



Божко К. М.,
Сидоренко С. Ю.,
Кущовий С. М.

ВДОСКОНАЛЕННЯ КОНТРОЛЮ З'ЄДНАНЬ ОПТИЧНИХ ДЕТАЛЕЙ ЗА ДОПОМОГОЮ ТЕЛЕВІЗІЙНИХ ЗАСОБІВ

Розглянуто основні види з'єднань оптичних деталей та визначені критерії їх міцності. Обґрунтовано застосування телевізійних засобів для контролю дефектів оптичних деталей і їх з'єднань. Доведено можливість субпіксельного вимірювання геометричних розмірів об'єктів. Запропоновано застосування телевізійних засобів для контролю оптико-електронних приладів і систем, зокрема клейових з'єднань фотоелектричних сонячних батарей.

Ключові слова: оптичні деталі, телевізійний контроль, субпіксельне вимірювання, фотоелектричні сонячні батареї.

1. Вступ

Телевізійні засоби контролю (ТЗК) надають унікальну можливість проводити вимірювання геометричних та динамічних параметрів широкого класу об'єктів у реальному часі з високим просторовим розрізненням шляхом аналізу як власного випромінювання, так і того, що пройшло через об'єкт.

Серед оптико-електронних приладів, які можуть використовуватися для аналізу оптичних полів різноманітного походження, ТЗК мають найбільший показник інформативності. Фактично світлоелектричний перетворювач є матрицею великої кількості мікроперетворювачів, що при малому часі формування виборки відкриває широкі перспективи впровадження ТЗК.

Концепція використання ТЗК для дослідження оптичних полів базується на припущенні про світлоелектричний перетворювач як упорядковану сукупність ідентичних, а також незалежних елементів розкладу зображення. Адекватність реальних характеристик та вказаного вище припущення забезпечується корекцією світло-сигнальної характеристики та роботою ТЗК в діапазоні лінійності.

Фізичний принцип дії ТЗК полягає у послідовності перетворень потоку оптичного випромінювання, яке попадає у вхідну апертуру [1]. Оптична система формує зображення об'єкту в чутливій площині світлоелектричного перетворювача (СЕП), наприклад, матриці приладів із зарядовим зв'язком (ПЗЗ) і утворюється первинний відеосигнал. Обробка отриманих зображень за допомогою програмного забезпечення є кінцевою операцією процесу контролю.

ТЗК є надзвичайно перспективним засобом дослідження у реальному часі процесів пошкодження та руйнування оптичних деталей у місцях їх з'єднання у складі вузлів та блоків під час випробувань на міцність від різного роду фізичних впливів. При цьому параметрами контролю можуть бути геометричні розміри та переміщення локальних областей деталей, які мають малі (субміліметрові та мікронні) розміри.

Відомо, що склокристалічні матеріали належать до коштовних функціональних матеріалів, оскільки для їх виготовлення використовуються особливо чисті речовини. Технологія виробництва оптичних матеріалів пов'язана з розплавленням вихідних матеріалів, наступним охоло-

дженням та відпалення для зняття внутрішніх напружень [2]. В ході технологічного процесу, а також на етапах обробки у готовій деталі можуть утворюватись внутрішні дефекти у вигляді мікробульбашок чи включень інородних матеріалів. Такі деталі вважаються бракованими, а вартість матеріалу, робіт, інструменту, що були витрачені на виготовлення цієї деталі стають прямими втратами.

Очевидно, що належна якість склокристалічних матеріалів може бути забезпечена не тільки при дотриманні технологічних вимог щодо найважливіших параметрів, але й за наявності адекватних методів та технічних засобів контролю.

Тому виявлення дефектів склокристалічних матеріалів на початкових етапах технологічного процесу є актуальною задачею, що потребує сучасних фотоелектричних та телевізійних методів та засобів контролю.

Такі технічні засоби, по-перше, повинні забезпечувати вимірювання параметрів на рівні сучасних вимог, а, по-друге, створити умови для накопичення експериментального матеріалу, який може бути використаний для вдосконалення самої технології створення оптично прозорих матеріалів та кристалів. Зрозуміло, що характеристики технічного засобу повинні забезпечити необхідну точність вимірювання параметру в усьому діапазоні його зміни.

