

## **ВИСОКОЕФЕКТИВНІ ТЕХНОЛОГІЧНІ ПРОЦЕСИ В ПРИЛАДОБУДУВАННІ**

УДК 681.7.062.43:681.785.4

### **КОНТРОЛЬ ФОРМИ ЕЛІПСОЇДАЛЬНИХ РЕФЛЕКТОРІВ БІОМЕДИЧНИХ ФОТОМЕТРІВ**

*Безуглий М. О., Лінючева О. В., Безугла Н. В., Бик М. В., Костюк С. А.*

*Національний технічний університет України*

*«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна*

*E-mail: [m.bezuglyi@kpi.ua](mailto:m.bezuglyi@kpi.ua)*

*У роботі представлено технологію нанесення дзеркального покриття хіміко-гальванічною металізацією внутрішньої поверхні еліпсоїдального рефлектора, виготовленого за допомогою 3-D друку з АБС-пластику. Розглянуто два способи реалізації цієї технології шляхом нанесення електропровідного шару за допомогою порошкового графіту та хімічного нанесення електропровідного металічного шару з наступним дорожцуванням необхідних функціональних шарів. Розроблено засіб контролю форми внутрішньої дзеркальної поверхні рефлектора на основі методу анабераційних точок, що може бути використаний для вимірювання відхилення форми як металевих еліпсоїдів з полірованою внутрішньою поверхнею, так і виготовлених за запропонованою технологією. Розроблений аналітичний базис просторової орієнтації елементів вимірювального засобу та математичний апарат визначення середньоквадратичного відхилення форми поверхні в точці контролю. Порівняльний контроль металевого та металізованого еліпсоїдів проведений у п'яти площинах на різних висотах, що характеризують положення точки контролю та кут падіння лазерного променя. У заданих площинах отримано «цифрову» модель робочої поверхні еліпсоїду обертання з дійсною формою та коефіцієнтом відбиття. Результати контролю можуть бути враховані при корекції математичного апарату поширення оптичного випромінювання у біомедичних фотометрах.*

**Ключові слова:** еліпсоїд обертання, рефлектор, 3-D друк, фотометрія.

#### **Вступ**

Фотометрія еліпсоїдальними рефлекторами (ЕР) є альтернативним до вимірювання інтегруючими сферами та волоконно-оптичними системам методом дослідження оптичних властивостей мутних середовищ, зокрема і біологічних [1, 2]. Розробці та вдосконаленню технологій виготовлення еліпсоїдальних рефлекторів з внутрішньою відбиваючою поверхнею присвячені, наприклад, роботи [3-6], головною відмінністю яких є висвітлення модельного або приладного розвитку виготовлення глибокої асферики методом тракторного копіювання. Проте, як зазначено в [6], перспективними і високопродуктивними можуть стати технології виготовлення деталей подібної конфігурації з використанням 3-D друку. З урахуванням специфічності форми еліпсоїдальних рефлекторів та вимогам, що ставляться до точності еліптичної твірної та «усічення» по фокальним площинам [2, 3], найбільш прийнятними можуть бути технології типу Laser Powder Forming [7, 8] для виготовлення твердотільної металеві деталі в умовах серійного виробництва. Проте практика експерименту зі світлорозсіювальними середовищами різної природи та товщини як у відбитому, так і у відбитому та пропущеному світлі [1, 2], показує, що оптимальна фотометрія еліпсоїдальними рефлекторами

можлива при адаптації їх параметрів (ексцентриситету та фокального параметру) до оптичних властивостей цього середовища. Це унеможливує втрати корисного сигналу, що виникають внаслідок виходу розсіяного оптичного випромінювання з бокових частин досліджуваного зразка, та підвищує питому вагу зареєстрованого світла з його поверхні в прямому та/або зворотному напрямку. З іншого боку, така фотометрія потребує широкої номенклатури ЕР з довільною конфігурацією, що є доволі вартісним навіть при виготовленні їх рядної кількості.

Виготовлення ЕР зі скла, полімерних матеріалів або керамічних сумішей, незалежно від використаної технології [9-11], потребує фінішної операції з нанесення дзеркального покриття. У випадку застосування скла або іншого прозорого матеріалу таке покриття є внутрішнім по відношенню до робочої поверхні і потребує формоутворення рефлектора, зовнішня і внутрішня сторони якого матимуть еліптичні твірні. З одного боку, це може суттєво спростити технологію отримання ЕР, а з другого - пред'являє високі вимоги до прозорості отриманої деталі. При цьому внаслідок обмеженої точності друку необхідним стане полірування обох поверхонь. Друк з непрозорих полімерів, найбільш поширеними серед яких є АБС-пластик (акрилоні-

трибутадієнстирол), ПЛА-пластик (полілактид), CoPET-пластик (поліетилентерефталат), може бути використаний для отримання твердотільної заготовки рефлектора. У цьому випадку дзеркальне покриття є зовнішнім і може бути отримане шляхом металізації робочої поверхні рефлектора з подальшим поліруванням.

Незалежно від технології виготовлення ЕР правильність функціонування фотометрів з їх використанням потребує контролю точності отриманої форми і оцінки її відхилення від номінальної, що задається рівнянням еліпсоїду обертання.

