

Попередження можливих руйнувань оптичних елементів точного приладобудування в умовах зовнішніх термодій

І.В. Яценко^{1,*}, В.С. Антонюк², В.А. Ващенко¹, В.В. Цибулін¹

¹ Черкаський державний технологічний університет, бул. Шевченка, 460, 18030 Черкаси, Україна

² Національний технічний університет України «КПІ», просп. Перемоги, 37, 03056 Київ, Україна

(Одержано 12.01.2016, опубліковано online 15.03.2016)

Представлено результати експериментальних досліджень з покращення властивостей поверхневих шарів елементів з оптичного скла шляхом попередньої електронно-променевої обробки їх робочих поверхонь. Це дозволяє підвищити стійкість елементів до зовнішніх термодій та зменшити кількість можливих руйнувань, а також покращити чистоту та гладкість їх поверхонь, що призводить до підвищення надійності та строку служби приладів на їх основі, розширення можливостей їх застосування (дальності та інтенсивності впливу на об'єкт тощо).

Ключові слова: Оптичний елемент, Зовнішні термічні впливи, Електронний промінь, Точне приладобудування.

DOI: [10.21272/jnep.8\(1\).01027](https://doi.org/10.21272/jnep.8(1).01027)

PACS number: 00.00. Bh

1. ВСТУП

Сучасні прилади з оптичними елементами для вимірювання та теплового контролю об'єктів різної фізичної природи (плоскі пластини та циліндричні диски як підкладки світлофільтрів ГЧ-приладів, лінзові аерофотографічні об'єктиви та пластини подвійної кривизни для дзеркал космічного та аерокозмічного призначення, входні захисні вікна та лінзи у прицілах для спостереження у видимій та ГЧ областях спектра, півсферичні об'єктиви ГЧ-приладів самонаведення та спостереження, циліндричні світловоди з оптичних моноволокон у медичних приладах для діагностики та лікування) піддаються інтенсивним зовнішнім термодіям (підвищені температури нагріву та зовнішні тиски, ударні термодії в умовах пострілу та польоту тощо) [1-3]. У вказаних умовах відбувається суттєва зміна властивостей поверхневих шарів оптичних елементів аж до їх руйнування (поява тріщин та сколів, глибоке поверхневе оплавлення елементів з утворенням напливів, хвиляподібних поверхонь та зміною геометричної форми та ін. дефектів), що призводить до суттєвого погіршення техніко-експлуатаційних характеристик приладів та їх виходу з ладу.

Для запобігання руйнувань оптичних елементів практичне значення мають електронно-променевої методи фінішної обробки їх робочих поверхонь на стадії виготовлення, які дозволяють покращувати властивості поверхневих шарів елементів й, тим самим, робити їх більш стійкими до зовнішніх теплових дій [2-5].

Питання впливу термічної дії електронного променя на зміну властивостей поверхневих шарів оптичних елементів нині досліджено недостатньо: не встановлено допустимі діапазони зміни параметрів електронного променя (густина теплового впливу променя, швидкість його переміщення), в межах яких спостерігається суттєве покращення властивостей поверхневих шарів елементів, що впливають на

техніко-експлуатаційні характеристики приладів.

Таким чином, метою даної роботи є попередження можливих руйнувань оптичних елементів точного приладобудування при їх експлуатації з врахуванням впливу зовнішніх термодій шляхом покращення властивостей поверхневих шарів елементів за допомогою попередньої електронно-променевої обробки.