При цьому на сьогодні накопичено достатньо теоретичних та експериментальних матеріалів, з яких можна зробити висновок, що серед усіх технічних засобів, які можуть бути використані для вимірювання параметрів оптично прозорих матеріалів та кристалів, повністю адекватними задачами є телевізійні засоби [3]. Дійсно, сучасні телевізійні прилади в змозі одночасно забезпечити найвищі серед усіх інших засобів показники щодо просторового розрізнення, формату та часу формування виборки, що надає їм суттєвої переваги при вимірюванні, в тому числі в плані точності вимірювань та достовірності контролю.

В сучасній науково-технічній літературі відсутні матеріали, що в повному обсязі розкривали б стан проблеми комплексного аналізу технології виробництва склокристалічних матеріалів, зокрема, відсутні матеріали, присвячені методам контролю якості склокристалічних матеріалів з використанням телевізійної виміральної системи, які б враховували специфіку технології і застосовувались в складі технологічного обладнання.

А з цього можна зробити висновок, що проблема контролю якості склокристалічних матеріалів на сьогодні повністю не вирішена.

Зазначимо також, що наведена вище проблема стосується не тільки контролю окремих технологічних операцій і вихідного контролю на виробництві. Задача контролю з'єднань оптичних деталей на наявність дефектів є актуальною й в процесі експлуатації та технічного обслуговування оптичних приладів і систем.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

В наш час широко розвинені оптичні методи контролю дефектів непрозорих (дзеркала) та прозорих (лінзи, пластинки) деталей оптики, а також вузлів і приладів, побудованих на їх основі. Для непрозорих об'єктів ефективним є тінювий або шлірен-метод, який також застосовують для візуалізації невидимих очом ефектів, наприклад, ударних хвиль, збуджених при пострілі із зброї [4–7].

Прозорі деталі та вузли контролюють інтерференційними методами, які надають найбільш детальну інформацію про об'єкт дослідження та мають найбільшу точність. Конструкції і схеми двопроменевих інтерферометрів, які звичайно застосовують для вимірювань у прозорих об'єктах, значно відрізняються один від одного. Відповідно відрізняються і області їх практичного застосування. Найбільш розповсюдженим і найбільш складним і коштовним є інтерферометр Маха-Цандера і системи контролю, побудовані на його основі.

Інтерференційні методи фундаментально досліджено у монографіях Д. Малакари [8, 9].

Використання інтерферометру Фізо, лазера та телевізійної камери на основі матриці із зарядовим зв'язком надало новий поштовх розвитку інтерференційних методів. В результаті створено метод асферичних інтерференційних зображень [10–13].

Складність розглянутих систем контролю та великі витрати на їх виготовлення, експлуатацію та обслуговування унеможливають їх широке впровадження в технологічних ланках існуючих та нових створюваних оптичних виробництв.

Отже, нагальною проблемою, на думку авторів даної роботи, є створення недорогих, проте високоточних засобів і методів для контролю дефектів оптичних деталей та вузлів. Ефективним рішенням даної задачі, на погляд авторів статті, є застосування телевізійних методів і засобів контролю.

3. Об'єкт, мета та задачі дослідження

Об'єкт дослідження — телевізійний контроль з'єднань оптичних деталей.

Мета дослідження — розширення функціональних можливостей телевізійного контролю при вимірюванні геометричних параметрів дефектів.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі задачі:

1. Виконати аналіз технологічних рішень з'єднань оптичних деталей в умовах виробництва оптичних блоків і приладів.

2. Довести можливості субпіксельного вимірювання геометричних розмірів дефектів.

3. Проаналізувати джерела похибок телевізійного засобу вимірювання та можливості компенсації деяких з них.

4. Визначити напрями наступних досліджень.

4. Огляд сучасного стану технологій з'єднань оптичних деталей

Комбінація в одному оптичному блоці деталей з нових нетрадиційних матеріалів і деталей з оптичного скла стимулюють розроблення нових науково-технічних рішень з'єднання таких деталей між собою в прецизійні й стабільні вузли приладів, що працюють як у наземних, так і в космічних умовах [14]. Нові технології потребують застосування відповідних до задач засобів та методик контролю. В цьому плані ТЗК мають значні перспективи.

При експлуатації руйнування з'єднаних деталей та вузлів приладів починається від периферійних ділянок деталей: шліфованих поверхонь і місць їх з'єднання. У зв'язку із цим особливу увагу необхідно приділяти дослідженням стану поверхонь деталей, що з'єднуються (так званому порушеному шару), і його впливу на міцність з'єднання [15]. Стан поверхні можна дослідити за динамікою її малих об'єктів, якими можуть бути тріщини, сколювання, розломи тощо. Ідентифікацію малих об'єктів на поверхні, яку досліджують, та вимірювання геометричних розмірів і швидкості руху їх границь забезпечують саме ТЗК [16].

