

УДК 535.24.1

Є. Є. Антонов, А. В. Панкратова, О. В. Шиховець
Інститут проблем реєстрації інформації НАН України
вул. М. Шпака, 2, 03113 Київ, Україна

Оптичні властивості серії гальванічних матриць мікрорельєфних світлоповертальних структур

Досліджено оптичні властивості серії гальванічних копій матриць світлоповертальних структур і мікропризмових пристроїв; визначено кутові діаграми світлоповертання для різних матриць світлоповертачів; виконано аналіз можливості використання нікелевих копій матриць-оригіналів для виготовлення світлоповертачів і мікропризмових елементів.

Ключові слова: алмазне різання, мікропризмовий рельєф, штамп-матриця, світлоповертання, гальванопластика.

Один із відомих методів отримання робочих штамп-матриць для виготовлення світлоповертальних структур різного призначення полягає у формуванні на плоскій поверхні мікропризмового рельєфу методом так званого «алмазного різання» [1]. Зазначена процедура досить складна, трудомістка та тривала, потребує спеціального прецизійного обладнання та інструменту, час виготовлення матриць-оригіналів світлоповертальних структур з алюмінієвих сплавів становить від одного до декількох десятків днів, тому необхідно з'ясувати можливість виготовлення з одного оригіналу декількох високоякісних гальванічних копій таких матриць з нікелю. Проблема полягає також у тому, що при гальванічному процесі відбувається зміна структури поверхні та кутів рельєфу внаслідок появи внутрішніх напружень у нарощуваних шарах нікелю [2]. Одним із основних параметрів, що впливає на зміну внутрішніх напружень в осадах нікелю, є щільність катодного струму [3]. Для забезпечення осадження нікелевого покриття з низькими внутрішніми напруженнями в умовах практично нерухомого електроліту [3] оптимальні щільності струму знаходяться в межах 2–4 А/дм². При щільності струму нижче 2 А/дм² у нікелевий осад може включатися гідроксид одновалентного нікелю NiOH, підвищуючи внутрішні напруги в осаді. Якщо щільність струму перевищує 4 А/дм², у прикатодній зоні за рахунок інтенсивного виділення водню відбувається помітне зниження концентрації іонів водню, що призводить до утворення гідроксидів двовалентного нікелю, і внутрішні напруження в нікелевому покритті зно-

ву починають зростати. Тому доцільно визначити оптимальні режими гальванічного процесу саме в наших умовах і дослідити, як при цьому змінюються кути рельєфу та структура мікрорельєфної поверхні.

Метою роботи є дослідження можливості заміни матриць-оригіналів їхніми гальванічними копіями за умови збереження необхідної якості оптичних поверхонь робочих матриць і забезпечення заданих параметрів кінцевих мікропризмових виробів, що виготовляються методом термопресування або методом лиття під тиском.

Оптичні характеристики серії гальванічних копій матриць світлоповертачів

У подальшому позначимо матрицю-оригінал симетричного світлоповертача літерами СК з індексом кроку рельєфу W , наприклад, СК071_300, тобто симетричний катафот № 071 з кроком рельєфу $W = 300$ мкм. Нікелеві матриці-копії маркуються літерою М, а нікелеві матриці-оригінали — літерою К, наприклад, маркування СК071М1К1 позначає першу нікелеву копію К1 з матриці М1 оригіналу СК071. Відповідно, асиметричні світлоповертачі (катафоти) будемо маркувати літерами АСК, а мікропризмові структури, які використовуються в офтальмології — літерою Ф.

З метою визначення впливу процесу гальванопластики на оптичні характеристики матриць було досліджено характеристики трьох матриць М1–М3, що виготовлені методом гальванопластики із застосуванням одного оригіналу симетричного світлоповертача СК071_300, та характеристики однієї гальванічної матриці М1К1М1, що виготовлена з нікелевої копії СК071М1К1, яка, в свою чергу, зроблена з першої робочої матриці СК071М1.

