

## ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ МАШИНОБУДУВАННЯ

УДК 621.338.27:53

**В.С. АНТОНЮК**, д-р техн. наук, Київ,  
**І.В. ЯЦЕНКО**, канд. техн. наук, **О.В. КИРИЧЕНКО**, д-р техн. наук,  
**В.А. ВАЩЕНКО**, д-р техн. наук, Черкаси, Україна

### ПІДВИЩЕННЯ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕМЕНТІВ З ОПТИЧНИХ КЕРАМІК ФІНІШНОЮ ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВОЮ ОБРОБКОЮ

Представлено результати експериментальних досліджень з покращення властивостей поверхневих шарів елементів з оптичних керамік (КО1, КО2, КО3, КО5, КО12) після їх обробки рухомим електронним променем з густиною теплової дії  $F_n = 10^6 \dots 1,6 \cdot 10^7$  Вт/м<sup>2</sup> та швидкістю переміщення  $V = 10^{-3} \dots 10^{-1}$  м/с (збільшення мікротвердості поверхні з 1,2...2,9 ГПа (необроблені елементи) до 5,7...6,4 ГПа (оброблені елементи), виникнення зміцнених шарів товщиною 210...230 мкм). Встановлено, що покращення вказаних властивостей призводить до підвищення стійкості елементів до зовнішніх термовпливів: збільшенню у 1,3...1,7 разу критичних значень зовнішніх теплових потоків та часів їх дії, перевищення яких призводить до руйнування елементів та виходу з ладу приладів для досліджуваного діапазону зміни зовнішнього тиску  $10^5 \dots 10^7$  Па; підвищенню граничних допустимих значень термопружних напружень в елементах з 50...140 МПа до 160...370 МПа при температурах нагріву 300...1200 К.

**Ключові слова:** оптична кераміка, поверхневий шар, електронно-променева обробка, зовнішній тепловий потік, термоапруження

Представлены результаты экспериментальных исследований по улучшению свойств поверхностных слоев элементов из оптических керамик (КО1, КО2, КО3, КО5, КО12) после их обработки подвижным электронным лучом с плотностью теплового воздействия  $F_n = 10^6 \dots 1,6 \cdot 10^7$  Вт/м<sup>2</sup> и скоростью перемещения  $V = 10^{-3} \dots 10^{-1}$  м/с (увеличение микротвердости поверхности с 1,2 ... 2,9 ГПа (необработанные элементы) до 5,7 ... 6,4 ГПа (обработанные элементы), возникновение упрочненных слоев толщиной 210...230 мкм). Установлено, что улучшение указанных свойств приводит к повышению устойчивости элементов к внешним термовоздействиям: увеличению в 1,3...1,7 раза критических значений внешних тепловых потоков и времен их действия, превышение которых приводит к разрушению элементов и выхода из строя приборов для исследуемого диапазона изменения внешнего давления  $10^5 \dots 10^7$  Па; повышению предельно допустимых значений термоупругих напряжений в элементах с 50...140 МПа до 160...370 МПа при температурах нагрева 300...1200 К.

**Ключевые слова:** оптическая керамика, поверхностный слой, электронно-лучевая обработка, внешний тепловой поток, термонапряжения

Presents the results of experimental studies on improvement of surface layers properties of the elements of optical ceramics (КО1, КО2, КО3, КО5, КО12) after processing a moving electron beam with the density of the thermal effects  $F_n = 10^6 \dots 1,6 \cdot 10^7$  W/m<sup>2</sup> and a speed of displacement  $V = 10^{-3} \dots 10^{-1}$  m/s (increase of micro-hardness of surface from 1,2...2,9 GPa (raw elements) to 5,7... 6,4 GPa (processed elements), the occurrence of a hardened layer with a thickness of 210...230 μm). The improvement of these properties leads to high resistance elements to the external thermo-influences: increase in 1,3...1,7 times the critical values of external heat flux and the times of their operation, the exceeding of which leads to the destruction of elements and malfunction of the instrument for the studied range of variation of the external pressure of  $10^5 \dots 10^7$  Pa; to increase the maximum permissible values of thermo-elastic stresses in the elements with 50...140 MPa to 160...370 MPa at the temperature of heating 300...1200 K.

**Keywords:** optical ceramics, surface layer, resistance elements, electron beam processing, external heat flux, thermostresses

## Вступ

Успіхи, досягнуті за останню чверть століття у освоєнні електронно-променевих технологій, призвели до створення різноманітної електронно-променевої апаратури промислового, наукового, медичного та військового призначення.

Сучасні прилади з елементами з оптичних керамік для вимірювання та теплового контролю об'єктів різної фізичної природи піддаються інтенсивним зовнішнім термовпливам – підвищеним температурам нагріву та значним зовнішнім тискам, ударним термовпливам тощо [1-4].

У таких умовах відбувається суттєва зміна властивостей поверхневих шарів оптичних елементів аж до їх руйнування, що призводить до суттєвого погіршення метрологічних характеристик приладів, зниження їх надійності та зменшення строку служби аж до виходу з ладу.

Експериментальні дослідження показали [5-9], що одним з технологічних засобів попередження руйнувань оптичних елементів є електронно-променеві методи фінішної обробки їх робочих поверхонь, що дозволяють значно покращувати властивості їх поверхневих шарів (мікротвердість, товщину зміцнених шарів тощо), які впливають на стійкість матеріалів до зовнішніх термовпливу.