Традиційним методом з'єднання оптичних деталей є їх склеювання. Для склеювання оптичних деталей застосовуються спеціальні оптичні прозорі клеї, до яких пред'являють такі вимоги [15]:

- прозорість і безбарвність;
- світлостійкість — збереження прозорості та безбарвності із часом під впливом зовнішніх умов;
- висока оптична однорідність;
- близькість показників заломлення і спектральних характеристик клею та деталей, що з'єднуються.

Оптичні характеристики клеїв також можна контролювати за результатами дослідження клейових оптичних з'єднань за допомогою ТЗК. Так, при склеюванні бальзаміном виникають місцеві деформації поверхонь при полімеризації клею. Ці деформації є причиною місцевих розклеювань у вигляді груп мілких крапок [16]. Ідентифікація та вимірювання геометричних розмірів подібних дефектів є задачею, яку вирішують ТЗК.

Загальними вимогами до з'єднання оптичних деталей склеюванням є такі [17]:

- збереження оптичних властивостей деталей;
- мінімальні деформації поверхонь деталей та забезпечення необхідної механічної міцності, яка визначається величиною модуля пружності матеріалу деталей (під механічною міцністю розуміють стійкість до механічних впливів при кріпленні в оправках);
- теплостійкість клейового з'єднання, під якою розуміють властивість запобігання зсуву одного елемента склеєного вузла відносно іншого при підвищенні температури;
- морозостійкість з'єднання;
- хімічна стійкість і вологостійкість клейового шву, які впливають на стійкість з'єднання до дії хімічних активних речовин;
- грибостійкість (біологічна стійкість).

Слід зазначити, що основним критерієм стійкості до різного роду впливів для оптичних деталей у місцях їх з'єднання є відсутність появи видимих морфологічних змін (ушкодження, плями, неоднорідності тощо) на поверхні. Принцип візуалізації дозволяє в якості об'єктивного засобу контролю застосовувати ТЗК.

Явище оптичного контакту (ОК) — з'єднання твердих тіл у результаті контактної взаємодії високоточних полірованих оптичних поверхонь (при цьому зникає оптична границя між деталями з'єднання) — широко використовується [16].

Вочевидь, що взаємодія між поверхнями ОК залежить від геометричних, фізичних і механічних характеристик, які визначають матеріали деталей та стан їх поверхонь. Основним геометричним параметром є шорсткість (мікрогеометрія поверхонь).

Шорсткість поверхні утворює мікрорельєф, інформацію про який можна отримати різними методами. Найбільш поширеним є метод профілографа, яким отримують графік профілю поверхні — профілограму. Альтернативою до методу профілографа може бути метод на основі застосування ТЗК.

Процес з'єднання деталей обмежує геометричний фактор, що визначає площу дійсного контакту.

Оцінка кількості та величини локальних ділянок дійсного ОК, виявлення виколків на границях контактних ділянок, вимірювання шорсткості поверхонь контакту методом із застосуванням ТЗК значно полегшить вирішення технологічних проблем створення нових оптичних вузлів і блоків на основі з'єднання деталей методом ОК.

Одним із самих надійних способів одержання нероз'ємних безклеєвих з'єднань оптичних елементів є глибокий оптичний контакт (ГОК) [18]. ГОК є альтернативою до клеєвих технологій і дозволяє міцно з'єднати деталі при збереженні якості робочих поверхонь. ГОК рекомендують у тих випадках, коли за умовами експлуатації неприпустима наявність клею або клеєвого з'єднання не забезпечує необхідних механічних і оптичних властивостей.

Якщо з'єднань оптичних деталей, які були виконані методом ГОК, також можна досліджувати за допомогою ТЗК. Вихідними даними (вимогами) для побудови ТЗК при дослідженні ГОК можуть бути прийняті розміри припустимих дефектів для III класу чистоти полірованої поверхні оптичної деталі [19]:

- подряпини із шириною не більше 0,01 мм та сумарною довжиною не більше 2 мм на величину світлового діаметру деталей;
- крапки із діаметром не більше 0,1 мм та кількістю (шт.) не більше 0,5 на величину світлового діаметру (у мм);
- площа подряпин і крапок на діаметрі ділянки 2 мм має бути не більше 0,02 мм²;
- площа невраховуваних подряпин має бути меншою 0,0002 мм²;
- лінійний розмір невраховуваних крапок має бути меншим 0,004 мм.

