

РОЗДІЛ 5

ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ФОРМОУТВОРЕННЯ ВНУТРІШНЬОЇ ЕЛІПСОЇДАЛЬНОЇ ПОВЕРХНІ

У даному розділі розглядаються технологічні засади виготовлення та контролю еліпсоїдальних рефлекторів. Обґрунтовано вибір матеріалів еліпсоїдів для різних методів формоутворення асферичної поверхні. Сформульовані принципи виготовлення металевих дзеркальних еліпсоїдів обертання із застосуванням вертикально-розточувальної технології, а також технології 3D друку з пластику. Обумовлені практичні аспекти нанесення дзеркального покриття на внутрішню еліпсоїдальну пластикову поверхню. Представлені особливості контролю форми еліпсоїдальної поверхні та здійснено фотометричне порівняння функціонування рефлекторів, виготовлених за різними технологіями.

5.1 До вибору методу та матеріалу виготовлення еліпсоїдального рефлектора

З функціональної точки зору, використання ЕР спрощує процеси складання та юстування оптичних систем фотометрів завдяки суттєвому зменшенню кількості елементів, а відтак маси та габаритів, що покращує їх експлуатаційні характеристики. При використанні дзеркального еліпсоїда обертання кількість діючих оптичних дзеркальних поверхонь зменшується до однієї. Такі оптичні елементи можуть бути використані при побудові приладів для контролю шорсткої поверхні [1] або вимірювальних систем біомедичного призначення [2], проте їх широке застосування обмежене складністю виготовлення. Існуючі технології по виготовленню еліпсоїдів не є універсальними, що вимагає використання великого верстатного парку та висококваліфікованих працівників.

За останні роки було проведено багато досліджень з метою отримання високопродуктивних технологій виготовлення асферичних поверхонь, у тому числі 3D друк [3]. Оскільки отримання дзеркального еліпсоїда обертання (еліпсоїдального рефлектора) з використанням 3D принтерів потребує фінішної обробки: нанесення дзеркального покриття (у випадку друку з полімерів) або полірування (у випадку друку з металів та металевих сплавів), то його особливості потребують окремого розгляду, що буде здійснено нижче. Найбільш ефективним, з огляду на необхідний

конструктивний функціонал використовуваних еліпсоїдальних рефлекторів було б алмазне точіння [4]. Проте даний метод вимагає вартісного обладнання і, внаслідок особливостей своєї реалізації та кінематики обладнання, не може бути використаний для отримання закритих поверхонь, якою є дзеркальний еліпсоїд обертання.

Метод реплікації [5] знайшов своє застосування в масовому виробництві. У даному випадку на сферичну поверхню наносять тонкий шар рідкої полімерної композиції. Еталон, що має зворотну асферичну поверхню, притискається до сферичної поверхні деталі. У результаті полімеризації композиція твердіє і точно копіює поверхню еталону. Після цього деталь з асферичним шаром відділяється від еталону. Необхідність виготовлення точних шаблонів та обладнання також робить цей метод недоцільним для виготовлення деталей в експериментальному та одиничному виробництві.

Відносно дешевим і доступним є формоутворення асферичних поверхонь методом траєкторного копіювання. Даний метод дозволяє оброблювати асферичні поверхні широкого класу з високою продуктивністю завдяки можливості забезпечення інтенсивних режимів обробки. Цей метод має високу точність формоутворення. Копіювальний пристрій забезпечує можливість отримання асферичних поверхонь довільного профілю. Відомі верстати [6], асферичним шаблоном в яких є кулачок з профілем, що відповідає твірній поверхні, що виготовляється, або її еволюті. Суттєвим недоліком таких верстатів є необхідність виготовлення складних і точних шаблонів, що впливають на точність отримуваних поверхонь.

Застосування механізмів, у яких використовуються прості елементи, визначені точки однієї з ланок яких описують необхідні криві, дозволяє суттєво зменшити вплив точності виготовлення шаблонів на точність виготовлення асферичних поверхонь. Однак простий важільний копір дає помітну геометричну похибку через неоднаковий повздовжній хід кінців копіювального та виконавчого важелів та недостатню його жорсткість при виготовленні деталей достатньо великих розмірів.

Для виготовлення ЕР не залежно від спектрального діапазону його роботи можна використати матеріал-підкладку, що матиме форму та розміри робочої поверхні у вигляді еліпсоїда обертання, і нанести на неї відбиваюче покриття. Іншим варіантом є виготовлення еліпсоїду з

матеріалу, який сам по собі має властивість до відбиття оптичного випромінювання.

У першому способі як матеріал-підкладка може бути використане оптичне скло або полімери. Цей метод має сенс застосовувати при необхідності виготовлення рефлекторів для роботи зі складним спектром випромінювання. Вибір конкретного покриття дозволить домогтися відбиття у широкому спектрі довжин хвиль, або ж, навпаки, відфільтрувати зайву область. З іншого боку, нанесення покриття на частково закриті поверхні є багатоетапним фізико-хімічним процесом і може потребувати складної, вартісної оснастки у вузькому діапазоні конфігурацій та розмірів.

При виготовленні рефлектора з матеріалу з власними властивостями до відбиття можна скоротити перелік необхідного обладнання і навіть здешевити собівартість кінцевого виробу. З огляду на завдання еліпсоїдальної фотометрії світлорозсіювальних середовищ, рефлектор повинен працювати в доволі широкому спектральному діапазоні, що включає видимий та ближній інфрачервоний, вважатимемо доцільнішим використовувати матеріал покриття або формоутворення з доволі широким спектральним діапазоном роботи, впритул до 2 мкм,

При виборі матеріалу для виготовлення деталей з відбиваючими поверхнями необхідно враховувати численні чинники, зокрема: фізичні (оптичні), механічні, технологічні, вартісні тощо. Основною характеристикою для рефлекторів є коефіцієнт відбиття їх робочих поверхонь. Найбільш високі показники за цими параметрам мають (в порядку спадання): срібло, золото, алюміній, паладій, хром, марганець і т.д. [7].

Алюміній, окрім малої ваги, має найбільш рівномірний коефіцієнт відбиття на інтервалі довжин хвиль видимого та ближнього інфрачервоного спектрів. Порівняно великий коефіцієнт лінійного розширення накладає свої умови до застосування деталей, обмежуючи використання приладів середовищами зі сталою температурою. Алюміній та сплави на його основі є достатньо технологічними при обробці багатьма методами. Як показує досвід, найкраща чистота оптичних поверхонь деталей досягається при застосуванні дрібнодисперсних однорідних сплавів В95, АМГ6, Д16Т. Тому останній і був використаний у якості основного конструкційного матеріалу для виготовлення еліпсоїдального рефлектора методами, розглянутими у п. 5.2 та п. 5.3.