В той же час досліджень з попередження можливих руйнувань оптичних елементів точного приладобудування в умовах їх експлуатації з врахуванням впливу зовнішніх термовпливів недостатньо. Крім цього, не встановлено оптимальні діапазони зміни параметрів електронного променя (густини теплової дії, швидкості переміщення), в межах яких спостерігається суттєве покращення властивостей поверхневих шарів елементів, підвищення їх стійкості до теплових навантажень і, в кінцевому випадку, покращення метрологічних характеристик та надійності приладів.

Тому дослідження закономірностей і розробка рекомендацій впливу попередньої електронно-променевої обробки на стадії проектування та виготовлення приладів з елементами з оптичних керамік є актуальними.

**Метою роботи** є підвищення стійкості елементів з оптичних керамік приладів для вимірювання та теплового контролю об'єктів різної фізичної природи шляхом фінішної електронно-променевої обробки їх поверхневих шарів.

## Методики та установки проведення досліджень

Для досліджень впливу термічної дії рухомого електронного променя на елемент з оптичної кераміки використовували спеціалізоване електронно-променеве обладнання [10], що дозволило реалізувати стрічковий електронний промінь шириною  $5 \cdot 10^{-4} \dots 5 \cdot 10^{-3}$  м, довжиною  $6 \cdot 10^2 \dots 8 \cdot 10^2$  м, густиною теплової дії  $F_n = 5 \cdot 10^6 \dots 9 \cdot 10^8$  Вт/м<sup>2</sup> та швидкістю переміщення  $V = 5 \cdot 10^{-3} \dots 10^{-1}$  м/с.

Електронно-променеве обладнання створене на базі універсальної вакуумної установки УВН-74ПЗ. Вакуумна система складається з вакуумної камери і вакуумного поста установки УВН-74ПЗ, паромасляного дифузійного

насосу НП-400, форвакуумного насосу АВЗ-20, вакуумметрів ВІТ-3, та ВМБ-8, датчиків вакууму (термопарного ТП-1, іонізаційного ИП-1, магнітно-блокувального М-2) розташованих у вакуумному об'ємі [8].

Загальна схема установки для електронної обробки оптичних елементів представлена на рис. 1.

В вакуумній камері установки розташовано спеціальне технологічне оснащення для електронної обробки, а саме: кварцеву інфрачервону піч попереднього нагріву та завершального охолодження, електронну гармату з оптикою Пірса для формування стрічкового електронного потоку, механізм переміщення оптичних елементів.

Роботу спеціального технологічного оснащення забезпечують зовнішні пристрої, а саме: високовольтне джерело живлення електронної гармати на базі блоку УЕЛІ-1, блок керування кварцевою печю на базі термодатчика-терморегулятора РИФ-101, а також розроблена автоматизована система керування процесом обробки [8].

Для моделювання теплових впливів на оптичні елементи з кераміки при нормальних умовах ( $T_0 = 293\text{K}$ ,  $P = 10^5\text{ Па}$ ) та знаходження критичних значень їх параметрів (теплового потоку  $q_f^*$  та часу його дії  $t^*$ ) використовували керований ПЧ-нагрів кварцовими лампами типу КГТ-220-1000-1 з використанням термодатчиків РИФ-101 для контролю температур поверхонь елементів та теплових потоків.

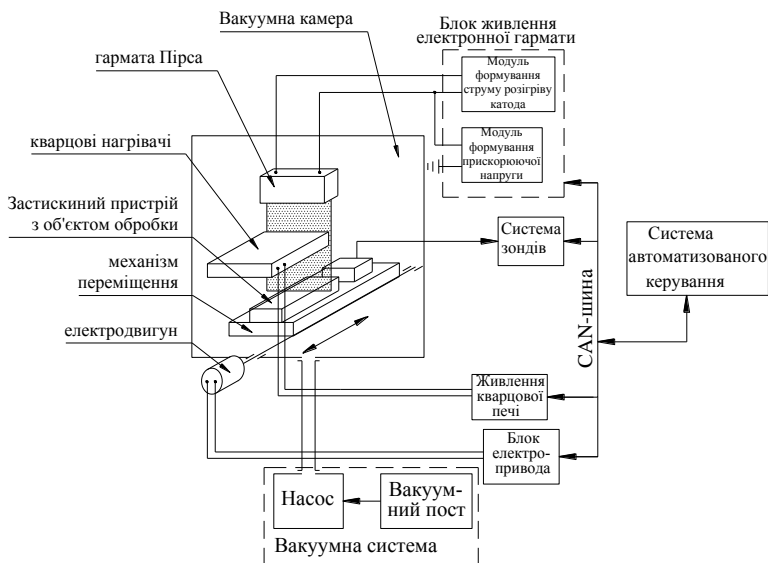


Рисунок 1 – Загальна схема електронно-променевої установки

Для дослідження поведінки оптичних елементів при підвищених температурах нагріву (до 1500 К) та зовнішніх тисках (до  $3 \cdot 10^7$  Па) використовували спеціальну установку [3, 8].

Установка (рис. 2) призначена для одночасного випробування трьох елементів. Установка включає прилад постійного тиску і систему нагріву, терморегулювання і реєстрації температури. Точність підтримки робочого тиску в цій установці складає  $\pm 5\%$ .