2. ХАРАКТЕРИСТИКА ОПТИЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ТА МЕТОДІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

Для дослідження впливу параметрів електронного променя на властивості поверхневих шарів елементів з оптичного скла (К8, К108, К208, БК10, ТФ110) використовувались пластини товщиною $2 \dots 4 \cdot 10^{-3}$ м, шириною $2 \dots 4 \cdot 10^{-2}$ м та довжиною $4 \cdot 10^{-2} \dots 8 \cdot 10^{-2}$ м [2, 3]. Для здійснення електронно-променевої обробки оптичних елементів при участі автора було розроблено спеціалізоване технологічне обладнання, яке захищено патентами України [3, 4], що дозволяє реалізовувати стрічковий електронний промінь шириною $5 \cdot 10^{-4} \dots 1,5 \cdot 10^{-3}$ м, довжиною $6 \cdot 10^{-2} \dots 8 \cdot 10^{-2}$ м, густиною теплової дії $F_n = 0,7 \cdot 10^7 \dots 8,5 \cdot 10^8$ Вт/м² та швидкістю переміщення $V = 0 \dots 0,1$ м/с.

Для визначення властивостей поверхневих шарів оптичних елементів до та після електронно-променевої обробки (висота залишкових мікронерівностей на поверхні (R_a , нм), фазовий склад та структура шарів, максимальна товщина оплавленого шару (h_m , мкм)) використовувались відомі методи фізико-хімічного аналізу (методи оптичної мікроскопії та мікрозондового аналізу, які включають растрову та скануючу мікроскопію (РЕМ) та транс-емісійну мікроскопію (ТЕМ), а також методи атомно-силової мікроскопії (АСМ) тощо) [3, 6-10]. Для моделювання теплових впливів на досліджувані елементи з оптичного скла при нормальних умовах ($T_0 = 300$ К, $P = 105$ Па) та знаходження критичних значень їх

* irina.yatsenko.79@mail.ru

параметрів (теплого потоку q_n^* та часу його дії t^*) використовувався керований ГЧ-нагрів кварцовими лампами типу КГМ-220-1000-1 з використанням термодатчиків РИФ 101 для контролю температур поверхонь елементів в діапазоні 300...1900 К та теплових потоків, що поступають на них [2, 3].

Для моделювання впливу підвищених температур нагріву (до 1500 К) та зовнішніх тисків (до 107 Па) використовувалось спеціалізоване обладнання, в якому для підвищення точності вимірювань здійснювалось випробування одночасно трьох оптичних елементів [3]. Експериментальні дослідження термічного впливу електронного променя на оптичні елементи проводились в лабораторії «Вакуумна техніка та електронно-променевої методи обробки» кафедри фізики Черкаського державного технологічного університету, а випробування оптичних елементів на стійкість до зовнішніх теплових впливів (при нормальних та підвищених тисках) проводились по методикам, розробленим на ПО «Завод Арсенал» (м. Київ) та Черкаському державному технологічному університеті в рамках держбюджетних та госпдоговірних робіт [2-5]. У проведених дослідженнях з визначення перерахованих вище властивостей поверхневих шарів оптичних елементів та критичних значень параметрів зовнішніх термодій відносна похибка не перевищувала 5...10 %.

3. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ АНАЛІЗ

Аналіз електронно-мікроскопічних знімків повер-

хонь елементів з оптичного скла, вивчення сканограм поверхонь шліфів з відколів елементів до та після електронно-променевої обробки показують, що у першому випадку висота мікронерівностей складає 30...40 нм, а у другому – знижується до рівня 0,5...1,2 нм. Визначено наступний вплив параметрів електронного променя на висоту залишкових мікронерівностей (рис. 1): збільшення густини теплового впливу електронного променя F_n від 10^7 Вт/м² до $8,5 \cdot 10^7$ Вт/м², наприклад, для використаної на практиці швидкості його руху $V = 8 \cdot 10^{-3} \dots 5 \cdot 10^{-2}$ м/с, призводить до зменшення висоти залишкових мікронерівностей від 3...5 нм до 1,0...1,5 нм.

Встановлено, що максимальна товщина оплавленого шару h_m (рис. 2) може досягати 250...300 мкм та суттєво залежить від величини F_n і швидкості його переміщення V : збільшення F_n від $7 \cdot 10^6$ Вт/м² до $8 \cdot 10^8$ Вт/м² при використаних на практиці значеннях швидкості руху електронного потоку V призводить до збільшення максимальної товщини оплавленого шару від 25 мкм до 230 мкм; збільшення швидкості руху електронного променя від 10^{-3} м/с до 10^{-2} м/с при використаних на практиці значеннях F_n призводить вже до зменшення максимальної товщини оплавленого шару від 200 мкм до 30 мкм.

