

УДК 620.190; 67.017; 681.7.024

В. П. Маслов

ЗАКОНОМІРНОСТІ ПОВЕДІНКИ ТОЧНОСТІ ОПТИЧНИХ ПРИЗМ ЗОВНІШНЬОГО ВІДБИТТЯ

Встановлено, що клейові з'єднання з мікро- та нанодомішками забезпечують довготривалу міцність та стабільність точнісних параметрів дзеркальних призм і можуть конкурувати з прецизійними дифузійними нано з'єднаннями. На прикладі дзеркальних призм зовнішнього відбиття виявлена загальна закономірність поведінки похибки після дії технологічних та екстремальних факторів, яка відповідає зворотній експоненціальній залежності від часу. Припущено, що це зменшення пов'язане з зворотною мікроповзучістю під дією накопичених внутрішніх напружень.

Ключові слова: клейові з'єднання, нанонаповнювачі, дзеркальні призми, склокераміка.

Вступ

Працездатність приладу і точність вимірювань визначаються рядом факторів, у тому числі, стабільністю взаємного положення оптичних деталей і працездатністю електронного блоку. Для дзеркальних призм зовнішнього відбиття точність взаємного положення окремих частин може складати 10 кут. сек. Для таких прецизійних деталей використовують матеріали з мінімальними значеннями коефіцієнту термічного розширення для зменшення впливу температурного фактору на похибки кута дзеркальної призми. Одним з найцікавіших матеріалів для цього є склокераміка Zerodur (Schott, Німеччина) або російський аналог – сітал СО 115М (ЛЗОС, Росія), які мають практично нульовий коефіцієнт термічного розширення.

Для з'єднання окремих деталей при виробництві таких призм використовують клейові методи з'єднання, а для отримання найменших похибок — дифузійні з'єднання[1].

Мета роботи — дослідити загальні закономірності поведінки похибки взаємного положення оптичних деталей зі склокераміки СО 115М після їх з'єднання в прецизійні призми зовнішнього відбиття.

В результаті проведених досліджень була обрана така оптимальна схема технології спікання полірованих деталей (ТСПД) у прецизійні призми, в якій були використані нанорозмірні покриття алюмінію для забезпечення можливості дифузійного з'єднання при температурі, не більше 600 °С:

1. полірування поверхонь, що з'єднуються, за традиційною технологією оптичного виробництва ($N = 5 \div 1$; $\Delta N = 0,5$), але за вимогами, що суттєво спрощуються в порівнянні з ОК і ГОК ($N = 1 \div 0,5$; $\Delta N = 0,1$);

2. нанесення у вакуумі покриття, що містить алюміній (100–200 нм) для дифузійної взаємодії і для компенсації можливих геометричних невідповідностей двох поверхонь, що з'єднуються (у межах $N = 3 \div 1$). З метою збільшення адгезійної активності матеріалу з'єднувального шва було запропоновано [2] перед нанесенням алюмінієвого шару на поліровану поверхню деталі наносити попередньо шар титану (товщина 50–100 нм). Таким чином, з'єднувальний шов являв собою систему із двох шарів Ti та Al.

3. позиціонування і контактування поверхонь, що з'єднуються;
4. термообробка при температурі 400–600 °С протягом 20 хв.;
5. контроль якості з'єднання.

Оскільки утворення нових аморфної або кристалічної фаз Al_2O_3 і кремнію відбувається при температурі 400–600 °С, то при охолодженні до кімнатної температури в деталях з склокераміки повинні виникати внутрішні напруження. У зв'язку з цим особливу увагу було приділено цьому питанню.

Методика експерименту

Для дослідження впливу технологій та зовнішніх умов, в тому числі екстремальних, на поведінку похибок дзеркальних призм з кутом відбивання 90° із окремих пластин, виготовлених за технологічною схемою (рис. 1) оптичного виробництва.