Прилад постійного тиску містить три випробувальні камери, з'єднані в один блок. Блок камер сполучений з корпусом рідинного фільтра, який перед випробуванням заповнюється водою. Термостатування елементів проводиться безпосередньо в камерах. Всі три елементи випробуються одночасно.

При випробуванні прилад постійного тиску наддувається інертним газом. Продукти, охолоджені і очищені від конденсованих частинок в рідинному фільтрі, поступають до клапана постійного тиску, керованого стислим газом.

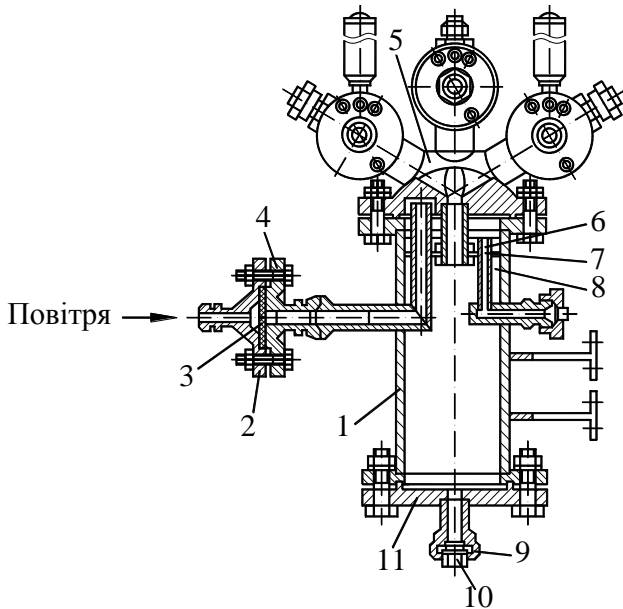


Рисунок 2 – Схема установки постійного тиску:

- 1 – корпус фільтра; 2 – кришка клапана; 3 – мембрана; 4 – корпус клапана;
- 5 – блок випробувальних камер; 6 – зливний патрубок;
- 7 – механічний дисковий фільтр; 8 – вода; 9 – гайка;
- 10 – заглушка; 11 – кришка фільтра

Випробувальна камера (рис. 3) складається з корпусу 1, сполученого патрубком з загальною кришкою блоку камер. На тій частині камери, де розташований зразок 5, встановлюється змінний електронагрівач 3. Електронагрівач складається з ніхромової спіралі, укладеної в ізоляційну кераміку. Корпус нагрівача – зварний, герметичний, виконаний з нержавіючої сталі.

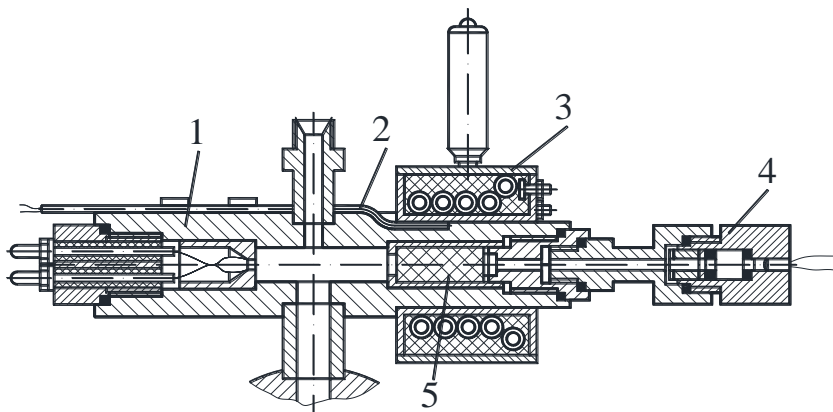


Рисунок 3 – Схема випробувальної камери установки:

1 – корпус камери; 2 – термопара; 3 – нагрівач; 4 – фотодатчик; 5 – зразок елемента

Внутрішній простір між корпусом і спіраллю заповнений азбестовим набиванням. До нагрівального елемента підводиться змінна напруга 100...200 В. Задня кришка камери має різьблення, в яке встановлено фотодатчик для реєстрації моменту закінчення нагріву зразка через отвір в донному бронюванні.

Для визначення властивостей поверхневих шарів оптичних елементів до та після електронно-променевої обробки (мікротвердості поверхні ( $H_v$ , МПа), величин залишкових термонапружень ( $\sigma$ , МПа) та товщин зміцнених шарів ( $\Delta$ , мкм) використовували методи фізико-хімічного аналізу (мікроидентування за методом Вікерса, методи оптичної мікроскопії та мікрозондового аналізу, які включають растрову та скануючу мікроскопію та трансмісійну електронну мікроскопію, дифрактометри загального призначення ДРОН-3,0 з спеціальними приставками для вимірювання мікронапружень у поверхневих шарах тощо [11]. Межа міцності оптичних елементів  $\sigma^*(T)$  до та після електронно-променевої обробки знаходили методом центрально-кільцевого згину [12].

### Результати досліджень та їх аналіз

Для дослідження впливу параметрів електронного променя на властивості поверхневих шарів елементів з оптичної кераміки (КО1, КО2, КО3, КО5, КО12) використовували диски діаметром  $3 \cdot 10^{-2} \dots 5 \cdot 10^{-2}$  м та товщиною  $4 \cdot 10^{-3} \dots 6 \cdot 10^{-3}$  м, півсферичні обтічники діаметром  $4 \cdot 10^{-2} \dots 8 \cdot 10^{-2}$  м (рис. 4).