Встановлено, що умові $h_m > h^*$ ($h^* = 150 \dots 200$ мкм – гранично допустимі значення глибини оплавлення елементів, перевищення яких призводить до порушення площинності поверхні та втрати геометричної форми елементів [2, 3]) відповідають наступні діапазони зміни критичних значень параметрів зовнішніх термодій: $q_n^* = 1,5 \cdot 10^6 \dots 2,3 \cdot 10^6$ Вт/м²; $t^* = 2 \dots 8$ с.

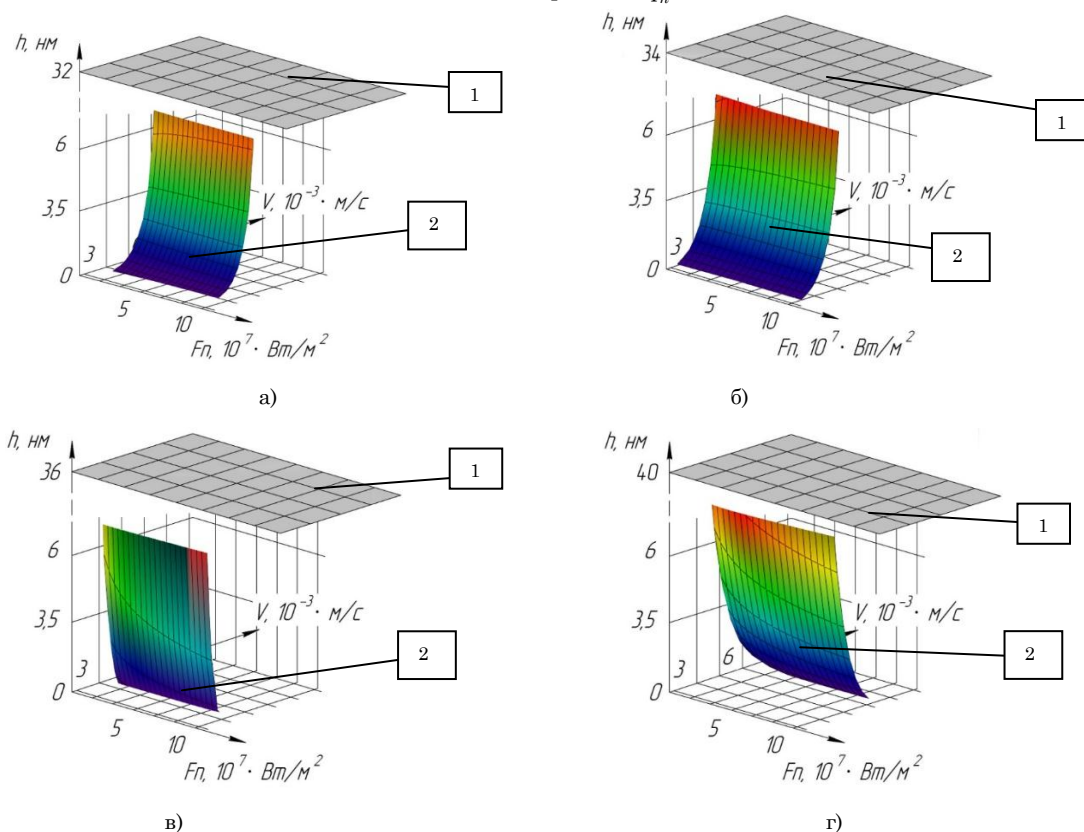


Рис. 1 – Залежності висоти залишкових мікронерівностей поверхні елементів з оптичного скла К8 (а), К108 (б), К208 (в) та БК10 (г) від густини теплового впливу електронного променя та швидкості його переміщення: 1 – необроблений елемент; 2 – елемент, оброблений електронним променем

