000ZOOM. Визначення площі зони з'єднання здійснювалось точковим методом за методикою, наведеною в [8].

Результати експериментів

Оскільки відомі технології зварювання багатошарових скло-кремнієвих вузлів мають недоліки внаслідок чергування прикладення позитивного та від'ємного потенціалів, придатним способом зварювання, що

не потребує додаткових технологічних заходів для забезпечення рівномірності зварних швів багатшарового вузла, є прикладення від'ємного потенціалу до скла з бокової поверхні за допомогою хомутових електродів. Передумовою для цього є використання хомутових електродів автором роботи [9] для отримання зварних з'єднань трубчатих скляних деталей з металом.

Отримання багатшарового з'єднання типу кремній-скло-кремній здійснюється за схемою, зображеною на рис. 4.

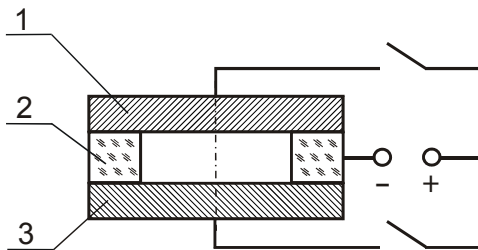


Рис. 4. Експериментальна схема зварювання вузла типу кремній-скло-кремній при прикладенні від'ємного потенціалу до скла за допомогою хомутового електроду:

- 1 – перша кремнієва мембрана; 2 – боросилікатне скло;
- 3 – друга кремнієва мембрана

Кремнієві мембрани встановлюють у контакт з скляною деталлю та розміщують їх у зварювальній камері. Потім до кремнієвих мембран підводять електроди для прикладення позитивного потенціалу, а до бокової поверхні скляної деталі – електрод для прикладення від'ємного потенціалу. Зібраний вузол нагрівають до температури зварювання і здійснюють ізотермічну витримку. Після неї подають зварювальну напругу на першу кремнієву мембрану і скло, проводять зварювання першої границі кремній-скло, а потім позитивний потенціал перемикають на другу кремнієву мембрану і проводять зварювання другої границі кремній-скло. Після зварювання отримане багатшарове з'єднання охолоджують та виймають із камери.

Розрізання скляної деталі багатшарового вузла навіл, шліфування та полірування поверхонь скла, зйомка кожної зони з'єднання кремній-скло дозволили встановити, що формування обох зварних з'єднань відбувається у повному обсязі.

Цей спосіб дозволяє здійснювати зварювання у твердій фазі в електростатичному полі з'єднань кремній-скло-кремній за один цикл. Запропоновані температура зварювання $T_{зв} = 673$ К, час, протягом

якого здійснюється дія електричної зварювальної напруги, $t_{зв} = 60-1200$ с, $j_{нік}$ – пікове значення густини струму зварювання від 10 мкА/мм² до 50 мкА/мм² дозволяють досягти міцності обох зварних з'єднань кремній-скло не нижче 12 МПа із забезпеченням вакуумної щільності не гірше $1 \cdot 10^{10}$ л.мм.рт.ст.с⁻¹.

Таким чином, на основі проведених досліджень розроблено нову удосконалену технологію зварювання у твердій фазі в електростатичному полі багатшарових вузлів типу кремній-скло-кремній за один цикл зварювання із забезпеченням рівномірності обох зварних з'єднань у вузлі.

Перелік посилань

1. Pat. 2107472 USA, INT CL³ G01L9/12. Electrostatic Bonded, Silicon Capacitive Pressure Transducer: Pat. 2107472 USA, INT CL³ G01L9/12 / D.S. Wise (USA); United Technologies Corporation (USA-Delaware). – № 8228253 ; Date of filing 04 Oct 1982 ; Application published 27 Apr 1983. – 3 p.
2. Хоменко Н. Н. Технология и оборудование получения сварно-паяных соединений кремния и кобальта со стеклом : дис. ... канд. техн. наук : 05.03.06 / Н. Н. Хоменко. – Чернигов, 1985. – 210 с.
3. Шлифер С. Э. Состояние и перспективы диффузионной сварки в электростатическом поле (ДС в ЭСП) со сменой полярности многослойных структур «стекло-полупроводник» / С. Э. Шлифер, В. М. Косогоров // Тезисы докладов тринадцатой всесоюзной научно-технической конференции «Достижения и перспективы диффузионной сварки». – М., 1990. – С. 17–18.
4. Шлифер С. Э. Диффузионная сварка в электростатическом поле алюминия со стеклом / С. Э. Шлифер, В. М. Косогоров // Автоматическая сварка. – 1991. – № 9. – С. 51–53.
5. Таиров В.Н. Физические основы, расчет и применение необратимого электроадгезионного соединения твердых тел / В. Н. Таиров, А. Р. Озолс, Н. С. Пшелко. – Рига : Ин-т орган. синтеза АН Латв. ССР, 1989. – 61 с.
6. Рассказов А. Н. Технология электростатического соединения кремниевой мембраны с металлостеклянным корпусом / А. Н. Рассказов, М. М. Гордиенко, В. М. Косогоров // Достижения и перспективы развития диффузионной сварки. – МДНТП им. Ф.Э. Дзержинского, 1987. – С. 119–123.
7. Осипович Л. А. Датчики физических величин / Л. А. Осипович. – М. : Машиностроение, 1979. – 159 с.
8. Салтыков С. А. Стереометрическая металлография / С. А. Салтыков. – М. : Металлургия, 1976. – 272 с.
9. Wallis G. Field Assisted Glass-Metal Sealing / G.Wallis, D.I. Pomerantz // Journal Applied Physics. – 1969. – Vol. 40, №10. – P. 3946–3949.

Одержано 07.07.2009

Исследованы особенности изготовления узлов кремниевых емкостных датчиков давления. Разработана технология изготовления многослойных узлов типа кремний-стекло-кремний за один цикл сварки, обеспечивающая достижение равнопрочности обоих сварных соединений в узле.

The peculiarities of silicon sensors for pressure capacities production are studied. Technology of multi-layered elements of Si-glass-Si type is developed for one cycle of welding, providing achievement of uniform strength of both welded connections in one unit.