Досліджувана матриця-оригінал СК071_300 була сформована методом алмазного різання [1] на заготовці з алюмінієвого сплаву В-95, що пройшов необхідну термообробку. Діаметр заготовки $d = 120$ мм, крок рельєфу $W = 300$ мкм. Використовувався різець китайського виробництва № 9819, розрахунковий кут різця $Y_0 = 70^\circ 31' 44''$. Реальний кутовий допуск при заточуванні ріжучої кромки різця $\Delta Y_p = -2' 04''$, тобто кут різця за паспортними даними складає $Y_{p0} = 70^\circ 29' 40''$.

Нікелеві копії з оригіналу та матриць вирощувались методом гальванопластики. Оптимальні параметри гальванічного процесу, які було визначено експериментально з урахуванням конкретних вимог до осадів, становили: 1) кислотність електроліту $PH = 4,0 \pm 0,2$; 2) температура розчину $T_p = (55 \pm 1)^\circ C$; 3) щільність струму $J = 10$ А/дм²; 4) потік електроліту $I = 20$ літрів/хвилину.

Вимірювання кута рельєфу на матриці-оригіналі СК071_300 визначило певне відхилення кута рельєфу $\Delta Y_p = (-1' 42'')$ від розрахункового значення, тобто кут рельєфу на оригіналі реально становив $Y_{p1} = 70^\circ 30' 02''$, що більше на 22 кутові секунди реального кута різця. Такий розбіг результатів можна пояснити деяким коливанням різця в поперечному напрямку в процесі різання. Однак можливо, що $\Delta Y = Y_{p0} = 70^\circ 29' 40'' - Y_{p1} = 70^\circ 30' 02'' = -22''$ визначає саме точність вимірювання кутів.

Для нікелевої копії-оригіналу СК071М1К1 товщиною 300 мкм, що була виготовлена з матриці СК071М1, відхилення кута рельєфу складало $\Delta Y_p = -0,4'$, від-

повідно кут Y_{K1} становить $70^{\circ}31'20''$. Таким чином, кут рельєфу в результаті двох гальванічних процесів (вирощування першої матриці СК071М1 та копії СК071М1К1) збільшився на 1,3 кутові хвилини. Значення всіх перелічених кутів наведено в табл. 1.

Таблиця 1

	Кут різця Y_0	Матриці-оригінали	
		СК071	СК071М1К1
Кут рельєфу	$70^{\circ}29'40''$ (-2,07')	$70^{\circ}30'02''$ (-1,7')	$70^{\circ}31'20''$ (-0,4')

Відомо, що похибка кута різця ΔY_p при нарізуванні рельєфу призводить до відповідної зміни ΔY_r кута нахилу бокових граней кутових відбивачів симетричного катафоту та відповідної зміни кута при вершині відбивача ΔY_b , причому $\Delta Y_r = 0,5\Delta Y_p$ з тим самим знаком, а $\Delta Y_b = -0,707\Delta Y_p$ [4].

Досліджені матриці М1, М2, М3 мають однакові зміни кутів ($\Delta Y_r \approx +1'$), що в принципі свідчить про сталість процесу гальванопластики. З іншого боку, невелике збільшення кута рельєфу на матрицях порівняно з оригіналом СК071 свідчить про наявність певних напружень у матеріалі [3], що виникають у процесі вирощування матриць, або появу дефектів на поверхні при механічному відділенні матриць-копій від оригіналу.

Результати вимірювання коефіцієнта світлоповертання R матриць СК071М1, СК071М2, СК071М3 та СК071М1К1М1 для кута спостереження $\gamma = 22'$, наведені в табл. 2.

