

УДК 535.241.5

Ю. О. Бородін, А. С. Лапчук, О. В. Шиховець

Інститут проблем реєстрації інформації НАН України
вул. М. Шпака, 2, 03113 Київ, Україна

Покращення характеристик світлоповертальних елементів шляхом вимірювання та корекції кута різця

Проведено аналіз кутових параметрів мікропризм світлоповертальних елементів. Із метою отримання максимального світлоповертання запропоновано методику вимірювання та корекцію кута різця. Наведено варіанти та приклади вимірювання.

***Ключові слова:** світлоповертальний елемент, вимірювання кута різця, корекція кута різця.*

Вступ. Постановка задачі

Безпека дорожнього руху значною мірою залежить від оснащення доріг і транспортних засобів світлоповертальними елементами (далі — катафотами). В Україні частково існує виробництво таких елементів, але воно базується на використанні імпортованих матриць і комплектуючих. Для запровадження вітчизняного виробництва сучасних катафотів в ІПРІ НАН України виконано комплекс наукових і прикладних досліджень [1–3], розроблено технологію створення таких матеріалів [4], спроектовано та виготовлено спеціальне устаткування для контролю готової продукції [5].

Основною задачею при виготовленні катафотів є одержання елементів з високими світлоповертальними властивостями, які були б добре помітні водієві на автошляху з досить великої відстані. Удосконалення світлоповертальних характеристик катафотів з метою відповідності існуючим стандартам сьогодні здійснюється за двома основними напрямками. Першим із них є отримання максимальної якості (тобто мінімальної шорсткості і хвилястості) всіх трьох взаємно перпендикулярних відбивних поверхонь мікрокубів, що насамперед залежить від якості застосовуваного алмазного різця [2]. Другий напрямок — це дотримання допусків на кутові параметри мікропризм. Що стосується першого напрямку, то досягнута певна межа в отриманні максимально якісного алмазного різця. Однак є широка можливість для покращення другого напрямку, тобто вдосконалення технології в частині контролю кутових параметрів мікропризм.

Частково наближена до теми дослідження задача вирішена в [6], однак вона

стосується лише точності виготовлення окремої скляної призми, яка працює як кутовий відбивач. Подібна задача розглядалась у роботі [7], але вирішення задачі не наведено, при цьому не враховуються особливості технології виготовлення світлоповертальних елементів (катафотів), яку умовно можна розділити на 4 основні стадії:

- 1) заточування ріжучого інструмента (алмазного різця) на потрібний кут $\alpha_{різ}$ на спеціальному верстаті для заточування;
- 2) виготовлення металевго оригіналу майстер-штампа методом алмазного різання;
- 3) вирощування нікелевої матриці з цього оригіналу;
- 4) отримання відливки катафота з цієї матриці на устаткуванні для лиття.

На стадії лиття має місце процес усадки матеріалу, що деформує мікропризми і, як наслідок, зменшує світловідбиття катафотів. Для усунення цього негативного явища пропонується методика отримання максимального світлоповертання катафотів у техпроцесі їхнього виготовлення шляхом вимірювання кутових параметрів мікропризм із подальшою корекцією кута різця. Вимірювання кутових параметрів здійснюється на лазерному вимірювальному комплексі, який складається з чотирьох стендів для вимірювання кутів нахилу бокових граней мікропризм до основи α і стенда для вимірювання коефіцієнта заломлення матеріалу катафота n .

Кутові параметри мікропризми катафота

Структура симетричного (прямого) катафота на рис. 1 має вигляд мікропризм, утворених трьома серіями заглиблень алмазним різцем на металевому зразку.

