

**Сергій Владиславович Олексієнко¹, Світлана Михайлівна Ющенко²,
Михайло Миколайович Руденко³**

¹кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри технологій зварювання та будівництва, Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)
E-mail: sv.oleks@stu.cn.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5475-4439>
ResearcherID: F-8197-2014. SCOPUS Author ID: 57190370561

²кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри технологій зварювання та будівництва, Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)
E-mail: rasssveta@stu.cn.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0863-9020>
ResearcherID: F-7741-2014. SCOPUS Author ID: 57190373626

³старший викладач кафедри технологій зварювання та будівництва, Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)
E-mail: m.rudenko@stu.cn.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9542-7792>
ResearcherID: G-6235-2014. SCOPUS Author ID: 57190378153

КОНСТРУЮВАННЯ СКЛО-КРЕМНІЄВИХ ВУЗЛІВ ДАТЧИКІВ ТИСКУ ТА ВПЛИВ ЇХНІХ РОЗМІРНИХ ПАРАМЕТРІВ НА ОПІР РУЙНУВАННЮ

Якість з'єднання кремнію зі склом при зварюванні у твердій фазі в електростатичному полі високої напруги залежить від кількості електрики, яка проходить через нього при зварюванні, та пікового значення струму на початку процесу зварювання. У роботі встановлено вплив поверхневої провідності скляних деталей на завершеність процесу зварювання. Визначено вплив розмірних параметрів скляних деталей на протікання процесу зварювання та на міцність з'єднань. Проведено комп'ютерне моделювання напруженого стану у вузлах. Розроблено рекомендації щодо конструювання скло-кремнієвих вузлів.

Ключові слова: скло; кремній; зварювання; конструювання; залишкові напруження; міцність.

Рис.: 8. Бібл.: 18.

Актуальність теми дослідження. Висока чутливість напівпровідникових п'єзоре-зистивних елементів обумовила їх широке використання в датчиках для вимірювання статичних та динамічних тисків [1]. Під дією механічного напруження електричний опір напівпровідників збільшується на 1-2 порядки в порівнянні з металами, тому використання п'єзореzистивного ефекту дозволило покращити рівень корисного сигналу та чутливість приладів, а також спростити обробку сигналів.

Ключем до створення чутливих до тиску елементів стало використання мембран із монокристалічного кремнію. Перетворення тиску, що вимірюється, в пропорційний електричний сигнал здійснюється за рахунок прогину пружної мембрани під односторонньою дією тиску. Вмонтований у мембрану методом дифузії міст Вітстона, що складається із напівпровідникових резисторів, піддається при цьому розбалансу пропорційно прикладеному тиску. У кожному напівмості опори резисторів змінюються протилежно, що обумовлено положенням останніх на кремнієвій мембрані.

З метою забезпечення можливості найбільш універсального застосування датчика чутливий елемент у ньому монтується таким чином, щоб він був захищений від сторонньої механічної та хімічної дії. Для цього корпус датчика виготовляють із нержавіючої сталі, а для ізоляції мембрани від металічного корпусу її монтується на прохідному ізоляторі, для виготовлення якого використовують боросилікатне скло «Пірекс» [2] (рис. 1).

При промисловому застосуванні датчиків тиску визначальним фактором є похибка вимірів. Стабільність метрологічних характеристик датчиків може бути забезпечена в тому випадку, коли прийом прикріплення кремнієвої мембрани до корпусу з діелектрика забезпечує мінімальні залишкові напруження в мембрані та здійснюється при температурах не більших 673 К [3]. Остання вимога направлена на збереження вихідних фізико-хімічних властивостей легованого кремнію. Тому при створенні прецизійних вузлів накладають певні обмеження на вибір способу отримання нероз'єданого з'єднання.

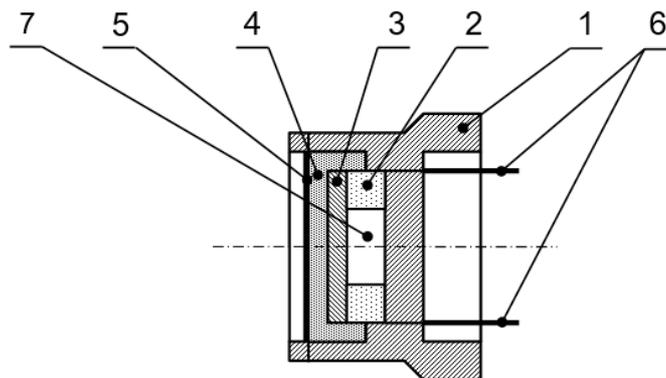


Рис. 1. Елемент датчика тиску з кремнієвим чутливим елементом [1]:
 1 – корпус із нержавіючої сталі; 2 – скляний ізолятор; 3 – мембрана (чутливий елемент); 4 – силіконове мастило; 5 – гофрована мембрана; 6 – електричні виводи;
 7 – порожнина за мембраною

Останнім часом перспективним способом з'єднання кремнію зі склом є спосіб зварювання в твердій фазі, який може здійснюватися в атмосфері повітря, при невисоких температурах, з використанням незначних зовнішніх зусиль стиснення та з прикладенням електростатичного поля високої напруги. В основу процесу покладено нагрів матеріалів, контактні поверхні яких відполіровані, та подача високої електричної напруги, причому повинна дотримуватись полярність: на кремній подається «+», а на скло «-» [4]. Виключення зовнішнього стискаючого зусилля як одного з параметрів зварювання в твердій фазі стало можливим через те, що при цьому способі зварювання виникають електростатичні сили стиснення між контактуючими поверхнями. Під дією електростатичних сил стиснення поверхні притягуються одна до одної, у результаті чого утворюється фізичний контакт. Витримка під напругою протягом певного часу сприяє збільшенню міцності зварного з'єднання завдяки проходженню через скло струму і розвитку міграційної поляризації та електрохімічних процесів в зоні зварювання [5-7].