5.2 Метод траєкторного копіювання для точіння глибокої асферики

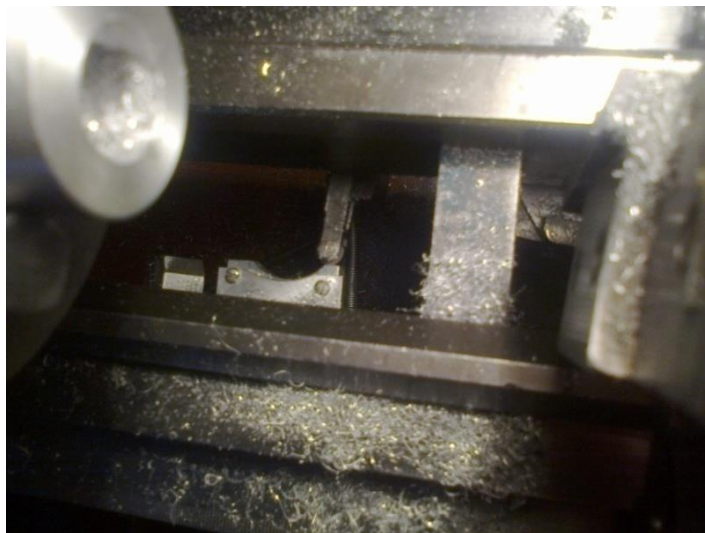
Як уже зазначалося, суто математично радіально-симетричний еліпсоїд обертання можна отримати зі сфери, стискаючи її по двом рівнозначним координатам (осям), коли третя залишається без зміни (рис. 2.9, рис. 2.10). Тоді, виходячи з [8] оперують коефіцієнтом стискання m . Такий спосіб отримання еліпсоїда було застосовано, зокрема, при розробці технології по його виготовленню шляхом траєкторного копіювання вихідної окружності [9]. Метод траєкторного копіювання дозволяє оброблювати асферичні поверхні широкого класу з високою продуктивністю завдяки можливості забезпечення інтенсивних режимів обробки в жорстких осях, які неможливо отримати за допомогою вільного притиру. Ці методи мають високу точність формоутворення. До того ж, за допомогою траєкторного копіювання можна отримати деталі з суцільною внутрішньою поверхнею еліпсоїду обертання за один установ, що суттєво спрощує конструкцію пристосування для базування заготовок і значно підвищує точність кінцевого виробу.

Розглянемо основні етапи виготовлення ЕР зазначеної конфігурації методом траєкторного копіювання. Усі еліпсоїдальні рефлектори, що були використані при створенні установок, макетів та прототипів приладів даного пошукового дослідження і були виготовлені за технологією траєкторного копіювання [9], є авторськими виробами і продукуювані в Головній астрономічній обсерваторії НАН України.

Розглянута нижче технологія реалізована на прикладі еліпсоїдального рефлектора з ексцентриситетом 0.66 (коефіцієнтом стискання $m = 0.75$) та фокальним параметром 7.5 мм. Спочатку був підготовлений брусок сплаву Д16Т необхідної товщини та розмірів по периметру. Далі на токарному верстаті ТВ-16 спочатку з використанням свердла діаметром 15 мм, а потім – розточного різця, був отриманий отвір діаметром 19.86 мм (рис. 5.1.а), що відповідає розміру малої осі еліпсоїда обертання. Потім від бруску відпиляли необхідну частину з визначеними розмірами (приблизно третина діаметру), що і забезпечило формування копіру, який після чистової обробки закріплюється в спеціальному пристосуванні (рис. 5.1.б).



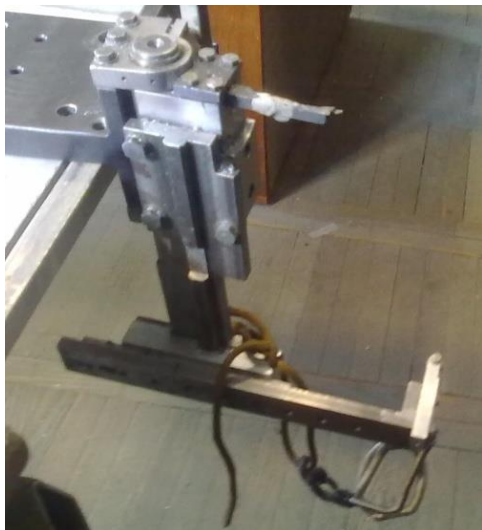
а)



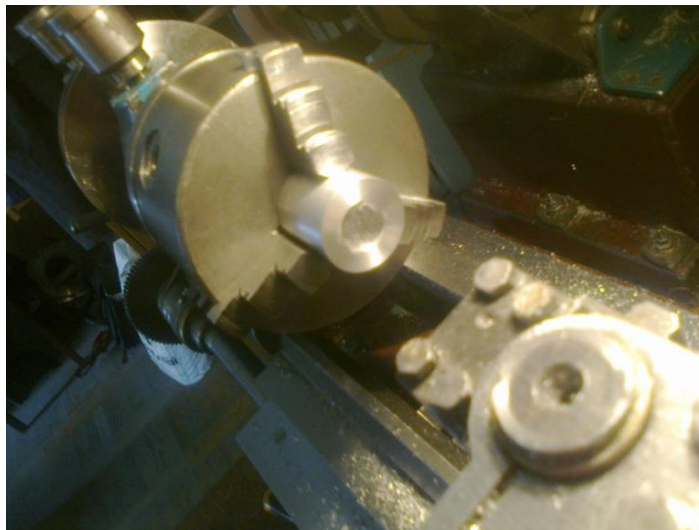
б)

Рис. 5.1 Особливості виготовлення та застосування копіру:
заготовка для отримання копіру (а); закріплення копіру у пристосуванні (б)

Пристосування (рис. 5.2) встановлюється на каретку токарного верстата ТВ-16 і закріплюється за допомогою спеціальної плити та гвинтів. Пристосування складається з двох плеч, одне з яких опирається направляючим роликом на копір (рис. 5.1.б) і ковзає вздовж нього. На друге плече встановлюється токарний різець спеціальної форми для точіння внутрішньої еліпсоїдальної поверхні. Заготовка зі сплаву Д16Т встановлюється в патрон токарного верстату (рис. 5.2.б). Потім за допомогою свердла, що розміщається у задній бабці, роблять наскрізний отвір і без пере-встановлення починають чорнову обробку.