Типові методи контактного контролю асферичних поверхонь другого порядку з використанням шаблонів, які, як правило, отримують шляхом вирізання з конусу похилої пластинки, з огляду на конфігурацію рефлектора, придатні в кращому випадку для контролю копіра або ексцентрика при застосуванні технологій траскторного копіювання [3,6]. Використання сферометрів, що широко поширені при контролі шліфованих та полірованих поверхонь, для визначення відступу внутрішньої дзеркальної еліпсоїдальної поверхні від заданої форми шляхом вимірювання стрілки сегментів її різних зон і порівняння з розрахунковими, потребують суттєвої зміни принципу вимірювань або виготовлення додаткової контрольної вимірювальної оснастки.

Асферичні поверхні, що утворені обертанням кривих другого порядку навколо їх осі симетрії, до яких відноситься і ЕР, мають корисну властивість: наявність пари анабераційних точок, які є геометричними фокусами цих кривих. Для еліпсоїда, утвореного обертанням еліпса навколо його великої осі, анабераційні точки розташовані по одну сторону від поверхні на кінцевій відстані одна від одної і є її оптичними фокусами. Анабераційні точки є оптично сполученими лише для поверхонь відбиття. Якщо поверхня еліпсоїда має ідеальну форму і точкове джерело світла розташоване точно в одному з геометричних фокусів, то відбиті від поверхні промені утворюють сферичний хвильовий фронт, центр кривизни якого збігається з іншим геометричним фокусом. Різні методи контролю, засновані на використанні анабераційних точок, по суті, зводяться до дослідження хвильового фронту, утвореного відбитими від поверхні променями. Способи дослідження хвильового фронту можуть бути досить різноманітними і ґрунтуватися на різних законах геометричної та фізичної оптики (наприклад, тіньовий метод Фуко, метод Гартмана або інтерферометрія [12]). Також поширеними методами контролю асферичних поверхонь є автоколімаційні та компенсаційні методи.

Специфічна конфігурація ЕР, що використовуються в біомедичних фотометрах, не дозволяє безпосередньо використати проаналізовані методи. Тому пошук нових або вдосконалення існуючих схем контролю форми внутрішньої відбиваючої поверхні еліпсоїда обертання є актуальною при-

кладною задачею.

### **Постановка задачі**

Метою роботи є розробка технології нанесення дзеркального покриття на внутрішню поверхню еліпсоїдального рефлектора, виготовленого за допомогою 3-D друку з АБС-пластику, а також засобу контролю форми внутрішньої дзеркальної поверхні рефлектора.

### **Хіміко-гальванічна металізація внутрішньої відбиваючої поверхні еліпсоїдального рефлектору**

Одним з основних недоліків деталей, надрукованих з пластикових матеріалів за допомогою 3-D друку, що частково обмежує їх використання, є відсутність властивостей притаманних металам, а саме електро- та теплопровідність, блиск тощо. До того ж, у більшості випадків, ці функціональні властивості необхідні тільки у зовнішньому шарі виробу. Частково цей недолік вдається компенсувати введенням у масу для друку дисперсних порошків металів. Це збільшує питому вагу таких виробів та покращує теплопровідність, але не дозволяє використовувати такі деталі як електропровідні. Для надання виробам здатності до електропровідності та можливості електролітичного нанесення на них функціональних покриттів авторами було проведено хіміко-гальванічну металізацію виробу «еліпсоїдальний рефлектор».

Процес надання електропровідності перед осадженням було реалізовано у два способи для різних зразків ЕР.

Перший спосіб передбачав, що початковий електропровідний шар наноситься за допомогою порошкового графіту. Для нанесення функціонального дзеркального покриття було використано наступну послідовність операцій: механічне очищення поверхні виробу наждачним папером зернистістю 600, знежирення поверхні з допомогою віденського вапна, травлення у хромовій суміші ( $\text{H}_2\text{SO}_4$  (конц.) +  $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$  – 30 г/л). Після цього на підготовану деталь наносили тонкий шар графіту з його суспензії в етиловому спирті. Процес нанесення графіту проводили 3-5 разів для отримання достатньо товстого шару (10-20 мкм). Після висушування графіту проводилось осадження мідного електропровідного шару з електроліту міднення наступного складу (г/л):  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  – 250,  $\text{H}_2\text{SO}_4$  – 100, блискоутворююча добавка – 2. Процес електрохімічного нанесення мідного шару проводився за катодної густини струму від  $0,5\text{А/дм}^2$  («затяжка») до  $2\text{А/дм}^2$  при нарощуванні товщини покриття. Процес нарощування продовжували до досягнення товщини мідного шару 500-800 мкм, яка дозволяє здійснювати механічне полірування для отримання дзеркальної поверхні.

У ході проведення металізації серії з ЕР автори поставили під сумнів доцільність використання такого способу внаслідок великої трудомісткості,

що викликана неоднорідністю покриття графітом та необхідністю багаторазового нанесення. Також при нанесенні покриття в електроліті міднення частина графітового порошку змивається в електроліт, через що виникає необхідність його фільтрування і повторного нанесення шару графіту.