Таблиця 2

Матриці-копії	СК071 М1	СК071 М2	СК071 М3	СК071 М1К1М1
Світлоповертання R	151 кд / (лк м ²)	125 кд / (лк м ²)	82 кд / (лк м ²)	131 кд / (лк м ²)
Товщина матриці	250 мкм	250 мкм	250 мкм	250 мкм

Зменшення коефіцієнта світлоповертання R від матриці М1 (151 кд/лкм²) до матриці М3 (82 кд/лкм²) не корелює з незмінністю кута рельєфу для цих матриць М1–М3. Тому причиною зменшення коефіцієнта світлоповертання R може бути лише погіршення робочих поверхонь мікрокубів на матрицях, що підтверджується дослідженнями структури поверхонь за допомогою мікроскопу МБС-10.

Також про це свідчить і просторова картина світлоповертання (рис. 1), отримана за допомогою лазера з довжиною хвилі $\lambda = 730$ нм для зазначених матриць М1, М2, М3. Помітне розмиття зображень з ростом номера матриці при незмінному куті рельєфу можна пояснити лише появою дефектів на оптичних поверхнях матриць-копій внаслідок пошкоджень поверхні матриці-оригіналу, причиною яких може бути реакція алюмінію з водою та залишками електроліту під час обробки поверхні матриці-оригіналу після кожного етапу гальванічного процесу.

У той же час, картина світлоповертання для матриці М1К1М1, що виготовлена з першої копії М1 оригіналу СК071, практично збігається з картиною для матриці М1 (рис. 1,а). Таким чином, при здійсненні досить тривалої операції масового виготовлення кінцевих світлоповертальних пристроїв, у процесі якої завжди певною мірою пошкоджується робоча поверхня штампу-матриці і необхідна заміна робочих матриць, доцільно використовувати копії М1К1М(1–N) з нікелевої копії М1К1 замість матриць М(1–N) з алюмінієвого оригіналу, при цьому якість кінцевих мікропризмових пристроїв залишається достатньо високою.

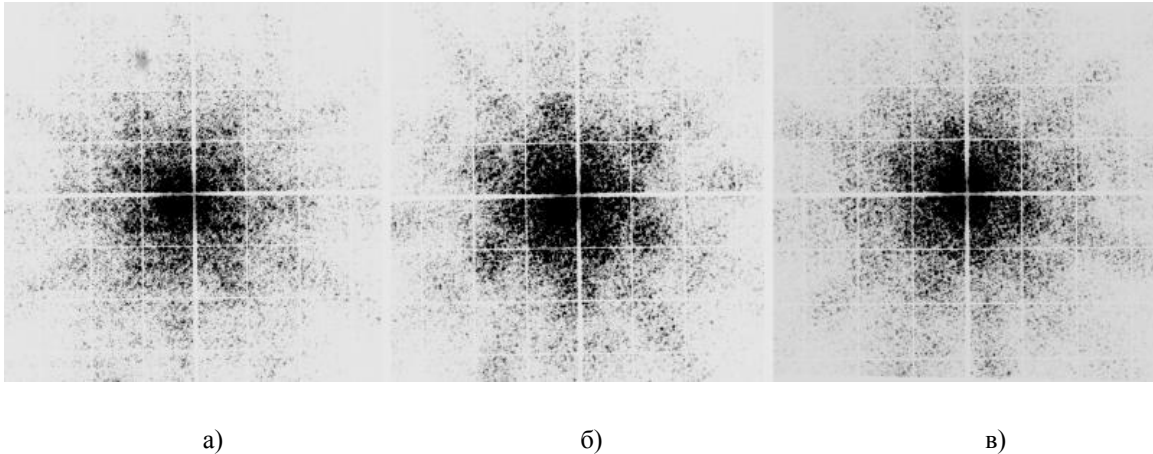


Рис. 1. Просторова картина світлоповертання для трьох нікелевих матриць з одного оригіналу світлоповертача СК071: а) матриця М1; б) матриця М2; в) матриця М3