а)



б)

Рис. 5.2 Особливості формоутворення еліпсоїдальної поверхні:
пристосування для виготовлення (а); встановлення заготовки у центрах (б)

Пристосування (рис. 5.2.а) застосовується для розточування внутрішньої еліпсоїдальної поверхні у циліндричній заготовці. Траєкторія руху плеча, що ковзає вздовж копіра, наступна: за одне переміщення каретки пристосування проходить крайні точки, а потім при кожному наступному переміщенні каретки, плече зміщується до центру, що і призводить до формоутворення внутрішньої еліпсоїдальної поверхні. У ході процесу різання внутрішньої поверхні за кожен прохід різця плече може зміщуватися на декілька міліметрів, що, у свою чергу, призводить до зміни величини ходу різця, а отже і до невірної траєкторії. Даний дефект виправляється за допомогою сильного натягу нижнього плеча пружиною розтягу (рис. 5.3.а). Готова деталь (рис. 5.3.б) містить внутрішню еліпсоїдальну поверхню і потребує чистової обробки для отримання необхідного функціоналу, а саме дзеркальності.

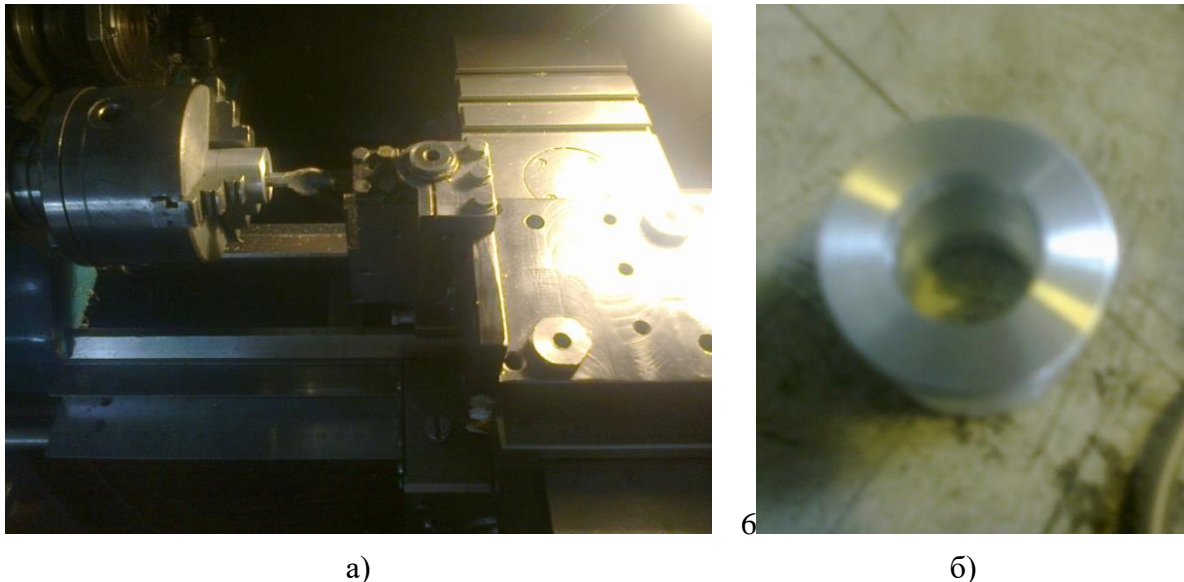


Рис. 5.3 Отримання внутрішньої еліпсоїдальної поверхні:
процес чорнкової обробки (а); деталь після чорнкової обробки (б)

Для отримання еліпсоїдального рефлектора з внутрішньою дзеркальною поверхнею здійснюють її полірування за допомогою алмазної пасти АСН поступово зменшуючи зернистість з 60/40 до 1/0. Для полірування використано спеціальне пристосування (рис. 5.4), що складається з асинхронного двигуна та валу, на кінці якого розміщується насадка з повсті.



Рис. 5.4 Пристосування для полірування внутрішньої еліпсоїдальної поверхні

Готові еліпсоїдальні рефлектори показані на рис. 5.5 і вже містять необхідні конструктивні елементи для забезпечення реалізації однієї з функціональних схем, описаних у п. 2.1.



Рис. 5.5 Еліпсоїдальні рефлектори
з ексцентриситетом 0.66 та фокальним параметром 7.5 мм

Описана технологія формоутворення асферичної (еліпсоїдальної) внутрішньої дзеркальної поверхні методом траєкторного копіювання дозволяє отримувати високоякісні рефлектори, номенклатура яких за конструктивними параметрами дозволяє використання у різноманітних фотометрах та вимірювальних засобах, що будуть описані у наступних розділах роботи.

5.3 Вертикально-розточувальна технологія з ексцентриковим механізмом

Свого роду, модельним розвитком вважатимемо метод виготовлення еліпсоїду обертання з необхідною формою твірної, що змінюється за заданим законом, шляхом узгодження переміщення по повздовжній осі з

врізанням у матеріал заготовки з циліндричним наскрізним отвором, що був розроблений на основі принципів траєкторного копіювання.

За запропонованою схемою (рис. 5.6) поперечна подача забезпечується при переміщенні проекції вершини обробляючого інструменту відносно горизонтальної осі при переміщенні штовхача.

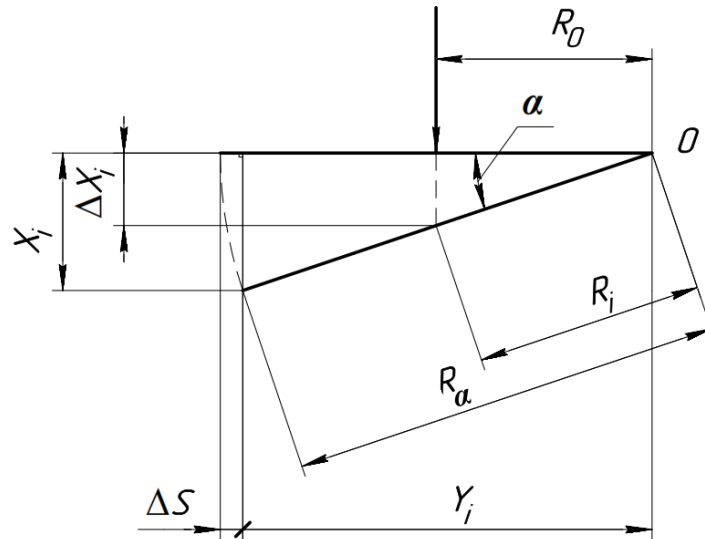


Рис. 5.6 Схема розрахунку поперечної подачі:

O – вісь обертання; R_0 – зміщення штовхача відносно осі обертання; R_a – виліт вершини обробляючого інструменту відносно осі обертання; R_i – зміщення штовхача відносно осі обертання після переміщення; α – кут повороту інструменту; Y_i – поперечна проекція різальної крайки інструменту після переміщення штовхача; ΔX_i – переміщення штовхача; X_i – переміщення вершини обробляючого інструменту; ΔS – величина поперечної подачі

З рис. 5.6 видно, що переміщення вершини обробляючого інструменту вздовж вертикалі складась:

$$X_i = \sqrt{R_a^2 - Y_i^2}$$

Беручи до уваги, що $Y_i = R_a - \Delta S$ отримаємо:

$$X_i = \sqrt{2R_a \cdot \Delta S - (\Delta S)^2}. \quad (5.1)$$

Переміщення штовхача можна виразити у вигляді:

$$\Delta X_i = R_0 \cdot \operatorname{tg} \alpha = R_0 \frac{\sin \alpha}{\sqrt{1 - (\sin \alpha)^2}}. \quad (5.2)$$