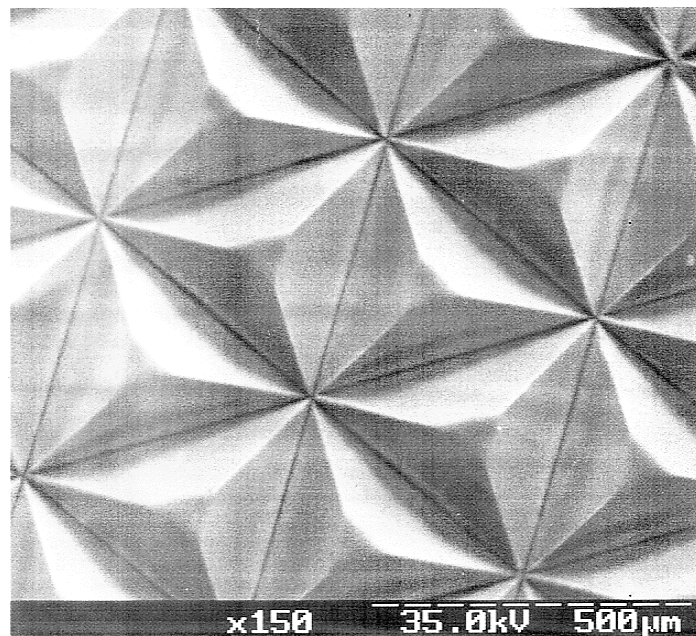


Рис. 1. Мікропризмові «алмазні» катафоти, розмір мікропризми 0,4 мм (1400 мікропризм на 1 см²).

Фотографія поверхні світлоповертального елемента зроблена на растровому електронному мікроскопі (збільшення 150[×])

Ці серії заглиблень розміщені під кутом 60° одна до одної, а кут між сусідніми гранями, який утворений різцем, становить $\alpha_{\text{різ}} = 70^\circ 31' 44''$. При цьому забезпечуються кути нахилу бокових граней мікропризм до основи $\alpha = 54^\circ 44' 08''$, а кути на трьох гранях при вершині дорівнюють 90° . Кожна мікропризма катафота працює як незалежний кутовий відбивач світла, в якому після трьох відбивань від граней світловий промінь прямує назад — паралельно до падаючого. На практиці паралельність падаючого на катафот і відбитого променів якраз і є першою і головною умовою виготовлення якісного катафота. Як показують розрахунки, похибка кутів нахилу бокових граней мікропризм до основи на 1 кутову хвилину веде до непаралельності відбитих променів із кутом розходження 7 кутових хвилин. Отже розглянемо детальніше кутові параметри мікропризми катафота, які необхідно врахувати для отримання паралельності падаючого та відбитого променів.

Спочатку проаналізуємо модель так званої «ідеальної» призми, яку зображено на рис. 2 в аксонометрії.

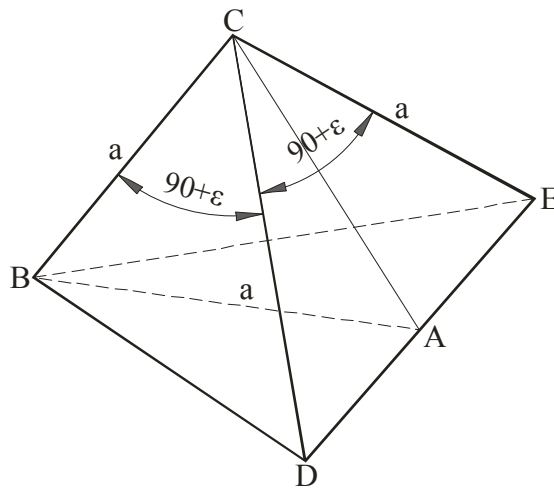


Рис. 2. Мікропризма — вигляд в аксонометрії

Ця призма має три однакові бокові ребра і три кути при вершині, які дорівнюють $90^\circ + \varepsilon$, де $\varepsilon = 0$. Ребра призми умовно приймемо за a , тобто: $CB = CD = CE = a$. Головним є те, що для такої «ідеальної» призми падаючий та відбитий промені паралельні.

На рис. 3 показано проекцію у вертикальній площині цієї та сусідньої призми на вигляді спереду.