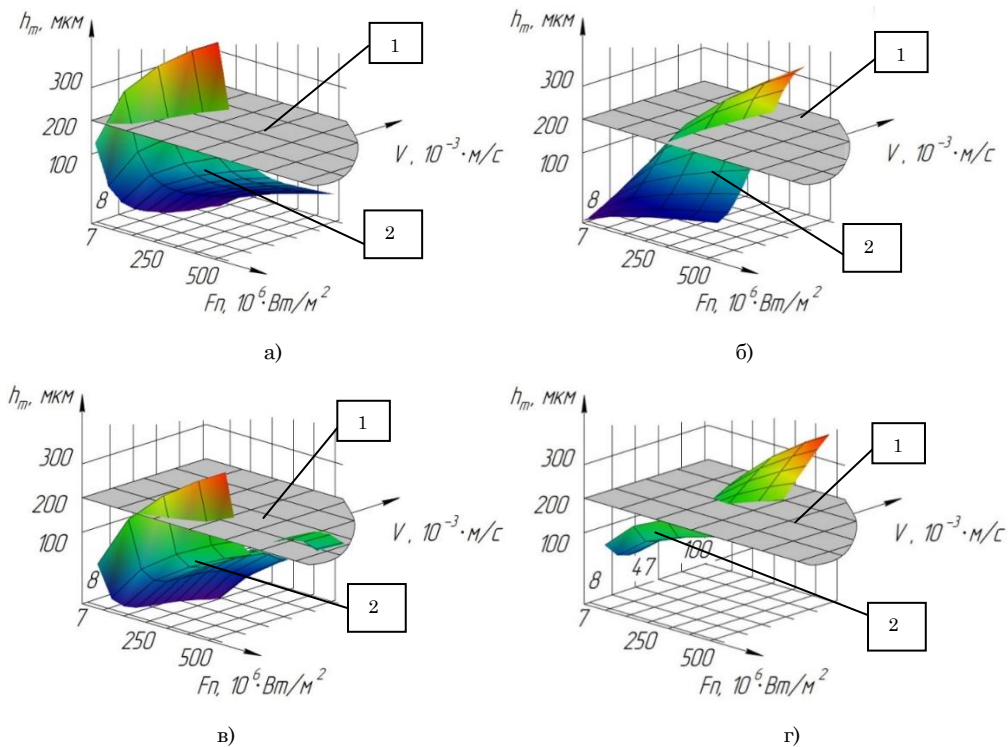


Рис. 2 – Залежності максимальної товщини оплавленого шару у елементах з оптичного скла К8 (а), К108 (б), К208 (в) та БК10 (г) від густини теплового впливу електронного променя та швидкості його переміщення: 1 – гранично допустимі значення h_m^* ; 2 – значення h_m , які отримано при електронно-променевої обробці оптичних елементів

Встановлено, що сформовані електронним променем шари на поверхні елементів мають у різній мірі змінений хімічний склад. Так, аналіз зміни елементного складу поверхні елементів з скла К8, К108, К208, проведений за допомогою спектрометра хвильової дисперсії, показав зменшення концентрації Na та O, збільшення концентрації Si та незмінність концентрації K. У той же час методом рентгеноструктурного аналізу на прикладі необроблених на оброблених електронним променем елементів з скла БК10 та ТФ110 показано, що помітної кількісної зміни хімічного складу поверхні не спостерігається, однак можна зробити висновок про поліпшення однорідності розподілу елементів у мікроб'ємах поверхневого шару елемента після електронно-променевої обробки.

Аналіз спектрів концентраційних залежностей розподілів елементів у оброблених та необроблених електронним променем поверхнях оптичних елементів (наприклад, елементів з оптичного скла К8, К108 та БК10) вказує на нестійкість K2O та Na2O по глибині дії електронного променя.