Враховуючи, що $\sin \alpha = X_i / R_\alpha$ (5.2) перепишемо у вигляді:

$$\Delta X_i = R_0 \frac{\frac{X_i}{R_\alpha}}{\sqrt{1 - \left(\frac{X_i}{R_\alpha}\right)^2}}. \quad (5.3)$$

Після підстановки (5.1) у вираз (5.3) отримаємо залежність для знаходження необхідного переміщення штовхача при заданій величині поперечної подачі:

$$\Delta X_i = R_0 \sqrt{\frac{2R_\alpha \cdot \Delta S - (\Delta S)^2}{(R_0 - \Delta S)^2}}. \quad (5.4)$$

Знаючи переміщення штовхача (5.4) можна отримати передавальну функцію приводу поперечної подачі, що обчислюється за значеннями параметрів конкретного верстату і деталі.

$$k = \frac{P}{h - 2X_i \left(\frac{R_\alpha}{R_0}\right)}, \quad (5.5)$$

де: k - передаточний коефіцієнт приводу поперечної подачі; P - крок ходового гвинта повздовжньої подачі, мм; h - висота еліпсоїдального рефлектора, мм.

На підставі розробленого методу та реалізованого алгоритму розрахунків запропоновано структурно-функціональну схему пристосування (рис. 5.7) для формоутворення еліпсоїдальної внутрішньої поверхні та подальшої чистової обробки з метою отримання необхідного коефіцієнту дзеркального відбиття.

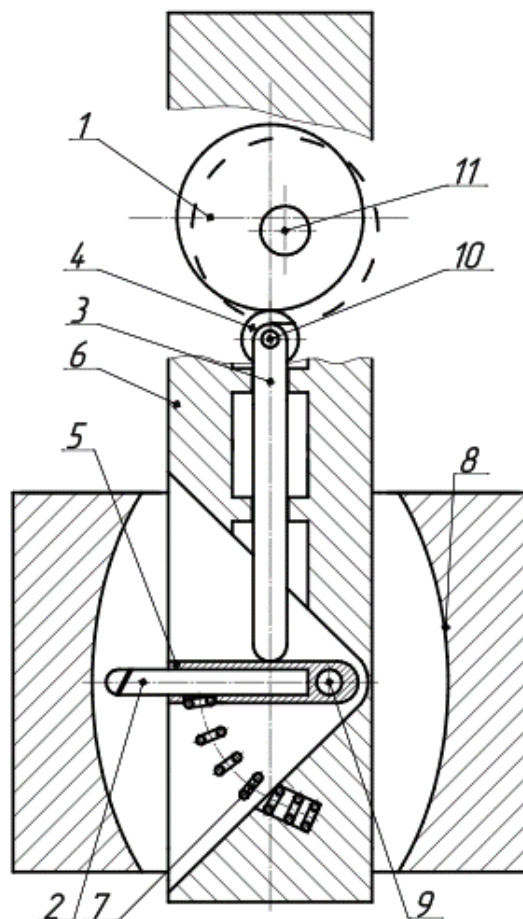


Рис. 5.7 Пристосування для обробки еліпсоїда обертання:

- 1 – ексцентрик; 2 – різець; 3 – штовхач; 4 – ролик; 5 – тримач різця;
 6 – оправка вертикально-розточувального верстату; 7 – пружина; 8 – деталь;
 9 – вісь тримача різця; 10 – вісь ролика, 11 – вісь ексцентрика

Під час обробки деталі 8 відбувається переміщення всього повздовжнього супорту з закріпленням на ньому пристосуванням. Круглий ексцентрик 1, що має ексцентриситет, розрахований відповідно до параметрів еліпсу, обертається зі швидкістю, узгодженою зі швидкістю повздовжньої подачі, переміщуючи при цьому штовхач 3. Штовхач ковзає вздовж отвору оправки 6 і давить на тримач інструменту 5, що обертається навколо осі 9 разом з різцем 2. Вершина інструменту, описуючи коло, виконує поперечне переміщення. Зворотній рух інструменту забезпечується пружиною 7. Даний метод дозволяє отримувати необхідне переміщення оброблюючої вершини інструменту вздовж твірної еліпсоїду. Пристосування може бути використаним як для отримання самої поверхні при точінні з закріпленням в ньому різцем, так і використовуватися при шліфуванні і поліруванні робочої поверхні при закріпленні в ньому шліфувальних та полірувальних головок, наприклад, на каучуковій

зв'язці [10]. Це дає змогу відмовитися від необхідності використання дорогого шліфувального та полірувального обладнання.

Розглянемо принципи реалізації ексцентрикового механізму (рис. 5.8), що складається з ексцентрика 1 та двох ланок: різця 2 та штовхача 3.

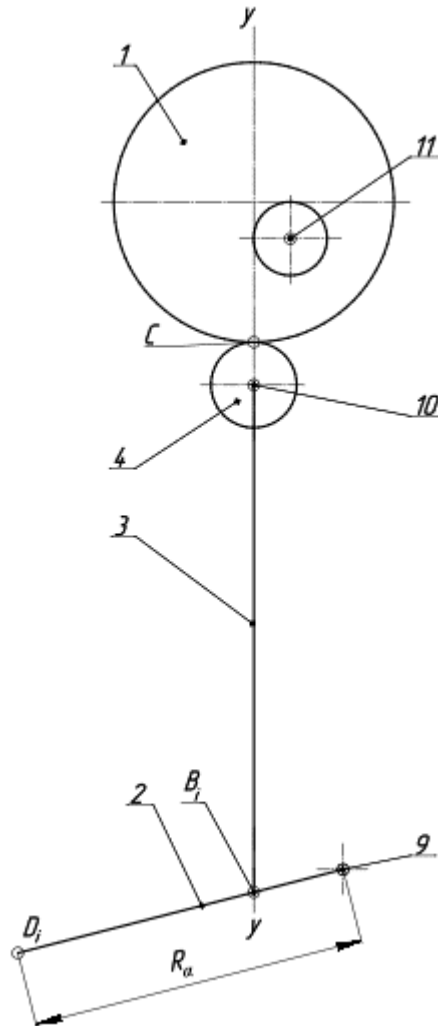


Рис. 5.8 Ексцентриковий механізм

Ексцентрик 1 обертається навколо осі 11, штовхач 2 переміщується поступально відносно вертикальної направляючої "у - у", при цьому ролик 4 може вільно обертатись навколо незалежної осі 10, не впливаючи на характер руху всього механізму. Ролик є конструктивним елементом, що зменшує сили тертя і спрацювання ланок. Зазначимо, що кінематика ексцентрикового механізму не зміниться, якщо ролик видалити і штовхач 2 безпосередньо з'єднати з ексцентриком 1 у кінематичну пару IV класу. Використовують цей механізм для перетворення обертального руху ланки 1 в поступальний рух ланки 2 для точіння внутрішньої форми еліпсоїда в залежності від розміщення ексцентрика щодо ланок механізму. Ексцентрик 1 з'єднується із шпинделем верстату, тому швидкість т. С на ексцентрику є