Постановка проблеми. Як вказується в [8], всі явища, що відбуваються при зварюванні кремнію зі склом, пов'язані з рухомістю іонів натрію. Пов'язаний з іонним струмом «натрієвий ефект» призводить до протікання гетерогенних електрохімічних процесів. У результаті цих процесів в прианодній області скла, що безпосередньо прилягає до анода, залишаються некомпенсовані заряди аніонів кисню, які і беруть участь в утворенні з'єднання скла з кремнієм на основі окиснювальних процесів. Отже, при недостатньому часі зварювання не забезпечується в повному обсязі реалізація комплексу фізико-хімічних процесів, які обумовлюють утворення зварного з'єднання, яке відповідало б вимогам міцності та вакуумної щільності. З іншої сторони, при занадто довгій витримці скло-кремнієвого вузла, що зварюється, під електричною напругою може відбутися зменшення його міцності [9]. Саме тому повинен бути обґрунтованим час витримки скло-кремнієвих з'єднань під зварювальною напругою протягом процесу зварювання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У роботі [10] показана можливість візуального контролю за процесом зварювання: по різкому спаданню струму зварювання (рис. 2 [8]) та по сірому кольору, що з'являється в зоні з'єднання.

Як вказується у роботах [4; 11], чіткий взаємозв'язок між формуванням з'єднання та контрольованими параметрами зварювання дає залежність зміни струму зварювання в часі, яка визначає кількість електрики, що проходить через з'єднання.

Експеримент, що відображає формування з'єднання у часі й заповнення повітряного зазору продуктом реакції, був проведений автором [8]. Доказом наявності повітряного зазору перед зварюванням є інтерференційні смуги рівної товщини, виявлені при спостереженні збірки скла з кремнієм перед зварюванням зі сторони скла у білому світлі (рис. 3, а).

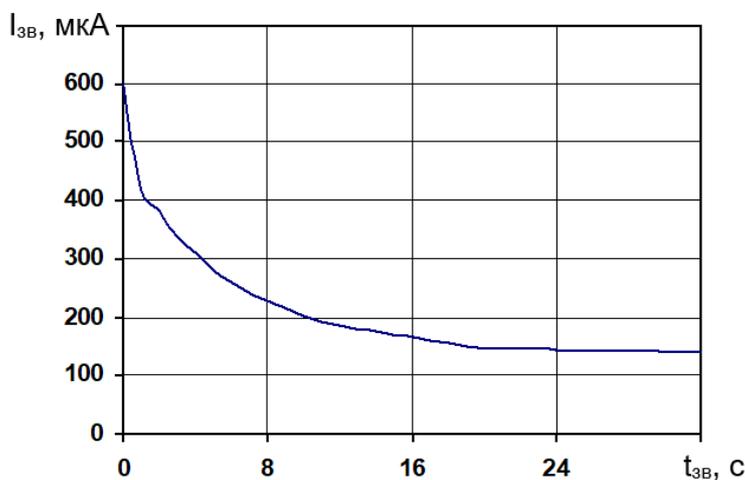


Рис. 2. Характер зміни зварювального струму в процесі зварювання [8]

При зварюванні від'ємний потенціал подавали на скло за допомогою тонкого дрітчастого електрода.

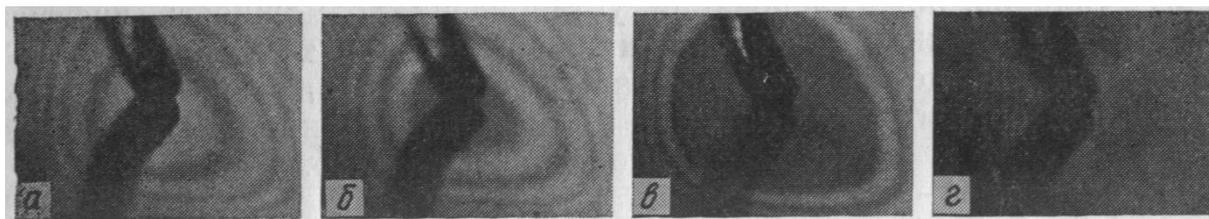


Рис. 3. Зміна інтерференційної картини в контактi скла з кремнієм у часі ($U_{зв} = 400 \text{ В}$, $T_{зв} = 673 \text{ К}$) [8]

Під дією прикладеної електричної напруги інтерференційні смуги поступово зміщувались до периферії пластинки (рис. 3, б, в), а потім повністю зникали (рис. 3, г). Після цього утворювалось однотонне сіре забарвлення в зоні з'єднання кремнію зі склом.

Автори роботи [11] вказують на те, що за отриманою кривою спадання струму зварювання у часі можна здійснювати контроль над завершеністю процесу зварювання шляхом визначення повного заряду (кількості електрики), що пройшов через з'єднання:

$$Q = \int_0^t I dt, \tag{1}$$

де Q – кількість заряду, $мкКл$;
 I – зварювальний струм, $мкА$;
 t – час зварювання, $с$.

Універсальність цієї кривої зумовлена тим, що вона не залежить від того, при яких температурі та електричній напрузі отримано з'єднання, а важливо, щоб через з'єднання в усіх випадках пройшла певна кількість електрики.

Кількісну характеристику процесу зварювання в електростатичному полі кремнію марки КЕФ-4,5/0,1 зі склом «Пірекс» дав автор роботи [4]. Для вказаної пари матеріалів питома кількість електрики складає 411 мкКл/мм^2 номінальної площі контакту. Однак проведені автором механічні випробування вузлів, через які при зварюванні пропускали

однакову кількість електрики, та оцінка отриманих результатів вказують на те, що при використанні такого способу контролю за процесом зварювання тільки 60 % від загальної кількості випробуваних вузлів відповідає нормативній міцності, що складає величину не менше 12 МПа (рис. 4).

Як вказується у роботі [12], вимога до границі міцності скла в з'єднаннях з металами не нижче 12 МПа при випробуванні на одновісний розтяг зумовлена забезпеченням вакуумної щільності зварних вузлів.