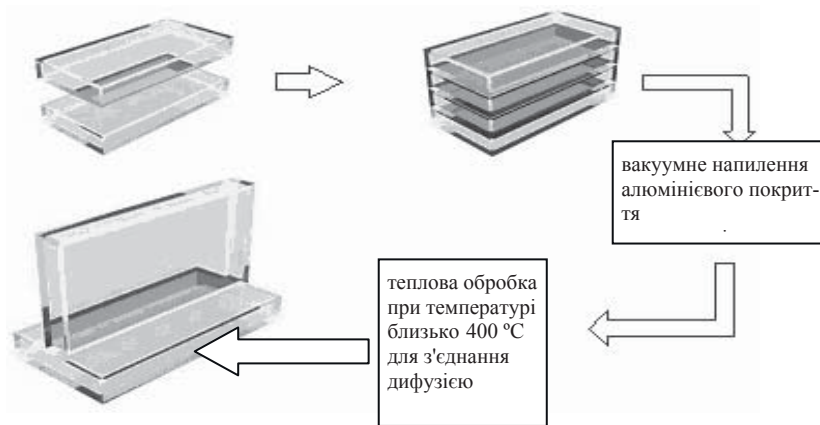


Рис. 1. Технологія виготовлення призм

Зовнішній вигляд виготовлених призм показано на рис. 2.

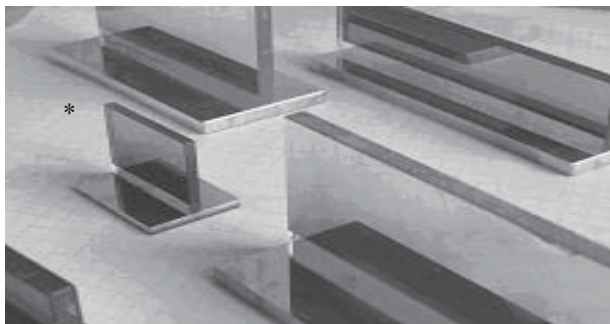


Рис. 2. Зовнішній вигляд призм $200 \times 100 \times 10$ мм і призми з позначкою *, яка мала розміри $100 \times 50 \times 5$ мм

Розроблений виробничий процес [2] дозволяє робити дзеркальні призми з точністю, визначеною точністю виробництва їхніх компонентів. У нашому випадку кут $90^\circ \pm 10''$ між торцем та площиною кожної пластини забезпечує практично таку ж точність на дзеркальних призмах після з'єднання. Для порівняння, крім дифузійного з'єднання було виконано також клейові з'єднання на основі розробленої клейової композиції на основі кремній-органічної смоли та наповнювачів [3].

Дослідження внутрішніх напружень у пластинах склокераміки, з'єднаних за розробленою технологією, проводили на установці з використанням методу поляризаційно-модуляційної спектроскопії [4].

Як відомо, еліптична поляризація є результатом складання лінійної і циркулярної складових поляризованого світла. Інтенсивність світла циркулярної складової (так само як і лінійної) пропорційна величині напружень. Введений в схему поляризаційний модулятор, дозволив окремо реєструвати інтенсивність світла циркулярної або лінійної складової еліптично поляризованого світла. Таким чином, скануючи зразок лазерним променем і реєструючи при цьому інтенсивність циркулярно поляризованого світла, можна реєструвати розподіл внутрішніх напружень уздовж лінії сканування.

Стабільність взаємного положення прецизійних дзеркальних призм 90° , з'єднаних за ТСПД-технологією та клейовими методами, проводили протягом двох років у головній метрологічній організації України — Науково-виробничому інституті метрологічного забезпечення вимірювань геометричних, механічних і віброакустичних величин Укрметртестстандарту протягом 20 місяців. Проводили 5 етапів вимірювань: на першому етапі після виготовлення деталі проходили п'ятикратний термічний удар рідким азотом і нагрівання до плюс 400°C (витримка 1 год при 400°C); на другому етапі зразки проходили подвійний механічний удар 100g і 300g; на наступних етапах досліджували стабільність кутового положення частин деталей при зберіганні в нормальних умовах. Вимірювання проводили на ганіометрі ГС-1. Похибка вимірювань дорівнювала 1 кут. сек.