Встановлено також, що електронно-променева обробка оптичних елементів оплавленням призводить не тільки до гомогенізації поверхні, а й до орієнтованої перебудови кремне-кисневої сітки біля поверхні скла, яка стає наближеною до структури кварцового скла, тобто поверхневі шари елементів стають більш стійкими до зовнішніх термодій.

Це підтверджується проведеними дослідженнями по знаходженню критичних значень зовнішніх теплових потоків та часів їх дії на необроблені та оброблені електронним променем оптичні елементи (рис. 3, 4): для руйнування оптичних елементів, оброблених електронним променем, потрібні зовнішні теплові пото-

ки, які у 1,5...2 рази вище, ніж для необроблених елементів.

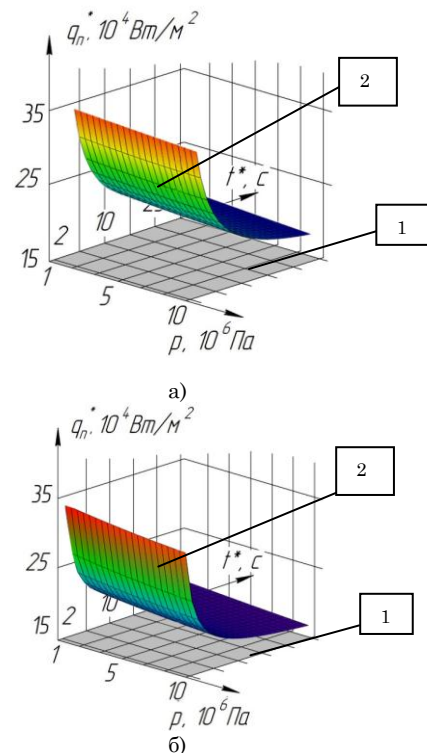


Рис. 3 – Залежності критичних значень зовнішнього теплового потоку від часів його дії на оптичні елементи з скла К8 (а) та К108 (б) та зовнішніх тисків: 1 – необроблений елемент; 2 – елемент, оброблений електронним променем

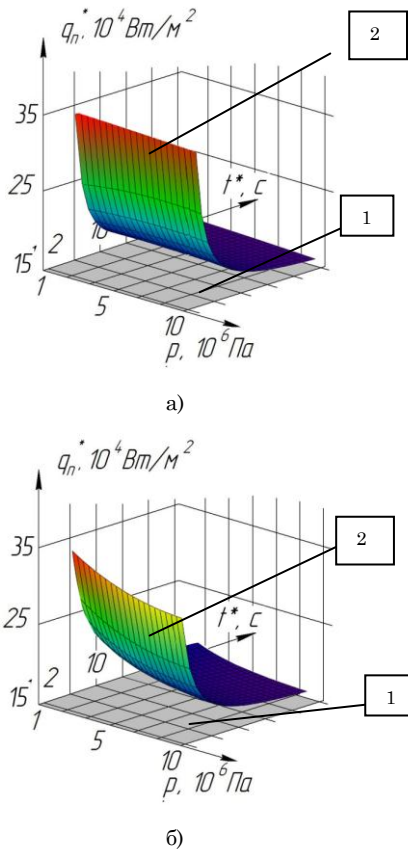


Рис. 4 – Залежності критичних значень зовнішнього теплового потоку від часів його дії на оптичні елементи з скла К208 (а) та БК10 (б) та зовнішніх тисків: 1 – необроблений елемент; 2 – елемент, оброблений електронним променем

Крім цього, встановлено, що при збільшенні t^* від 4 с до 24 с величина q_n^* зменшується у 5...6 разів; при цьому збільшення зовнішнього тиску від $P = 10^5$ Па до $P = 10^7$ Па призводить при заданому t^* до зменшення q_n^* у 1,2...1,7 разу, а при заданому q_n^* – до зменшення t^* у 1,3...1,5 разу (рис. 5, 6).

