

УДК 535.361.21

МЕТОД ФОТОМЕТРИЧНОГО ДЗЕРКАЛЬНОГО ЕЛІПСОЇДА ОБЕРТАННЯ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ШОРСТКОСТІ ПОВЕРХНІ**М.О. Безуглий, Д.В. Ботвиновський, В.В. Зубарєв, Я.О. Коцур**

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»,
проспект Перемоги, 37, корпус 1, м. Київ, 03056, тел.: (044) 454-94-75,
e-mail: mikhail_bezuglyy@ukr.net

Розглянутий метод фотометричного дзеркального еліпсоїда обертання для дослідження шорсткої поверхні. Проаналізовані особливості поширення оптичного випромінювання в еліпсоїді та вплив аберації кома на формування зображення. Обґрунтована конструкція та параметри дзеркального еліпсоїда обертання, що дозволило побудувати фотометричну головку, котра дозволяє реєструвати все відбите досліджуванім зразком оптичне випромінювання. Проведені характеристичні дослідження сталюї та дюралюмінієвої шорстких поверхонь та окреслені основні напрямки для подальших досліджень.

Ключові слова: еліпсоїд обертання, шорстка поверхня, шорсткість, лазерне випромінювання.

Rассмотрен метод фотометрического зеркального эллипсоида вращения для исследования шероховатой поверхности. Проанализированы особенности распространения оптического излучения в эллипсоиде и влияние абберации кома на формирование изображения. Обоснована конструкция и параметры зеркального эллипсоида вращения, что позволило построить фотометрическую головку, которая позволяет регистрировать все отраженное исследуемым образом оптическое излучение. Проведены характеристические исследования стальной и дюралюминиевой шероховатых поверхностей и очерчены основные направления дальнейших исследований.

Ключевые слова: эллипсоид вращения, шероховатая поверхность, шероховатость, лазерное излучение.

The method of photometric mirror ellipsoid of revolution is considered for research of rough surface. The features of distribution of optical radiation in an ellipsoid and influence of aberration of coma are analyzed on forming of image. A construction and parameters of mirror ellipsoid of revolution are reasonable, that allowed to build a photometric head that allows to register all reflected by the investigated standard optical radiation. Characteristic researches are conducted by steel and duralumin rough surfaces and basic directions of further researches are outlined.

Keywords: ellipsoid of revolution, rough surface, roughness, laser radiation.

Важливість дослідження властивостей шорсткої поверхні пов'язана з багатьма задачами різних напрямків науки та техніки, включаючи визначення мікронерівностей металевих дзеркал та характеристик різноманітних покриттів, контроль ступеню гладкості поверхонь мікроелектронної техніки та класу шорсткості поверхонь металевих деталей. Шорсткість є параметром, що визначає якість металевих деталей і від її величини залежать міцність, зносостійкість, коефіцієнт тертя, корозійна стійкість та ін. Серед сучасних методів дослідження та контролю шорсткості виділяють порівняльний безконтактний, механічний контактний та оптичний методи вимірювання параметрів шорсткості, а також фізичні методи діагностики поверхонь, серед

яких методи екзоелектронної емісії та контактної різниці потенціалів [1]. Оптичні методи (метод світлового та темного перерізу, інтерференційний метод, растровий метод, поляризаційний метод [2]) внаслідок своєї безконтактності та неруйнівного способу контролю шорсткості можуть бути легко автоматизованими на виробництві, а відтак забезпечити проведення вимірювання у режимі реального часу. З іншого боку, існуючі методики контролю, у тому числі і оптичні, дозволяють оцінити параметри поверхні величиною порядку 0,1 мкм [3]. У той же час новітні технології дозволяють отримувати поліровані поверхні з висотою мікронерівностей менше 1 нм, що потребує використання високоточних методів та засобів для їх

контролю.