5. Субпіксельне вимірювання та аналіз похибок телевізійного контролю з'єднань оптичних деталей

Використовуючи залежність сигналу пікселя ПЗЗ-матриці від характеру розподілу освітленості за певних

умов можна збільшити точність визначення координати межі двох контрастних ділянок зображення дефектів оптичних деталей та їх з'єднань.

Нехай сигнал, який формується пікселом в межах лінійної ділянки світлосигнальної характеристики ПЗЗ-матриці знаходиться в діапазоні від середньоквадратичного значення шуму σ до деякого максимального A_0 при освітленості E'_0 .

Очевидно, що зміну сигналу в цих межах можна отримати, збільшуючи освітленість від E'_Π до E'_0 , або навпаки, зменшуючи її від E'_0 до E'_Π . Зауваживши, що технічне втілення такої ідеї є складною задачею, використаємо цю обставину для обґрунтування можливості збільшення точності вимірювання координати. Оскільки межі дефектів є лініями складної форми, то поняття розміру межі може бути застосоване тільки для певної фіксованої координати.

Введемо параметр S_Π^* , який визначає освітлену площу пікселя. Нехай в момент часу t сигнал пікселя $A(t)$, а шум — $A_{III}(t)$. Визначимо поріг реєстрації A_Π , і встановимо, що сигнал $A(t)$ може бути зареєстрований за умови $A(t) > A_\Pi + A_{III}(t)$, або $A_{III}(t) < A(t) - A_\Pi$. Очевидно, що при роботі в межах діапазону лінійності залежність сформованого пікселом сигналу від параметру S_Π^* буде лінійною. При цьому $0 \leq S_\Pi^* \leq S$, а $\sigma \leq A(S_\Pi^*) \leq A_0$.

Введемо приведені значення:

$$a_1 = \frac{A(t)}{\sigma}, \quad a_2 = \frac{A_\Pi}{\sigma}, \quad a_3 = \frac{A_{III}(t)}{\sigma},$$

тоді умова реєстрації сигналу $a_3 < a_1 - a_2$. Шум пікселя $A_{III}(t)$, а також приведені значення a_3 є випадковими величинами. Повною характеристикою випадкової величини є функція розподілу (інтегральний закон розподілу $F(z)$), який визначає імовірність того, що випадкова величина приймає значення $z < z_0$, отже $P(z < z_0) = F(z)$.

Відомо, що шум СЕП підкоряється нормальному закону розподілу, оскільки шумовий сигнал утворюється внаслідок одночасної дії кількох незалежних факторів, жоден з яких не домінує. Тоді імовірність реєстрації сигналу, тобто імовірність того, що $P(a_3 < a_1 - a_2)$ визначиться так:

$$P(a_3 < a_1 - a_2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{a_1 - a_2} \exp\left(-\frac{z^2}{2}\right) dz. \quad (1)$$

Якщо сигнал $A(S_\Pi^*)$ при $S_\Pi^* < S$ відповідає умові реєстрації, це означає, що піксель можна умовно розділити на S/S_Π^* ділянок, площа кожної з яких в діапазоні лінійності визначається співвідношенням:

$$S_\Pi^* = \frac{S \cdot A(S_\Pi^*)}{A_0}. \quad (2)$$

Скористаємось табличними значеннями нормованої функції Лапласа.

Очевидно, що при $a_2 = 1$, тобто $A_\Pi = \sigma$ значення імовірності $P(a_3 < a_1 - a_2) = 0,99$ буде забезпечуватись при $A(t) = 3,2\sigma$. Якщо такий сигнал буде сформований ділянкою пікселя, то площа цієї ділянки $S_\Pi^* = (S \times 3,2\sigma)/A_0$.

Отже, кількість ділянок, які можуть бути розрізнені в межах пікселя як окремі:

$$N_1 = \frac{S}{S_{\Pi}^*} = \frac{A_0}{3,2\sigma}. \quad (3)$$

Таким чином, виходячи з оцінки сигналів, можна стверджувати, що в межах пікселя з імовірністю 0,99 можна розрізнити N ділянок. З цього випливає, що при лінійному розмірі пікселя Δ мкм можлива ідентифікація положення межі з точністю до ділянки розміром Δ/N .