Показано, що попередня електронно-променева обробка робочих поверхонь тонких оптичних пластин, що використовуються, наприклад, в якості входних захисних вікон лазерних тепловізійних прицільних комплексів [11], в умовах змінного зовнішнього нагріву, який моделює реальні умови їх експлуатації з врахуванням впливу зовнішніх термодій, призводить до зменшення кількості руйнувань пластин у 2... 2,5 разу (табл. 1) та підвищує строк служби прицільних комплексів у 1,5...2 рази.

Крім цього, встановлено, що попередня електронно-променева обробка торцевих поверхонь світловодів на оптичному оптоволоконні, які використовуються у лазерних медичних приладах для діагностики та лікування [12], призводить до зменшення у 2...3 рази енергетичних втрат при введенні лазерного випромінювання крізь торцеву поверхню світловода. Це дозволяє збільшити у 1,5...2 рази відстань від лазерного джерела випромінювання до місць його впливу, тобто дозволяє проводити діагностику та лікування, по-перше, у раніше недосяжних місцях, а, по-друге – з більшою інтенсивністю впливу.

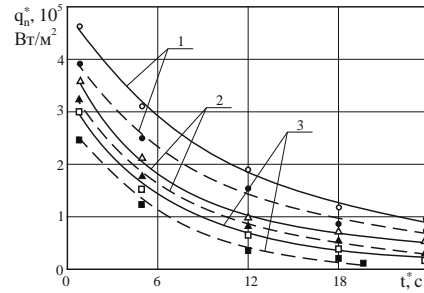


Рис. 5 – Залежності $q_n^*(t^*)$ для елементів з оптичного скла К8 (1), К208 (2) та К108 (3) (товщина елемента $H = 4 \cdot 10^{-3}$ м): ——— $P = 10^5$ Па; - - - - - $P = 10^7$ Па; ●, ○, ▲, □, ■ – експериментальні дані

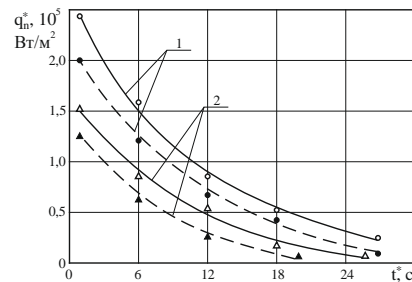


Рис. 6 – Залежності $q_n^*(t^*)$ для елементів з оптичного скла ТФ110 (1) та БК10 (2) (товщина елемента $H = 4 \cdot 10^{-3}$ м: ——— $P = 10^5$ Па; - - - - - $P = 10^7$ Па; ●, ○, ▲ – експериментальні дані

Таблиця 1 – Вплив електронно-променевої обробки робочих поверхонь оптичних пластин на залежність відносної кількості їх руйнувань (k) від швидкості нагріву* (пластини з скла К8 розміром $2 \cdot 10^{-3} \times 3 \cdot 10^{-2} \times 4 \cdot 10^{-2}$ м, $T_0 = 300$ К, $P = 10^5$ Па)

| Пластина | k , % | |
|---------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|
| | Необроблена електронним променем | Оброблена електронним променем |
| Швидкість нагріву пластини, К/с | | |
| 100...150 | 40...50 | 20...30 |
| 150...200 | 50...60 | 30...40 |
| 200...300 | 60...70 | 40...50 |

*Примітка. $k = k_p/k_0$, де k_0 , k_p – загальна кількість випробуваних пластин та кількість з них, які піддались руйнуванню відповідно.