Як більш промислово придатний спосіб металізації було використано метод хімічного нанесення електропровідного металічного шару з наступним дорошуванням необхідних функціональних шарів [13]. Для цього способу було використано наступну послідовність підготовчих операцій: механічне очищення поверхні, знежирення віденським вапном та травлення у концентрованій азотній кислоті. Між підготовчими операціями використовувались струменеві промивання проточною і дистильованою водою. Після підготовки поверхні був нанесений сенсibiliзуючий шар з розчину  $\text{SnCl}_2$  – 2 г/л у концентрованій соляній кислоті. Після ретельного промивання на сенсibiliзовану поверхню нанесли шар хімічного срібла. Хімічне сріблення проводили з аміачного розчину із використанням сегнетової солі у якості відновника. Для хімічного сріблення готували два розчини. Розчин 1 (без відновника) – 5 г  $\text{AgNO}_3$  у вигляді комплексного аміакату, який розчинений у 500 мл дистильованої води. Розчин 2 (з відновником) – 1,4 г сегнетової солі та 2 г  $\text{AgNO}_3$ , які розчинені в 1 л дистильованої води. Розчини зберігалися в посуді з темного скла. Безпосередньо перед процесом сріблення розчини змішували у співвідношенні 1:1 і занурювали у них підготовлену і сенсibiliзовану деталь. Процес хімічного осадження срібла проводився двічі по 15 хв. Після цього деталь промивали у непроточній дистильованій воді і занурювали у розчин попереднього нікелювання наступного складу (г/л):  $\text{NiSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  – 140-200,  $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  – 5-6,  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  – 120-130,  $\text{H}_3\text{BO}_3$  – 30-40. Процес нанесення захисного нікелевого покриття проводився у гальванічній ванні без перемішування за кімнатної температури. Катодна густина струму складала 0,5-1 А/дм<sup>2</sup>. Розрахункова товщина нікелевого покриття становила 10 мкм.

Після цього деталь промивали і нарощували основну товщину покриття з електроліту міднення як і у випадку з графітовим електропровідним шаром. Для збільшення контактної поверхні було сконструйовано спеціальні пристосування з двостороннього фольгованого текстоліту (рис.1).

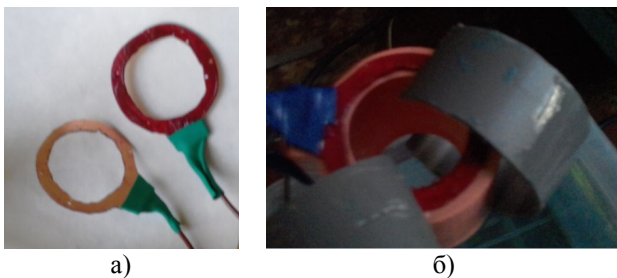


Рис. 1. Пристосування (а) для збільшення контактної поверхні та його монтаж (б) на деталь

При отриманні достатньої товщини мідного покриття було здійснено його полірування фетровою втулкою із полірувальною пастою до дзеркального блиску і нанесення функціонального дзеркального покриття зі срібла. Загальний вигляд деталі до і після нанесення покриття наведено на рис. 2.б та рис. 2.в відповідно.



Рис. 2. Еліпсоїдальні рефлектори: металевий (а); пластиковий до (б) та після (в) нанесення металічного покриття

Таким чином, запропоновані підходи дозволяють проводити металізацію деталей, отриманих за допомогою 3-D друку, надаючи їм необхідних функціональних властивостей.

#### **Контроль форми еліпсоїдальних рефлекторів**

Як у випадку металевих еліпсоїдів (рис.2.а) з полірованою внутрішньою поверхнею, так і виготовлених за допомогою технологій 3-D друку з нанесеним дзеркальним покриттям, контроль форми готового виробу має складності в технічній реалізації, що пов'язані з відсутністю придатних засобів контролю. З огляду на це, авторами запропоновано пристрій (рис.3) для контролю форми дзеркального еліпсоїду обертання [14], що розроблений на основі методу анабераційних точок. Його функціонування базується на властивості еліпсоїдів направляти випромінювання, що виходить з одного з фокусів  $F_1$  і відбивається від внутрішньої поверхні, у другий фокус  $F_2$ .

Використовуючи цю властивість формуючу оптичну систему 2 та координатний фотоприймач 4 розташовують таким чином аби падаючий та відбитий промінь проходили через відповідні фокуси еліпсоїду обертання. Це досягається взаємною орієнтацією оптичної системи 2 та фотоприймача 4 шляхом зміни кутів  $\alpha_1$  та  $\alpha_2$ . При цьому відстані  $z_1$  та  $z_2$  є фіксованими, а елементи 2 та 4 переміщуються у площинах, перпендикулярних осі обертання еліпсоїда. Для визначення координат точки контролю  $A$  за математичним апаратом, що описує процес пошуку направляючих косинусів відбитого променя [2], а також точки його потрапляння на площину фотоприймача  $Q_2$ , використовують систему відліку, що характеризує положення променя (джерела випромінювання) та досліджуваного об'єкту (рефлектора).

З урахуванням того, що запропонований метод контролю реалізований в одній площині, у якій лежать траєкторія руху падаючого та відбитого променя, канонічне рівняння еліпсу та пря-

мої, що містить падаючий промінь вздовж відрізка  $Q_1A$ , з початком координат в точці  $O$  можна записати у наступному вигляді:

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1, \quad (1)$$

$$y = f - x \operatorname{tg} 2\alpha_1, \quad (2)$$

де  $a$  та  $b$  – мала та велика напів-осі еліпса;  $f$  – його фокальна відстань.