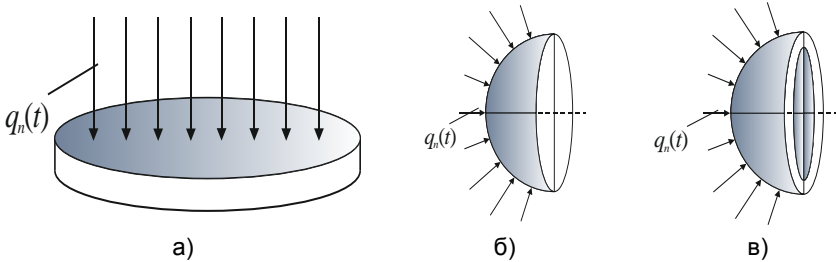


Рисунок 4 – Загальний вигляд оптичних елементів:

а) диски; б), в) – півсферичні обтічники;

$q_n(t)$  – густина зовнішньої теплової дії, Вт/м<sup>2</sup>

Проведені експерименти з електронної обробки елементів з оптичних керамік показали, що вони не можуть бути оплавлені у вакуумі внаслідок високої пружності парів [7, 8].

Так, попередній нагрів у вакуумі оптичних елементів навіть до 1300 К, призводить до інтенсивного випаровування матеріалу, а при намаганні його оплавлення рідка фаза практично не утворюється.

При цьому електронна обробка елементів з оптичної кераміки без попереднього нагріву призводить до підвищення їхньої мікротвердості, впорядкування структури та зміцнення за рахунок формування у поверхневих шарах стискаючих напружень і тим самим до підвищення міцності виробів на ударні теплові впливи, яким вони піддаються в умовах експлуатації.

Електронно-мікроскопічний аналіз знімків поверхонь та поперечних шліфів оптичної кераміки до та після електронної обробки показує, що відбувається помітна зміна структури по глибині матеріалу (до 250...300 мкм), яка найбільш суттєво залежить від параметрів електронного променя ( $F_n$ ,  $V$ ). При цьому помітним є грубий рельєф (деформованого походження) з елементами "в'язкого" руйнування, що свідчить про здатність матеріалу чинити опір руйнуванню при навантаженні.

В результаті проведених експериментальних досліджень встановлено, що для розглядуваних діапазонів зміни параметрів електронного променя ( $F_n = 10^6 \dots 1,6 \cdot 10^7$  Вт/м<sup>2</sup>,  $V = 10^{-3} \dots 10^{-1}$  м/с) мікротвердість поверхні елементів змінюється від 1,2...2,9 ГПа (для необроблених елементів) до 5,7...6,4 ГПа (для оброблених елементів).

При цьому збільшення  $F_n$  від  $10^6$  Вт/м<sup>2</sup> до  $1,6 \cdot 10^7$  Вт/м<sup>2</sup> призводить до збільшення мікротвердості поверхні кераміки у 1,5...1,7 разу, а збільшення  $V$  від  $10^{-3}$  до  $10^{-1}$  м/с призводить до зменшення мікротвердості поверхні кераміки у 1,3...1,4 разу (рис. 5 а, б).

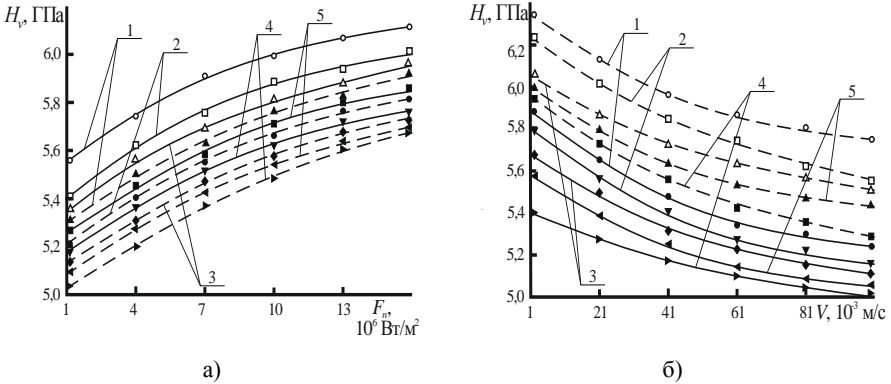


Рисунок 5 – Залежність мікротвердості поверхні елементів з оптичних керамік КО12 (1), КО2 (2), КО1 (3), КО5 (4) та КО3 (5), які оброблені електронним променем:

а) від його густини теплового впливу для швидкостей:

$V = 7 \cdot 10^{-3}$  м/с (—) і  $V = 1,5 \cdot 10^{-2}$  м/с (---);

б) від швидкості переміщення для густини теплового впливу:

$F_n = 2,3 \cdot 10^6$  Вт/м<sup>2</sup> (—) і  $F_n = 1,4 \cdot 10^7$  Вт/м<sup>2</sup> (---);

$\Delta$ ,  $\circ$ ,  $\square$ ,  $\blacktriangle$ ,  $\blacksquare$ ,  $\blacklozenge$ ,  $\blacktriangledown$ ,  $\bullet$ ,  $\blacktriangleright$ ,  $\blacktriangleleft$  – експериментальні дані

Результати досліджень зміни мікротвердості по глибині елементів з оптичних керамік, оброблених електронним променем, представлені на рис. 6 а, б. З цих даних випливає, що мікротвердість матеріалу усіх типів розглядуваних керамік достатньо швидко зменшується, прямуючи до свого значення для необроблюваного матеріалу.