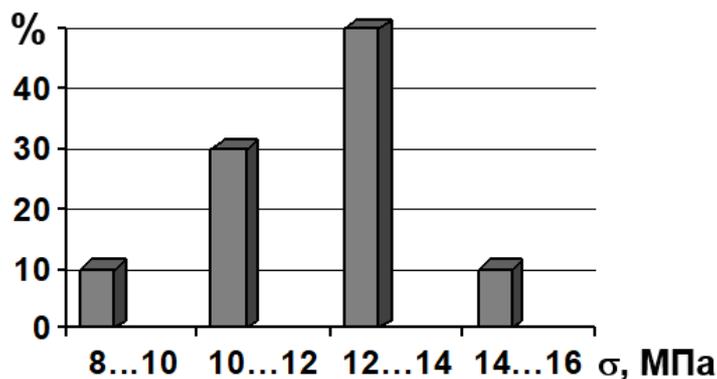


Рис. 4. Гістограма розподілу міцності зварних вузлів [4]

Автором роботи [8] була встановлена загальна тенденція впливу температури, електричної зварювальної напруги та часу зварювання на надійність з'єднань при постійному класі шорсткості поверхонь, що зварюються. За результатами механічних випробувань скло-кремнієвих вузлів показано, що збільшення процента виходу якісних вузлів з гарантованим проваром пов'язане зі збільшенням всіх трьох технологічних параметрів: температури, напруги та часу зварювання (рис. 5).

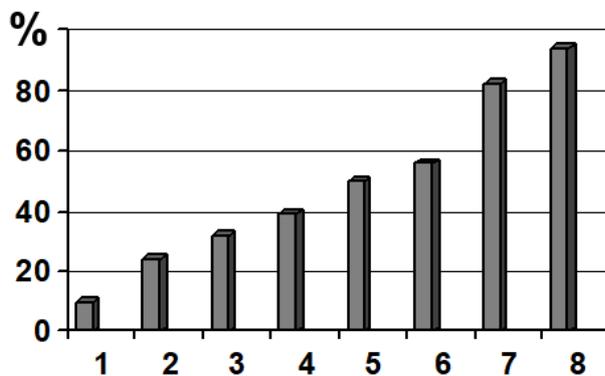


Рис. 5. Номограма кількісної залежності процента виходу якісних вузлів від режимів зварювання [8]

- 1 – $U_{зв} = 200 \text{ В}$, $t_{зв} = 1 \text{ хв}$, $T_{зв} = 623 \text{ К}$; 2 – $U_{зв} = 200 \text{ В}$, $t_{зв} = 11 \text{ хв}$, $T_{зв} = 623 \text{ К}$;
 3 – $U_{зв} = 1200 \text{ В}$, $t_{зв} = 1 \text{ хв}$, $T_{зв} = 623 \text{ К}$; 4 – $U_{зв} = 200 \text{ В}$, $t_{зв} = 1 \text{ хв}$, $T_{зв} = 723 \text{ К}$;
 5 – $U_{зв} = 1200 \text{ В}$, $t_{зв} = 11 \text{ хв}$, $T_{зв} = 623 \text{ К}$; 6 – $U_{зв} = 200 \text{ В}$, $t_{зв} = 11 \text{ хв}$, $T_{зв} = 723 \text{ К}$;
 7 – $U_{зв} = 1200 \text{ В}$, $t_{зв} = 1 \text{ хв}$, $T_{зв} = 723 \text{ К}$; 8 – $U_{зв} = 1200 \text{ В}$, $t_{зв} = 11 \text{ хв}$, $T_{зв} = 723 \text{ К}$

Тобто при постійних температурі та часі витримки виробів під електричною зварювальною напругою збільшення останньої відповідає більшому значенню струму, що проходить через виріб. Іншими словами, збільшення пікового струму зварювання на початку процесу дозволяє повною мірою реалізувати весь комплекс фізико-хімічних процесів, які відповідають за отримання якісних вузлів з гарантованим проваром за більш короткий час.

Враховуючи, що значення поверхневої провідності скла є непостійним параметром [13; 14] і залежить від площі поверхні скляних деталей, низький процентний вихід якісних вузлів можна пояснити різним характером проходження струму через них.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. У вітчизняних та закордонних джерелах відсутня інформація стосовно дослідження впливу розмірних параметрів скляних деталей з погляду їх впливу на завершеність процесу зварювання і, відповідно, на міцність скло-кремнієвих з'єднань. Лише автори роботи [15] встановили негативний вплив на міцність скла надмірної кількості електрики, яка пройшла через з'єднання, при використанні трубчастих скляних деталей з різним співвідношенням номінальної площі контакту до сумарного периметра бокових поверхонь.

Мета дослідження. Мета роботи – визначити вплив розмірних параметрів скляних деталей на завершеність процесу зварювання та на міцність скло-кремнієвих з'єднань.

Для досягнення поставленої мети вирішувались такі задачі:

- 1) визначити загальні принципи визначення завершеності процесу зварювання залежно від впливу коливань значень струму при зміні співвідношення номінальної площі контакту до сумарного периметра бокових поверхонь трубчастих скляних деталей;
- 2) дослідити характер розподілу полів залишкових напружень у з'єднаннях;
- 3) розробити рекомендації стосовно вибору розмірних параметрів скло-кремнієвих вузлів та ключових параметрів процесу зварювання.

Виклад основного матеріалу. Вказані матеріали у процесі виготовлення із них деталей піддають різній механічній, хімічній та термічній дії (шліфування, полірування, дифузійне насичення домішками, розділення на заготовки, напилення тензорезистивних схем та захисних покриттів). При цьому в структурних елементах датчиків виникають дефекти, що знижують їх механічну міцність (нааявність на поверхнях і в об'ємі елементів тріщин, подряпин, включень та неоднорідностей).

