

АНАЛІТИЧНЕ ТА ЕКОЛОГІЧНЕ ПРИЛАДОБУДУВАННЯ

УДК 620.190; 67.017; 681.7.024

ЗАКОНОМІРНОСТІ ПОВЕДІНКИ ТОЧНОСТІ ОПТИЧНИХ ПРИЗМ ЗОВНІШНЬОГО ВІДБИТТЯ

Маслов В. П.

Інститут фізики напівпровідників ім. В. Є. Лашкарьова НАН України, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», м. Київ, Україна

Працездатність приладу й точність вимірювань визначаються в тому числі стабільністю взаємного положення оптичних деталей. В роботах [1 - 3] були узагальнені різні методи з'єднання оптичних деталей. Однак, в них відсутній опис впливу технологічних режимів та складу з'єднувального шва на працездатність приладів і похибки прецизійних вузлів.

В роботі досліджено закономірності поведінки похибки взаємного положення призми зовнішнього відбиття зі склокераміки СО 115М після їх з'єднання.

Встановлено, що клейові з'єднання з мікро- та нанодомішками забезпечують міцність та стабільність точнісних параметрів дзеркальних призми і можуть конкурувати з прецизійними дифузійними наноз'єднаннями. 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: взаємне положення призми, зовнішнє відбиття, з'єднання.

Вступ

Працездатність приладу й точність вимірювань визначаються рядом факторів, у тому числі, стабільністю взаємного положення оптичних деталей і працездатністю електронного блоку. В роботі [1] були узагальнені різні методи з'єднання оптичних деталей, відомі в СРСР за станом на 1980 рік. У монографії [2], виданої в США у 2002 році міжнародною організацією інженерів оптико-електронної промисловості (SPIE), наведені принципи й розрахунки методів кріплення оптичних деталей, таких як головне полегшене дзеркало космічного телескопа Hubble та інші. Відома також монографія [3] за напрямком кріплення оптичних деталей еластичними матеріалами. Однак, наведені в цих книгах рішення описують інженерні питання, безпосередньо пов'язані з виробництвом; у більшості випадків в них відсутній опис впливу стану поверхонь, що з'єднуються, структури з'єднувального шва та фізико-технологічних закономірностей з'єднання прецизійних деталей на працездатність і надійність приладів.

Аналіз причин відмов оптико-електронних приладів (ОЕП) при експлуатації їх у космічних або інших екстремальних умовах показав, що руйнування деталей з крихких матеріалів відбувається в місцях їх з'єднання між собою або з іншими деталями [4].

Для дзеркальних призми зовнішнього відбиття точність взаємного положення окремих частин може складати 10 кут. сек. Для таких прецизійних деталей ви-

користовують 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, 5].

Метою роботи було дослідження загальних закономірностей поведінки похибки взаємного положення оптичних деталей зі склокераміки СО 115М після їх з'єднання в прецизійні призми зовнішнього відбиття.

У результаті проведених досліджень була обрана наступна оптимальна схема технології спікання полірованих деталей (ТСПД) у прецизійні призми, у якій були використані нанорозмірного 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 [5, 6] 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 із склокераміки повинні виникати внутрішні напруження. Тому 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.

Зовнішній вигляд виготовлених призм показано на рис. 2.

Розроблений виробничий процес дозволяє робити дзеркальні призми з точністю, визначеною точністю виробництва їхніх компонентів. В нашому випадку кут $90^\circ \pm 10''$ між торцем та площиною кожної пластини забезпечувало практично таку ж точність на дзеркальних призмах після з'єднання.