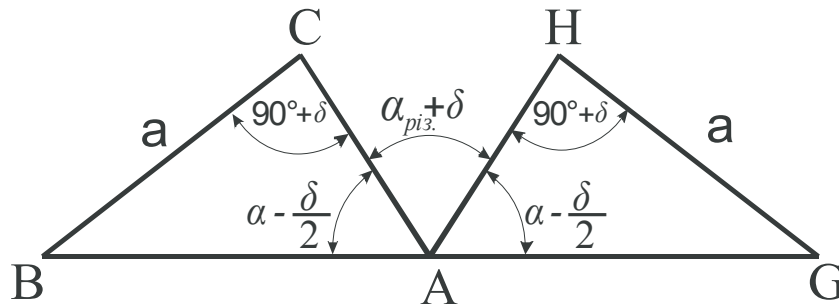


Рис. 3. Проекція у вертикальній площині двох сусідніх мікропризм

Із трикутників DCE, BAD, ABC та AGH маємо формулу для кута різця $\alpha_{\text{різ}} + \delta$, де $\delta = 0$:

$$\alpha_{\text{різ}} = 2 \operatorname{arctg} \frac{1}{\sqrt{2}} = 70^{\circ}31'44". \quad (1)$$

Також із трикутників ABC та AGH маємо формулу, що пов'язує кут різця з кутом нахилу α бокової грані призми до основи:

$$\alpha = 90^{\circ} - \frac{\alpha_{\text{різ}}}{2} = 54^{\circ}44'08". \quad (2)$$

Далі розглянемо реальну призму, яка утворена різцем із кутом $\alpha_{\text{різ}} + \delta$, де δ не дорівнює нулю. Призма деформується, і кути при вершині стають рівними $90^{\circ} + \varepsilon$, де ε не дорівнює нулю. Головною особливістю такої деформованої призми є те, що відбитий промінь прямує не паралельно до падаючого, а з деяким кутом розходження ω .

Треба обчислити залежність між похибками δ та ε . Ребра призми залишилися без змін, тобто $CB = CD = CE = a$ (див. рис. 2).

Якщо врахувати, що похибки δ та ε малі, тобто $\sin \delta = \delta$, $\sin \varepsilon = \varepsilon$, тоді з трикутників DCE, BAD та ABC отримуємо

$$\delta = \varepsilon \sqrt{2}. \quad (4)$$

Дуже важливою є формула залежності кута розходження ω від похибки кута різця δ .

У роботі [6, с. 51] наведено наступний вираз:

$$\omega = \frac{8\varepsilon\sqrt{2}}{\sqrt{3}}. \quad (5)$$

Якщо у вираз (5) підставити (4), тоді для матриці отримаємо формулу:

$$\omega = \frac{8 \cdot \delta}{\sqrt{3}} = \delta 4,62. \quad (6)$$

Для прозорого катафота до формули (6) треба додати показник заломлення матеріалу катафота n . Тобто для прозорого катафота маємо наступне:

$$\omega = 8\delta \frac{n}{\sqrt{3}} = \delta n 4,62, \quad (7)$$

де n — показник заломлення матеріалу катафота.

Підсумуємо головні особливості призми, яка працює як кутовий відбивач світла. Якщо мікропризми утворені різцем із кутом $\alpha_{\text{риз}} = 70^{\circ}31'44''$ ($\delta = 0$), тоді кути нахилу бокових граней до основи призми дорівнюють $\alpha = 54^{\circ}44'08''$, всі три кути при вершині дорівнюють 90° ($\epsilon = 0$), а відбитий промінь прямує паралельно до падаючого, що і є умовою отримання максимального світлоповертання. Кут розходження ω такої призми дорівнює нулю. Це модель «ідеальної» призми.

У реальній призмі похибка кута різця δ не дорівнює нулю. Це веде до того, що, по-перше, з'являється похибка кутів нахилу бокових граней до основи призми $\frac{\delta}{2}$, а, по-друге, з'являється похибка кута при вершині ϵ , яка пов'язана із δ за формулою (4). Головним є те, що відбитий промінь такої призми прямує не паралельно до падаючого, а кут розходження ω обчислюється за формулами (6) та (7).