При дослідженні шорсткої поверхні використовують, як правило, освітлення трьох типів [3]: направлене, цілком дифузне та дифузне. Промені, що падають на досліджувану шорстку поверхню, відбиваються дзеркально та дифузно в різних співвідношеннях у залежності від характеристик цієї поверхні та від способу освітлення. Дзеркальне відбиття променів залежить від коефіцієнту дзеркального відбиття поверхні і характеризує, в більшій мірі, розмір мікронерівностей цієї поверхні. Дифузне відбиття променів залежить від коефіцієнту дифузного відбиття поверхні і дозволяє оцінити індикатрису розсіювання оптичного випромінювання, а відтак і мікронерівності більшої величини. Очевидно, що при використанні направленого освітлення при певних конфігураціях вимірювальних пристроїв [3] аналізують дзеркальну або дифузну компоненту відбитого зразком світла. Для вимірювання коефіцієнта дифузного відбиття при направленому освітленні необхідно реєструвати всі відбиті промені в тілесному куті 2π . Це дозволяють зробити схеми, що базуються на використанні інтегруючої сфери, дзеркальних установок та гоніометрів. Проте більшість методик, що реалізують вимірювання на цих установках, громіздкі для певних досліджуваних зразків або занадто трудомісткі і не дозволяють за єдиним експериментом оцінити просторовий розподіл відбитого випромінювання. Тому актуальною залишається задача розробки адекватних безконтактних оптичних вимірювальних засобів для контролю шорсткості поверхні з широкими функціональними можливостями.

Для оптичного контролю шорстких поверхонь авторами запропонований метод фотометричного дзеркального еліпсоїда обертання і пристрій для його реалізації (рис. 1) [4]. Принцип роботи пристрою наступний. Оптичне випромінювання, що генерується лазером, вводиться в порожнину еліпсоїдального дзеркала 1 через вхідне вікно 2 і, відбившись від плоского дзеркала 3, направляється на поверхню досліджуваної частини поверхні. Внаслідок взаємодії випромінювання з середовищем на поверхні зразка, розміщеного в одному з фокусів еліпсоїдального дзеркала (F_1), спостерігається характерна пляма розсіювання, зображення якої проектується в другий фокус (F_2). Пляма розсіювання з другої фокальної площини проектується за допомогою оптичної системи (ОС) 5 в площину фоточутливої площадки координатного приймача випромінювання ПВ.

Функцію основного оптичного перетворювача в запропонованій системі виконує дзеркало, виконане у формі еліпсоїда обертання. Зазначена оптична система не є прикладом типової ОС в рамках зображальної оптики і тому для розуміння процесу поширення оптичного випромінювання необхідно вирішити задачу розрахунку ходу променів в еліпсоїді обертання.

Задамо вісь обертання – вісь Oz , тоді рівняння еліпсоїду буде мати наступний вид:

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

При моделюванні вважатимемо, що світло при поширенні в середині еліпсоїда підпорядковується законам геометричної оптики. Таким чином (рис. 2), промінь, що вийшов з першої фокальної площини (з точки A) під певним кутом, подолає прямолінійний шлях до відбиваючої поверхні еліпсоїда.

