

## Збільшення вірогідності безвідмовної роботи ГЧ-приладів самонаведення та спостереження шляхом електронно-променевої обробки оптичних обтічників

І.В. Яценко<sup>1,\*</sup>, В.С. Антонюк<sup>2</sup>, В.І. Гордієнко<sup>3</sup>, О.В. Кириченко<sup>4</sup>, В.А. Ващенко<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Черкаський державний технологічний університет, бул. Шевченка, 460, 18030 Черкаси, Україна

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

<sup>3</sup> Підприємство Науково-виробничий комплекс «Фотоприлад», вул. Б. Вишневецького, 85, 18000 Черкаси, Україна

<sup>4</sup> Черкаський інститут пожежної безпеки ім. Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України, вул. Онопрієнка, 8, 18034 Черкаси, Україна

(Одержано 11.02.2018, опубліковано online 25.08.2018)

Представлено результати теоретичних досліджень процесу теплового впливу надзвукового газового потоку на півсферичні обтічники з оптичної кераміки ГЧ-приладів самонаведення та спостереження, які визначають місця розташування на їх поверхнях ділянок максимального зовнішнього термовпливу, де відбуваються руйнування обтічників, що призводить до виходу з ладу приладів. Наведено результати експериментальних досліджень покращення властивостей поверхневих шарів вказаних ділянок шляхом їх фінішної електронно-променевої обробки, що призводить до підвищення стійкості обтічників до зовнішніх теплових впливів та зменшення кількості їх руйнувань і підвищення надійності приладів при їх експлуатації.

**Ключові слова:** ГЧ-прилади, Оптичні обтічники, Зовнішній термовплив, Електронний промінь.

DOI: [10.21272/jnep.10\(4\).04028](https://doi.org/10.21272/jnep.10(4).04028)

PACS number: 42.79. Bh

### 1. ВСТУП

Умови використання оптико-електронних приладів з оптичними елементами (ГЧ-прилади з оптичними обтічниками самонаведення та спостереження за різними об'єктами, далекоміри прицільних комплексів з вхідними оптичними вікнами тощо) пред'являють підвищені вимоги до їх безвідмовної роботи [1-4]. Це обумовлено тим, що в умовах інтенсивного зовнішнього термовпливу (при підвищених швидкостях обдуву надзвуковим потоком повітря, кутових швидкостях віссиметричного обертання, швидкостях нагріву, зовнішніх тисках тощо) відбувається зниження параметрів якості поверхневих шарів оптичних елементів (півсферичних обтічників ГЧ-приладів тощо) аж до їх руйнування (поява тріщин, відколів та інших негативних дефектів), що призводить до виходу з ладу приладів.

Тому підвищення стійкості оптичних елементів до зовнішніх теплових навантажень та інших небажаних явищ на стадії проектування та виготовлення ГЧ-приладів з оптичними обтічниками є актуальним.

Як показали експериментальні дослідження з електронно-променевої обробки оптичних матеріалів, регулюючи параметри електронного променя (густину теплового впливу, швидкість переміщення) можна, суттєво покращити фізико-механічні властивості їх поверхневих шарів та, тим самим, збільшити стійкість матеріалів до зовнішнього теплового впливу [5-9].

На даний час досліджень з попередження можливих руйнувань оптичних обтічників шляхом фінішної електронно-променевої обробки проведено недостатньо.

Відсутні ефективні методи визначення ділянок

на поверхні обтічників, де вони піддаються максимальним зовнішнім термовпливам з подальшим руйнуванням та які необхідно додатково обробляти електронним променем на фінішній стадії їх виготовлення, оскільки на даний момент технічно не вдалось реалізувати обробку усєї поверхні півсферичного обтічника з оптичних матеріалів за допомогою рухомого електронного променя різної форми впливу (точковий, стрічковий тощо); не визначено оптимальні параметри електронного променя, що дозволяють максимально покращувати властивості поверхневих шарів елементів з оптичних керамік.