Міцність кремнієвих елементів у з'єднаннях також може різко змінитись при використанні завищених зварювальних режимів (температури зварювання та питомого тиску [16]). Зокрема, при температурі вище 673 K у кремнії під дією зовнішнього навантаження з'являється пластична деформація, і руйнівне напруження зменшується з ростом температури [17]. Тому важливим при цьому є використання у процесі зварювання не критичних зовнішніх стискаючих зусиль, а у випадку виготовлення мініатюрних виробів і повне їх виключення.

З указаних причин ми обрали максимально можливу температуру зварювання 673 K , оскільки при збільшенні температури зварювання збільшиться вихід якісних вузлів (рис. 5). Така температура зварювання не вплине на зміну початкових розмірів деталей зі скла при зварюванні, оскільки для боросилікатних стекел температура склування, тобто нижня температура розм'якшення скла, не нижча за 673 K .

Електрична напруга зварювання була обмежена допустимими щільностями струму для запобігання виникнення пропалів та непроварів у контактній зоні внаслідок розвитку електророзрядних процесів у повітряному зазорі [12]. Найбільша щільність струму не перевищувала 50 мкА/мм^2 .

Питоме зусилля стиснення відіграло роль фіксуючого й дорівнювало $0,1\text{ МПа}$. Зусилля стиснення такої величини, як показали наші експериментальні дослідження, не призводить до розтріскування кремнієвих мембран товщиною $0,15\text{ мм}$, на поверхню яких нанесені тензорезистивні схеми.

У такому випадку формування зварного з'єднання обумовлюється лише електростатичною взаємодією матеріалів та комплексом електрохімічних процесів, зумовлених проходженням через них електричного струму.

У процесі виготовлення зварних з'єднань використовувались кремнієві пластини та трубчасті скляні деталі, контактні поверхні яких були поліровані (14 клас шорсткості).

З метою виявлення впливу поверхневої провідності скляних деталей на пікові значення струму зварювання та характер зміни його у часі для зварювання кремнію зі склом були використані трубчасті скляні деталі, які мали приблизно однакову номінальну площу контакту, однакову висоту, але різну величину периметра бокових поверхонь – довжину зовнішньої та внутрішньої бокових поверхонь (партії зразків № 1 та № 2).

При умові, що в усіх випадках зварювання через з'єднання пропускали однакову кількість електрики, площа зон з'єднання відрізнялась (рис. 6).

Залежності струму зварювання відрізнялися піковими значеннями струму зварювання та процентом спадання струму зварювання у часі (табл. 1).



Рис. 6. Знімки зон з'єднання, що відповідають скляним деталям із різною величиною периметрів бокових поверхонь ($U_{зв} = 800 \text{ В}$; $Q = 4000 \text{ мкКл}$)

Встановлено, що при сталих параметрах режиму зварювання скляним зразкам із більшим сумарним периметром при незмінній висоті відповідає більше пікове значення струму зварювання, більша площа зони з'єднання, менший час зварювання та менший процент спадання струму зварювання у часі.

Розрахунок площі зони з'єднання проводили точковим методом. Якість зварних з'єднань визначалася випробуванням на відрив кремнієвої мембрани від скла. Розрахунки показали, що міцність зварного з'єднання прямо пропорційна площі зони з'єднання, якій відповідає сіре забарвлення. Руйнування з'єднань відбувалось по склу.

З отриманих результатів випливає, що метод визначення часу зварювання за питомою кількістю електрики, яка проходить через з'єднання при зварюванні, має недоліки і потребує коригування залежно від співвідношення номінальної площі контакту до сумарного периметру бокових поверхонь скляних деталей A_0/S_{Σ} .

Як вказується в роботах [4, 11], витримка скло-кремнієвого вузла під електричною напругою протягом певного часу забезпечує проходження через з'єднання певної кількості електрики, яка має розмірність Кл або $\text{мкА}\cdot\text{с}$. Протягом процесу зварювання відбувається доставка атомів та іонів із скла силами електричного поля до поверхні кремнію, відбуваються процеси фізичної та хімічної адсорбції, протікають процеси іонної міграції іонів кисню в об'єм оксиду. Заключними процесами є взаємодія активованих іонів кисню з іонами кремнію та ріст зв'язуючого оксидного продукту.

Таблиця 1 – Результати дослідження зон з'єднання при зварюванні кремнію зі скляними деталями із різним сумарним периметром бокових поверхонь

Партії зразків	№ 1	№ 2
Номинальна площа A_0 , мм ²	20,28	20,49
Периметр зовнішній S_z , мм	22,61	19,63
Периметр внутрішній $S_в$, мм	16,01	11,30
Сумарний периметр S_Σ , мм	38,62	30,93
Відношення A_0/S_Σ , мм	0,53	0,66
Пікове значення струму $I_{пик}$, мкА	830	760
Кількість електрики, що пройшла через з'єднання при зварюванні Q , мкКл	4000	4000
Процент спадання струму у часі, % _{с.с.}	65	74
Час зварювання $t_{зв}$, с	15	20
Площа зони з'єднання A_z , мм ²	15,17	9,92
Міцність з'єднань $\sigma_в$, МПа	9,5	6,15

Відповідно до [4] об'єм зв'язуючого продукту в повітряному зазорі можна визначити таким чином:

$$V_{nz} = \frac{QM}{4F\rho}, \quad (2)$$

де Q – кількість електрики, що проходить через з'єднання, Кл;
 M – молекулярна маса діоксиду кремнію ($M_{SiO_2} = 60$ г/моль);
 F – число Фарадея ($9,648531 \cdot 10^4$ Кл);
 ρ – густина діоксиду кремнію ($2,21 \cdot 10^{-3}$ г/мм³).

Експерименти, наведені в табл. 1, вказують на те, що у випадку збільшення пікового значення струму при проходженні однакової кількості електрики ми маємо утворення з'єднання по більшій частині номінальної площі контакту поверхонь (рис. 6). Оскільки при проходженні однакової кількості електрики об'єм зв'язуючого продукту в усіх випадках однаковий, більша площа зони з'єднання пояснюється більшим зближенням поверхонь під дією електростатичних сил стиснення та, відповідно, меншим об'ємом зазору між контактуючими поверхнями.