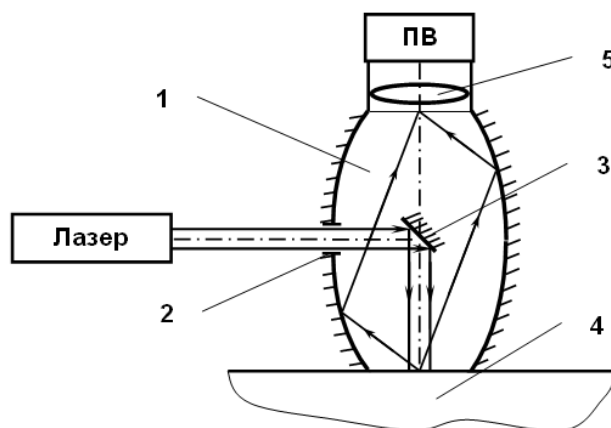


Рисунок 1 – Структурна схема пристрою для вимірювання шорсткості

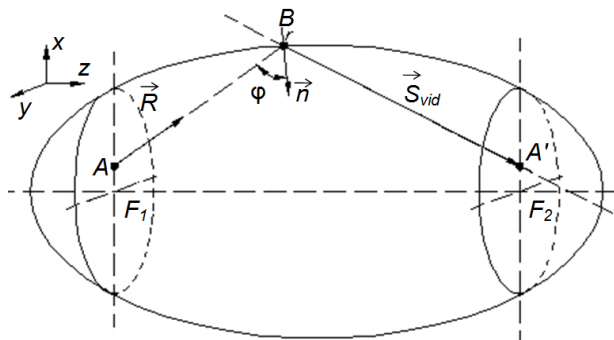


Рисунок 2 – Хід променів в еліпсоїді

У точці зустрічі з поверхнею еліпсоїда промінь

відіб'ється під кутом, що дорівнює куту падіння, і спрямується у другу фокальну площину (точка A'). Знайдемо закономірність, на основі якої можна визначити траєкторію розповсюдження світла в еліпсоїдальній фотометричній голівці, а саме координати точки перетину другої фокальної площини променями, що вийшли з певних точок першої фокальної площини.

Початковими даними для розрахунку оберемо ексцентриситет еліпсоїда, що характеризує протяжність фігури вздовж осі Oz , координати точки $A(X;Y;Z)$ пуску променя з першої фокальної площини та напрямок поширення, представлений трьома направляючими косинусами одиничного вектора $\vec{R}(\cos\alpha; \cos\beta; \cos\gamma)$. Промінь, що поширюється у напрямку одиничного вектора, можна описати рівнянням прямої, а саме:

$$\frac{x-X}{l} = \frac{y-Y}{m} = \frac{z-Z}{n},$$

де l, m, n – напрямки вектора \vec{R} ($l = \cos\alpha$; $m = \cos\beta$; $n = \cos\gamma$).

Для визначення точки перетину $B(x_n; y_n; z_n)$ запущеного променя з поверхнею еліпсоїда введемо параметр t [5] і виразимо через нього змінні:

$$\frac{x_n - X}{l} = \frac{y_n - Y}{m} = \frac{z_n - Z}{n} = t, \quad \begin{cases} x_n = lt + X \\ y_n = mt + Y \\ z_n = nt + Z \end{cases} \quad (2)$$

Підставивши (3) в рівняння еліпсоїда (1), отримуємо квадратне рівняння:

$$(b^2(l^2 + m^2) + a^2n^2)t^2 + (2b^2(lX + mY) + 2a^2nZ)t + (b^2(X^2 + Y^2) + a^2(Z^2 - b^2)) = 0. \quad (3)$$

Отримані при вирішенні (3) значення t підставимо в систему рівнянь (2) і знайдемо точки перетину еліпсоїда променем, яких буде дві. Обираємо точку, яка лежить по ходу променя, тобто $z_n > z_{f_1}$. У точці перетину будемо нормаль \vec{n} (рис. 2):

$$\frac{x - x_n}{\frac{\partial F}{\partial x}} = \frac{y - y_n}{\frac{\partial F}{\partial y}} = \frac{z - z_n}{\frac{\partial F}{\partial z}},$$

де $\frac{\partial F}{\partial x}, \frac{\partial F}{\partial y}, \frac{\partial F}{\partial z}$ – похідні в точці перетину; F –

формула еліпсоїда, задана в неявній формі.

Знаходимо кут між падаючим променем і нормаллю:

$$\cos\varphi = \frac{\vec{R} \cdot \vec{n}}{|\vec{R}| \cdot |\vec{n}|},$$

де $\vec{n} \left\{ \frac{\partial F}{\partial x}, \frac{\partial F}{\partial y}, \frac{\partial F}{\partial z} \right\}$ – вектор нормалі.