Існує ще один аспект проблеми світлоповертання. При вимірюваннях коефіцієнта світлоповертання R згідно ДСТУ 4036-2001 фотоелемент, який реєструє потік світла від катафота, розміщується під кутом спостереження $\theta = 0,2$ та $0,5$ градуси (12 та 30 кутових хвилин). На рис. 1 масштаб зображення становить 17 кутових хвилин/см, тобто максимальна інтенсивність світлоповертання спостерігається для кутів спостереження, менших зазначених у ДСТУ. Для того, щоб отримати при вимірюваннях згідно ДСТУ 4036-2001 значення світлоповертання R було максимальним, центральний максимум світлоповертання повинен розміщуватися при кутах, не менших 12–15 хвилин, але не більших за 20–25 хвилин, коли в центрі з'являється провал інтенсивності. Враховуючи, що відхилення δ кута кутового відбивача від 90° пов'язано з кутом розширення структури світлоповертання ω співвідношенням [4]:

$$\omega = 4,62 \delta \quad (1)$$

для матриць, що ілюструються рис. 1, доцільно внести калібровану корекцію кута нарізки мікрорельєфу $\delta_k = 4-5'$, що призведе до оптимального розширення кутової діаграми світлоповертання.

Такий алгоритм доцільно застосовувати для будь-яких матриць світлоповертальних елементів у випадках, коли необхідно отримати розширену кутову діаг-

раму світлоповертання з максимальним світлоповертанням при кутах спостереження $\theta = 17\text{--}30$ кутових хвилин. Іншим шляхом розширення кутової діаграми світлоповертання є зменшення кроку мікрорельєфу W . Це питання розглянуто в попередній роботі [5].

Відзначимо, що значення світлоповертання $R = (80\text{--}150 \text{ кд/лкм}^2)$ для матриць М1, М2, М3 та М1К1М1 є відносно невеликими. Це свідчить, перш за все, про незадовільну якість оптичних поверхонь матриці-оригіналу СК071 і потребує певної корекції параметрів технологічного процесу формування мікрорельєфу. Однак, цей факт істотно не впливає на результати виконаних досліджень тенденції зміни оптичних параметрів серії гальванічних матриць світлоповертачів.

У той же час, коефіцієнт світлоповертання $R = 131 \text{ кд/лкм}^2$, що виявлений для матриці СК071М1К1М1, дає можливість отримувати досить непогані відбитки з оптичних пластмас з використанням матриць-копій з нікелевої матриці К1. У табл. 3 наведено значення коефіцієнта світлоповертання R для відбитка з першої матриці СК071М1 та відбитків світлоповертачів № 1 та № 2 з матриці СК071М1К1М1, що виготовлені методом термопресування.

Таблиця 3

Відбитки	СК071М1 № 1	СК071М1К1М1 № 1	СК071М1К1М1 № 2
Світлоповертання R	520 кд /лк м ²	543 кд / лк м ²	574 кд / лк м ²

Результати свідчать, що матриці мають практично однаковий коефіцієнт світлоповертання. В той же час, структура кутового розподілу світлоповертання має такі особливості:

— матриця СК071М1К1М1 має збільшений кут рельєфу ($\Delta Y_r \approx +3'$) порівняно зі зміною кутів на матрицях М1–М3 ($\Delta Y_r \approx +1'$);

— максимум світлової енергії знаходиться не під кутом падіння, а при куті, більшим його на $\sim 20\div 25'$, що дозволяє для досліджуваних матриць отримати коефіцієнт світлоповертання, більший за $500\text{--}600 \text{ кд / (лк}\cdot\text{м}^2)$;

— розподіл світла в азимутальній площині не має різких коливань інтенсивностей в напрямках, що б мали корелювати з кутами між напрямками нарізки, тобто з кутами 120° .

Ці особливості можна пояснити саме відхиленням геометрії поверхонь, які формують світлоповертальний елемент, від площинності. Відмітимо, що зміни кута рельєфу на відбитках СК071М1К1М1(N1-N2) практично повторюють зміну кута на матриці СК071М1К1М1. Це свідчить про відсутність значних усадок матеріалу при циклах нагрівання-охолодження матриці та відбитків за рахунок оптимально підібраних параметрів процесу термопресування.