Як було вказано вище, особливістю техпроцесу виготовлення катафотів є те, що на стадії відливки має місце процес усадки матеріалу. Це негативно впливає на мікропризми та веде до їхньої деформації. Внаслідок цього похибки кутів δ та ϵ , а також кут розходження ω збільшуються, а світлоповертання зменшується, що спричиняє брак продукції. Для боротьби з цим явищем було запропоновано методику, згідно з якою для отримання максимального світлоповертання робиться вимірювання кутових параметрів катафотів з подальшою корекцією кута різця. Конкретно, послідовність операцій наступна:

- 1) заточити різець на кут $\alpha_{\text{риз}} + \delta 1$ (пункт 1 техпроцесу виготовлення катафота);
- 2) поміряти похибку кута різця $\delta 1$ (дивись нижче другий варіант вимірювання);
- 3) пройти пункти 2, 3, 4 техпроцесу;
- 4) поміряти похибку кута різця $\delta 2$;
- 5) внести поправку на кут різця, а саме заточити різець на кут $\alpha_{\text{риз}} + \delta$ з похибкою $\delta = -(\delta 2 - \delta 1)$;
- 6) пройти пункти 2, 3, 4 техпроцесу.

Вимірювання кутових параметрів мікропризм для матриці або прозорого катафота (перший варіант — відбиття від трьох поверхонь)

На рис. 4 зображено оптичну схему стенда для вимірювання кута розходження матриці, або готової штамповки чи відливки катафота.

Дія стенда наступна. Лазерний промінь від лазера 1 розширюється телескопом 2, відбивається від гіпотенузи світлоподільного кубика 3 і потрапляє на вимірювальний зразок матриці або катафота 4. На відстані 2 метри знаходиться матовий екран 5, на якому формується зображення відбитих променів. Типова картина на екрані зображена на рис. 5. Якщо взяти до уваги, що кут розходження малий, тобто $\text{tg}\omega = \omega$, тоді маємо наступну формулу:

$$\omega = \frac{d}{2000}. \quad (8)$$

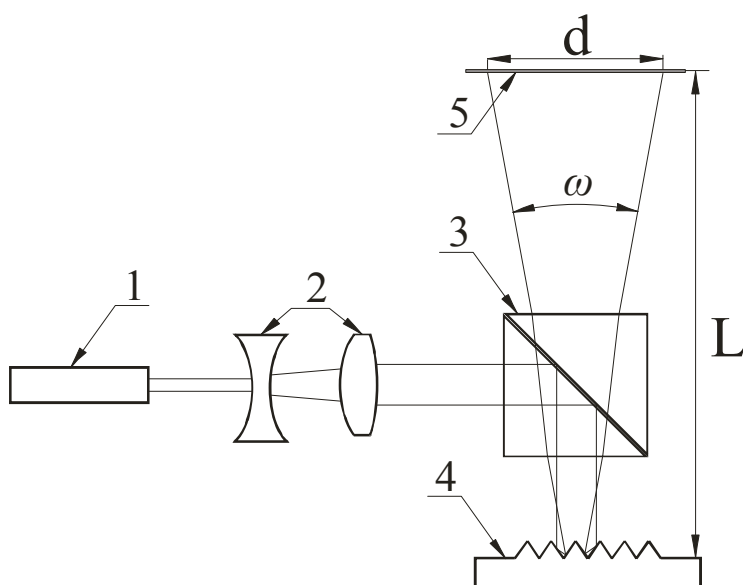


Рис. 4. Схема вимірювання кута розходження ω для матриці або відливки катафота

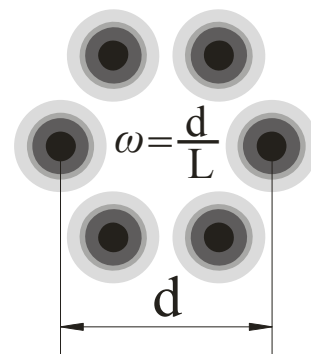


Рис. 5. Зображення на екрані відбитих променів

Вище була приведена формула (6). Це головна формула залежності розходження ω від похибки кута різця δ . Отже для матриці отримуємо:

$$\delta = \frac{\omega}{4,62}. \quad (9)$$

Аналогічно на цьому стенді можна поміряти кут розходження ω для прозорого катафота. У цьому випадку похибка кута різця δ обчислюється за формулою:

$$\delta = \frac{\omega}{n \cdot 4,62}, \quad (10)$$

де n — показник заломлення матеріалу катафота.