Метою роботи є попередження можливих руйнувань обтічників ГЧ-приладів та зменшення кількості їх відмов шляхом фінішної електронно-променевої обробки ділянок на поверхні обтічників, які піддаються максимальному зовнішньому термовпливу.

### 2. ХАРАКТЕРИСТИКА ОПТИЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ТА МЕТОДІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

Для дослідження впливу параметрів електронного променя на властивості поверхневих шарів елементів з оптичної кераміки (КО1, КО2, КО3, КО5, КО12) використовувались диски діаметром  $3 \cdot 10^{-2} \cdot 5 \cdot 10^{-2}$  м та товщиною  $4 \cdot 10^{-3} \cdot 6 \cdot 10^{-3}$  м, півсферичні обтічники діаметром  $4 \cdot 10^{-2} \cdot 8 \cdot 10^{-2}$  м [10, 11].

Для проведення досліджень було використано розроблене спеціалізоване електронно-променеве обладнання [8], що дозволяє реалізувати стрічковий електронний промінь шириною  $5 \cdot 10^{-4} \cdot 5 \cdot 10^{-3}$  м, довжиною  $6 \cdot 10^{-2} \cdot 8 \cdot 10^{-2}$  м, густиною теплової дії  $F_n = 5 \cdot 10^6 \cdot 9 \cdot 10^8$  Вт/м<sup>2</sup> та швидкістю переміщення  $V = 3 \cdot 10^{-3} \cdot 10^{-1}$  м/с.

Для моделювання зовнішнього термовпливу на

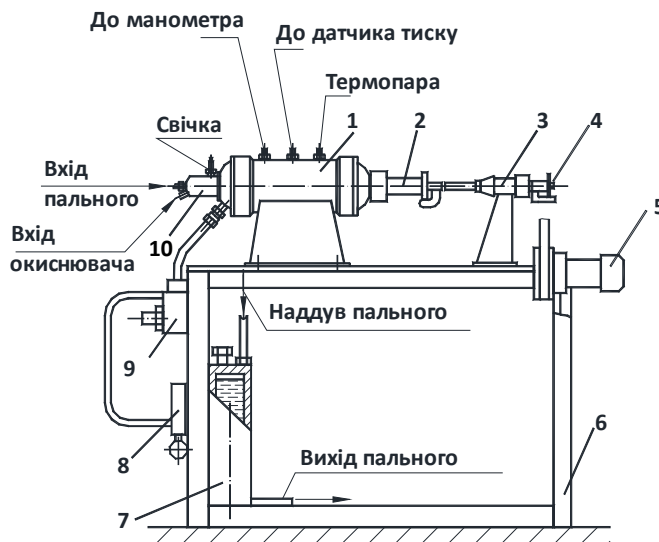
\* [victor.antoniuik@gmail.com](mailto:victor.antoniuik@gmail.com)

оптичні елементи приладів при нормальних умовах ( $P = 10^5$  Па,  $T = 293$  К) використовувався стандартний метод керованого ІЧ-нагріву кварцовими лампами типу КГМ-220-1000-1 з застосуванням термодатчиків РИФ-101 для контролю температури на поверхні елементів в діапазоні 300-1900 К та зовнішніх теплових потоків в діапазоні  $1,5 \cdot 10^5 - 2,3 \cdot 10^6$  Вт/м<sup>2</sup>.

Моделювання впливу підвищених швидкостей надзвукового обдуву потоком повітря (до  $2 \cdot 10^3$  м/с) та кутових швидкостей вісесиметричного обертання півсферичних об'єктів (до  $4 \cdot 10^3$  рад/с) (умови пост-

рілу та польоту виробів з ІЧ-приладами) виконували на спеціально розробленій установці [5, 8].

Установка (рис. 1) містить камеру з соплами, змонтовану на станині. Сопла змінні, що дозволяють варіювати швидкість потоку до  $V = 2 \cdot 10^3$  м/с. Нагрів повітря в камері відбувається при змішуванні холодного повітря з гарячими газами, що генеруються підігрівачем. З бачка пального (бензин) подається через форсунку в камеру згоряння підігрівача. Туди ж подається окиснювач (повітря).