Експериментальним шляхом визначено часові залежності тривалості зварювання кремнію марки КЕФ-4,5/0,1 зі склом «Пірекс» у межах пікових значень щільностей струму зварювання від 10 мкА/мм² до 50 мкА/мм². Оцінка якості скло-кремнієвих з'єднань здійснювалась за допомогою оптичної мікроскопії (за 100%-вою наявністю провару в контактній зоні) та за результатами механічних випробувань методом відриву кремнієвої мембрани від скла (при руйнуванні по склу з границею міцності не менше 12 МПа або при руйнуванні по склу та кремнію). Залежність часу зварювання $t_{зв}$ у секундах від значення $j_{пик}(x)$ апроксимована в поліноміальну функцію четвертого ступеня:

$$t_{зв} = -4 \cdot 10^{-5} x^4 + 0,0067 x^3 - 0,1733 x^2 - 24,734 x + 1156. \quad (3)$$

Оскільки призначення та конструкція датчиків різноманітна, в подальших дослідженнях використовувалися трубчасті скляні деталі, які мали однакову висоту, але різне відношення A_0/S_Σ . Результати механічних випробувань на відрив кремнію від скла наведені в табл. 2.

Результати механічних випробувань показали, що при збільшенні величини відношення A_0/S_Σ трубчатих скляних деталей пікове значення щільності струму знижується, кількість електрики, необхідна для утворення якісного з'єднання, збільшується, а при руйнуванні по склу зафіксована менша міцність. Причому випадків, коли руйнування зразків відбувалось із частковими виривами по кремнію, зафіксовано також більше при збільшенні відношення A_0/S_Σ .

Таблиця 2 – Результати механічних випробувань скло-кремнієвих вузлів

Партії зразків	№ 3	№ 4	№ 5
Кількість випробуваних зразків	50	50	50
Номинальна площа контакту $A_0, \text{мм}^2$	15,71	25,45	35,73
Сумарна довжина бокової поверхні скла $S_{\Sigma}, \text{мм}$	31,40	33,91	34,85
Відношення $A_0/S_{\Sigma}, \text{мм}$	0,50	0,75	1,02
Пікове значення щільності струму $j_{\text{пик}}, \text{мкА/мм}^2$ ($U_{\text{зв}} = 1200 \text{ В}$)	38,2	37,5	36,9
Час зварювання $t_{\text{зв}}, \text{с}$	247	259	270
Кількість електрики, що пройшла через з'єднання при зварюванні $Q, \text{мкВл}$	3,86	6,48	9,30
Середнє значення міцності зразків, міцність яких перевищувала $12 \text{ МПа } \sigma, \text{МПа}$	14,1	13,3	12,7
% зразків, які мали міцність нижче 12 МПа	12	19	28

Утворення тріщин у кристалі кремнію при експлуатації, а в нашому випадку – наявність часткових виривів по кремнію при механічних випробуваннях скло-кремнієвих зразків, пояснюється наявністю залишкових внутрішніх напружень у кристалі.

Тому було досліджено характер розподілу полів залишкових напружень в скло-кремнієвих з'єднаннях. Аналіз напруженого стану в з'єднаннях проведено з використанням розрахункової платформи ANSYS Workbench 2025 R2.

Розрахункова схема зварного скло-кремнієвого вузла представлена на рис. 7.