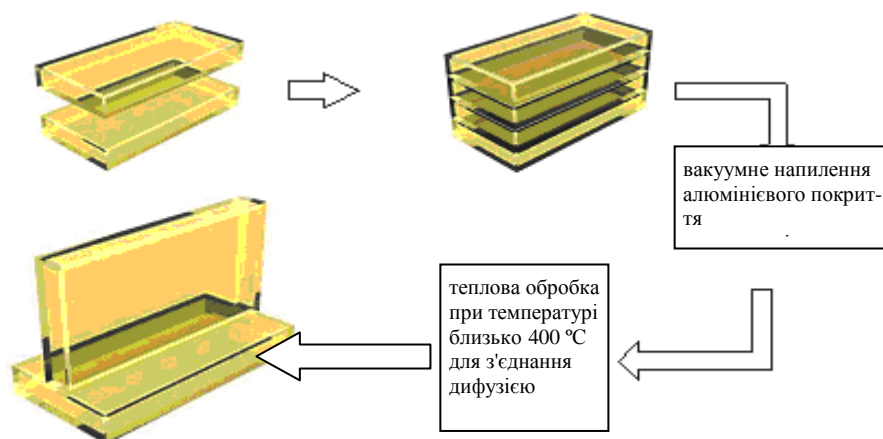


Рис. 1. Технологія виготовлення призми

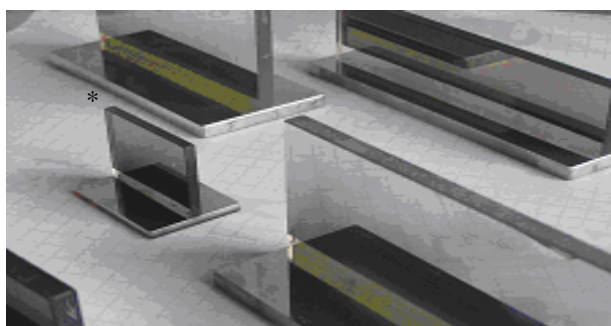


Рис. 2. Зовнішній вигляд призми 200x100x10 мм і призми з позначкою *, яка мала розміри 100x50x5 мм

Для порівняння, крім дифузійного з'єднання, було виконано також клейові з'єднання на основі розробленої клейової композиції на основі кремній – органічної смоли та наповнювачів [7].

Дослідження із оцінки величин внутрішніх напружень у пластинах склокераміки, з'єднаних за розробленою технологією, проводили на установці з використанням методу поляризаційно-модуляційної спектроскопії [8, 9].

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. Уведений 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 призми 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 година при 400°C); на другому етапі зразки проходили подвійний механічний удар 100g і 300g; на наступних етапах досліджувалася 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 впливу їх 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 склокерамики, з'єданого ТСПД- та клейовими методами показаний на рис. 3. Лінія сканування проходила паралельно площини з'єднання, яка на малюнку заштрихована.

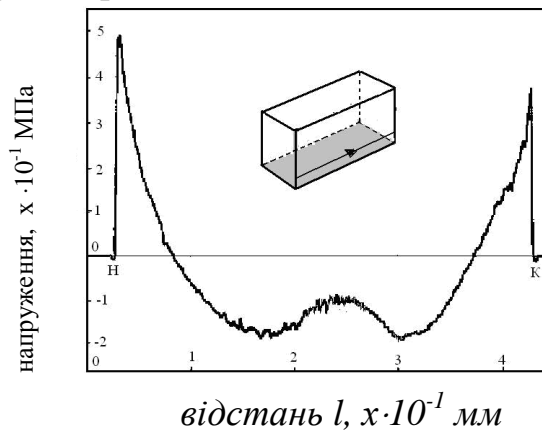


Рис. 3. Типовий розподіл напружень у склокристалічній пластині дзеркальної призми, лінія сканування паралельна площині з'єднувального шва (ТСПД - з'єднання)

Букви Н та К позначають початок і кінець зразка. Установка попередньо була відкалібрована шляхом реєстрації величини сигналу від прикладеного до досліджуваного зразка тиску відомої величини. Наявність каліброваної кривої дозволила представити розподіл напружень уздовж лінії сканування в абсолютних величинах. З малюнка видно, що поблизу країв зразок перебуває в напруженому стані, величина напружень не перевищує 0,5 МПа через нанотовщину дифузійного шва. У разі використання клейових методів з'єднання прошарок між деталями збільшується до 10 мкм. Для клейових з'єднань напруження збільшувалось в 2-3 рази, але додавання мікро та нанодомішок до 20 об. % дозволяло уникнути збільшення внутрішніх напружень, тобто створити аналог дифузійного з'єднання за рівнем механічних напружень.

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.

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 (крива 7, рис. 4) і для оптимального складу клейових композицій дорівнювала міцності дифузійного з'єднання.