**Рис. 1** – Схема установки: 1 – камера; 2 – змінне сопло; 3 – державка з зразком оптичного елемента та датчик частоти обертання; 4 – вузол обертання; 5 – електродвигун; 6 – станина; 7 – бак з паливом; 8 – електропневмоклапан; 9 – відсічний кран; 10 – підігрівач повітря

Обидва компоненти подаються через відсічні крани, керовані електропневмоклапанами. На станині кріпиться співвісний з соплом вузол обертання з датчиком частоти обертання і електродвигун постійного струму потужністю 2,7 кВт, напругою 27 В і номінальною кутовою швидкістю обертання 995 рад/с.

Передача крутильного моменту з електродвигуна на вал державки зразка елемента здійснюється за допомогою спеціального гнучкого плоского ремня, що дозволяє варіювати кутову швидкість обертання зразка до  $\omega = 4 \cdot 10^3$  рад/с.

Відстань від торця зразка, що випробується, до зрізу сопла вибирається на підставі шлірен-фотографічних досліджень картини обтікання на тіншовому приладі ІАБ – 451, а також вимірювання тиску на передньому торці моделей зразка.

Для якісної оцінки формування потоку, візуалізації картини обтікання, визначення оптимальної відстані перешкоди, що імітує зразок елемента, від зрізу сопла, визначення місця розташування прямого стрибка залежно від відстані і виду перешкоди була проведена зйомка течії при обтіканні моделі зразка повітряним потоком (рис. 2).

Проведені обміри показали, що відстань  $S_0$  прямого стрибка від зрізу моделі зразка змінюється незначно і лежить в межах  $S_0 = 1,3 \cdot 10^{-2} - 1,5 \cdot 10^{-2}$  м.

На підставі проведених досліджень було вибрано оптимальну відстань від зрізу державки зразка до

зрізу сопла  $S_{1opt} = 5 \cdot 10^{-2}$  м.

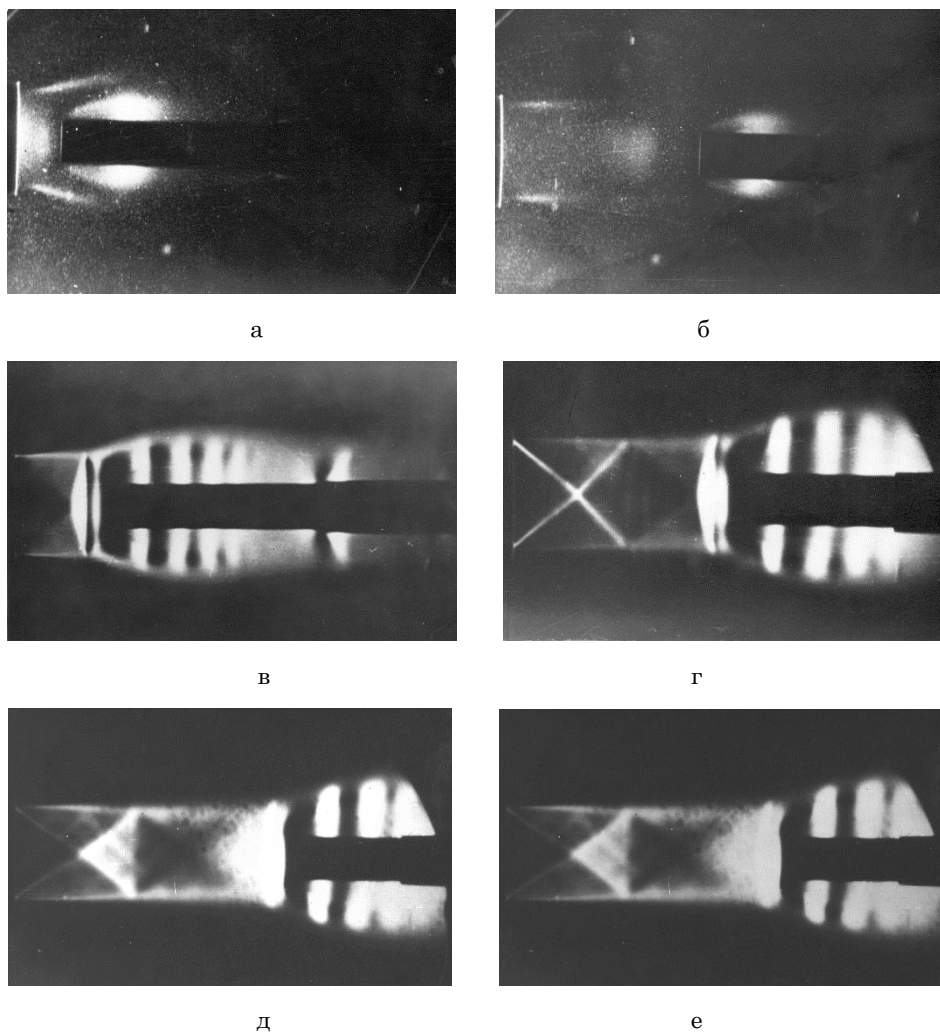
Аналіз всіх отриманих фотографій показав, що надзвуковий газовий струмінь має розрахункові режими течії в межах досліджених довжин. При цьому зберігається структура початкової ділянки струменя, що дозволяє у декілька разів підвищити точність розрахунків швидкостей обдуву потоком повітря досліджуваних зразків, використавши для цього відомі газодинамічні функції.