Напрямок відбитого променя шукаємо, виходячи з [6]:

$$\vec{S}_{vid} = \vec{S}_{pad} + S \frac{2}{\|\vec{n}\|} \cos\varphi \cdot |\vec{S}_{pad}| \cdot \vec{n},$$

де \vec{S}_{pad} – вектор падаючого променя, який визначається як різниця координат між точкою перетину променем поверхні еліпсоїда і координатами пуску променя; S – параметр, що визначає робочу поверхню еліпсоїда: $S=1$ – зовнішня, $S=-1$ – внутрішня; \vec{n} – нормаль, побудована в точці перетину.

Далі складаємо рівняння прямої в напрямку відбитого вектора:

$$\frac{x - x_n}{l_{vid}} = \frac{y - y_n}{m_{vid}} = \frac{z - z_n}{n_{vid}},$$

де $l_{vid}, m_{vid}, n_{vid}$ – направляючі косинуси відбитого вектора.

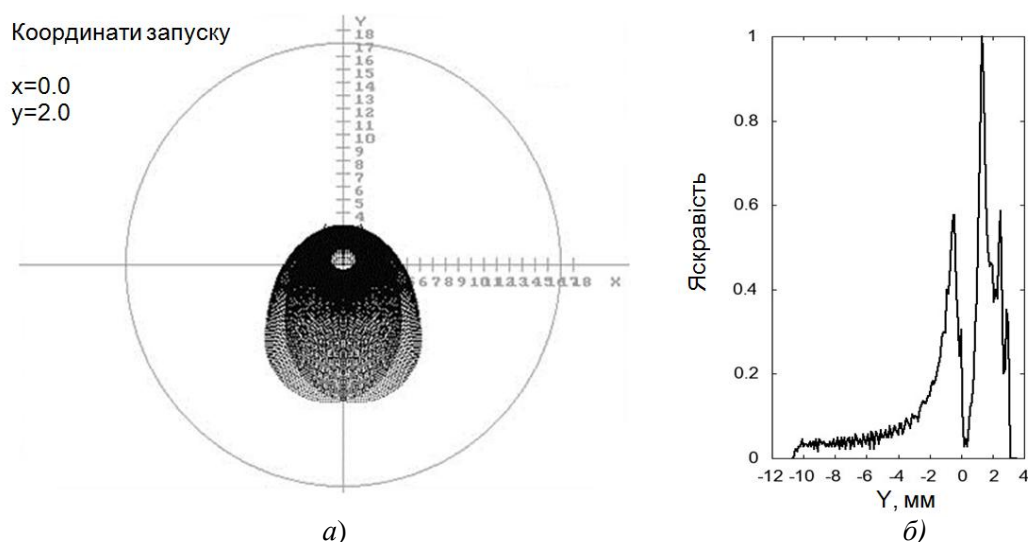
Визначаємо координати точки, в яку потрапить промінь у другій фокальній площині, тобто для $Z' = z_{f_2}$:

$$X' = \frac{(Z' - z_n)x_{vid}}{z_{vid}} + x_n,$$

$$Y' = \frac{(Z' - z_n)y_{vid}}{z_{vid}} + y_n.$$

У результаті отримуємо точку $A'(X'; Y'; Z')$, яка лежить у площині другого фокусу еліпсоїдального дзеркала.

Авторами розроблене програмне забезпечення, що дозволяє при заданих параметрах еліпсоїду та координатах виходу променя з першої фокальної площини проаналізувати геометричне зображення в іншому фокусі (рис. 3, а) та побудувати графік ймовірності потрапляння променів у певну область (рис. 3, б) в залежності від напрямку



**Рисунок 3 – Результати роботи програми для променів, що виходять з т. А (0;2):
а – геометричне зображення; б – графік ймовірності потрапляння променів**

пуску променя.

З рис.3 видно, що еліпсоїд обертання формує зображення у другій фокальній площині, форма якого викривлена монохроматичною аберацією системи – комою. У такому випадку інтенсивність випромінювання, що потрапило в другу фокальну площину дзеркального еліпсоїда, найбільш сконцентрована в області точки $A'(0;2)$ і зменшується в експоненціальній залежності до точки з координатами $(0;-11)$ по осі Oy [7].