При цьому товщина зміцненого шару ( $\Delta$ ), де виникають основні структурні зміни та підвищується мікротвердість оброблюваного матеріалу для розглядуваних параметрів електронного променю змінюється в діапазоні від 70...90 мкм до 210...230 мкм при товщинах оброблюваних виробів  $4...6 \cdot 10^{-3}$  м.

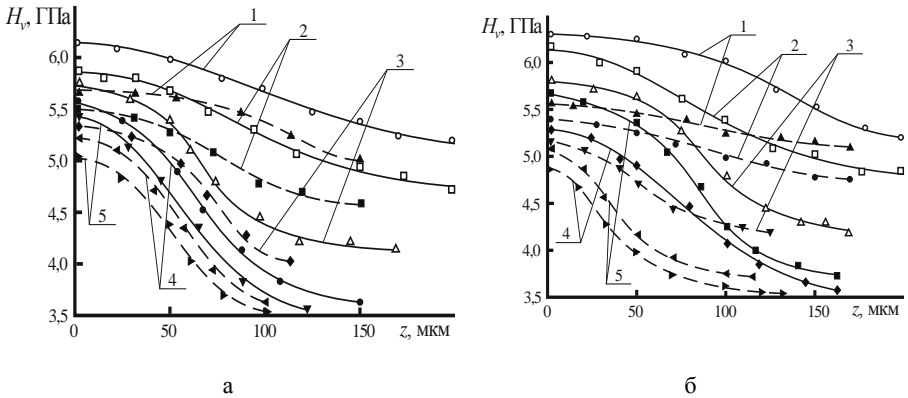


Рисунок 6 – Залежність мікротвердості по глибині елементів з оптичних керамік KO12 (1), KO2 (2), KO1 (3), KO3 (4) та KO5 (5), які оброблені електронним променем:  
а) для швидкостей переміщення:  $V = 7 \cdot 10^{-3}$  м/с (—) і  $V = 1,5 \cdot 10^{-2}$  м/с (---),

при  $F_n = 1,5 \cdot 10^7$  Вт/м<sup>2</sup> та

б) для значень густини теплового впливу:

$F_n = 1,5 \cdot 10^7$  Вт/м<sup>2</sup> (—) і  $F_n = 5 \cdot 10^6$  Вт/м<sup>2</sup> (---);

при  $V = 7 \cdot 10^{-3}$  м/с;

Δ, ○, □, ▲, ■, ◆, ▼, ●, ►, ◀ – експериментальні дані

Величина  $\Delta$  суттєво залежить як від природи кераміки, так й від параметрів електронного променя (рис. 7 а, б): збільшення  $F_n$  від  $10^6$  Вт/м<sup>2</sup> до  $2 \cdot 10^7$  Вт/м<sup>2</sup> призводить до збільшення товщини зміцненого шару у 1,8...2,6 разу, а збільшення швидкості руху променя від  $1,5 \cdot 10^{-3}$  м/с до  $2 \cdot 10^{-2}$  м/с призводить до зменшення товщини зміцненого шару у 1,7...2,5 разу.

Встановлено, що вплив електронного променя на поверхню елементів з оптичної кераміки призводить до збільшення блоків мозаїки та зменшення мікрODEформацій кристалічної ґратки: величина блоків мозаїки від вихідного до обробленого електронним променем оптичних елементів збільшується у 3,9 разу для елементів з KO1, у 5,5 разу для елементів з KO2, у 3,3 разу для елементів з KO12, у 4,7 разу для елементів з KO3 та у 7,7 разу для елементів з KO5, а величина мікрODEформацій зменшується у 3,7 разу для елементів з KO1, у 5,4 разу для елементів з KO2, у 4,2 разу для елементів з KO12, у 5,5 разу для елементів з KO3 та у 5,9 разу для елементів з KO5.

Встановлено, що незалежно від технологічних режимів обробки (значень  $F_n$  та  $V$  для розглядуваних діапазонів їхньої зміни) елементів з оптичних



керамік у всіх випадках спостерігається збільшення розмірів блоків мозаїки та зменшення мікрдеформацій їхніх кристалічних ґраток, тобто в результаті електронної обробки отримуються більш крупнозернисті поверхневі шари з напруженнями у кристалічних ґратках.

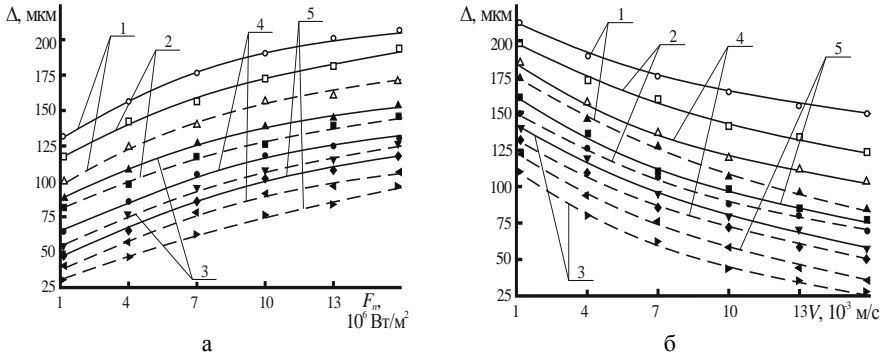


Рисунок 7 – Залежність глибини зміцнення електронним променем шарів елементів з оптичних керамік КО12 (1), КО2 (2), КО1 (3), КО3 (4) та КО5 (5):