Експериментальні дослідження структури поверхні та поверхневих шарів оптичних елементів проводились за допомогою відомих методів оптичної мікроскопії та мікрозондового аналізу, що включає растрову та скануючу мікроскопію (РЕМ), трансемісійну електронну мікроскопію (ТЕМ).

Мікротвердість поверхні оптичних елементів визначали по методу Вікерса. Для вимірювання величин термопружних напружень у поверхневих шарах об'єктів використовували дифрактометри загального призначення “ДРОН-2,0” та “ДРОН-3,0”, за допомогою відомих методів, розроблених для аналізу структури полікристалів за допомогою зйомки у рентгенівських променях з різними довжинами хвиль.

Межу міцності оптичних елементів до та після електронно-променевої обробки для діапазону зміни температури нагріву 300-1200 К знаходили методом центрально-кільцевого вигину (ЦКВ).

Для оцінки вірогідності безвідмовної роботи ІЧ-приладів в умовах інтенсивних зовнішніх термодій



**Рис. 2** – Шлірен-фотографії обтікання зразка повітряним потоком:  $V = 6 \cdot 10^2$  м/с, відстані від зразка до зрізу сопла –  $1,2 \cdot 10^{-2}$  м (а) та  $8 \cdot 10^{-2}$  м (б);  $V = 2 \cdot 10^3$  м/с –  $4 \cdot 10^{-2}$  м (в) та  $7 \cdot 10^{-2}$  м (г);  $V = 1,5 \cdot 10^3$  м/с –  $7,5 \cdot 10^{-2}$  м (д) та  $8,5 \cdot 10^{-2}$  м (е).

(підвищені швидкості нагріву надзвукового обдуву потоком повітря, вісесиметричного обертання та ін.) застосовувались стандартні методики випробування приладів, результати яких, згідно ДСТУ 3004-95, використовувались для знаходження значення вірогідності як критерія працездатності приладів при їх експлуатації.

### 3. РЕЗУЛЬТАТИ ТЕОРЕТИЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ АНАЛІЗ

Газодинамічну задачу нагріву оптичного обтічника у вигляді півсферичної оболонки надзвуковим потоком повітря (рис. 3) будемо розглядати як квазі-стаціонарну, що справедливо для більшості практичних випадків, за винятком імпульсних режимів.

Це обумовлено тим, що об'ємна теплоємність повітряного потоку ( $C_{Vz}$ ) мала порівняно з об'ємною теплоємністю матеріалу обтічника ( $C_{V0}$ ), тобто  $C_{Vz}/C_{V0} \ll 1$ .