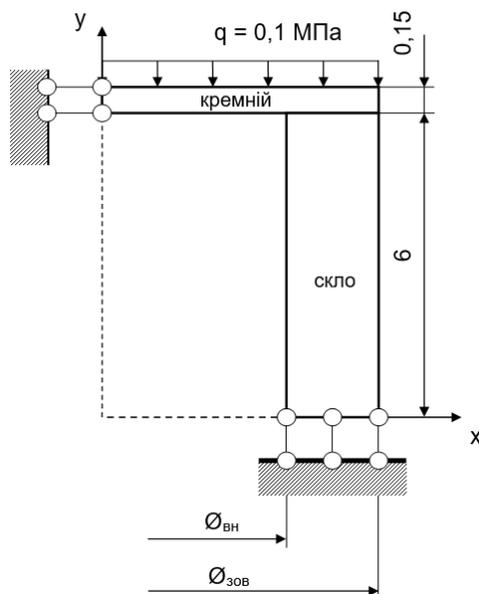


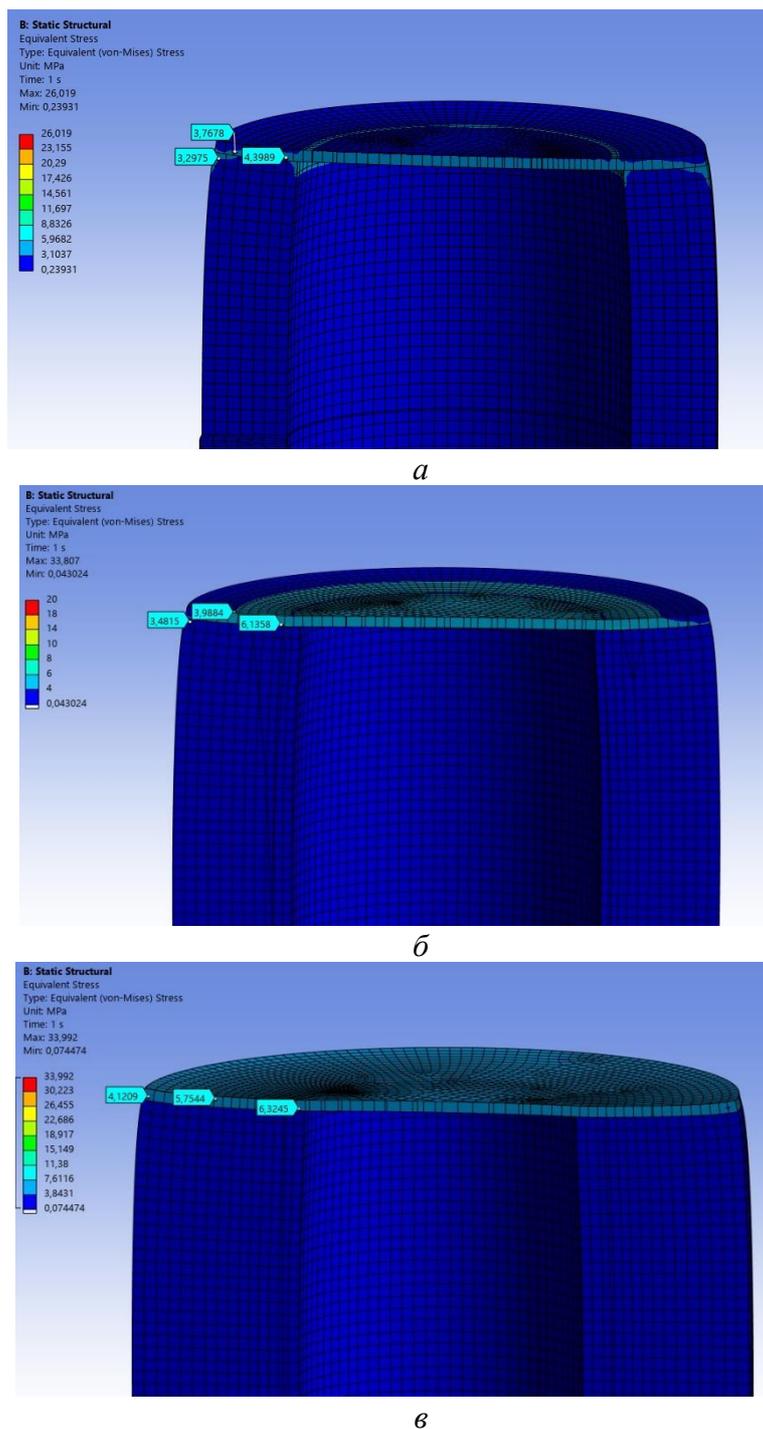
Рис. 7. Розрахункова схема скло-кремнієвого вузла

Розрахункові параметри скляних деталей наведені в табл. 3.

Таблиця 3 – Розрахункові параметри скляних деталей для оцінки напруженого стану

Партії зразків	№ 3	№ 4	№ 5
$\varnothing_{\text{вн}}, \text{мм}$	4,0	3,9	3,5
$\varnothing_{\text{зов}}, \text{мм}$	6,0	6,9	7,6

Розподілення еквівалентних залишкових напружень у вузлах зображені на рис. 8.

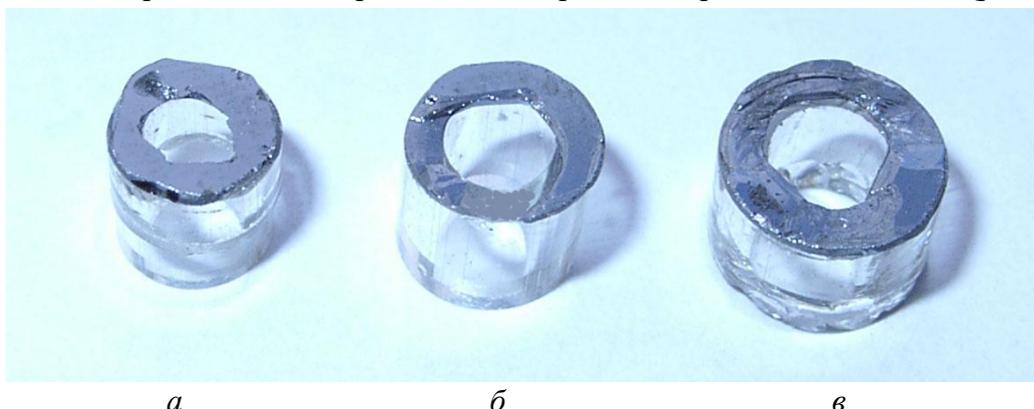


$a - A_0/S_{\Sigma} = 0,50 \text{ мм}; \text{ б} - A_0/S_{\Sigma} = 0,75 \text{ мм}; \text{ в} - A_0/S_{\Sigma} = 1,02 \text{ мм}$

Рис. 8. Розподілення напружень в скло-кремнієвих вузлах залежно від величини A_0/S_{Σ}

Неметалеві матеріали значно гірше витримують розтягуючі напруження [18], тому критерієм для оцінки напруженого стану вузлів була величина еквівалентних розтягуючих напружень. Із представлених вище рисунків видно, що при збільшенні відношення номінальної площі контакту деталей до сумарного периметра бокових поверхнь трубчастої скляної деталі A_0/S_{Σ} еквівалентні розтягуючі напруження зростають.

Підтвердження результатів аналізу напруженого стану отримано при механічних випробуваннях зварних скло-кремнієвих вузлів, в яких товщина кремнієвої мембрани була рівна 0,15 мм, на продавлювання кремнієвої мембрани зі сторони скляної деталі (рис. 8).



a – $A_0/S_\Sigma = 0,50$ мм; *б* – $A_0/S_\Sigma = 0,75$ мм; *в* – $A_0/S_\Sigma = 1,02$ мм

Рис. 8. Руйнування кремнієвих мембран в скло-кремнієвих вузлах залежно від величини A_0/S_Σ

При збільшенні відношення A_0/S_Σ скляних деталей руйнування кремнієвих мембран супроводжувалося збільшенням розшарування по площині мембрани.

Висновки. Розроблено новий принцип визначення оптимального часу зварювання в твердій фазі в електростатичному полі кремнію зі склом, що дозволяє підвищити стабільність якості зварних скло-кремнієвих з'єднань шляхом врахування зміни електричного опору скляних деталей з різними геометричними параметрами та наявності у них поверхневої провідності.