Наприклад, якщо за умов експерименту $\sigma = 3$, а максимальне значення сигналу $A_0 = 100$, то для ТЗВ з лінійним розміром пікселя $\Delta = 10$ мкм можлива ідентифікація положення межі з точністю 1 мкм.

У роботі [20] виконано порівняльний аналіз підходів до оцінки похибки телевізійного вимірювання та обґрунтовано, що підвищення точності вимірювання неможливе без дослідження характеру формування сигналів на межах дефектів та розробки відповідних методик і алгоритмів.

Показано, що при виборі спектрального діапазону та для погодження робочого діапазону телевізійної вимірювальної системи з діапазоном змін яскравості об'єкту повинні бути враховані закономірності формування поля яскравості поверхні кристалу, зокрема, експериментальні дані про ширину перехідних ділянок та характер зміни сигналу в їх межах [20].

Там же [20] виконано аналіз оптимальних умов, необхідних для визначення дефектів прозорих в оптичному діапазоні склокристалічних матеріалів. Цими умовами є робота телевізійної вимірювальної системи в межах лінійної ділянки світлосигнальної характеристики та мінімізація впливу перевідбитого випромінювання.

Теоретичний аналіз джерел похибок телевізійних вимірювань довів [20], що можливе значне зменшення їх впливу. Зокрема, оскільки існуючі методики компенсації нерівномірності чутливості базуються на експериментальному визначенні локальних значень чутливості з подальшим їх використанням при обробці сигналу, то обумовлена нерівномірністю чутливості похибка може бути повністю скомпенсована. Такий підхід дійсно дозволяє компенсувати геометричний шум, особливо при застосуванні досконалих експериментальних пристроїв для формування еталонної освітленості. В цьому випадку сумарна похибка залежить від похибки шуму $\sigma_{ш}$, похибки аналого-цифрового перетворювача (АЦП) $\sigma_{ацп}$ та методичної похибки вимірювання розмірів σ_m і визначається за формулою:

$$\sigma_{\Sigma} = \sqrt{\sigma_{ш}^2 + \sigma_{ацп}^2 + \sigma_m^2}. \quad (4)$$

Кількісна оцінка сумарної похибки повинна виконуватись шляхом аналізу її складових. Очевидно, що аналіз повинен базуватись на врахуванні особливостей формування зображення об'єкту (складова σ_m) та характеристик ТЗВ (складові $\sigma_{ш}$ і $\sigma_{ацп}$).

Похибка АЦП складаються з інструментальної (нестабільність частоти та нелінійність характеристики), похибок дискретизації та квантування [21].

Якщо розглядати координати меж дефекту як випадкові величини з нормальним законом розподілу, то сумарну похибку вимірювання їх геометричних параметрів можна оцінити за формулою $\sigma_h = \sqrt{2}\sigma_{\Sigma}$.

6. Обговорення напрямків наступного розвитку телевізійного контролю з'єднань оптичних деталей

На думку авторів даної роботи, розвиток алгоритмів попиксельної обробки зображень, отриманих телевізійним засобом вимірювання при різній освітленості, надасть можливість виявляти та вимірювати геометричні розміри дефектів з'єднань оптичних деталей із похибкою, яка дорівнює частині пікселя.

У багатьох випадках важливішим за розміри є топологія дефекту. Топологічний аналіз дефектної поверхні потребує застосування особливих алгоритмів, заснованих, наприклад, на предфрактальних моделях. Так, тепловий пробій у клейовому шарі фотоелектричної сонячної батареї (ФЕСБ) має вигляд предфракталу (рис. 1).

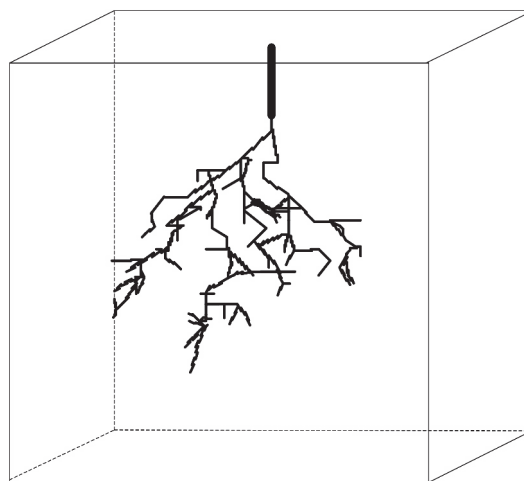


Рис. 1. Розвиток теплового пробію в клейовому шарі

Таким чином, перспективним напрямком є застосування телевізійного контролю дефектів оптико-електронних приладів і систем, прикладом яких є ФЕСБ.