Розроблене програмне забезпечення також дозволяє задавати напрямки поширення променів у сферичній системі координат: r – відстань до початку координат, θ і φ – зенітний і азимутальний кути, відповідно. Так як вектор напрямку руху променя є одиничним, то вхідними даними будуть лише кути. Проаналізуємо відбиваючу поверхню фотометричної голівки по секторам a , b і c відносно осі Oz (рис. 4) і з'ясуємо, які частини криволінійної поверхні вносять більші похибки в сформоване зображення.

Рис.5 ілюструє формування геометричного зображення променя, що вийшов з точки з координатами $(0;3)$, без обмеження поширення променів по зенітному куту (рис. 5, а), при обмеженні кута $0 < \theta < 65$ (рис. 5, б), при обмеженні кута $0 < \theta < 45$ (рис. 5, в). Характерно, що збільшення азимутального кута призводить до збільшення величини коми.

Характер роботи еліпсоїда обертання при обмеженні азимутального кута φ не змінюється, лише геометрично обмежуються сектори, по яким здійснюється аналіз.

Наведений алгоритм розрахунку ходу

променя в еліпсоїді обертання та аналізу впливу

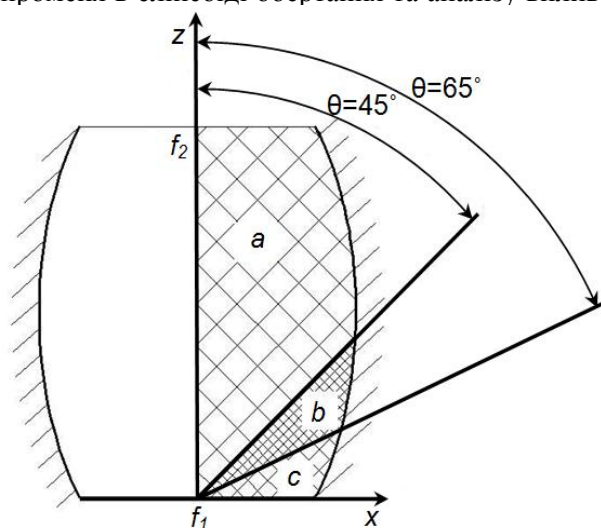


Рисунок 4 – Сектори дослідження процесу відбиття еліпсоїдального дзеркала в залежності від зенітного кута

коми на сформоване зображення дозволив оптимізувати конструктивні параметри фотометричної голівки для дослідження шорсткості металеві поверхні. З огляду на певні технологічні обмеження при виготовленні дзеркального еліпсоїда та вищезгаданий алгоритм показано, що зображення, спроектоване в другій фокальній площині фотометричної голівки, зазнає меншого впливу аберацій і похибок при використанні конструкції еліпсоїду з ексцентриситетом 0,66 та фокальним параметром 16,875 мм.