Для підвищення міцності скла в з'єднаннях процес зварювання необхідно проводити з прикладенням максимально можливого рівня електричної зварювальної напруги, обмеженої величиною напруги перекриття скла, щільність струму не повинна перевищувати 50 мкА/мм².

Для зменшення залишкових напружень з метою підвищення опору руйнуванню необхідно так конструювати скло-кремнієві вузли напівпровідникових датчиків, щоб відношення номінальної площі контакту деталей до сумарного периметра бокових поверхонь трубчастої скляної деталі мало мінімальне значення.

Список використаних джерел

1. Kistler Instrumente AG. (1987). *Measurement with crystals: Piezoresistive instruments for measuring static and dynamic pressure*. Kistler Instrumente AG.
2. Хоменко, Н. Н., Задорожний, Ю. Г., Ковтун, С. И., Гнатюк, О. В., Матвеев, А. К., Логинова, А. С., & Саблин, А. В. (1984). *Полупроводниковый преобразователь давления* [Авторське свідоцтво СРСР № 106388]. Державний комітет СРСР у справах винаходів і відкриттів.
3. Моряков, О. С. (1982). *Сварка и пайка в полупроводниковом производстве*. Высш. школа.
4. Хоменко, Н. Н. (1997). *Научные и технологические основы электрохимической сварки в твердой фазе кристаллических материалов с ионопроводящими стеклами* [Докторська дисертація]. Київ.
5. Хоменко, Н. Н. (1982). Использование свойств стекла в процессе соединения его с кремнием во внешнем электрическом поле. *Электронная техника, сер. 6*, 2(162), 61-64.
6. Хоменко, Н. Н. (1986). Исследование поляризации стекол при их сварке с кремнием в электрическом поле. *Электронная техника, сер. 6*, 1(212), 60-62.
7. Орешкин, П. Т. (1997). *Физика полупроводников и диэлектриков*. Высш. школа.
8. Хоменко, Н. Н. (1985). *Технология и оборудование получения сварно-паяных соединений кремния и когара со стеклом* [Кандидатська дисертація]. Чернігів.
9. Шлифер, С. Э., Ковшиков, Е. К., & Браун, А. Г. (1990). Влияние циклического нагружения на режимы и свойства диффузионной сварки в электростатическом поле полупроводников со стеклами. *Сварочное производство*, 5, 33-35.

10. Wallis, G. & Pomerantz, D. (1969). Field Assisted Glass-Metal Sealing. *Journal Applied Physics*, 40 (10), 3946-3949.
11. Таиров, В., Озолс, А., & Пшелко, Н. (1989). *Физические основы, расчет и применение необратимого электроадгезионного соединения твердых тел*. Ин-т орган. синтеза АН Латв. ССР.
12. Березин, Л. Я. (1990). *Технология и оборудование для получения вакуумплотных соединений узлов газоразрядного прибора* [Кандидатська дисертація]. Чернігів.
13. Stevels, J.M. (1957). *The Electrical Properties of Glass*. Handbuch der PhysikK.
14. Лосик, М. В., & Звір, О. М. (2018). *Технологічні та фізико-хімічні властивості скла: Навчальний посібник*. Львівська національна академія мистецтв.
15. Харченко, Г. К., Олексієнко, С. В., & Ганєєв, Т. Р. (2005). Аналіз міцності скло-кремнієвих з'єднань, отриманих зварюванням в твердій фазі в електростатичному полі. *Вісник Чернігівського державного технологічного університету*, 25, 100-105.
16. Россошинский, А. А., Гавриленко, И. С. (1968). Образование трещин в монокристаллах кремния при сварке полупроводниковых приборов. *Электронная техника*, 10 (1), 40-43.
17. Жога, Л. В., Степанов, В. А., & Шпайзман, В. В. (1976). Хрупкое разрушение монокристаллов кремния. *Физика и электроника твердого тела*, 75-81.
18. Бачин, В. А. (1986). *Диффузионная сварка стекла и керамики с металлами*. Машиностроение.

References

1. *Measurement with crystals. Piezoresistive instruments for measuring static and dynamic pressure* (1987). Kistler Instrumente AG.
2. Khomenko, N. N., Zadorozhnyi, Yu. H., Kovtun, S. I., Hnatiuk, O. V., Matveev, A. K., Lohynova, A. S., & Sablyn, A. V. (1984). Poluprovodnykovyi preobrazovatel davleniya [Semiconductor pressure transducer] [Avtorske svidotstvo SRSR № 106388]. [Author's certificate of the USSR No. 106388] Derzhavnyi komitet SRSR u spravakh vynakhodiv i vidkryttiv- Derzhavnyi komitet SRSR u spravakh vynakhodiv i vidkryttiv.
3. Moriaikov, O. (1982). Svarka i paika v poluprovodnikovom proizvodstve [Welding and soldering in semi-conductor production]. Vyshaya shkola.
4. Khomenko, N. (1997). Nauchnyie i tekhnologicheskiiie osnovy svarki v tverdoj faze kristalicheskikh materialov s ionoprovodiashchimi steklami [Scientific and technological foundations of electrochemical welding in the solid phase of crystalline materials with ion-conducting glasses]. [Doctor's thesis, Kyiv].
5. Khomenko, N.N. (1982). Ispolzovanie svoistv stekla v protsesse soedyneniya eho s kremnyem vo vneshnem elektrycheskom pole. [Utilising the properties of glass in the process of combining it with silicon in an external electric field.] *Elektronnaiia tekhnika, ser. 6, 2(162), 61-64.- Electronic Technology, vol. 6, 2(162), 61-64*
6. Khomenko, N. (1986). Issledovanie polarizatsii stekol pri ikh svarke s kremniyem v elektricheskom pole [A study of the polarization of glasses when they are welded to silicon in an electric field.]. *Elektronnaya tekhnika, Ser. 6, Vol. 1 (212), (p. 60-62) - Electronic Technology, Ser. 6, Vol. 1 (212), (p. 60-62)*
7. Oreshkin, P. (1997). *Fizika poluprovodnikov i dielektrikov [Physics of semiconductors and dielectrics]*. Vyshaya shkola.
8. Khomenko, N. (1985). *Tekhnologiya i oborudovaniie polucheniiia svarno-payanykh soedineniy kremniya i kovara so steklom [Technology and equipment for obtaining welded-soldered joints of silicon and covar with glass]*. [Candidate's thesis, Chernihiv].
9. Shlifer, S., Kovshikov, Ye., & Braun, A. (1990). Vliyanie tsyklicheskogo nagruzheniya na rezhymy i svoystva diffuzionnoy svarki v elektrostatischeckom pole poluprovodnikov so steklami [Influence of cyclic loading on modes and properties of diffusion welding in electrostatic field of semiconductors with glasses]. *Svarochnoe proizvodstvo – Welding process*, 5, 33-35.
10. Wallis, G. & Pomerantz, D. (1969). Field Assisted Glass-Metal Sealing. *Journal Applied Physics*, 40(10), 3946-3949.
11. Tairov, V., Ozols, A., & Pshchelko, N. (1989). *Fizicheskie osnovy, raschet i primeneniie neobratimogo elektroadgезionnogo soedinenia tverdykh tel [Physical basis, calculation and application of irreversible electroadhesive compound of solid bodies]*. Institut organicheskokogo sinteza AN Latv. SSR.
12. Berezin, L. Ya. Л. Я. (1990). *Tekhnologiya i oborudovaniie dlya polucheniiia vakuumplootnykh soedineniy uzlov gazorazryadnogo pribora [Technology and equipment for vacuum-tight connections of gas-discharge device assemblies]* [Candidate's thesis, Chernihiv].