Аналіз джерел похибок телевізійного контролю є важливим з точки зору можливості компенсації деяких з них на етапі комп'ютерної обробки зображення.

7. Висновки

Існуючі на сьогодні технології з'єднань оптичних деталей потребують уніфікованого підходу для розробки методик їх контролю. Основою такого підходу може бути телевізійний контроль, який дозволяє виконувати контроль якості оптичних з'єднань як в умовах виробництва, так і при експлуатації в рамках виконання регламентного обслуговування або ремонту.

Розглянуто основні типи з'єднань оптичних деталей та вимоги до їх параметрів і характеристик.

Доведено можливість субпіксельних вимірювань геометричних розмірів дефектів.

Розглянуто джерела похибок та показано можливість компенсації нерівномірності чутливості алгоритмічними методами.

Запропоновано застосувати телевізійний контроль не тільки в умовах виробництва, але і при експлуатації оптичних, а також оптико-електронних приладів і систем. Для створення адекватних до топології дефектів

їх математичних моделей запропоновано використати предфрактали. Предфрактальне моделювання визначено перспективним при дослідженні руйнувань клейового шару фотоелектричних сонячних батарей, яке виникає при їх тепловому пробі і є об'єктом наступного дослідження.

Література

1. Порев, В. А. Концептуальні аспекти використання приладів з електронним розгортанням зображення для аналізу оптичних полів [Текст] / В. А. Порев, Г. В. Порев // Наукові вісті НТТУ «КПІ». — 2000. — № 1. — С. 56–61.
2. Семибратов, М. Н. Технология оптических деталей [Текст] / М. Н. Семибратов. — М.: Машиностроение, 1978. — 415 с.
3. Згуровский, Г. М. Телевизионная измерительная система — концепция и практика [Текст] / Г. М. Згуровский, Г. В. Порев // Сборник научных трудов 6-го Международного молодежного форума «Радиоэлектроника и молодёжь в XXI веке». — Харьков: ХНУРЭ, 2002. — С. 235–236.
4. Richard, H. Principle and applications of the background oriented schlieren (BOS) method [Text] / H. Richard, M. Raffel // Measurement Science and Technology. — 2001. — Vol. 12, № 9. — P. 1576–1585. doi:10.1088/0957-0233/12/9/325
5. Meier, G. Computerized background-oriented schlieren [Text] / G. Meier // Experiments in Fluids. — 2002. — Vol. 33, № 1. — P. 181–187. doi:10.1007/s00348-002-0450-7
6. Elsinga, G. E. Assessment and application of quantitative schlieren methods: Calibrated color schlieren and background oriented schlieren [Text] / G. E. Elsinga, B. W. van Oudheusden, F. Scarano, D. W. Watt // Experiments in Fluids. — 2003. — Vol. 36, № 2. — P. 309–325. doi:10.1007/s00348-003-0724-8
7. Hargather, M. J. A comparison of three quantitative schlieren techniques [Text] / M. J. Hargather, G. S. Settles // Optics and Lasers in Engineering. — 2012. — Vol. 50, № 1. — P. 8–17. doi:10.1016/j.optlaseng.2011.05.012
8. Malacara, D. Interferogram Analysis for Optical Testing [Text] / D. Malacara, M. Servin, Z. Malacara. — CRC Press Taylor & Francis Group, 2005. — 546 p. doi:10.1201/9781420027273
9. Malacara, D. Optical Shop Testing [Text] / D. Malacara. — Wiley, 2007. — 862 p. doi:10.1002/9780470135976
10. Garbusi, E. New technique for flexible and rapid measurement of precision aspheres [Text] / E. Garbusi, C. Pruss, J. Liesener, W. Osten // Proc. SPIE, Optical Measurement Systems for Industrial Inspection. — 2007. — Vol. 6616. — P. 661629. doi:10.1117/12.727898
11. Pruss, C. Testing Aspheres [Text] / C. Pruss, E. Garbusi, W. Osten // Optics and Photonics News. — 2008. — Vol. 19, № 4. — P. 24–29. doi:10.1364/opn.19.4.000024
12. Garbusi, E. Interferometer for precise and flexible asphere testing [Text] / E. Garbusi, C. Pruss, W. Osten // Optics Letters. — 2008. — Vol. 33, № 24. — P. 2973–2975. doi:10.1364/ol.33.002973
13. Seifert, L. Measuring aspheres with a chromatic Fizeau interferometer [Text] / L. Seifert, C. Pruss, B. Dörband, W. Osten // Proc. SPIE, Optical Measurement Systems for Industrial Inspection VI. — 2009. — Vol. 7389. — P. 738919. doi:10.1117/12.830658
14. Маслов, В. П. Микро- и нанотехнологии соединения прецизионных деталей оптико-электронных приборов [Текст] / В. П. Маслов // Вісник Українського матеріалознавчого товариства. — 2009. — № 1 (2). — С. 18–35.
15. Маслов, В. П. Фізико-технологічні проблеми з'єднання прецизійних деталей оптико-електронних приладів [Текст] / В. П. Маслов. — К.: НТУУ «КПІ», 2012. — 160 с.
16. Панов, В. А. Справочник конструктора оптико-механических приборов [Текст] / В. А. Панов, В. В. Кулагин, Г. В. Погарев, М. Я. Кругер и др.; под ред. М. Я. Кругера. — Ленинград: Машиностроение, 1967. — 760 с.
17. Прокофьев, О. Е. Методы соединения оптических деталей [Текст] / О. Е. Прокофьев, Г. Ф. Пищук, В. С. Чередник, Г. А. Куршев. — К.: Техніка, 1984. — 128 с.
18. Морозов, И. А. Особенности соединения оптических элементов методом ГОКа [Текст] / И. А. Морозов, Э. Н. Морозов, И. И. Юркевич. — Минск: Ин-т физики АН БССР, 1978. — 210 с.
19. Воронков, В. Б. Прямое сращивание кремниевых пластин с диффузионным флюом [Текст] / В. Б. Воронков, Е. Г. Гук, В. А. Козлов, В. Б. Шуман // Письма в ЖТФ. — 1998. — № 6. — С. 1–4.
20. Порев, В. А. Розробка методу контролю якості склокристалічних матеріалів з використанням телевізійної вимірювальної системи [Текст]: звіт про НДР № держреєстрації 01115U001576 від 03.09.2015 / В. А. Порев, К. М. Божко, О. М. Маркіна, О. В. Суліма, Т. О. Рудик. — 54 с.
21. Телешов, Г. В. Погрешность определения линейных размеров в системах обработки изображения на фотоувеличительных приборах с зарядовой связью [Текст] / Г. В. Телешов // Известия ВУЗов. Приборостроение. — 1995. — Т. 38, № 11–12. — С. 44–46.

УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНТРОЛЯ СОЕДИНЕНИЙ ОПТИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ С ПОМОЩЬЮ ТЕЛЕВИЗИОННЫХ СРЕДСТВ

Рассмотрены основные виды соединений оптических деталей и определены критерии их прочности. Обосновано применение телевизионных средств при контроле дефектов оптических деталей и их соединений. Доказана возможность субпиксельного измерения геометрических размеров объектов. Предложено применение телевизионных средств для контроля оптико-электронных приборов и систем, в частности клеевых соединений фотоэлектрических солнечных батарей.

Ключевые слова: оптические детали, телевизионный контроль, субпиксельное измерение, фотоэлектрические солнечные батареи.

Божко Костянтин Михайлович, старший викладач, кафедра наукових, аналітичних та екологічних приладів і систем, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Україна.

Сидоренко Сергій Юрійович, аспірант, кафедра наукових, аналітичних та екологічних приладів і систем, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Україна.

Куцовой Сергей Николаевич, аспірант, кафедра наукових, аналітичних та екологічних приладів і систем, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Україна, e-mail: kuschoviysergey@gmail.com.

Божко Константин Михайлович, старший преподаватель, кафедра научных, аналитических и экологических приборов и систем, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», Украина.

Сидоренко Сергей Юрьевич, аспирант, кафедра научных, аналитических и экологических приборов и систем, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», Украина.

Куцовой Сергей Николаевич, аспирант, кафедра научных, аналитических и экологических приборов и систем, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», Украина.

Bozhko Konstantin, National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Ukraine.

Sydorenko Sergey, National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Ukraine.

Kuschoviys Sergey, National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Ukraine, e-mail: kuschoviysergey@gmail.com