Вимірювання кутових параметрів мікропризм (другий варіант — відбиття від двох поверхонь)

Для вимірювання кута заточки алмазного різця $\alpha_{риз}$ треба зробити різцем канавку на металевому зразку, наприклад з олова, і направити лазерний промінь на цю канавку паралельно бісектрисі кута, як показано на рис. 6. Відбитий промінь розділиться на два променя під кутом β до падаючого. Для обчислення кута $\alpha_{риз}$ розглянемо рис. 6.

Із трикутників ABC та ACD на рис. 6 та трикутників EFH та GFH на рис. 7 отримуємо формулу

$$\alpha_{\text{різ}} = 90^\circ - \frac{\beta}{2}, \quad (11)$$

де $\beta = \arctg \frac{EG}{2 \cdot FH}$.

На рис. 7 показано схему стенда для вимірювання кута $\alpha_{\text{різ}}$ для металевий оригіналу або катафота. Лазерний промінь від лазера 1 падає на нарізаний металевий оригінал 2 і відбивається на 2 променя, які потрапляють на екран 3 в крапку Е та крапку G. Далі обчислюємо $\alpha_{\text{різ}}$ за формулою (11).

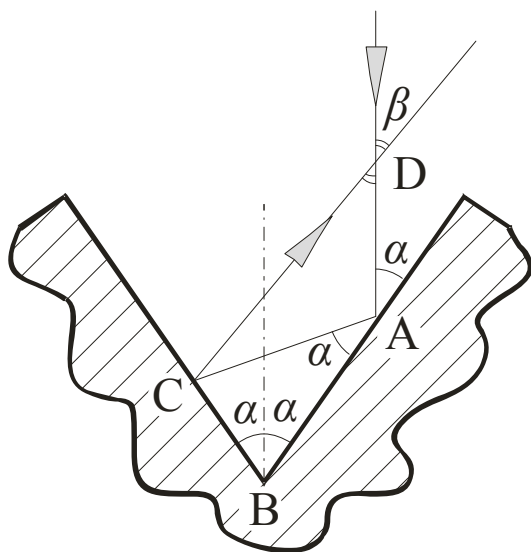


Рис. 6. Пояснення до формули (6)

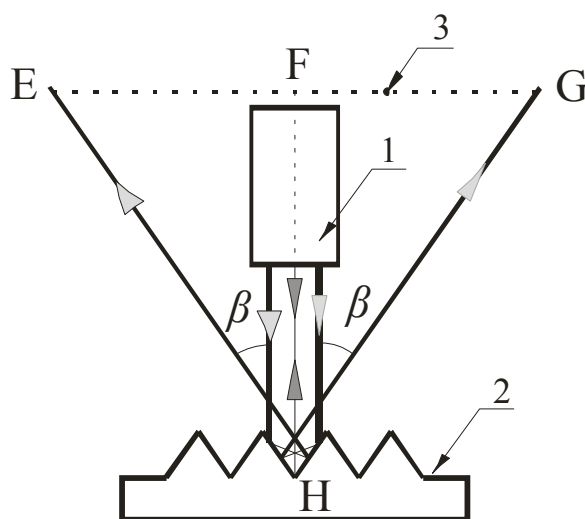


Рис. 7. Схема вимірювання кута різця

Вимірювання кутових параметрів для матриці на гоніометрі (третій варіант — відбивання від одної поверхні)

Обчислення похибки δ кута різця $\alpha_{\text{різ}}$ за допомогою вимірювання кута розходження ω першим варіантом має свої переваги і недоліки. Перевагою є простота і швидкість. Недоліком — те, що поміряти малий кут розходження менше, ніж 30' складно або навіть неможливо, тому що замість шести лазерних плям (рис. 5) на екрані є тільки одна пляма. В такому випадку можна запропонувати методику вимірювання кута різця на гоніометрі. Схему вимірювання зображено на рис. 8.