Просторові картини світлоповертання для відбитків з матриць М1 та М1К1М1, що наведені на рис. 2, також мають практично однакову структуру та кутові характеристики.

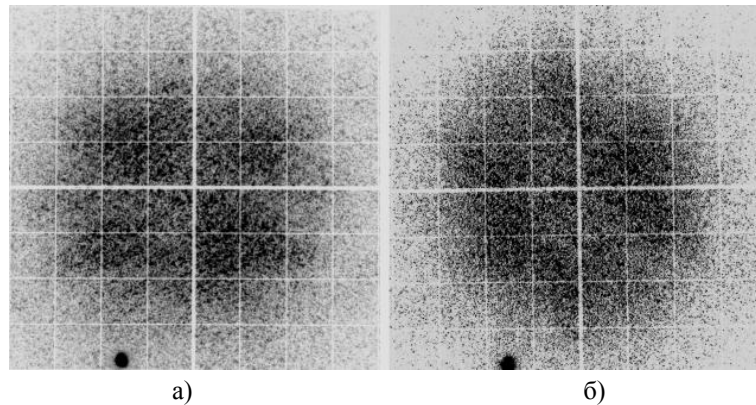


Рис. 2. Діаграма світлоповертання для відбитків світлоповертачів з полікарбонату:
а) матриця М1; б) матриця М1К1М1

Значення коефіцієнта світлоповертання R для досліджених матриць значно перевищують вимоги ДСТУ 4036-2001 ($150\text{--}250$ кд/лкм²), і таким чином є можливість виготовлення високоякісних мікрорельєфних виробів з серії матриць СК071М1К1(М1–МN), що виготовлені з нікелевої копії М1К1, і не використовувати для виготовлення серії нікелевих матриць алюмінієвий оригінал СК071.

Також отримані дані дають змогу вносити відповідні корективи в кути нарізання мікрорельєфу матриці-оригіналу з метою отримання оптимальних за своїми світлоповертальними властивостями кінцевих мікрорельєфних виробів.

Гальванічні копії мікропризмових структур

Питання, аналогічні дослідженим для матриць світлоповертальних елементів, існують і для матриць одномірних мікропризмових структур. Досить м'які матриці-оригінали з алюмінієвих сплавів не витримують десятки циклів термопресування при масовому виготовленні мікропризмових елементів для офтальмологічних застосувань, і тому виникає питання про можливість використання в процесі термопресування замість алюмінієвих матриць їхніх гальванічних копій з досить твердого нікелю.

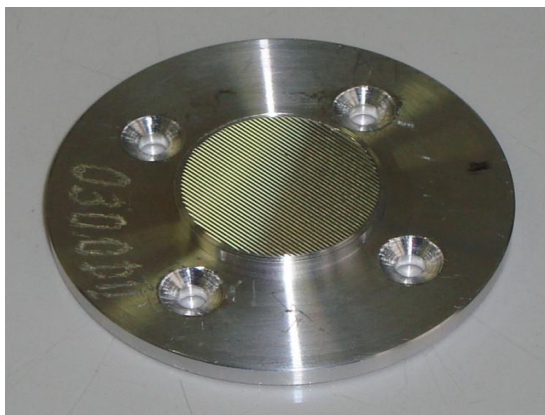


Рис. 3. Оригінал мікропризми $PD = 36,4\Delta$ з алюмінію $\Phi 1\ 36,4$

Для з'ясування цього було досліджено оптичні властивості матриці-оригіналу $\Phi 1\ 36,4$ зі спеціального алюмінієвого сплаву марки В-95 (рис. 3) мікропризмового елемента призматичною дією $36,4\Delta$, який використовується для виготовлення окулярної оптики $PD = 30\Delta$, а також властивості гальванічної копії цієї матриці $\Phi 1\text{M1}$ та копії із зазначеної копії $\Phi 1\text{M1K1}$. Було досліджено також відбитки з поліметилметакрилату для всіх цих матриць.