а) від значень його густини теплового впливу:

$V = 7 \cdot 10^{-3} \text{ м/с}$  (—) і  $V = 1,5 \cdot 10^{-2} \text{ м/с}$  (- - -);

б) від швидкості його переміщення:  $F_n = 1,6 \cdot 10^7 \text{ Вт/м}^2$  (—);  $F_n = 2 \cdot 10^6 \text{ Вт/м}^2$  (- - -);

$\Delta$ , ○, □, ▲, ■, ◆, ▼, ●, ►, ◀ – експериментальні дані

Аналіз отриманих змін параметрів кристалічних ґраток елементів після електронної обробки у відповідності з відомими методами розрахунку даних рентгенограм [11], що базуються на прямій аналітичній залежності між залишковими напруженням, які діють по поверхні елемента та зміною періоду кристалічної ґратки основних компонентів розглядуваних керамік, показав наявність стискаючих напружень у тонких поверхневих шарах елементів глибиною 40...60  $\mu\text{m}$  для центральної частини оброблених ділянок (розмір ділянок  $4 \cdot 10^{-2} \dots 5 \cdot 10^{-2} \text{ м}$ ) у розглядуваних діапазонах зміни параметрів електронного променю: для елементів з оптичної кераміки КО1 – до 30...40 МПа; для елементів з оптичної кераміки КО2 – до 60...70 МПа; з оптичної кераміки КО3 – до 25...30 МПа; з оптичної кераміки КО5 – до 55...65 МПа; з оптичної кераміки КО12 – до 75...90 МПа.

В результаті проведених досліджень встановлено, що після попередньої електронно-променевої обробки оптичних елементів (товщина елемента  $H = 4 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ ,  $T_0 = 300 \text{ К}$ ,  $P = 10^5 \text{ Па}$ ) відбувається збільшення критичних значень зовнішніх теплових потоків  $q_n^*$  та часів їх дії  $t^*$  у 2...4 рази (рис. 8 а, б).

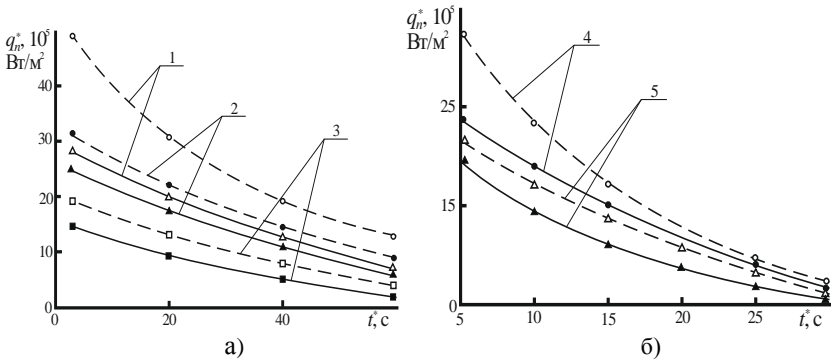


Рисунок 8 – Залежності критичних значень зовнішніх теплових потоків  $q_n^*$  від часу їх дії  $t^*$  на оброблені (— — —) та необроблені (—) електронним променем оптичні елементи при  $F_n = 1,6 \cdot 10^7$  Вт/м<sup>2</sup> і  $V = 10^{-3}$  м/с); а) – елементи з оптичних керамік КО5 (1), КО1 (2) та КО12 (3) та б) – з оптичних керамік КО3 (4) та КО2 (5);  $\Delta$ ,  $\circ$ ,  $\square$ ,  $\blacktriangle$ ,  $\blacksquare$ ,  $\bullet$  – експериментальні дані

При цьому збільшення зовнішнього тиску до  $10^7$  Па, які можуть реалізуватися, наприклад, у фронті ударної хвилі при надзвуковому обдуві потоком повітря обтічників ІЧ-приладів в умовах пострілу та польоту [7, 8], призводить до збільшення значень  $q_n^*$  та  $t^*$  тільки у 1,3...1,7 разу. На рисунках 8 а, б представлені критичні значення зовнішніх теплових потоків  $q_n^*$  від часу їх впливу  $t^*$  на оброблені електронним променем оптичні елементи товщиною  $H = 6 \cdot 10^{-3}$  м, при тепловому потоці  $F_n = 1,6 \cdot 10^7$  Вт/м<sup>2</sup> та швидкості його переміщення,  $V = 10^{-3}$  м/с.

Крім цього, встановлено, що гранично допустимі значення термпружних напружень  $\sigma^*$  при різних температурах нагріву  $T$  для оптичних елементів товщиною  $H = 4 \cdot 10^{-3}$  м при тепловому потоці  $F_n = 1,6 \cdot 10^7$  Вт/м<sup>2</sup> та швидкості його переміщення  $V = 10^{-3}$  м/с, оброблених електронним променем, у 1,8...2,7 разу вище, ніж для необроблених елементів (рис. 10).