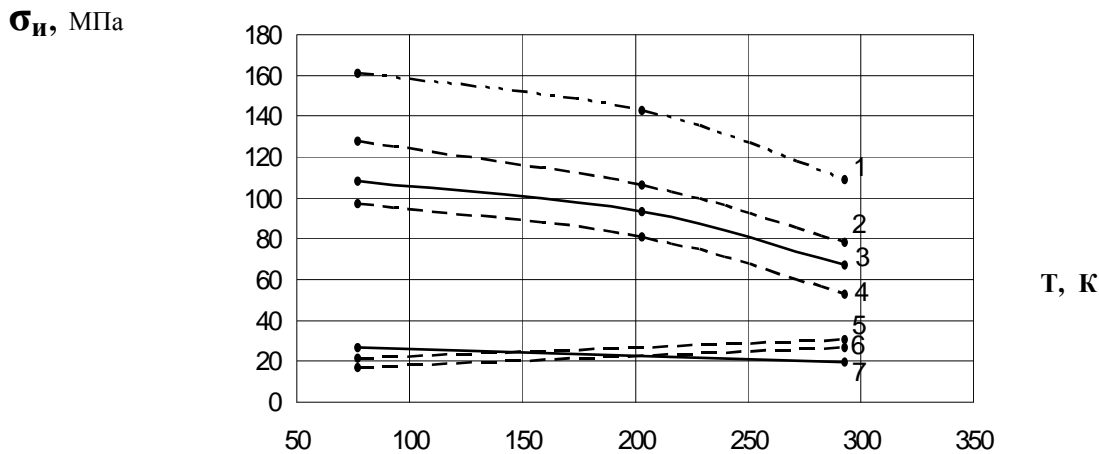


Рис. 4. Залежність міцності на вигин склокераміки і її з'єднань при знижених температурах. Зразки випробовували після річної витримки в нормальних кліматичних умовах: 1 – міцність хімічно зміцнених монолітних зразків; 2, 3 і 4 – верхня, середня та нижня границі міцності вихідних монолітних шліфованих зразків; 5, 6 – міцність свіжовироблених клейових з'єднань (епоксидний компаунд К-400 із мікро та наноаповнювачем 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 чинником для клейових з'єднань є не лише економічна ефективність пов'язана із суттєво меншою трудомісткістю цієї технології, але й з тим, що надлишок клею виходить на периферію площини з'єднання і захищає кутовий концентратор напружень, що створюється двома (або однією залежно 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 різновисхідність (клиноподібність).

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

Така залежність може бути узагальнена формулою

$$y = \frac{A \cdot \left(\frac{\alpha}{e^{0,5 \cdot \tau}} + B \cdot \beta \right)}{\tau}, \quad (1)$$

де А = 4, В = 12000 – отримані експериментально, τ - час, α, β- коефіцієнти, які залежать від конкретного матеріалу дзеркальних призм, для склокераміки СО 115М α = 0,4810⁻⁶ 1/l_n τ, місяці, β = 0,5.

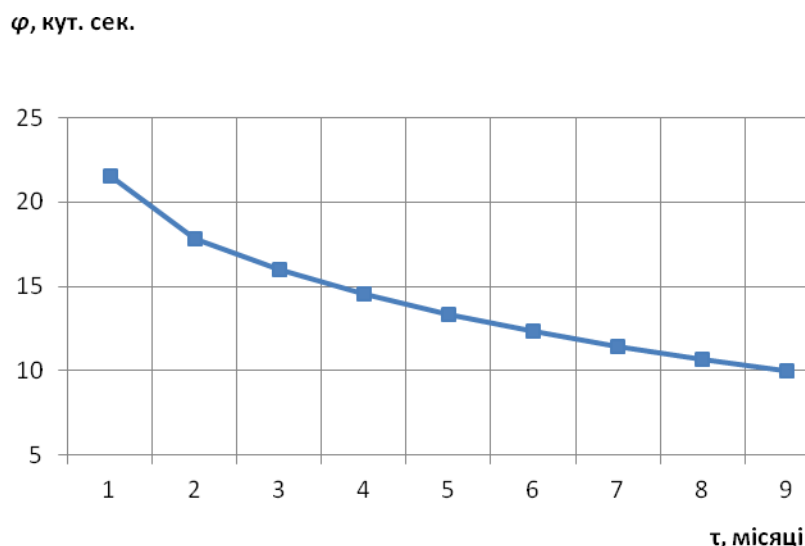


Рис. 5. Узагальнений вигляд поведінки технологічної похибки та похибки після дії екстремальних факторів дзеркальних призм зовнішнього відбивання

Попередні дослідження по впливу пружних механічних напружень при довготривалій експозиції при кімнатних температурах показали, що для скла та склокристалічних матеріалів має місце логарифмічна мікроповзучість [10], тобто незворотні зміни лінійних розмірів в мікро- та нанодіапазонах, яка відповідає залежності (2)

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

де τ - час, α , β - коефіцієнти з рівняння логарифмічної повзучості склокераміки СО 115 М. α , β з експерименту були знайдені $\alpha = 0,4810 \cdot 10^{-6} 1/l_n \tau$, 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 зі зворотною мікроповзучістю під дією накопичених внутрішніх напружень.