рівномірною. Штовхач взаємодіє з робочою поверхнею ексцентрика наконечником, який може бути гострим (точковим або лінійним), плоским, грибоподібним або роликівим, і здійснює поступальний або обертальний рух. Ексцентриковий механізм може бути плоским або просторовим, а замикання у вищій парі може бути силовим (пружина, вага штовхача тощо) або геометричним. Ексцентрик, що взаємодіє з плоским штовхачем, можна укласти в рамку, що дозволить здійснити геометричне замикання вищої кінематичної пари.

У залежності від зміщення осі штовхача відносно осі ексцентрика, збільшується радіус еліпсоїда. Побудуємо діаграму руху робочої ланки ексцентрикового механізму (рис. 5.9.а) для переміщення крайньої точки вильоту вершини обробляючого інструменту відносно осі обертання тримача різця 9 (рис. 5.7). Для забезпечення надійного підводу та врізання обробляючого інструменту в поверхню деталі 8 і збереження необхідної точності виготовлення робочої частини еліпсоїдальної поверхні, початком руху вважатимемо точку $D_0=D_{I2}$, котра знаходиться вище площини, що містить точку другого фокусу F_2 . Координати зазначеної точки $D_0=D_{I2}$ і точки $D_I=D_{I1}$, що відстають одна відносно іншої на величину поперечної подачі ΔS_0 , базуються (P) по верхньому торцю еліпсоїдального рефлектора для забезпечення необхідної фокальної відстані при завершальному торцевому точінні.

Діаграму переміщення (рис. 5.9.б) побудовано в системі координат $(\Delta S, t)$, де ΔS можна визначити з (5.4) для положення поточних точок вершини різця D_i та наконечника штовхача B_i , t – час.

Представлена діаграма переміщення вершини різця та наконечника штовхача побудована при рівному масштабі для виготовлення еліпсоїда з ексцентриситетом 0.76 та фокальним параметром 44.11 мм при використанні ексцентрика з середнім радіусом 55.33 мм та зміщення осі обертання відносно геометричної осі 20.36 мм. Рис. 3.9.в ілюструє діаграму переміщення для еліпсоїда з ексцентриситетом 0.66 та фокальним параметром 16.875 мм. На горизонтальній осі відкладено відрізок, що відповідає часу одного оберту ведучої ланки ексцентрикового механізму. Переміщення штовхача відбувається плавно, рівномірно і симетрично відносно найбільшого радіуса. З рис. 5.9.б та рис. 5.9.в. видно, що рух різця складається з двох частин: робочої, внаслідок якої відбувається

безпосередньо процес точіння і зворотно-обертальної, що повертає різець у вихідне положення.

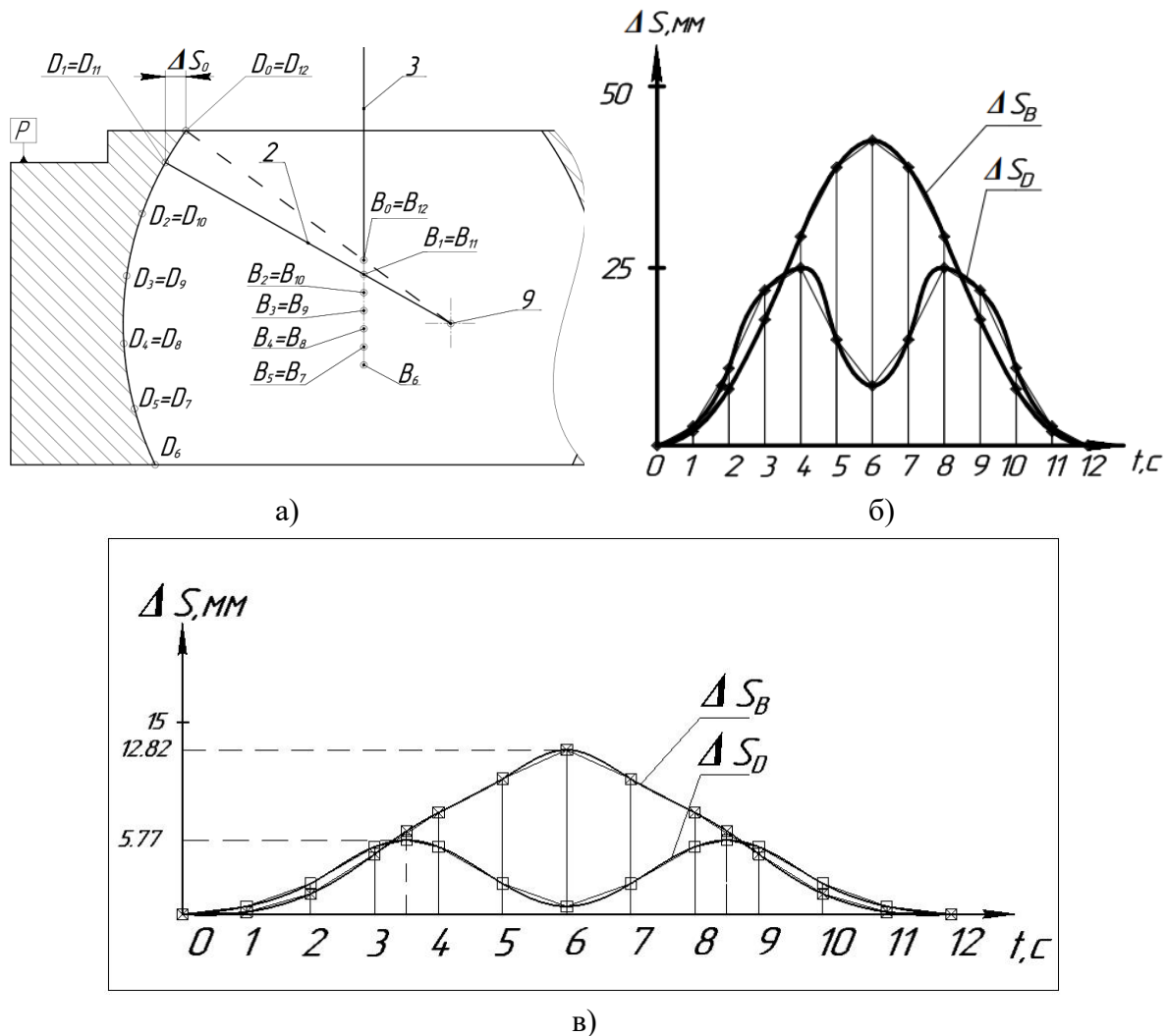


Рис. 9 Переміщення робочої ланки ексцентрикового механізму: елементи кінематичної схеми (а); діаграми переміщення різця ΔS_D та штовхача ΔS_B (б, в)

У відповідності до проведених розрахунків залежність форми еліпсоїда обертання, перш за все, обумовлена формою та розмірами ексцентрика і розміщенням штовхача відносно осі обертання тримача різця розробленого пристосування. Вертикальне зміщення штовхача відносно різця регулює виліт вершини різця при точінні. Таким чином, знаючи характеристики ексцентрикового механізму, можна обрахувати і виточити еліпсоїд обертання необхідної конфігурації.