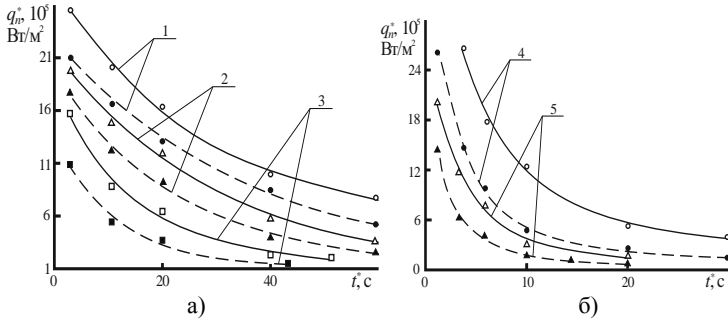


Рисунок 9 – Залежності критичних значень зовнішніх теплових потоків  $q_n^*$  від часу їх дії  $t^*$  на оброблені електронним променем оптичні елементи при  $P = 10^5$  Па (—);  $P = 10^7$  Па (---);  
 а) – елементи з оптичних керамік КО5 (1), КО1 (2) та КО12 (3);  
 б) – елементи з оптичних керамік КО2 (4) та КО3 (5);  
 $\Delta$ ,  $\square$ ,  $\blacktriangle$ ,  $\blacksquare$ ,  $\bullet$  – експериментальні дані

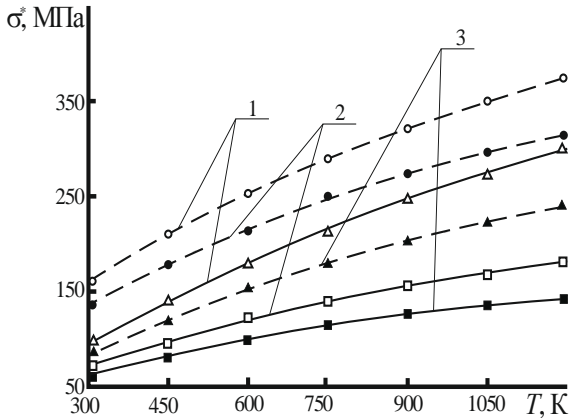


Рисунок 10 – Залежність величини гранично допустимих термопружних напружень в елементах з оптичних керамік КО1 (1), КО2 (2), КО3 (3) від температури нагріву ( $P = 10^5$  Па, не оброблених (—) електронним променем і оброблених (---));  $\Delta$ ,  $\square$ ,  $\blacktriangle$ ,  $\blacksquare$ ,  $\bullet$  – експериментальні дані

В результаті проведених експериментальних досліджень встановлено,

що після попередньої обробки робочих поверхонь елементів з оптичних керамік (КО1, КО2, КО3, КО5, КО12) рухомих електронним променем для діапазонів зміни його параметрів (густини теплового впливу  $F_n = 10^6 \dots 1,6 \cdot 10^7$  Вт/м<sup>2</sup> та швидкості його переміщення  $V = 10^{-3} \dots 10^{-1}$  м/с) покращуються основні властивості їх поверхневих шарів:

- підвищується мікротвердість поверхні у 1,5...1,7 разу;
- у поверхневих шарах товщиною 40...60 мкм виникають стискаючі термопружні напруження величиною 25...90 МПа, які призводять до утворення зміцнених шарів товщиною до 210...230 мкм.

Отримано, що покращення властивостей поверхневих шарів оптичних елементів після їх електронно-променевої обробки призводить до підвищення стійкості елементів до зовнішніх термовпливів:

- збільшуються у 2...4 рази критичні значення зовнішніх теплових потоків та часів їх дії, які призводять до руйнування елементів; при цьому збільшення зовнішнього тиску від  $10^5$  Па до  $10^7$  Па знижує вказані критичні значення параметрів у 1,3...1,7 разу;

- підвищуються у 1,8...2,7 разу значення гранично допустимих термопружних напружень у оптичних елементах, оброблених електронним променем, для діапазонів зміни температур нагріву 300...1200 К.

### Висновки

Отримані результати рекомендується використати при проектуванні та виготовленні нових приладів, а також модернізації серійних приладів з оптичними елементами для вимірювання та теплового контролю об'єктів різної фізичної природи (світлофільтрів ІЧ-приладів, лазерних прицільних комплексів, лазерних медичних приладів на основі оптичних світловодів тощо), що дозволить покращити їх основні метрологічні характеристики (точність, діапазон вимірювання, чутливість тощо), а також підвищити вірогідність, надійність, ресурс та строк служби при їх експлуатації з врахуванням впливу зовнішніх термовпливів, а також при застосуванні виробів з ІЧ-приладами самонаведення та спостереження в умовах вистрілу та польоту при значних зовнішніх ударних, теплових і механічних впливах.

**Список використаних джерел:** 1. Ващенко В.А., Канашиевич Г.В., Лукашенко В.М., Бондаренко М.А., Яценко І.В. ОптоЕлектроника и микрооптика – перспективные отрасли науки и техники // Вісник Черкаського державного технологічного університету. – 2002. – № 2. – С.52-62. 2. Тарасов В.В., Якушенков Ю.Г. Инфракрасные системы “смотрящего” типа. – М.: Логос, 2004. – 444 с. 3. Ващенко В.А., Котельников Д.И., Лега Ю.Г., Краснов Д.М., Яценко И. В., Кириченко О.В. Тепловые процессы при электронной обработке оптических материалов и эксплуатации изделий на их основе. – К.: Наукова думка, 2006. – 368 с. 4. Бонус М.Н., Гладкова А.И., Горбатов С.А. и др. Современные аспекты лазерной терапии. – Черкассы: Вертикаль, 2011. – 608 с. 5. Дудко Г.В., Кулов С.К., Розе Ю.А., Максимова Н.Г. Исследование электронно-лучевых процессов в создании базовых технологий ЕЛЕФП // Электронная промышленность. – 1991. – Вып. 1. – С. 41-45. 6. Канашиевич Г.В., Ващенко В.А., Бондаренко М. О. Перспективи використання електронного променю в технології інтегральної

оптики // Вісник Черкаського інженерно-технологічного інституту. – 2000. – № 2. – С. 189-193.