Висновки

Результати проведених досліджень показали, що:

1. 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 нано'єднаннями.
2. На прикладі дзеркальних призм зовнішнього відбиття, виконаних із склокераміки з практично нульовим коефіцієнтом лінійного розширення виявлена загальна закономірність поведінки похибки після дії технологічних та екстремальних чинників, 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.

Література

1. Прокофьев О. Е. Методы соединения оптических деталей / О. Е. Прокофьев, Г. Ф. Пищук, В. С. Чередник, Г. А. Куршев. – К.: Техника, 1984. – 129 с.
2. Paul R. Mounting Optics in Optical Instruments / R. Paul, Jr. Yoder - SPIE PRESS, 2002. – 589 p.
3. Каледин Б. Ф. Крепление оптических деталей эластичными материалами. – М.: Машиностроение, 1990. – 160 с.
4. Маслов В. П. Физико-технологические проблемы обеспечения работоспособности оптоэлектронных сенсорных приборов при экстремальных условиях // Сенсорна електроніка і мікросистемні технології. – 2005. – № 1. – С. 57 – 62.
5. Патент на корисну модель № 12202, Україна, МПК H05B 1/00, H05B 3/16, B81C 3/00, G02B 11/00. Узел з'єднання Маслова деталей зі склокристалічних матеріалів / В. П. Маслов Заявка № u2005 08308 від 25.08.2005. Опубл. 16.01.2006. Бюл. № 1.
6. Maslov V. Unknown properties of aluminum nano-layer in unglue assemblage of ZERODUR parts // American Journal of Nanoscience and Nanotechnology. – 2013. – № 1. – pp. 70 – 73.
7. Патент на корисну модель №72363, Україна, МПК C09J 163/10. Спосіб виготовлення клейової композиції МАКК / Маслов В. П., Качур Н. В., Казакевич М. Л. Заявка № u 2012 03407 від 21.03.2012. Опубл. 10.08.2012, Бюл. № 15.
8. Патент на корисну модель №39789, Україна, МПК G01N 21/21 Пристрій для контролю якості оптичних матеріалів / Венгер Є. Ф., Сердега Б. К., Маслов В. П., Качур Н. В. Заявка № u 2008 12413 від 22.10.2008. Опубл. 10.03.2009. Бюл. № 5.
9. Сердега Б. К. Модуляційна поляриметрия: монографія. – К.: Наукова думка, 2011. – 260 с.
10. Маслов В. П. Фізико-технологічні проблеми з'єднання прецизійних деталей оптико-електронних приладів: монографія. – К.: НТУУ «КПІ», 2012. – 160 с.

*Надійшла до редакції
11 лютого 2014 року*

© Маслов В. П., 2014

УДК 535.241

**ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ МЕТОДУ «ІНТЕГРУЮЧОЇ СФЕРИ» ТА
ГОНІОМЕТРИЧНОГО МЕТОДУ ВИЗНАЧЕННЯ СВІТЛОВОГО ПОТОКУ**

¹⁾Ковтун Ю. Ю., ¹⁾Маркін М. О., ²⁾Корнага В. І., ²⁾Рибалочка А. В., ³⁾Агінський Ю. А.

¹⁾Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», м. Київ, Україна; ²⁾Інститут фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова НАНУ, м. Київ, Україна; ³⁾Вища технічна школа Бремена, м. Бремен, Німеччина

В статті наведено опис методу «інтегруючої сфери» та гоніометричного методу визначення світлового потоку. Проаналізовані їх особливості, переваги та відмінність один від одного. Представлені та проаналізовані результати вимірювання світлового потоку зразків лампи розжарювання, світлодіодної лампи та компактної люмінесцентної лампи (КЛЛ) за допомогою цих двох методів. Експериментальне порівняння цих методів визначення світлового потоку для зразків трьох ламп показали, що за швидкістю вимірювання метод «інтегруючої сфери» має явну перевагу над гоніофотометричним методом.

Ключові слова: *світловий потік, інтегруюча сфера, гоніометр.*

Вступ

Розробка, впровадження та експлуатація освітлювальних пристроїв вимагає