Було визначено, що структура поверхні оригіналу Ф1 з алюмінію та нікелевої копії Ф1М1 істотно різняться (рис. 4). На ребрах мікрорельєфу на копії Ф1М1 спостерігаються помітні дефекти у вигляді западин, наявність яких можна пояснити наявністю в заглибленнях рельєфу на оригіналі залишків алюмінієвої стружки від формування мікрорельєфу. На копії Ф1М1К1 такі дефекти, звичайно, відсутні, тому що виступи знову перетворилися на западини і знаходяться в глибині мікрорельєфу.

Дослідження структури поверхонь зазначених трьох матриць за допомогою мікроскопу МБС-10 показали, що поверхні оригіналу мікропризми Ф1 та нікелевої копії Ф1М1К1 практично не відрізняються один від одного за якістю, в той час, як на матриці Ф1М1 наявні помітні дефекти на ребрах мікропризм (рис. 5). Це призводить до появи оптичних дефектів при візуальному дослідженні тестових об'єктів через прозорі відбитки з матриці Ф1М1.

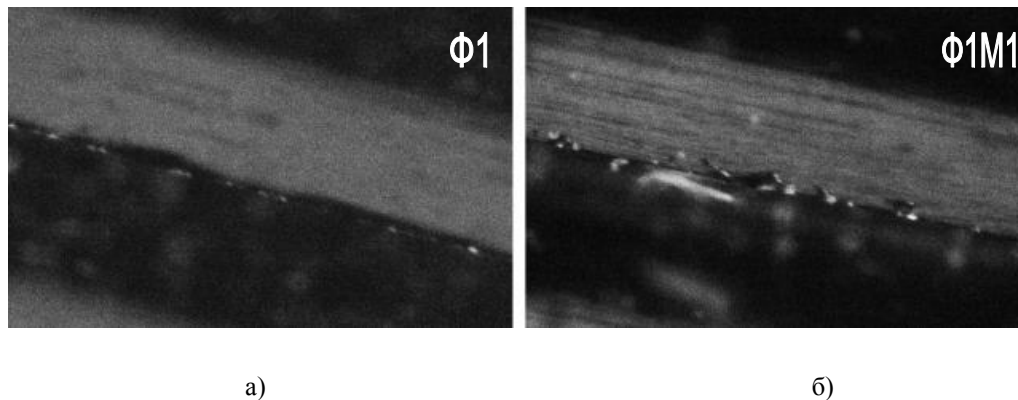


Рис. 4. Структура мікрорельєфу матриць:
а) оригінал з алюмінію Ф1_36,4; б) копія з нікелю Ф1М1

Аналогічні висновки щодо оптичних дефектів для матриці Ф1М1 можна зробити на основі вимірювань методом [6] роздільної здатності зображень тестової штрихової міри, що спостерігаються на екрані через досліджені відбитки з мікропризм Ф1, Ф1М1 та Ф1М1К1.

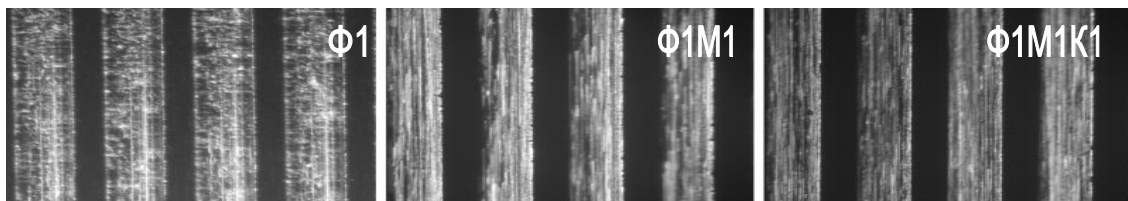


Рис. 5. Структура поверхонь деяких мікропризм

Наявність оптичних дефектів пояснюється, крім того, появою у відбитках внутрішніх напружень, що виникають у процесі термопресування. Для усунення цього небажаного ефекту використовується відпал відбитків у тернопечі [7]. Від-