На поворотну платформу гоніометра 1 ставиться матриця 2. На деякій відстані знаходяться лазер 3 і екран зі щілиною 4. Платформа обертається таким чином, щоб одна з граней була по нормалі до лазерного променя. Це видно по відбитому променю, який потрапляє у щілину екрана. По гоніометру відмічається відлік α_1 . Потім платформа повертається на кут $360^\circ - \alpha_{\text{різ}}$, і робиться прив'язка до сусідньої грані. Робиться відлік α_2 . Кут різця $\alpha_{\text{різ}}$ обчислюється за формулою

$$\alpha_{\text{різ}} = \alpha_2 - \alpha_1. \quad (12)$$

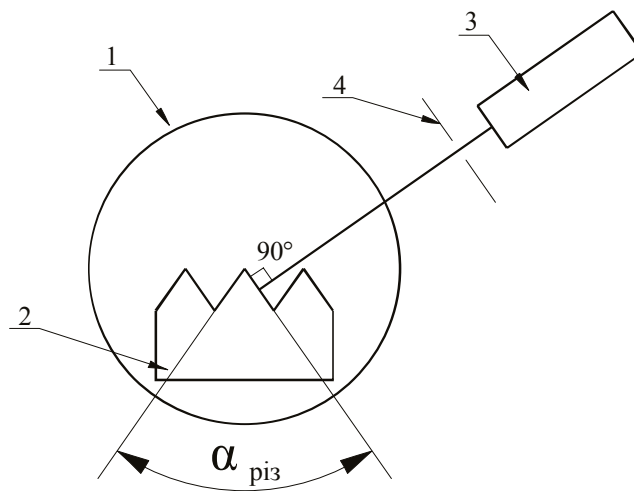


Рис. 8. Схема вимірювання кута різця для матриці за допомогою гоніометра

Вимірювання кутових параметрів для прозорого катафота на пропусання (четвертий варіант)

У катафоті, який виготовлений методом штамповки або лиття, можна контролювати кут різця $\alpha_{різ}$ за допомогою 1-го, 2-го і 3-го варіантів. Але є випадки (наприклад, катафот з малим кроком нарізки), коли ці методи неефективні або дають велику похибку вимірювання. Тому розглянемо 4-й варіант вимірювання кута різця на пропускання через катафот, схему вимірювання якого зображено на рис. 9.

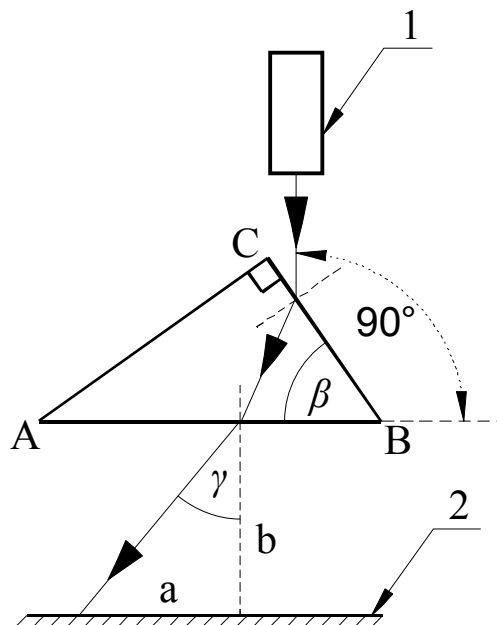


Рис. 9. Схема вимірювання кута різця «на пропускання» для прозорого катафота

Лазерний промінь від лазера 1 виставляється по нормалі до екрана 2, а катафот ставиться паралельно до екрана, тобто гіпотенуза АВ по нормалі до променя. Кут $\alpha_{різ}$ обчислюється наступним чином:

$$\alpha_{різ} = 180^\circ - 2\beta, \quad (13)$$

де

$$\sin\beta = \frac{1}{\sqrt{\left(n - \sqrt{1 - \frac{\sin^2(\gamma)}{2}} \right)^2 + \frac{1}{2}}},$$

$$\sin(\gamma) = \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}}.$$

Перевага цього варіанту полягає в тому, що він має більшу точність, ніж варіанти 1 і 2. Це пояснюється тим, що оптичний фронт лазерного променя деформується менше (тільки на одній поверхні), ніж у варіантах 1 і 2. Недоліком варіанта 4 як і варіанта 1 є те, що треба знати коефіцієнт заломлення матеріалу катафота n . Якщо матеріал катафота невідомий, тоді коефіцієнт заломлення n треба поміряти.