Результати досліджень наявності внутрішніх мікронапружень та їх вплив на поведінку технологічної похибки взаємного положення оптичних деталей після їх з'єднання в прецизійні призми зовнішнього відбиття

Типовий розподіл експериментально визначених напружень уздовж лінії сканування зразка склокераміки, з'єданого ТСПД- та клейовими методами показаний на рис. 3. Лінія сканування проходила паралельно площині з'єднання, яка на малюнку заштрихована.

Дослідження характеру цих напружень показало, що зразок поблизу країв розтягнутий, а в центрі — стиснутий. Такий розподіл не суперечить загальним фізичним уявленням, тому що поблизу поверхні зразок розтягнутий силами поверхневого натягу та силами, які виникають при з'єднанні (від усадки матеріалу, який з'єднує деталі).

Становило інтерес дослідити вплив довготривалого зберігання та екстремальних умов на міцність і точність взаємного положення з'єднаних деталей.

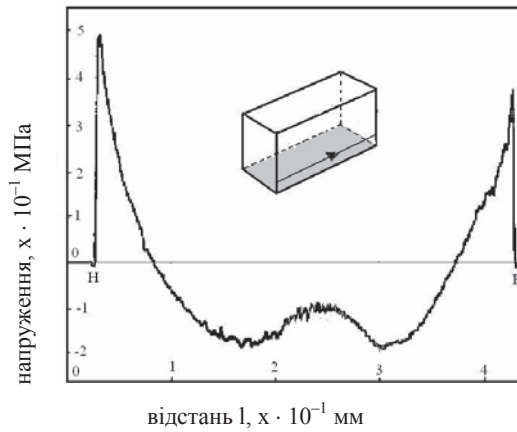


Рис. 3. Типовий розподіл напружень у склокристалічній пластині дзеркальної призми, лінія сканування паралельна площині з'єднувального шва (ТСПД-з'єднання)

Залежно від місця розташування досліджуваної ділянки з'єднувального шва на зразку рівень міцності коливається (крайові зони — менше; зони, розташовані на 15–20 мм від краю — вище) у діапазоні від 14 МПа до 20 МПа, що відповідало розподілу внутрішніх напружень, виміряних поляризаційно-модуляційним способом. Тобто середня частина, що була у стиснутому стані мала вищу міцність в порівнянні з краями, що були в розтягнутому стані. Крім того, було встановлено, що міцність цього з'єднання трохи зростає при криогенних температурах (рис. 4, крива 7,) і для оптимального складу клейових композицій дорівнювала міцності дифузійного з'єднання.

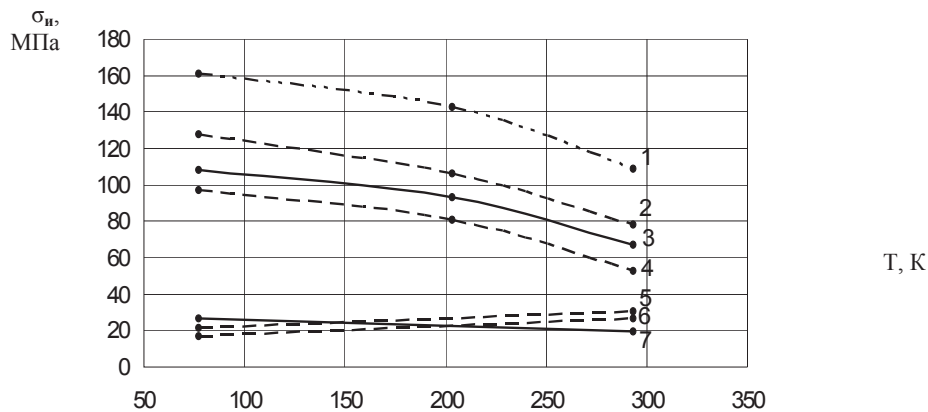


Рис. 4. Залежність міцності на вигин склокераміки і її з'єднань при знижених температурах. Зразки випробовували після річної витримки в нормальних кліматичних умовах: 1 — міцність хімічно зміцнених монолітних зразків; 2, 3 і 4 — верхня, середня та нижня границі міцності вихідних монолітних шліфованих зразків; 5, 6 — міцність свіжовироблених клейових з'єднань (епоксидний компаунд К-400 із мікро та нанонаповнювачем оптимального складу); 7 — міцність ТСПД-наноз'єднання після річної витримки в кліматичних умовах