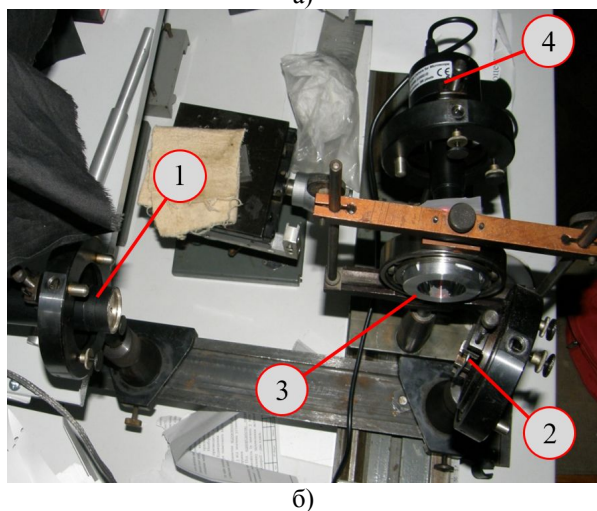
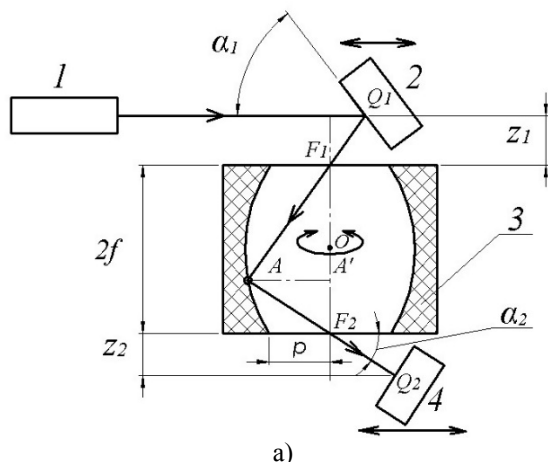


Рис. 3. Схема пристрою (а) та загальний вигляд установки (б) для контролю параметрів робочої поверхні дзеркального еліпсоїда обертання: 1 – джерело випромінювання; 2 – формуюча оптична система; 3 – еліпсоїдальний рефлектор; 4 – координатний фотоприймач

Висоту точки контролю, тобто відрізок  $A'F_2$  (рис.3.а), можна визначити, віднайшовши точку перетину еліпсу (1) та прямої (2):

$$A'F_2 = 2f - x_{1,2} \operatorname{tg} 2\alpha_1, \quad (3)$$

де

$$x_{1,2} = \frac{-2fb^2 \pm \sqrt{D}}{2(b^2 - a^2 \operatorname{tg}^2 2\alpha_1)},$$

$$D = (2fb^2)^2 - 4(b^2 - a^2 \operatorname{tg}^2 2\alpha_1)(a^2 \operatorname{tg}^2 2\alpha_1 - f^2)b^2.$$

Оскільки суто математично квадратне рівняння, утворене при вирішенні системи (1)-(2), має

два корені, правильним буде той, при підстановці якого в (3) отримаємо висоту точки контролю  $A'F_2 \in (0; 2f)$ .

З рис. 3.а видно, що зміна кута падіння  $\alpha_1$  та сталість відстаней  $z_1$  та  $z_2$  призводить до зміни відрізків  $Q_1F_1$  та  $Q_2F_2$ :

$$Q_1F_1 = \frac{z_1}{\sin 2\alpha_1}, \quad Q_2F_2 = \frac{z_2}{\sin \alpha_2} \quad (4)$$

Водночас, величина, на яку необхідно встановити фотоприймач, визначається виходячи з обчисленого кута  $\alpha_2$ :

$$\operatorname{tg} \alpha_2 = -\frac{A'F_2 \cdot \operatorname{tg} 2\alpha_1}{(2f - A'F_2)}. \quad (5)$$

Коефіцієнт відбиття робочої поверхні в точці контролю  $A$  визначається співвідношенням інтенсивності випромінювання, відбитого внутрішньою стороною ЕР, до інтенсивності випромінювання, що формується оптичною системою 2. З огляду на те, що вимірювання здійснюються у багатьох контрольних точках при обертанні ЕР навколо великої напів-осі, то для плинного контролю падаючої на поверхню рефлектора інтенсивності, котра залежить від можливих флуктуацій джерела випромінювання, можна застосувати світлоділильний елемент та допоміжну фотометричну систему.

Запропонований метод забезпечує можливість побудови «цифрової» моделі робочої поверхні еліпсоїда обертання з дійсною формою та коефіцієнтом відбиття за рахунок фіксації координати точки контролю та визначення відхилення відбитого променя від другого фокусу. Альтернативою позиціонування плями, створеної відбитим променем на координатному фотоприймачі, є введення по ходу відбитого променя діафрагми. При цьому кількість світла, що пройшла крізь неї, буде пропорційна відхиленню реальної форми еліпсоїда на висоті, що визначається координатою точки контролю.

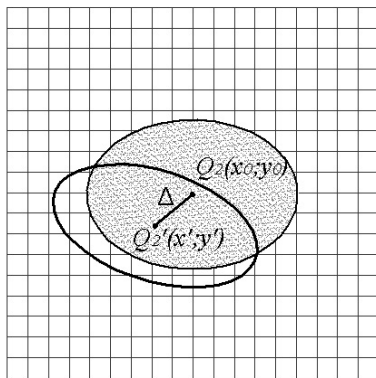
Використання різноманітного типу мікроаніпуляторів, наприклад на основі кільцевих п'єзоелементів [15], у якості приводу оптичної системи дозволить забезпечити регулювання роздільної здатності та необхідної кількості точок контролю вздовж осі еліпсоїда в залежності від точності виготовлення ЕР.