Вимірювання коефіцієнта заломлення матеріалу катафота n

Взагалі, для вимірювання коефіцієнта заломлення n застосовуються складні спеціалізовані гоніометричні, рефрактометричні та інтерференційні оптичні прилади. У статті пропонується проста схема вимірювання коефіцієнта заломлення n для плоскопаралельної пластини із прозорого матеріалу. Схему цього макету зображено на рис. 10.

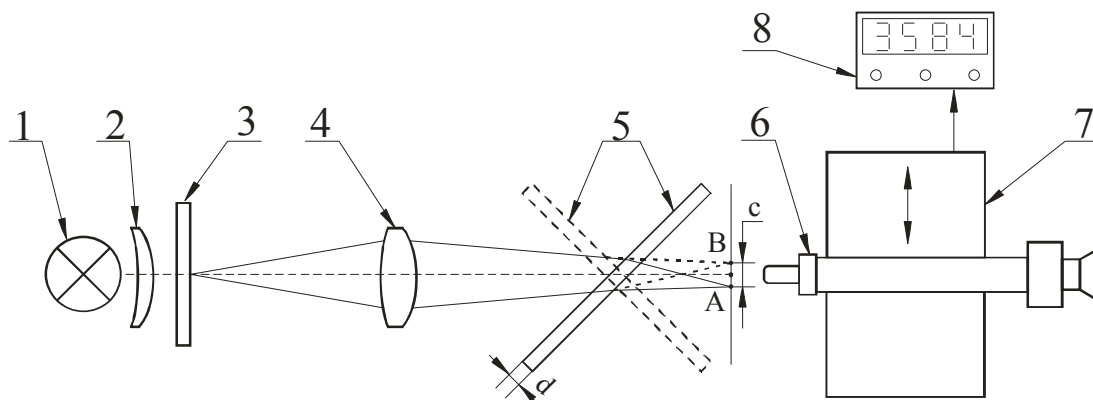


Рис. 10. Схема вимірювання коефіцієнта заломлення матеріалу катафота n

Схема працює наступним чином: лампа 1 за допомогою конденсора 2 підсвічує перехрестя 3. Об'єктив 4 формує зображення перехрестя 6 в крапці А. Вимірвальний зразок 5 товщиною d нахилений до оптичної осі на кут 45° . Потім зразок обертається на кут 90° зображення перехрестя в крапці В. Відстань $c = AB$ контролюється за допомогою мікроскопа 7, який встановлено на рухомій платформі 8. Платформа підключена до точного приладу вимірювання відстані 9. Коефіцієнт заломлення n обчислюється за формулою

$$n = \sqrt{\frac{1}{\left(1 - \frac{c\sqrt{2}}{d}\right)^2 + 1}} \quad (14)$$

На цьому стенді був вимірний коефіцієнт заломлення n для пластини з полікарбонату: $n = 1,587$ виміряне на стенді, $n = 1,586$ взято з довідника [8, с. 21]. Як видно, різниця між цими значеннями дуже мала.

Порівняльна характеристика варіантів

Головні особливості варіантів вимірювання наведено в табл. 1.

Таблиця 1.

Тип	1-й варіант	2-й варіант	3-й варіант	4-й варіант
Металевий оригінал	Не використовується	Простий варіант. Точність висока.	Складний варіант. Точність висока.	Не використовується
Матриця	Простий варіант. Точність мала.	Не використовується	Складний варіант. Точність висока.	Не використовується
Штамп або відливка катафота	Простий варіант. Точність мала.	Простий варіант. Точність висока.	Складний варіант. Точність висока.	Простий варіант. Точність висока.

- 1-й варіант — відбиття від 3-х поверхонь.
- 2-й варіант — відбиття від 2-х поверхонь.
- 3-й варіант — гоніометричний. Відбиття від 1-ї поверхні.
- 4-й варіант — на пропускання (заломлення) через катафот.

Треба зауважити, що немає одного універсального варіанта вимірювання. Кожний варіант має свої переваги і свої недоліки. Тому для забезпечення точності треба використовувати не один, а декілька варіантів вимірювання одного зразка катафота. Ця теза демонструється на прикладах нижче.