4. ВИСНОВКИ

Вперше визначено оптимальні діапазони зміни параметрів електронного променя (густина його теплового впливу $F_n = 6 \cdot 10^6 \dots 8 \cdot 10^8$ Вт/м², швидкості його переміщення відносно елемента $V = 5 \cdot 10^{-3} \dots 10^{-2}$ м/с), в межах яких відбувається покращення основних властивостей поверхневих шарів оптичних елементів після їх попередньої електронно-променевої обробки:

– збільшення густини теплової дії електронного променя від 10^7 Вт/м² до 10^8 Вт/м² та зменшення швидкості його переміщення від $5,5 \cdot 10^{-2}$ м/с до $7 \cdot 10^{-3}$ м/с призводить до зменшення висоти залишкових

мікронерівностей від 4...6 нм до 0,5...1 нм;
 – відбувається розгладження нерівностей, суттєва залежність форми поверхні від режимів обробки (при глибокому оплавленні (до 250...300 мкм) спостерігається чітко визначена хвилоподібна поверхня, а модифікований оплавлений шар має чітко орієнтовану структуру по глибині оплавлення);
 – керуючи параметрами електронного променя можна зменшити товщину оплавленого шару до гранично допустимих значень 150...200 мкм, перевищення яких призводить до порушення площинності поверхні оптичних елементів та втрати їх геометричної форми;
 – електронна обробка елементів оплавленням призводить не тільки до гомогенізації поверхні, а й до орієнтованої перебудови біля поверхні кремне-

кисневої сітки скла, яка стає наближеною до структури кварцового скла, що підвищує стійкість елементів до зовнішніх термодій у 1,5...2 рази.

1. Встановлено, що попередня електронно-променева обробка: робочих поверхонь тонких оптичних пластин для вхідних захисних вікон лазерних тепловізійних прицільних комплексів призводить до зменшення кількості їх руйнувань у 2...2,5 разу, а також до підвищення надійності та строку служби прицільних комплексів у 1,5...2 рази; торцевих поверхонь світловодів лазерних медичних приладів призводить до зменшення у 2...3 рази енергетичних втрат при введенні лазерного випромінювання крізь ці поверхні, значно розширюючи можливості приладів для діагностики та лікування.

Упреждение возможных разрушений оптических элементов точного приборостроения в условиях внешних термовоздействий

И.В. Яценко¹, В.С. Антонюк², В.А. Ващенко¹, В.В. Цыбулин¹

¹ Черкаський державний технологічний університет, бул. Шевченко, 460, 18030 Черкаси, Україна

² Національний технічний університет України «КПІ», просп. Перемоги, 37, 03056 Київ, Україна

Представлены результаты экспериментальных исследований по улучшению свойств поверхностных слоев элементов из оптического стекла путем предварительной электронно-лучевой обработки их рабочих поверхностей. Это позволяет повысить стойкость элементов к внешним термовоздействиям и уменьшить количество возможных разрушений, а также улучшить чистоту и гладкость их поверхностей, что приводит к повышению надежности и срока службы приборов на их основе, расширению возможностей их применения (дальности и интенсивности воздействия на объект и др).

Ключевые слова: Оптический элемент, Внешние термические воздействия, Электронный луч, Точное приборостроение.

Prevent Potential Destruction of the Optical Elements of Precision Instrumentation to External Thermo-influences

I.V. Yatsenko¹, S.V. Antonyuk², V.A. Vaschenko¹, V.V. Tsybulin¹

¹ Cherkasy State Technological University, 460, Shevchenko St., 18030 Cherkasy, Ukraine

² National technical University of Ukraine «KPI», 37, Pobedy Av., 03056 Kiev, Ukraine

Presents the results of experimental investigations on improvement of properties over the surface layer of elements made of optical glass by a preliminary electron beam processing of their working surfaces. This allows to increase the resistance elements to the external thermo-influences and reduce the possible of destruction, as well as improve the texture, clarity and smoothness of their surfaces, which leads to increased reliability and lifetime of devices based on them, the empowerment of their application (range and intensity of impact on the object, etc.).