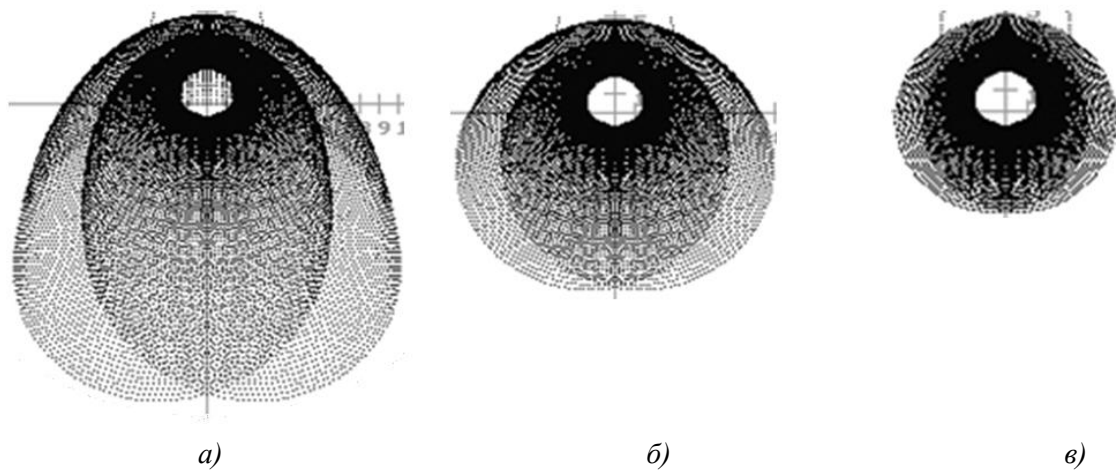
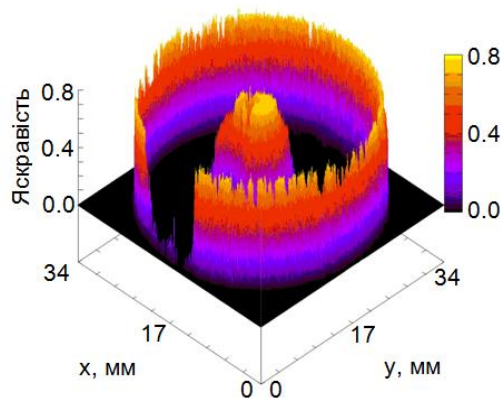
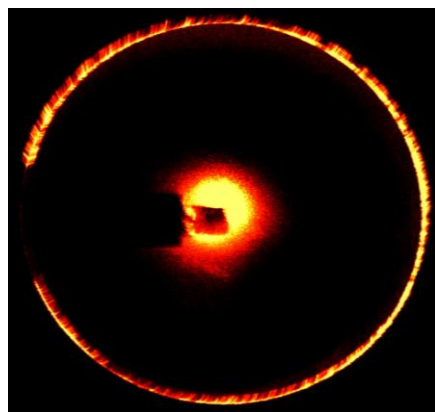


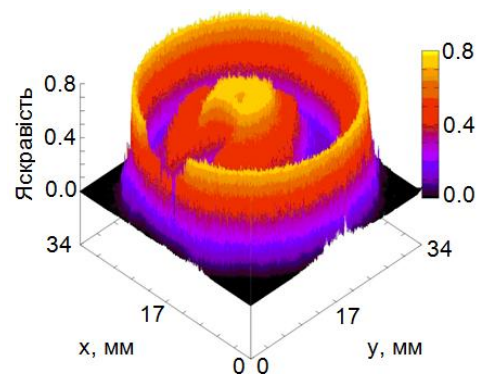
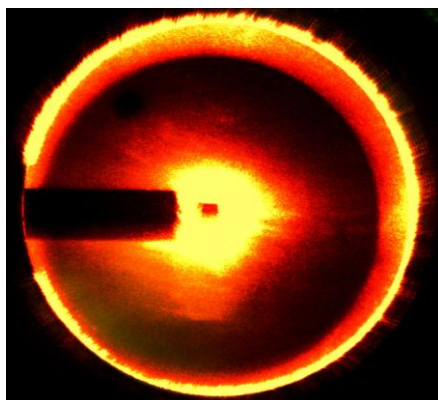
Рисунок 5 – Геометричне зображення точки в залежності від зенітного кута: *a* – для секторів *a*, *b* і *c*; *б* – для секторів *a* і *b*; *в* – для сектору *a*

Фотометрична установка (рис. 1) використовувалась при потужності одномодового безперервного *He-Ne* лазера

2 мВт на довжині хвилі $\lambda=632,8$ нм, діаметрі падаючого пучка 1,4 мм, ексцентриситеті еліпсоїду обертання 0,66 та фокальному



a)



б)

Рисунок 6 – Зображення та графіки просторового розподілу яскравості у фокальній площині еліпсоїда обертання для сталюго (а) та дюралюмінієвого (б) брусків