Відомо, що всі типові оптичні деталі мають периферійну фаску, яка захищає деталь від сколів при її обробці. Тому позитивним фактором для клейових з'єднань є не лише економічна ефективність, пов'язана з суттєво меншою трудомісткістю цієї технології, але й з тим, що надлишок клею вихо-

дить на периферію площини з'єднання і захищає кутовий концентратор напружень, що створюється двома (або однією в залежності від конкретної конструкції вузла з'єднання) фасками деталей, які з'єднуються між собою. Це дозволяє зменшити коефіцієнт напружень при механічних або теплових (особливо екстремальних) навантаженнях на вузол з'єднання.

Дослідження впливу екстремальних криогенних температур дозволило встановити наступне.

При 77 К підвищення міцності склало в середньому 40%. Більш міцні у звичайних умовах клейові з'єднання зразків, вирізаних із цього блоку, показали зменшення міцності на вигин на 30–40% при температурі 77 К (криві 5 і 6). Міцність шліфованих зразків монолітної склокераміки після цих впливів і додаткової хімічної обробки (крива 1) підвищилася в порівнянні з вихідним шліфованим станом (крива 3) з 67 МПа до 109 МПа. При зниженні температури до 77 К міцність з'єднання зростала на 47% відносно даних для нормальних умов і граничні напруження досягли 160 МПа.

Результати досліджень стабільності взаємного положення прецизійних дзеркальних призм 90° збірної конструкції що проводили у головній метрологічній організації України — Науково-виробничому інституті метрологічного забезпечення вимірювань геометричних, механічних і віброакустичних величин Укрметртестстандарту протягом 20 місяців, показали:

- для дзеркальних призм 90° помилка, яка виникла від технологічних факторів виготовлення призм, становила від 0 до 8,5 кут.сек.;
- вплив екстремальних умов (охолодження до температури рідкого азоту) приводить до зміни взаємного положення від 0,2 кут. сек. до 8,3 кут. сек.;

- при зберіганні призм у нормальних умовах після дії екстремальних умов відхилення взаємного положення не перевищувало 6 кут.сек. Для кращого зразка № 1 (зразок № 1 на рис. 1, позначений зірочкою з найменшими габаритними розмірами) — 1 кут. сек., що дорівнює похибці вимірів.

Клейові композиції показали дещо гірші значення 10–20 кут. сек., що було пов'язано з неможливістю зменшити шар клею до 10 нм та його різнотовщинністю (клиноподібністю).

Для всіх типів з'єднання (дифузійних з товщиною шва 100 нм, клейових з'єднань з товщиною шва 10 мкм) була встановлена загальна залежність поведінки технологічної похибки від часу (часу експлуатації та після дії екстремального фактору), яка показала зворотну експоненціальну залежність зменшення похибки від часу (рис. 5).

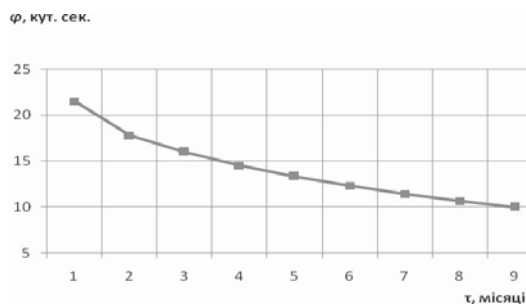


Рис. 5. Узагальнений вигляд поведінки технологічної похибки та похибки після дії екстремальних факторів дзеркальних призм зовнішнього відбивання

Така залежність може бути узагальнена формулою:

$$\gamma = \frac{A \times \frac{\alpha}{e^{0,5\tau}} + B \times \beta}{\tau}, \quad (1)$$

де $A = 4$, $B = 12000$ — отримані експериментально, τ — час, α , β — коефіцієнти, які залежать від конкретного матеріалу дзеркальних призм, для склокераміки СО 115М $\alpha = 0,4810^{-6} 1/l_n$, τ — місяці, $\beta = 0,5$.