Випромінювання від джерела 1 попадає на формуючу оптичну систему 2 і спрямовується на робочу поверхню рефлектора 3. Тип джерела і конструкція оптичної системи 2 визначають спосіб контролю і можуть формувати колімований потік або фокусувати випромінювання в точці  $A$ . Відбите внутрішньою дзеркальною поверхнею ЕР світло потрапляє на координатний приймач у вигляді фотометричної плями, розміри та форма якої окрім способу контролю визначаються діаметром падаючого променя, фокальною відстанню  $f$  та фокальним параметром  $p$  еліпсоїду, а також відхиленням форми поверхні від номінальної. При зазначеній конфігурації схеми вимірювального пристрою

формою плями буде еліпс, що складається з окремих пікселів з різною яскравістю фотометричного зображення на координатному фотоприймачі (рис. 4). Для визначення відхилення форми еліпсоїдальної поверхні в точці контролю автори використали величину (6), що характеризує середньоквадратичне відхилення (СКВ) координат пікселів, що формують зображення фотометричної плями, від номінального значення, що характеризує геометрію оптичної осі вздовж променю з урахуванням кута падаючого променя  $\alpha_1$  та (4)-(5):

$$\Delta = \sqrt{(x' - x_0)^2 + (y' - y_0)^2} = \sqrt{\frac{1}{N} \left( \sum_{i=1}^N (x_i - x_0)^2 + \sum_{i=1}^N (y_i - y_0)^2 \right)} \quad (6),$$

де  $x_i, y_i$  - координати яскравих пікселів, що формують фотометричну пляму,  $x_0, y_0$  - координати геометричного центру номінальної плями;  $x', y'$  - координати геометричного центру реальної плями.



(0;0)

Рис. 4. Схема розміщення номінальної та реальної фотометричних плям

Для номінальної фотометричної плями геометричний центр еліпса, СКВ координат якого є нульовими, співпадає з точкою  $Q_2(x_0; y_0)$ . Для реальної фотометричної плями, геометричний центр якої визначається СКВ за виразом (6), відповідає точці  $Q_2'(x'; y')$ .

Оскільки при вимірюваннях на кожній з висот  $A'F_2$  фотоприймач 4 зафіксований у незмінному проложенні, то порівняльний аналіз фотометричних зображень здійснюється з прив'язкою до крайнього пікселя кадру. Іншим варіантом може бути встановлення у другій фокальній площині еліпсоїду розміщеного шаблону з подальшою оцінкою зміщення еліптичної плями відносно його центру.

При обертанні ЕР здійснюється побудова форми об'єкту в поперечному перерізі, а під час взаємного переміщення формуючої оптичної системи та фотоприймача разом з обертанням рефлектора, будується повна дійсна форма робочої поверхні

еліпсоїду обертання та коефіцієнту відбиття в кожній точці контролю.

**Результати та обговорення**

Підготовчими етапами побудови вимірювальної установки за запропонованим методом автори виділяють наступні. По-перше, визначення механічної складальної бази для забезпечення стабільності та статичності конструкції та зменшення вібрацій та зовнішніх фізичних впливів. Такою базою є оптична лава та допоміжна направляюча для розміщення джерела випромінювання, встановлена на монтажному столі. По-друге, визначення горизонтальної оптичної складальної бази. Цей етап полягає у встановленні оптичної осі джерела випромінювання (у даному випадку ЛГН 208А, з довжиною хвилі  $\lambda=0,6328$  мкм, номінальною потужністю 2 мВт та діаметром пучка 1,4 мм) паралельно до оптичної лави.

До основних етапів відносять встановлення та юстування формуючої оптичної системи (плоского дзеркала), еліпсоїдального рефлектора та координатного фотоприймача (КМОП матриці DCM35E) з визначенням кутів  $\alpha_1$  та  $\alpha_2$  й відстаней  $Q_1F_1$  та  $Q_2F_2$  (рис. 3.а). При цьому обертального руху еліпсоїдальному рефлектору надає підшипниковий механізм, відцентрований по відношенню до складальних баз установки. Матричний фотоприймач підключається до комп'ютера і за допомогою програмного забезпечення «ScopePhoto» здійснюється фіксація фотометричної плями.

У якості досліджуваних рефлекторів були обрані дзеркальні еліпсоїди обертання, виготовлені методом траєкторного копіювання [3] та шляхом металізації деталі, надрукованої з АБС пластику на 3-D принтері, з ексцентриситетом 0,66 та фокальним параметром 16,875 мм. Зазначимо, що у результаті металізації параметри еліпсоїда були змінені за рахунок нанесення на його внутрішню поверхню додаткових шарів. Але оскільки оцінка відхилення дійсної форми здійснюється по відношенню до номінальної, використання еліпсоїдів з різними параметрами не порушує аналітичного принципу та не впливає на кінцеву точність методу.