Запропонована технологія [2] дозволить суттєво спростити виготовлення еліпсоїдальних рефлекторів з широким діапазоном по розмірам та мінімальною кількістю використовуваного обладнання, а розроблене пристосування може застосовуватись також для чистової та фінішної обробки для отримання дзеркальної відбиваючої поверхні.

5.4 Виготовлення еліпсоїдального рефлектора з використанням технологій 3D-друку

5.4.1 Обґрунтування технології 3D-друку

Як зазначено в [11], перспективними і високопродуктивними можуть стати технології виготовлення деталей подібної конфігурації з використанням 3D друку. З урахуванням специфічності форми еліпсоїдальних рефлекторів та вимогам, що ставляться до точності еліптичної твірної та «усіченню» по фокальним площинам [1, 9], найбільш прийнятними можуть бути технології типу Laser Powder Forming [12, 13] для виготовлення твердотільної металевої 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, 14], показує, що оптимальна фотометрія еліпсоїдальними рефлекторами можлива при адаптації їх параметрів (ексцентриситету та фокального параметру) до оптичних властивостей цього середовища. Це унеможливорює 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 [15 – 17], 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 (акрилонітрилбутадієнстирол), ПЛА-пластик (полілактид), СоРЕТ-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.

З огляду на вищезазначене, наведемо технологію нанесення дзеркального покриття на внутрішню поверхню еліпсоїдального рефлектора, виготовленого за допомогою 3D друку з АБС-пластику.

5.4.2 Хіміко-гальванічна металізація внутрішньої відбиваючої поверхні еліпсоїдального рефлектору

Одним з основних недоліків деталей, надрукованих з пластикових матеріалів за допомогою 3D 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 (H_2SO_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, H_2SO_4 – 100, блискоутворююча добавка – 2. Процес електрохімічного нанесення мідного шару проводився за катодної густини струму від 0.5 А/дм^2 («затяжка») до 2 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 було поставлено 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 дорощуванням необхідних функціональних шарів [17, 18]. 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 сенсibilізуючий шар з розчину SnCl_2 – 2 г/л у концентрованій соляній кислоті. Після ретельного промивання на сенсibilізовану 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 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 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 сенсibilізовану 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, H_3BO_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/дм². 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. 5.10).



а)



б)

Рис. 5.10 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. 5.11.б та рис. 5.11.в відповідно.



а)



б)



в)

Рис. 5.11 Еліпсоїдальні рефлектори: металевий (а); пластиковий до (б) та після (в) нанесення металевого покриття

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

5.5 Контроль форми еліпсоїдальної поверхні

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 траєкторного копіювання [9, 11]. 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 контрольно-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 [19]). 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 прикладною задачею.

Як у випадку металевих еліпсоїдів (рис. 5.11.а) з полірованою внутрішньою поверхнею, так і виготовлених за допомогою технологій 3D 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. 5.12) для контролю форми дзеркального еліпсоїду обертання [18, 20], 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 .

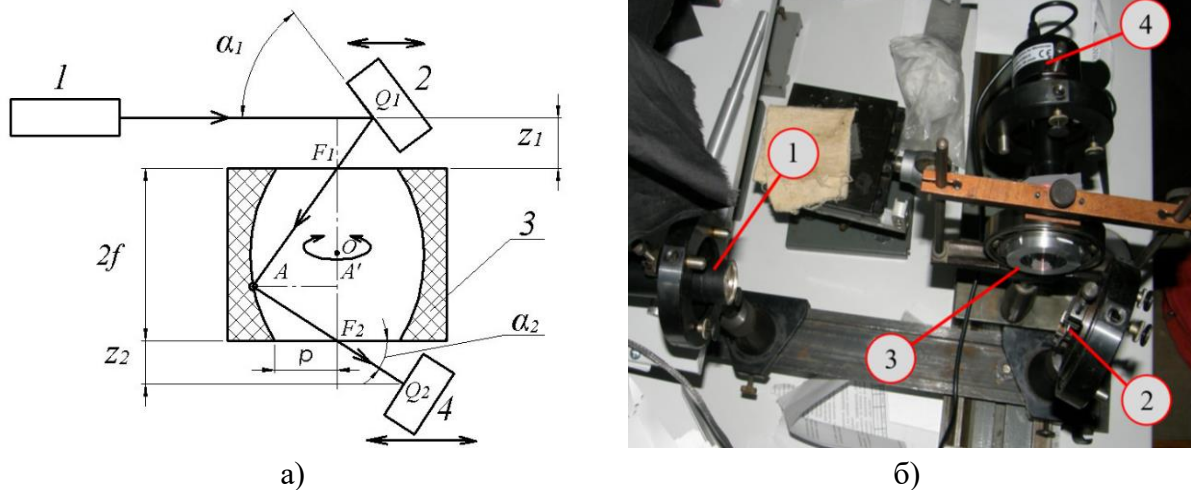


Рис. 5.12 Схема пристрою (а) та загальний вигляд установки (б) для контролю параметрів робочої поверхні дзеркального еліпсоїда обертання:
1 – джерело випромінювання; 2 – формуюча оптична система;
3 – еліпсоїдальний рефлектор; 4 – координатний фотоприймач

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 α_1 та α_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 [1, 21], 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 прямої, що містить падаючий промінь вздовж відрізка Q_1A , з початком координат в точці O можна записати у наступному вигляді:

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1, \quad (5.6)$$

$$y = f - x \operatorname{tg} 2\alpha_1, \quad (5.7)$$

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

Висоту точки контролю, тобто відрізок $A'F_2$ (рис. 5.12.а), можна визначити, віднайшовши точку перетину еліпсу (5.6) та прямої (5.7):

$$A'F_2 = 2f - x_{1,2} \operatorname{tg} 2\alpha_1 \quad (5.8)$$

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 (5.6) – (5.7), має два корені, правильним буде той, при підстановці якого в (5.8) отримаємо висоту точки контролю $A'F_2 \in (0; 2f)$.