Keywords: Optical element, External thermal influences, Electron beam, Precision instrumentation.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. В.А. Ващенко, Г.В. Канашиевич, В.М. Лукашенко, М.А. Бондаренко, И.В. Яценко, *Вісник ЧДТУ* 2, 52 (2002) (V.A. Vashchenko, H.V. Konashevych, V.M. Lukashenko, M.A. Bondarenko, Y.V. Yatsenko, *Visnyk ChDTU* 2, 52 (2002)).
2. В.А. Ващенко, Д.И. Котельников, Ю.Г. Лега, Д.М. Краснов, И.В. Яценко, О.В. Кириченко, *Тепловые процессы при электронной обработке оптических материалов и эксплуатации изделий на их основе* (Київ: Наук. думка: 2006) (V.A. Vashchenko, D.I. Kotel'nikov, Yu.G. Luga, D.M. Krasnov, I.V. Yatsenko, O.V. Kirichenko, *Teplovyye protsessy pri elektronnoy obrabotke opticheskikh materialov i ekspluatatsii izdeliy na ikh osnove* (Kiev: Nauk. dumka: 2006)).
3. В.А. Ващенко, И.В. Яценко, Ю.Г. Лега, О.В. Кириченко, *Основи електронної обробки виробів з оптичних матеріалів* (Київ: Наук. думка: 2011) (V.A. Myshchenko, Y.V. Yatsenko, Yu.H. Leha, O.V. Kyrychenko, *Osnovy elektronnoyi obrobky vyrobiv z optychnykh materialiv* (Kiev: Nauk. dumka: 2011)).
4. М.П. Бочок, Н.П. Будко, В.А. Ващенко, *Спеціальні методи обробки оптичного скла*, 215 (Чернігів: ЧДТУ:

- 2001) (M.P. Vochkov, N.P. Butko, V.A. Vashchenko, *Spetsial'ni metody obrobky optychnoho skla*, 215 (Chernihiv: ChDTU: 2001)).
5. В.А. Ващенко, О.В. Кириченко, Д.И. Котельников, *Электронная обработка материалов* 6, 44 (2004) (V.A. Vashchenko, O.V. Kirichenko, D.I. Kotel'nikov, *Elektronnaya obrabotka materialov* 6, 44 (2004)).
6. Г. Шиммель, *Методы электронной обработки* (М.: Мир: 1972) (G. Shimmel', *Metodika elektronnoy obrabotki* (M.: Mir: 1972)).
7. Л. Энгель, Г. Клингеле, *Растровая электронная микроскопия* (М.: Металлургия: 1986) (L. Engel', G. Klingele, *Rastrovaya elektronnaya mikroskopiya* (M.: Metallurgiya: 1986)).
8. E. Meyer, *Prog. Surface Sci.* 41, 3 (1992).
9. А.А. Суслов, С.А. Чижик, *Материалы, технологии, инструменты* 3, 79 (1997) (A.A. Suslov, S.A. Chizhik, *Materialy, tekhnologii, instrumenty* 3, 79 (1997)).
10. Г.М. Дубровська, Г.В. Канашевич, В.А. Ващенко, *Приклади застосування фізичних методів дослідження структури поверхні* (Сільхет: Шобуж Біпоні, Удоун Офсет принтерс: 2007) (H.M. Dubrovs'ka, H.V. Kanashevych, V.A. Vashchenko, *Pryklady zastosovannya fizychnykh metodiv doslidzhennya struktury pov-erkhni* (Sil'khet: Shobuzh Biponi, Udoun Ofset prynters: 2007)).
11. А.Р. Глущенко, В.И. Гордиенко, А.В. Буряк, А.Ю. Денисенко, *Танковые ночные системы и приборы наблюдения* (Черкассы: Фотоприбор: 2007) (A.R. Vlasenko, V.I. Gordiyenko, A.V. Bur'yak, A.Yu. Denisenko, *Tankovyye nochnyye sistemy i pribory nablyudeniya* (Cherkassy: Fotopribor: 2007)).
12. В.Д. Попов, *Современные аспекты лазерной терапии* (Черкассы: Вертикаль: 2011) (V.D. Popov, *Sovremennyye aspekty lazernoy terapii* (Cherkassy: Vertikal': 2011)).