13. Stevels, J.M. (1957). *The Electrical Properties of Glass*. Handbuch der Physik.
14. Losik, M. V., & Zvir, O. M. (2018). *Tekhnolohichni ta fizyko-khimichni vlastyvoli skla [Technological and physicochemical properties of glass]*. LNAM.
15. Kharchenko, H. K., Oleksiienko, S. V., & Hanieiev, T. R. (2005). Analiz mitsnosti sklo-kremniievkykh ziednan, otrymanykh zvariuvanniam v tverdii fazi v elektrostatychnomu poli [Strength analysis of glass-silicon compounds obtained by solid-phase welding in an electrostatic field]. *Visnyk Chernihivskoho derzhavnogo tekhnolohichnoho universytetu – Journal of Chernihiv Polytechnic National University*, 25, 100-105.
16. Rossoshynskiy, A. A., & Gavrilenko, I. S. (1968). Obrazovaniye treshchin v monokristalakh kremniya pri svarke poluprovodnikovyykh priborov. [Formation of cracks in silicon monocrystals during welding of semiconductor devices]. *Elektronnaya tekhnika - Electrotechnik*, Vol. 1, 40-43.
17. Ghoga, L., Stepanov, V., & Shpaizman V. (1976). Khrupkoie razrushenie monokristallov kremniya [Brittle fracture of silicon monocrystals]. *Fizika i elektronika tverdogo tela. – Phisic and electronic of the solid matter*, 1, 75-81.
18. Bachin, V. (1986). *Diffuzionnaya svarka stekla i keramiki s metallami [Diffusion welding of glass and ceramics with metals]*. *Mashinostroenie – Machine building*.

Дата першого надходження статті до видання: 08.10.2025
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 25.11.2025

UDC 621.792.6:004.94

Serhii Oleksiienko¹, Svitlana Yushchenko², Mykhailo Rudenko³

¹PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Welding Technologies and Construction Department Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: sv.oleks@stu.cn.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5475-4439>
ResearcherID: [F-8197-2014](https://orcid.org/0000-0001-5475-4439). SCOPUS Author ID: [57190370561](https://orcid.org/0000-0001-5475-4439)

²PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Welding Technologies and Construction Department Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: rasssveta@stu.cn.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0863-9020>
ResearcherID: [F-7741-2014](https://orcid.org/0000-0003-0863-9020). SCOPUS Author ID: [57190373626](https://orcid.org/0000-0003-0863-9020)

³Senior Lecturer of Welding Technologies and Construction Department Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: m.rudenko@stu.cn.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9542-7792>
ResearcherID: [G-6235-2014](https://orcid.org/0000-0001-9542-7792). SCOPUS Author ID: [57190378153](https://orcid.org/0000-0001-9542-7792)

DESIGNING OF GLASS-SILICON NODES OF PRESSURE SENSORS AND INFLUNCE OF THEIR DIMENTIONAL PARAMETERS ON FRACTURE RESISTANCE

A promising method of joining silicon with glass is the solid phase welding method that can be carried out in an air atmosphere, at low temperatures, using insignificant external compression forces and with the application of an electrostatic field of high voltage. The widespread use of the method limits a significant drawback – the instability of the quality indicators of welded joints, the main of which is mechanical strength. Primarily this is due to the imperfection of the methods for determining the welding time, during which it is possible to obtain welded joints with a given level of service properties.

The influence of the dimensional parameters of glass parts and the presence of surface conductivity in them on the course of the welding process is been determined. It is shown that the welding time required to ensure the connection of KEF-4.5/0.1 silicon with Pyrex glass along the entire contact plane is determined by the peak value of the welding current at the moment of applying the electric welding voltage. The corresponding functional dependencies have been obtained for the first time.

The influence of geometrical parameters of welded parts on strength of glass-silicon nodes is been investigated. The results of the experiments showed that with an increase in the ratio of the nominal contact area of the parts to the total perimeter of the side surfaces of the tubular glass part from 0.5 to 1.02 mm²/mm, the welding time increases.

Computer simulation of the stress state in the nodes has been carried out. It has been found that in order to improve the performance of welded glass-silicon units by reducing the level of residual stresses, they must be designed so that the ratio of the nominal contact area of the parts to the total perimeter of the side surfaces of the tubular glass part is minimal.

Keywords: glass; silicon; welding; designing; residual stresses; strength.

Fig.: 8. References: 18.