**7. Яценко І.В.** Теплофизические процессы электронной обработки изделий точного приборостроения // Вісник Черкаського державного технологічного університету. – 2004. – № 4. – С. 97-103.

**8. Ващенко В.А., Яценко І.В., Лега Ю.Г., Кириченко О.В.** Основи електронної обробки виробів з оптичних матеріалів. Монографія. – К.: Наукова думка, 2011. – 562 с.

**9. Yatsenko I., Antoyuk V., Bondarenko M., Vashchenko V.** Influence of parameters by electronic ray on properties of superficial layers of optical elements of exact instrument-making // International journal for science and innovations for the industry “Innovations in discrete productions”, YEAR III, ISSUE 1/2015, Sofia. – P. 13-15.

**10. Патент України на корисну модель № 4177C03B29/00, N01J37/305.** Пристрій для електронно-променевого полірування виробів / Яценко І.В., Канашиевич Г.В., Коваленко Ю.І. та ін. – Бюл. № 1/2005.

**11. Дубровська Г.М., Канашиевич Г.В., Божко Н.І.** Прилади застосування фізичних методів дослідження структури поверхні. – Сільхет: Шобуж Біпоні, Удоун Офсет Принтерс, 2007. – 248 с.

**12. Окатов М.А., Антонов Е.А., Байгожин А.Б.** Справочник оптика-технолога. – СПб.: Политехника, 2004. – 679 с.

**Bibliography (transliterated):** **1. Vashchenko V. A., Kanashyevych H. V., Lukashenko V. M., Bondarenko M. A., Yatsenko Y. V.** OptoElektronnyka y mikrooptyka – perspektivnyye otrasly nauky y tekhniky // Visnyk Cherkaskoho derzhavnogo tekhnolohichnoho universytetu. – 2002. – № 2. – S. 52–62.

**2. Tarasov V. V., Yakushenkov Iu. H.** Ynfrakrasnye systemy “smotriashcheho” tyra. – M.: Lohos, 2004. – 444 s.

**3. Vashchenko V. A., Kotelnikov D. Y., Leha Iu. H., Krasnov D. M., Yatsenko Y. V., Kyrychenko O. V.** Teplovye protsessy pry Elektronnoi obrabotke optycheskykh materialov y Ekspluatatsyy yzdelyi na ykh osnove. – K.: Naukova dumka, 2006. – 368 s.

**4. Bonus M. N., Hladkova A. Y., Horbatiuk S. A. y dr.** Sovremennyye aspekty lazernoi terapyu. – Cherkassy: Vertykal, 2011. – 608 s.

**5. Dudko H. V., Kulov S. K., Roze Iu. A., Maksymova N. H.** Yssledovanye Elektronno-luchevykh protsessov v sozdannyi bazovykh tekhnolohiyi ELEFP // Elektronnaia promyshlennost. – 1991. – Vyp. 1. – S. 41-45.

**6. Kanashyevych H. V., Vashchenko V. A., Bondarenko M. O.** Perspektivy vykorystannia elektronnoho promeniui v tekhnolohii intehranoi optyky // Visnyk Cherkaskoho inzhenerno-tekhnolohichnoho instytutu. – 2000. – № 2. – S. 189-193.

**7. Yatsenko Y. V.** Teplofizycheskye protsessy Elektronnoi obrabotky yzdelyi tochnoho pryborostroeniya // Visnyk Cherkaskoho derzhavnogo tekhnolohichnoho universytetu. – 2004. – № 4. – S. 97-103.

**8. Vashchenko V. A., Yatsenko I. V., Leha Iu. H., Kyrychenko O. V.** Osnovy elektronnoi obrobky vyrobiv z optychnykh materialiv. Monohrafiia. – K.: Naukova dumka, 2011. – 562 s.

**9. Yatsenko I., Antoyuk V., Bondarenko M., Vashchenko V.** Influence of parameters by electronic ray on properties of superficial layers of optical elements of exact instrument-making // International journal for science and innovations for the industry “Innovations in discrete productions”, YEAR III, ISSUE 1/2015, Sofia. – P. 13-15.

**10. Patent Ukrainy na korysnu model № 4177S03V29/00, N01J37/305.** Prystrii dlia elektronno-promenevoho poliruvannia vyrobiv / Yatsenko I. V., Kanashyevych H. V., Kovalenko Iu. I. ta in. – Biul. № 1/2005.

**11. Dubrovska H. M., Kanashyevych H. V., Bozhko N. I.** Prylady zastosuvannia fizychnykh metodiv doslidzhennia struktury poverkhni. – Silkhiet: Shobuzh Biponi, Udoun Ofset Pryntrs, 2007. – 248 s.

**12. Okatov M. A., Antonov E. A., Baihozhyn A. B.** Spravochnyk optyka-tekhnoloha. – SPb.: Polytekhnika, 2004. – 679 s.