параметрі 16,875 мм. В якості проектувальної оптичної системи використовувався об'єктив з фокусною відстанню 64 мм та відео окуляр з КМОП матрицею на 5 Мп. Зображення фіксувались за допомогою програмного забезпечення ScopePhoto, аналізувались за допомогою авторської програмної розробки для обробки зображень, графіки побудовані з використанням програми для створення двох- та трьохвимірних графіків Gnuplot. У якості досліджуваних зразків були обрані металеві бруски із сталі та дюралюмінію, причому клас шорсткості бруска алюмінію був нижчим. На рис. 6 наведено зображення та графіки просторового розподілу яскравості в фокальній площині дзеркального еліпсоїда для обраних металів.

Аналіз зображень і графіків показує, що просторовий розподіл яскравості шорсткої поверхні, зареєстрований за допомогою запропонованої установки, містить три складові (зони): центральну, що характеризує умовне дзеркальне відбиття, крайову, котра свідчить про внесок променів, відбитих під значними зенітними кутами, і середню, що заключає в собі відбиту під невеликими зенітними кутами компоненту. Також добре помітно, що у більш шорсткої поверхні зонний просторовий розподіл захоплює більш широкий концентричний інтервал.

ВИСНОВКИ

На підставі розробленого методу фотометричного дзеркального еліпсоїда обертання і спроектованої та побудованої на його основі установки отриманий характеристичний просторовий розподіл відбитого шорсткою поверхнею лазерного випромінювання в межах тілесного кута 2π. Безперечно, отримані дані є необхідними і достатніми для визначення параметрів шорсткості, проте потребують розробки адекватного математичного апарату для їх інтерпретації. Такий математичний базис може бути створений шляхом паралельного дослідження зразків різних металів з різними

класами шорсткості за допомогою розробленої установки та одного з сертифікованих приладів, що широко використовується в конструкторській та технологічній практиці. До того ж потрібно диференціювати результати досліджень для різних типів напрямків мікронерівностей, оскільки це суттєво впливатиме на характер відбитого поверхнею оптичного випромінювання. Додаткових досліджень також потребують спектральні особливості формування відбитого випромінювання.

1. Назаров Ю.Ф. Методы исследования и контроля шероховатости поверхности металлов и сплавов / Ю.Ф. Назаров, А.М. Шкилько, В.В. Тихоненко, И.В. Компанеец // *Физическая инженерия поверхности* – 2007. – Т.5. – №3-4. – с. 207-216. 2. Зайцев С.А. Контрольно-измерительные приборы и инструменты. Учебник / С.А. Зайцев, Д.Д. Грибанов, А.Н. Толстой, Р.В. Меркулов. – М.: Издательский центр «Академия», 2003. – 464 с. 3. Топорец А.С. Оптика шероховатой поверхности / А.С. Топорец – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1988. – 191 с. 4. Пат. 61635 Українв, МПК 7 G01 N21/47, 21/55, Дозиметр оптичного випромінювання / Безуглий М.О., Ключко Т.Р., Тимчик Г.С., Циганков А.Т. ; заявник та патентовласник Націон. технічн. ун-т України «Київ. політехн. ін.-т». – №2003032423 ; заявл. 20.03.2003 ; опуб. 17.11.2003. Бюл. №11 – 3с. 5. Гусак А.А. Справочник по высшей математике / А.А. Гусак, Г.М. Гусак, Е.А. Бричикова. – Мн.: ТетраСистемс, 1999. – 640с. 6. Keijzer M. Light transport for medical laser treatments / M. Keijzer – Delft, 1993. – 207p. 7. Слюсарев Г.Г. Методы расчета оптических систем. Изд. 2-е. доп. и перераб. / Г.Г.Слюсарев – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние 1975. – 640с.

Поступила в редакцію 15.12.2011 р.

Рекомендував до друку докт. техн. наук,
проф. Тимчик Г. С.