пал полягає в нагріванні пластику до температур, менших температури плавлення $T_{\text{П}}$ або розм'якшення $T_{\text{Р}}$, витримуванні його та повільному охолодженні разом з пічкою до кімнатної температури, внаслідок чого матеріал наближується до рівноваги. Для визначення оптимальних режимів віджигу було проведено спеціальні експерименти з відпалу повністю ідентичних відбитків, що виготовлені з екструзивного поліметилметакрилату товщиною 1,55 мм виробництва концерну «Rohm Degussa» (Німеччина) марки «Plexiglas XT». Відбитки № 1–6 повільно нагрівалися до різних температур відпалу $T_{\text{В}} = (85\text{--}145) \text{ }^{\circ}\text{C}$, утримувалися при температурі $T_{\text{В}}$ протягом $t_{\text{В}} = 2$ години і повільно охолоджувалися. Вимірювалася призматична дія відбитків до відпалу PD_0 та після нього PD_1 . Отримані результати наведені в табл. 4.

З даних табл. 4 випливає, що величина призматичної дії PD мікропризмових елементів практично не змінюються до температур $T_{\text{В}} \leq 125 \text{ }^{\circ}\text{C}$. За даними авторів [8] оптимальна температура відпалу $T_{\text{В}}$ для поліметилметакрилату становить 70–80 $^{\circ}\text{C}$. Однак усунення внутрішніх напружень доцільно проводити при максимально можливих температурах. Тому можна рекомендувати значення $T_{\text{В}} = (120\text{--}125) \text{ }^{\circ}\text{C}$ для оптимального режиму відпалу мікропризмових елементів, що виготовлені методом термопресування з матеріалу марки «Plexiglas XT».

Таблиця 4

Відбитки	$T_{\text{В}} \text{ }^{\circ}\text{C}$	$PD_0 (\Delta)$	$PD_1 (\Delta)$
№ 1	85	20,086	20,075
№ 2	105	20,101	20,030
№ 3	115	20,118	20,003
№ 4	125	20,095	19,990
№ 5	135	20,010	19,890
№ 6	145	20,092	18,880

Вимірювання величини призматичної дії PD відбитків з досліджених матриць Ф1, Ф1М1 та Ф1М1К1 визначили, що величина призматичної дії для всіх мікропризм, яка вимірюється кутом відхилення променя лазера [4], практично однакова (рис. 6). Це свідчить про те, що кути мікропризм не змінюються в процесі гальванічного вирощування нікелевих матриць мікропризмових структур.

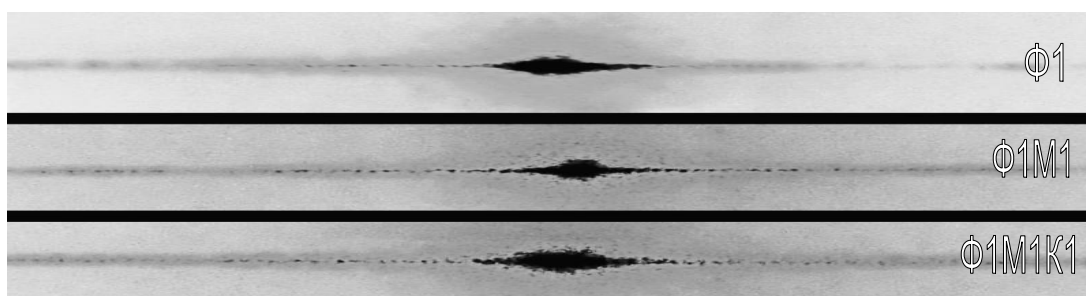


Рис. 6. Розподіл інтенсивності заломленого променя для відбитків з трьох матриць

Результати досліджень свідчать, що при виготовленні мікропризмових елементів для офтальмологічних застосувань методом термопресування також можливо використовувати нікелеві копії матриць замість матриць-оригіналів практично без погіршення якості кінцевих виробів.