З рис. 5.11.а видно, що зміна кута падіння α_1 та сталість відстаней z_1 та z_2 призводить до зміни відрізків Q_1F_1 та Q_2F_2 :

$$Q_1F_1 = \frac{z_1}{\sin 2\alpha_1}, \quad Q_2F_2 = \frac{z_2}{\sin \alpha_2} \quad (5.9)$$

При цьому величина, на яку необхідно встановити фотоприймач, визначається виходячи з обчисленого кута α_2 :

$$\operatorname{tg} \alpha_2 = -\frac{A'F_2 \cdot \operatorname{tg} 2\alpha_1}{(2f - A'F_2)} \quad (5.10)$$

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 свіло-ділильний елемент та допоміжну фотометричну систему.

Запропонований метод забезпечує можливість побудови «цифрової» моделі робочої поверхні еліпсоїду обертання з дійсною формою та коефіцієнтом відбиття за рахунок фіксації координати точки контролю та визначення відхилення відбитого променя від другого фокусу. Альтернативою позиціювання 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 мікроманіпуляторів, наприклад на основі кільцевих п'єзоелементів [22], 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. 5.13). Для визначення відхилення форми еліпсоїдальної поверхні в точці контролю використано величину (5.11), 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 α_l та (5.9) – (5.10):

$$\Delta = \sqrt{(x' - x_0)^2 + (y' - y_0)^2} = \sqrt{\frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^N (x_i - x_0)^2 + \sum_{i=1}^N (y_i - y_0)^2 \right)} \quad (5.11),$$

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.

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 (5.11), відповідає точці $Q_2'(x'; y')$.

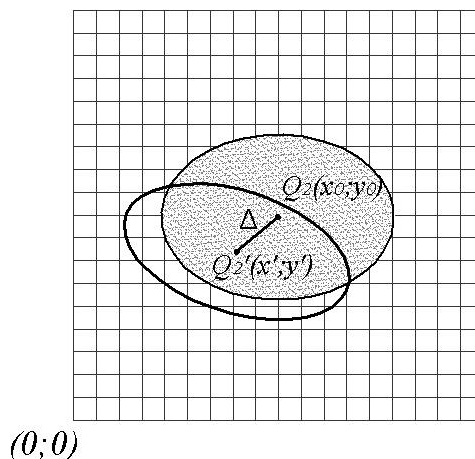


Рис. 5.13 Схема розміщення номінальної та реальної фотометричних плям

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 розміченого 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.

Підготовчими етапами побудови вимірювальної установки за запропонованим методом виділимо 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 α_1 та α_2 й відстаней Q_1F_1 та Q_2F_2 (рис. 5.12.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 [9] та шляхом металізації деталі, надрукованої з АБС пластику на 3D принтері [18], 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° . 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. 5.14). Першим числом на рис. 5.14 позначено кут, на який був повернутий ЕР навколо своєї великої напів-осі, а другим – кут α_1 .

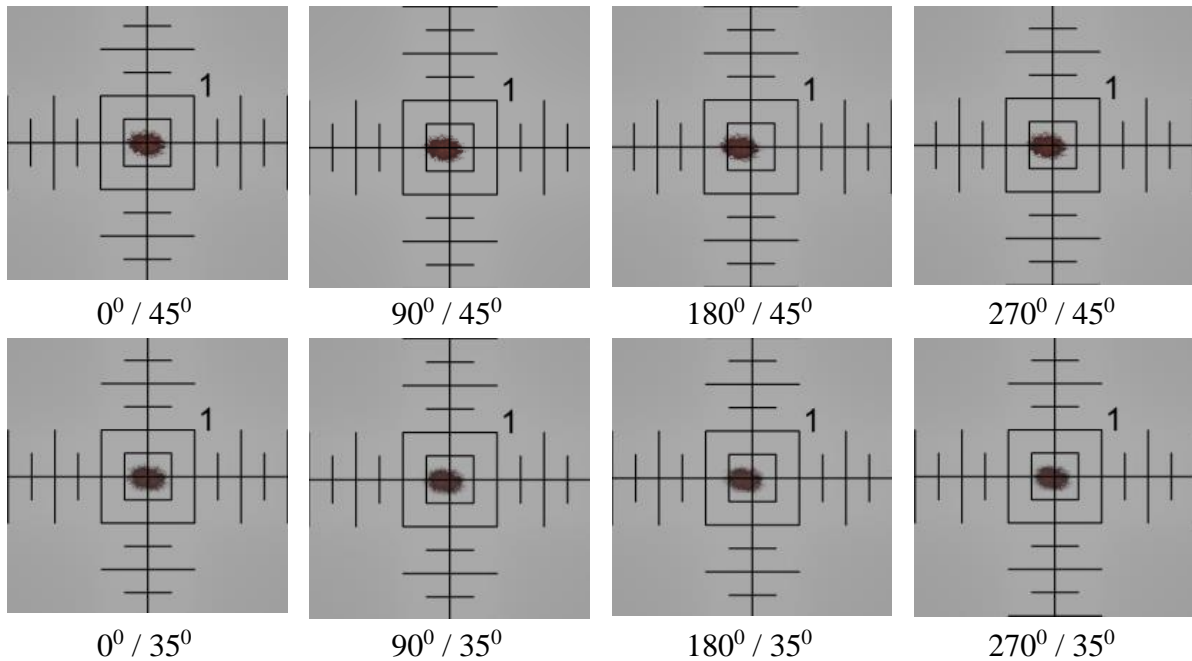


Рис. 5.14 Центральна частина зображення фотометричної плями з шаблоном при обмірі металевого ЕР

З урахуванням (5.11) набір функцій середньоквадратичного відхилення в п'яти обміряних площинах для металевих та металізованих еліпсоїдів представлені на рис. 5.15.

Особливості застосування запропонованого математичного апарату показують, що відхилення форми поверхні виражається додатними значеннями. Проте, як видно з рис. 5.14, зміщення геометричного центру реальної фотометричної плями і по координаті x , і/або по координаті y може бути від'ємним. При цьому 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 фотометрії.