Експеримент був проведений у 5 площинах на різних висотах  $A'F_2$  в 24 точках у кожній площині з кроком обертання еліпсоїда в  $15^0$ . У кожній точці контролю зроблено 10 знімків, величина відхилення за аналізом яких була усереднена. При вимірюваннях був використаний напівпрозорий розмічений шаблон і отримана серія зображень фотометричних плям (рис. 5). Першим числом на рис. 5 позначено кут, на який був повернутий ЕР навколо своєї великої напів-осі, а другим – кут  $\alpha_1$ .

З урахуванням (6) набір функцій середньоквадратичного відхилення в п'яти обміряних площинах для металевого та металізованого пластикового еліпсоїдів представлені на рис. 6.

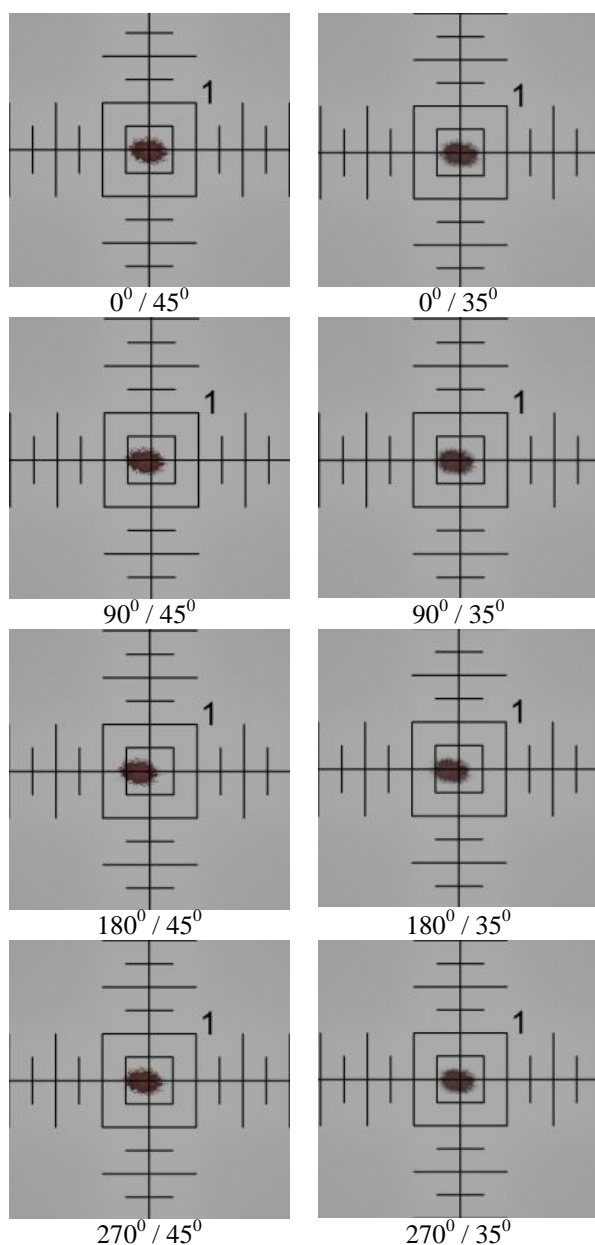


Рис. 5. Центральна частина зображення фотометричної плями з шаблоном при обмірі металевго ЕР

Особливості застосування запропонованого математичного апарату показують, що відхилення форми поверхні виражається додатними значеннями. Проте, як видно з рис. 5, зміщення геометричного центру реальної фотометричної плями і по координаті  $x$ , і/або по координаті  $y$  може бути від'ємним. Водночас, додатне відхилення буде, коли середньоарифметичні значення координат фотометричної плями потраплять у першу та третю координатну чверть, і від'ємне – коли у другу та четверту.

Зазначена обставина може бути врахована при корекції математичного апарату поширення оптичного випромінювання у біомедичному фотометрі.

Аналізуючи графіки на рис. 6.а, можна побачити, що контрольований металевий еліпсоїд обертання має перекіс робочої дзеркальної поверхні відносно оптичної осі.

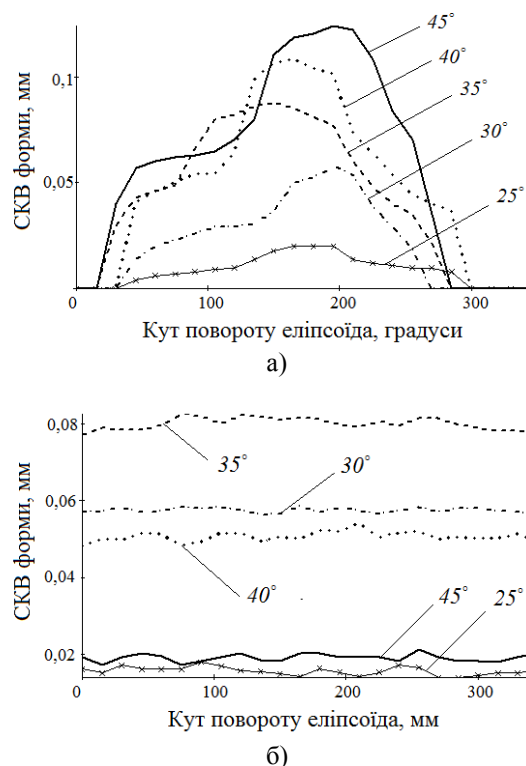


Рис. 6. СКВ форми поверхні еліпсоїду обертання: для металевого (а) та металізованого пластикового (б) рефлекторів при різних кутах падіння  $\alpha_I$