Припускаючи також, що газовий потік є нестисливою (справедливо для  $V < 2 \cdot 10^3$ – $3 \cdot 10^3$  м/с), для визначення розподілів теплового потоку  $q_w$  вздовж поверхні обтічника (нульові кути атаки і ковзання) використовуємо відомий у газодинаміці вираз:

$$q_w = \frac{f(\text{Pr})}{\left(\frac{\rho_\delta \cdot u_\delta \cdot x}{\mu_\delta}\right)^{1/5}} \cdot \rho_\delta \cdot u_\delta \cdot C_p \cdot (T_r - T_w), \quad (1)$$

де  $f(\text{Pr})$  – задана функція числа Прандтля  $\text{Pr}$ , яке залежить від геометричної форми тіла та режиму обтікання ( $\text{Pr} = C_p \mu / \lambda_w$ );  $\rho$ ,  $u$ ,  $\mu$ ,  $C_p$ ,  $\lambda_r$  – відповідно густина, швидкість вздовж координати  $x$ , коефіцієнт динамічної в'язкості, теплоємність та коефіцієнт теплопровідності повітряного потоку;  $T_w$  – температура поверхні обтічника; індекс “ $\delta$ ” – умови на зовнішній межі прикордонного шару;  $T_r$  – температура відновлення у прикордонному шарі, яка являє собою температуру повітря в безпосередній близькості від поверхні тіла.

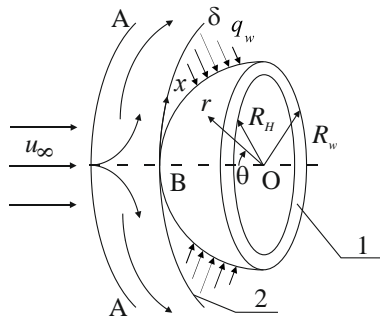
При цьому режим обтікання потоком повітря обтічника визначається відомим критерієм Рейнольдса

$$\text{Re} \left( \text{Re} = \frac{2 \cdot u_\infty \cdot R_w}{\nu_\infty} \right), \text{ де } \nu_\infty - \text{коефіцієнт кінематичної}$$

в'язкості повітря): при  $\text{Re} > 10^5$  – режим обтікання турбулентний, а при  $\text{Re} < 10^5$  – ламінарний).

Підставляючи у (1) відомі газодинамічні співвідношення, отримуємо наступний вираз для теплового потоку у випадку турбулентного режиму обтікання:

$$q_w = \frac{0,00042}{Pr^{2/3}} \cdot \left(\frac{\beta \cdot R_w}{u_\infty}\right)^{4/5} \cdot \left(\frac{v_\infty}{u_\infty \cdot R_w}\right)^{1/5} \cdot \left(\frac{\rho_\delta}{\rho_\infty}\right)^{4/5} \cdot \left(\frac{\mu_\delta}{\mu_\infty}\right)^{1/5} \cdot \rho_\infty \cdot u_\infty \cdot C_p \cdot (T_r - T_w) \cdot (\sin \theta)^{3/5} \quad (2)$$



**Рис. 3** – Схема нагріву півсферичного обтічника: 1 – півсферична оболонка з оптичного матеріалу; В – передня критична точка (швидкість потоку дорівнює нулю); 2 – зовнішня межа прикордонного шару товщиною  $\delta$ ;  $r$ ,  $\theta$  – сферичні координати;  $R_w$ ,  $R_H$  – радіуси зовнішньої та внутрішньої поверхонь обтічника відповідно; індекс “ $\infty$ ” – значення параметрів у повітряному потоці, що набігає.