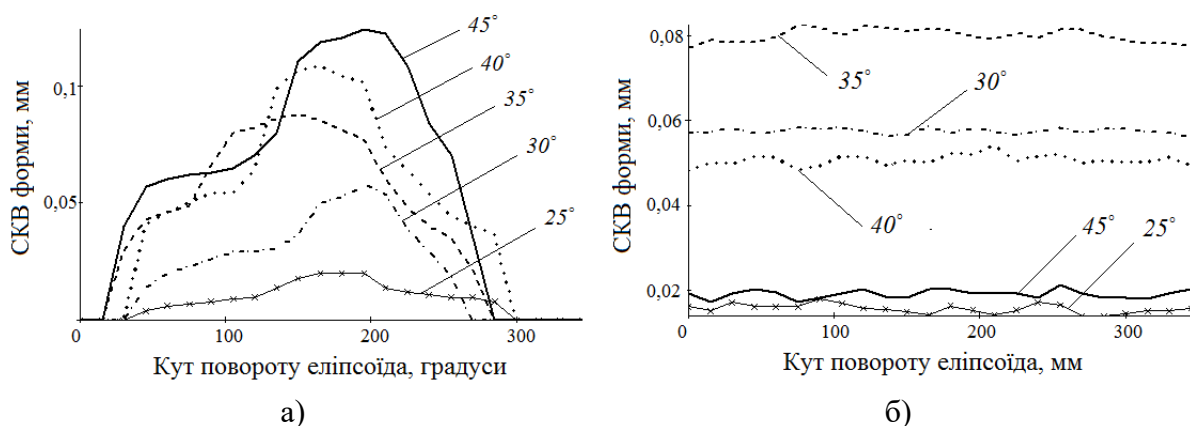


Рис. 5.15 СКВ форми поверхні еліпсоїду обертання:
для металевого (а) та металізованого пластикового (б) рефлекторів
при різних кутах падіння α_l

Аналізуючи графіки на рис. 5.15.а, можна побачити, що контрольований металевий еліпсоїд обертання має переки́с робочої дзеркальної поверхні відносно оптичної осі. Це могло бути спричинене неточним встановленням його під час виготовлення. Металізований пластиковий еліпсоїд, як видно з рис. 5.15.б, має суттєво менші відхилення СКВ, що свідчить як про точне базування при 3D друці, так і про рівномірність нанесених металічних шарів. Проте зміщення відхилення для різних кутів падіння α_l , котрі визначають висоту положення точки контролю, свідчать про те, що внутрішня поверхня ЕР була недостатньо добре підготовлена шляхом механічного очищення. З урахуванням точності використаного 3D друку (100 мкм) більше очищення практично неможливе, оскільки суттєво спотворює форму еліпсоїдальної поверхні. У такому разі доцільно використовувати 3D принтери, що забезпечують більш високу точність друку.

Слід зазначити, що викладений у цьому розділі матеріал, корелює з науковими публікаціями автора [11] та [18] і має певну схожість формулювань.

Список використаних джерел до розділу 5

1. Безуглий М.О., Ботвиновський Д.В., Зубарєв В.В., Коцур Я.О. Метод фотометричного дзеркального еліпсоїда обертання для дослідження шорсткості поверхні, *Методи та прилади контролю якості*, №27, с.77 – 83, 2011.

2. M.A. Bezuglyi, A.V. Yarych, and D.V. Botvinovskii, On the possibility of applying a mirror ellipsoid of revolution to determining optical properties of biological tissues, *Optics and Spectroscopy*, no. 113, pp.101 – 107, 2012.
3. М.А. Зленко, М.В. Нагайцев, В.М. Довбыш, *Аддитивные технологии в машиностроении: пособие для инженеров*, М: ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ», 2015.
4. Л.В. Попов, С.В. Любарский, В.Г. Соболев, С.Е. Шевцов, Алмазное точение в производстве оптических деталей, *Оптико-механическая промышленность*, №11, с. 12 – 17, 1990.
5. Л.В. Попов, Э.И. Шепурев, Асферизация оптических поверхностей методом репликации, *Оптико-механическая промышленность*, №11, с. 24 – 26, 1990.
6. В.И. Каширин, *Основы формообразования оптических поверхностей: курс лекций*, Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2006.
7. А.В. Соколов, *Оптические свойства металлов*, М.: Физматлит, 1961.
8. Г.А. Корн, и Т.М. Корн, *Справочник по математике*, М.: Наука, 1978.
9. Ю.С. Иванов, О.О. Монсар, та І.І. Синявський, Виготовлення глибокої асферики траєкторним копіюванням та її застосування, *Вісник НТУУ «КПІ». Приладобудування*, вип.28, с.24 – 28, 2004.
10. Ю.Б. Серебренник, А.И. Лурье, и В.Е. Косинский, Отделочная обработка деталей сложного профиля алмазным инструментом на каучуковой связке, *Сверхтвердые материалы*, №1, с. 76 – 78, 1984.
11. М.О. Безуглий, І.І. Синявський, Н.В. Безугла, та А.Г. Козловський, Особливості виготовлення еліпсоїдальних рефлекторів фотометрів, *Вісник НТУУ «КПІ». Серія Приладобудування*, том. 52, №2, с.76-81, 2016.
12. C. Atwood, M. Griffth, L. Harwell, at. el, "Laser Engineered Net Shaping (LENS): A Tool for Direct Fabrication of Metal Parts", in *Proc. 17th International Congress on Applications of Lasers and Elector-Optics*, pp. 1549, 1998.
13. S.-H. Ahn, M. Montero, D. Odell, Sh. Roundy, and P. K. Wright, Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS, *Rapid Prototyping Journal*, vol. 8, no. 4, pp.248 – 257, 2002.

14. M.A. Bezuglyi, N.V. Bezuglaya, Ellipsoidal reflectors in biomedical diagnostic, in *Proc. SPIE Biophotonics—Riga 2013*, Riga, 2013, 90320V.
15. M. W. Barclift, Ch. B. Williams, Examining variability in the mechanical properties of parts manufactured via polyjet direct 3d printing, *Discover the world's research*, pp.876 – 890, 2012.
16. B. Mueller, and D. Kochan, Laminated object manufacturing for rapid tooling and patternmaking in foundry industry, *Computers in Industry*, vol. 39, no. 1, pp. 47–53, 1999.
17. M. V. Byk, O. V. Linucheva, R. I. Hulian at. ell., Die funktionale Mehrfachbeschichtung der Oberfläche von quarzartigen Resonatoren, *Austrian Journal of Technical and Natural Sciences*, № 11–12, pp. 116-119, 2014.
18. М.О. Безуглий, О.В. Лінючева, Н.В. Безугла, М.В. Бик, та С.А Костюк, Контроль форми еліпсоїдальних рефlectorів біомедичних фотометрів, *Вісник НТУУ «КПІ». Серія Приладобудування*, том.53, №1, с. 62-69, 2017.
19. Д.Т. Пуряев, *Методы контроля оптических асферических поверхностей*, Москва: Машиностроение, 1976.
20. М.О. Безуглий, І.І. Синявський, та М.Г. Баринов, «Спосіб контролю форми дзеркального еліпсоїда обертання», патент України на корисну модель, *МПК51 G01M 11/00 № 78518*, 25.03.2013 р.
21. M.A. Bezuglyi, N.V. Bezuglaya, and I.V. Helich, Ray tracing in ellipsoidal reflectors for optical biometry of media, *Applied Optics*, no. 56 (30), pp. 8520–8526, 2017.
22. С.Ф. Петренко, Мікроманіпулятор, патент України на винахід, *МКП51 G02B21/32 №71044*, 15.11.2004 р.