Це могло бути спричинене неточним встановленням його під час виготовлення. Металізований пластиковий еліпсоїд, як видно з рис. 6.б, має суттєво менші відхилення СКВ, що свідчить як про точне базування при 3-D друці, так і про рівномірність нанесених металічних шарів. Проте зміщення відхилення для різних кутів падіння  $\alpha_I$ , котрі визначають висоту положення точки контролю, свідчать про те, що внутрішня поверхня ЕР була недостатньо добре підготовлена шляхом механічного очищення. З урахуванням точності використаного 3-D друку (100 мкм) більше очищення практично неможливе, оскільки суттєво спотворює форму еліпсоїдальної поверхні. У такому разі доцільно використовувати 3-D принтери, що забезпечують більш високу точність друку.

#### Висновки

У роботі розглянуті особливості реалізації методу виготовлення еліпсоїдального рефлектора шляхом хіміко-гальванічної металізації внутрішньої відбиваючої поверхні заготовки, надрукованої на 3-D принтері з АВС-пластику.

На основі принципу анабераційних точок розроблено метод контролю внутрішньої дзеркальної еліпсоїдальної поверхні рефлекторів. Серед-

ньоквадратичне відхилення геометричного центру реальної та номінальної фотометричних плям, виміряні при різних кутах падіння на металічному та металізованому пластиковому еліпсоїдальних рефлекторах показали більшу рівномірність контрольованої форми останнього. Врахування реальної форми робочої поверхні рефлекторів біомедичних фотометрів при вирішенні задачі поширення оптичного випромінювання у системах «біологічне середовище + еліпсоїдальний рефлектор» дозволить підвищити достовірність візуалізації при прямій задачі та точність визначення оптичних властивостей середовищ при оберненій. Таким чином, запропонований метод контролю форми еліпсоїдальних рефлекторів дозволить покращити метрологічні характеристики вимірювальних систем фотометрів з їх використанням.

#### Література

1. Bezuglyi M. A. Ellipsoidal reflectors in biomedical diagnostic / M.A. Bezuglyi, N.V. Bezuglaya // Proc. SPIE 9032-15. – 2013, V2. – Pp.Q1– Q5. DOI: 10.1117/12.2044606
2. Безуглий М. О. Метод фотометричного дзеркального еліпсоїда обертання для дослідження шорсткості поверхні / М. О. Безуглий, Д. В. Ботвинівський, В. В. Зубарев, Я. О. Коцур // Методи та прилади контролю якості. – 2011. - №27. – С.77 – 83.
3. Иванов Ю. С. Виготовлення глибокої асферики траєкторним копіюванням та її застосування / Ю. С. Иванов, О. О. Монсар, І. І. Синявський // Вісник НТУУ «КПІ». Серія приладобудування. – 2004. – Вип. 28. – С.24 – 28.
4. Pan R. A novel method for aspheric polishing based on abrasive trajectories analysis on contact region / R. Pan, Zhen-Zhong Wang, T. Jiang, Zhan-Shuai Wang, Yin-Biao Guo // Proc IMechE Part B:J Engineering Manufacture. – 2015, No. 229. – Pp.275–285. DOI: 10.1177/0954405414527956
5. Johnson R. B. Aspheric glass lens modeling and machining / R. B. Johnson, M. Mandina // Proc. of SPIE 5874. – 2005. doi:10.1117/12.619382
6. Безуглий М. О. Особливості виготовлення еліпсоїдальних рефлекторів фотометрів / М. О. Безуглий, І. І. Синявський, Н. В. Безугла, А. Г. Козловський // Вісник НТУУ «КПІ». Серія Приладобудування. – 2016. – №2 (52). – С.76-81.
7. Зленко М. А. Аддитивные технологии в машиностроении: пособие для инженеров / М. А. Зленко, М. В. Нагайцев, В. М. Довбыш. – М. ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ», 2015. – 220 с.
8. Laser Engineered Net Shaping (LENS): A Tool for Direct Fabrication of Metal Parts / [C. Atwood, M. Griffith, L. Harwell, et. al] // Conference: 17th International Congress on Applications of Lasers and Elector-Optics. – 1998. – Pp. 1549. – Режим доступу до журналу: <https://www.osti.gov/scitech/servlets/purl/1549>  
DOE Contract Number: AC04-94AL85000
9. Ahn S.-H. Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS / S.-H. Ahn, M. Montero, D. Odell, Sh. Roundy, P. K. Wright // Rapid Prototyping Journal. – 2002, Vol. 8 Iss: 4, – Pp.248 – 257. DOI 10.1108/13552540210441166
10. Barclift M.W. Examining variability in the mechanical properties of parts manufactured via polyjet direct 3d printing / M. W. Barclift, Ch. B. Williams // Discover the world's research. – 2012. – Pp.876 – 890. – Режим доступу до журналу: [https://www.researchgate.net/publication/267262975\\_Examining\\_variability\\_in\\_the\\_mechanical\\_properties\\_of\\_parts\\_manufactured\\_via\\_polyjet\\_direct\\_3D\\_printing](https://www.researchgate.net/publication/267262975_Examining_variability_in_the_mechanical_properties_of_parts_manufactured_via_polyjet_direct_3D_printing).
11. Mueller B. Laminated object manufacturing for rapid tooling and patternmaking in foundry industry / B. Mueller, D.Kochan // Computers in Industry – 1999, V. 39, Iss.1. – Pp. 47–53.
12. Пуряев Д. Т. Методы контроля оптических асферических поверхностей. - Москва: Машиностроение, 1976. – 262 с.
13. Byk M.V. Die funktionale Mehrfachbeschichtung der Oberfläche von quarzartigen Resonatoren / [M.V.Byk, O.V. Linucheva, R. I. Hulian et. ell.] // Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. – 2014, № 11–12. – Pp. 116-119.
14. Патент України UA 78518. М. О. Безуглий, І. І. Синявський, М. Г. Баринів, «Спосіб контролю форми дзеркального еліпсоїда обертання», (51) МПК , G01M 11/00. Березень 25, 2013.
15. Патент України UA 71044. С. Ф. Петренко, Мікроманіпулятор, (51) МПК G02B21/32. Листопад, 11, 2004.