Приклади вимірювання

У табл. 2 наведено типові приклади вимірювання кута різця для трьох стадій техпроцесу: $\delta 1$ обчислюється за формулою (16) для матриці і за формулою (17) для відливки; $\delta 2$ обчислюється за формулою (18).

Таблиця 2.

Тип зразка	Розходження ω в кутових хвилинах	Похибка кута різця $\delta 1$ — перший варіант	Похибка кута різця $\delta 2$ — другий варіант
Металевий оригінал			-10'
Нікелева матриця	45'	-9,7'	
Відливка дакрил	82'	-12'	-14'
Відливка полістирол	50'	-7'	-6,5'

Аналізуючи результати, можна дійти висновку, що другий варіант вимірювання точніший ніж перший. Тому для відливок будемо брати до уваги результати другого варіанта.

Як видно нікелева матриця має малу відмінність похибки кута різця $\alpha_{різ}$ від металевого оригіналу.

Відливка катафота із матеріалу дакрил має на 4' менше значення $\delta 2$ ніж металевий оригінал. Відливка катафота із полістирола має на 3,5' більше ніж металевий оригінал. Це дозволяє обчислити поправку на заточку різця, яка становить для дакрила +4', а для полістирола -3,5'.

Інший приклад — польський червоний трикутник. Цей катафот у центральній частині має високе світловідбиття. Вимірювання похибки кута різця $\delta 2$ другим методом становить всього 0',25. Це доводить таку тезу — за інших рівних умов, чим менше δ , тим більше світлоповертання катафота.

Висновки

У техпроцесі виготовлення симетричних катафотів були випробувані всі чотири варіанти вимірювання кута різця $\alpha_{різ}$. Це дозволило ефективно впливати на техпроцес шляхом корекції кута різця і отримати якісні катафоти з високим світлоповертанням.

У подальшому передбачається провести дослідження спрямовані на оцінку якості поверхонь світлоповертальних елементів.

1. *Моделирование* свойств асимметричных световозвращающих элементов./ В.В. Петров, С.М. Шанойло, А.А. Крючин [и др.] // Реєстрація, зберігання і оброб. даних. — 2007. — Т. 9, № 2. — С. 17–25.

2. *Світлоповертання: проблеми та досягнення* / В.В. Петров, С.М. Шанойло, Є.Є. Антонов [та ін.] // Реєстрація, зберігання і оброб. даних. — 2008. — Т. 10, № 1. — С. 3–15.

3. *Оптические* характеристики световозвращающих элементов / Е.Е. Антонов, С.М. Шанойло, А.В. Шиховец [и др.] // Реєстрація, зберігання і оброб. даних. — 2008. — Т. 10, № 2. — С. 13–22.

4. *Патент* 74034 України, G02B5/124, B32B3/00. Спосіб виготовлення призмоподібних світлоповертальних елементів / В.В. Петров, С.М. Шанойло, О.І. Гранат, Л.В. Бутенко, А.А. Крючин, В.М. Зенін, В.Д. Ковтун, О.К. Войтенко, В.О. Заболотний, П.В. Майстренко, А.В. Ковальчук (Україна); ІПРІ НАН України. — № 2003076449; заявл. 10.07.2003; опубл. 17.10.2005. — 2 с.

5. *В.В. Петров*. Програмно-апаратний комплекс для контролю світлотехнічних характеристик світлоповертальних елементів / В.В. Петров, О.І. Бріцький, Ле Зичун, Кван Бишенг // Реєстрація, зберігання і оброб. даних. — 2008. — Т. 10, № 2. — С. 69–76.

6. *Макалара Д.* Оптический производственный контроль / Д. Макалара. — М.: Машиностроение, 1985.

7. US Patent 6767102 B1. Retroreflective Articles Having Microcubes, and Tools and Methods for Forming Microcubes / Heenan [et al.]; 2004, Jul. 27.

8. *Зубаков В.Г.* Технология оптических деталей / В.Г. Зубаков. — М.: Машиностроение, 1985.

Надійшла до редакції 10.02.2010