Висновки

1. Для виготовлення серії гальванічних матриць світлоповертальних елементів з одного оригіналу доцільно використовувати першу нікелеву копію-оригінал К1, що отримана з першої нікелевої матриці М1, а не виготовляти серію нікелевих матриць з алюмінієвого оригіналу, тому що оптичні параметри послідовно виготовлених матриць М1, М2, М3 помітно знижуються з ростом номера матриці внаслідок погіршення якості робочих оптичних поверхонь мікрокубів на оригіналі при многократному процесі гальванопластики. В той же час, перша матриця М1 та матриця М1К1М1, що виготовлена з нікелевої копії-оригіналу М1К1, практично однакові за коефіцієнтом світлоповертання.

2. Різні відбитки на полікарбонаті з однієї матриці мають практично однаковий коефіцієнт світлоповертання R та виявляють ідентичні кутові відхилення рельєфу, що свідчить про достатню відпрацьованість усіх робочих параметрів процесу термопресування.

3. Для виготовлення гальванічних копій матриць мікропризмових елементів для офтальмології необхідно використовувати нікелеві копії Ф1М1К1, які повністю повторюють структуру поверхонь алюмінієвої матриці-оригіналу Ф1. Використання матриці-копії Ф1М1 є недоцільним, враховуючи незадовільну оптичну якість її робочих поверхонь.

4. Для зняття внутрішніх напружень для мікропризмових елементів доцільно використовувати термічний відпал, про цьому температура відпаду становить 120–125° С.

Таким чином, для виготовлення високоякісних мікропризмових засобів заломлення зображень повністю доцільне використання нікелевих гальванічних робочих матриць-штампів замість алюмінієвих матриць-оригіналів. При виробництві мікрорельєфних світлоповертальних пристроїв необхідно використовувати лише першу нікелеву гальванічну копію з матриці-оригіналу для її подальшого копіювання та виготовлення робочих матриць-штампів.

1. Бобров В.Ф. Основы теории резания металлов / В.Ф. Бобров. — М.: Машиностроение, 1979. — 344 с.

2. Моргун А.И. Возникновение и релаксация внутренних напряжений в гальванических покрытиях: дис. канд. техн. наук: 05.02.01 / Моргун Аксана Игоревна. — Тюмень, 2003. — 109 с.

3. Исаев А.В. Кинетические особенности катодного осаждения никеля из сульфатного электролита никелирования / А.В. Исаев, М.Г. Михаленко, В.В. Исаев. — Труды Нижегородского гос. техн. ун-та им. Р.Е. Алексеева. — 2011. — № 4 (91). — С. 244–251.

4. Бородін Ю.О. Покращення характеристик світлоповертальних елементів шляхом вимірювання та корекції кутів різця / Ю.О. Бородін, А.С. Лапчук, О.В. Шиховець // Реєстрація, зберігання і оброб. даних. — 2010. — Т. 12, № 1. — С. 55–66.

5. *Шляхи* поліпшення оптичних характеристик мікропризових структур / В.В. Петров, Є.Є. Антонов, С.М. Шанойло, А.С. Лапчук // Реєстрація, зберігання і оброб. даних. — 2010. — Т. 12, № 2. — С. 25–33.

6. Антонов Є.Є. Роздільна здатність та призматична дія мікропризових елементів Френеля / Є.Є. Антонов // Реєстрація, зберігання і оброб. даних. — 2013. — Т. 15, № 2. — С. 3–16.

7. *Технические свойства* полимерных материалов / [Крыжановский В.К., Бурлов В.В., Паниматченко А.Д., Крыжановская Ю.В.]. — [2-е изд., испр. и доп.]. — СПб.: Профессия, 2005. — 248 с.

8. *Структурная* томография полиметилметакрилата, деформированного в условиях одноосного сжатия / А.Л. Волынский, Т.Е. Гроховская, В.В. Люлевич [и др.] // Высокомолекулярные соединения. Серия А. — 2004. — Т. 40, № 2. — С. 247–256.

Надійшла до редакції 15.11.2013