УДК 681.7.062.43:681.785.4

**М. А. Безуглий, О. В. Линючева, Н. В. Безуглая, М. В. Бык, С. А. Костюк**

*Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», Киев, Украина*

#### КОНТРОЛЬ ФОРМЫ ЭЛЛИпсоИДАЛЬНЫХ РЕФЛЕКТОРОВ БИомЕДИЦИНСКИХ ФОТОМЕТРОВ

В работе представлена технология нанесения зеркального покрытия химико-гальванической металлизацией внутренней поверхности эллипсоидального рефлектора, изготовленного с помощью 3-D печати из АБС-пластика. Рассмотрены два способа реализации этой технологии путем нанесения электропроводящего слоя с помощью порошкового графита и химического нанесения электропроводящего металлического слоя с

последующим доразчиванием необходимых функциональных слоев. Разработано средство контроля формы внутренней зеркальной поверхности рефлектора на основе метода анаберационных точек, который может быть использован для измерения отклонений формы как металлических эллипсоидов с полированной внутренней поверхностью, так и изготовленных по предложенной технологии. Разработан аналитический базис пространственной ориентации элементов измерительного средства и математический аппарат определения среднеквадратичного отклонения формы поверхности в точке контроля. Сравнительный контроль металлического и металлизированного эллипсоидов произведен в пяти плоскостях на разных высотах, которые характеризуют положение точки контроля и угол падения лазерного луча. В заданных плоскостях получено «цифровую» модель рабочей поверхности эллипсоида вращения с действительной формой и коэффициентом отражения. Результаты контроля могут быть учтены при коррекции математического аппарата распространения оптического излучения в биомедицинских фотометрах.

**Ключевые слова:** эллипсоид вращения, рефлектор, 3- D печать, фотометрия.

**M. A. Bezuglyi, O. V. Linucheva, N. V. Bezuglaya, M. V. Byk, S. A. Kostiuk**  
*National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»,  
Kyiv, Ukraine*

### CONTROL OF THE ELLIPSOIDAL REFLECTORS SHAPE FOR BIOMEDICAL PHOTOMETERS

A mirror coating technology by chemical-galvanic metallization of inner surface of ellipsoidal reflector produced by 3-D printing of ABS plastic is presented in the paper. Two ways of this technology realization were considered. The first is by applying a conductive layer with graphite powder. The second is by chemical deposition metal conductive layer and subsequent functional layering. The method of shape control of inner mirror surface of reflector based of aberration points was developed and can be used to measure the deviation form of metal ellipsoids with polished inner surface as well as produced by proposed technology. The analytical basis for spatial orientation elements measuring tools and mathematical tools of determine standard deviation shape the surface at the point of control were developed. Comparative control of the metal ellipsoid and the metallized ellipsoid was spent in five planes at different heights characterizing the position of the control's point and the angle of the laser beam. In a given planes "digital" model working surface of an ellipsoid revolution with the actual shape and the coefficient of reflection have been received. The control results can be taken into account during correction of the mathematical tools propagation of optical radiation in biomedical photometer.

**Keywords:** ellipsoid of revolution, reflector, 3-D printing, photometry.

*Надійшла до редакції  
27 квітня 2017 року*

*Рецензовано  
17 травня 2017 року*

© Безуглий М. О., Лінючева О. В., Безугла Н. В., Бик М. В., Костюк С. А., 2017  
DOI: 10.20535/1970.2017.53.1.010

УДК 620.179.14

### ВПЛИВ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ФАНТОМУ ТОЧНОСТІ ВИГОТОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ У ПРИЛАДОБУДУВАННІ

*Скицюк В. І., Клочко Т. Р.*

*Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені  
Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна  
E-mail: [klochkotr@gmail.com](mailto:klochkotr@gmail.com)*

*У попередній низці авторських статей розглядалися просторові елементи технологічного об'єкта як частки відліку розмірів у технологічних процесах вимірювання. У пропонуємії статті розглянуто низку проблем, пов'язаних із перетворенням уявного розміру в реальний, не розглядаючи при цьому сам процес утворення. Водночас, сам процес утворення необхідного розміру розглядається як реалізація фантому другого роду.*

*Оскільки між уявним та реальним розмірами існує зв'язок лише через теорію вірогідності, то розглядається низка проблем з визначенням точності отримуючого розміру. Для цього у систему допусків та*