Попередні дослідження впливу пружних механічних напружень при довготривалій експозиції при кімнатних температурах показали, що для скла та склокристалічних матеріалів має місце логарифмічна мікроповзучість, тобто незворотні зміни лінійних розмірів в мікро- та нанодіапазонах, яка відповідає залежності (2).

$$\gamma = \alpha \cdot \ln(\tau) + \beta, \quad (2)$$

де τ — час, α , β — коефіцієнти з рівняння логарифмічної повзучості склокераміки СО 115 М. α , β з експерименту були знайдені $\alpha = 0,4810^{-6} 1/l_n$, τ — години, $\beta = 0,5$.

Узагальнення експериментальних результатів дозволяє з достатньою долею імовірності припустити, що зменшення величини похибки (рис. 6) дзеркальних призм із склокераміки СО 115М пов'язане із зворотною мікроповзучістю під дією накопичених внутрішніх напружень.

Висновки

Оптимальні склади клейових композицій з мікро- та нанодомішками забезпечують довготривалу міцність та стабільність точнісних параметрів дзеркальних призм при довготривалій експлуатації та зберіганні і може конкурувати з прецизійними дифузійними наноз'єднаннями.

На прикладі дзеркальних призм зовнішнього відбиття, виконаних з склокераміки з практично нульовим коефіцієнтом лінійного розширення виявлена загальна закономірність поведінки похибки після дії технологічних та екстремальних факторів, яка відповідає зворотній експоненціальній залежності зменшення похибки від часу. Припущено, що зменшення величини похибки дзеркальних призм із склокераміки СО 115М пов'язане з зворотною мікроповзучістю під дією накопичених внутрішніх напружень.

Установлено, что клеевые соединения с микро-и нанонаполнителями обеспечивают длительную прочность и стабильность точностных параметров зеркальных призм и могут конкурировать с прецизионными диффузионными наносоединениями. На примере зеркальных призм внешнего отражения выявлена общая закономерность поведения погрешности после воздействия технологических и экстремальных факторов, соответствующей обратной экспоненциальной зависимости от времени. Предположено, что это уменьшение связано с обратной микроповзучестью под действием накопленных внутренних напряжений.

Ключевые слова: клеевые соединения, нанонаполнители, зеркальные призмы, стеклокерамика.

Shown that the adhesive bonding with micro- and nanofillers provide long-term strength and stability accuracy parameters mirrored prisms and can compete with the precision of diffusion nanobonding. For example mirrored prisms external reflection revealed a general pattern of behavior error after the technological and extreme factors corresponding inverse exponential dependence on time. It is supposed, that this reduction is associated with reverse mikrocreep under accumulated tension.

Keywords: *adhesive bonding, nanofillers, optical prisms, glass-ceramics.*

1. Прокофьев О. Е. Методы соединения оптических деталей / О. Е. Прокофьев, Г. Ф. Пищук, В. С. Чередник, Г. А. Куршев // К.: Техніка, 1984. – С. 22–95.
2. Пат. 12202 Україна. Узел з'єднання Маслова деталей зі склокристалічних матеріалів / В. П. Маслов. – Опубл. 16.01.2006, Бюл. № 1.
3. Пат. 72363 Україна. Спосіб виготовлення клейової композиції МАКК / В. П. Маслов, Н. В. Качур, М. Л. Казакевич. – Опубл 10.08.2012, Бюл. № 15/2012.
4. Пат. 39789 Україна. Пристрій для контролю якості оптичних матеріалів / С. Ф. Венгер, Б. К. Сердега, В. П. Маслов, Н. В. Качур. – Опубл 10.03.2009, Бюл. № 5/2009.