Аналогічно для ламінарного режиму обтікання тепловий потік можна представити у вигляді:

$$q_w = \frac{0,0083}{Pr^{2/3}} \cdot \left(\frac{\beta \cdot R_w}{u_\infty}\right)^{1/2} \cdot \left(\frac{v_\infty}{u_\infty \cdot R_w}\right)^{1/2} \cdot \left(\frac{\rho_\delta}{\rho_\infty}\right)^{1/2} \cdot \left(\frac{\mu_\delta}{\mu_\infty}\right)^{1/2} \cdot \rho_\infty \cdot u_\infty \cdot C_p \cdot (T_r - T_w) \quad (3)$$

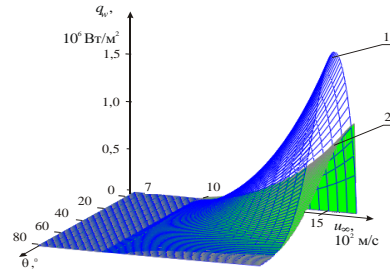
Використовуючи для  $\beta$  та співвідношень  $\rho_\delta/\rho_\infty$  та  $\mu_\delta/\mu_\infty$  відомі газодинамічні функції, знаходимо розподіли  $q_w$  вздовж поверхні обтічника (рис. 4, 5). З результатів розрахунків, представлених на рис. 4, 5, випливає, що місця розташування ділянок на поверхні обтічника, які піддаються максимальному зовнішньому термовпливу, що визначаються максимальними значеннями теплового потоку, суттєво залежать від режиму обтікання: для ламінарного режиму обтікання значення  $(q_w)_{max}$  знаходяться поблизу передньої критичної точки ( $\theta = 0^\circ$ ) обтічника; для турбулентного режиму обтікання значення  $(q_w)_{max}$  вже зміщуються від  $\theta = 0^\circ$  до  $\theta_{max}$ .

При турбулентному режимі обтікання для дослідженого діапазону зміни  $u_\infty = 7 \cdot 10^{-2} \cdot 2 \cdot 10^3$  м/с значення  $\theta = 0^\circ$  лежать в межах 19-23°, тобто  $\theta_{max}$  практично не змінюється, що повністю відповідають експериментально визначеним ділянкам руйнування на поверхні обтічника.

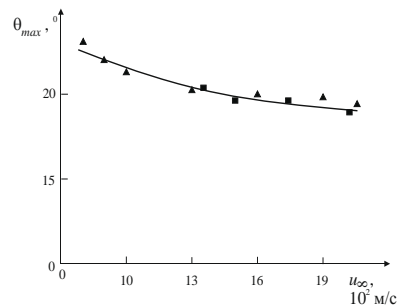
#### 4. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ АНАЛІЗ

Встановлено оптимальні діапазони зміни параметрів електронного променя: густини теплового впливу  $F_n = 10^6 \cdot 8 \cdot 10^8$  Вт/м<sup>2</sup> та швидкості переміщення  $V = 10^{-3} \cdot 5 \cdot 10^{-2}$  м/с, в межах яких відбувається покращення властивостей поверхневих шарів оптичних елементів.

Визначено, що вплив електронного променя на елементи з оптичної кераміки ( $F_n = 7 \cdot 10^6 \cdot 2 \cdot 10^7$  Вт/м<sup>2</sup>,  $V = 5 \cdot 10^{-3} \cdot 2 \cdot 10^{-2}$  м/с) призводить до збільшення мікротвердості її поверхні в залежності від параметрів електронного променя: збільшення  $F_n$  від  $7 \cdot 10^6$  Вт/м<sup>2</sup> до  $1,5 \cdot 10^7$  Вт/м<sup>2</sup> призводить до збільшення мікротвердості поверхні кераміки у 1,5-1,7 рази, а зменшення  $V$  від  $1,5 \cdot 10^{-2}$  м/с до  $10^{-3}$  м/с призводить до збільшення мікротвердості поверхні кераміки у 1,3-1,4 рази (рис. 6).

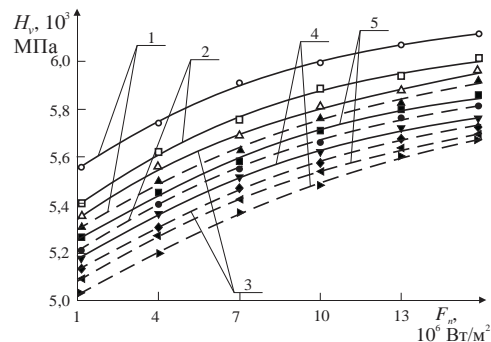


**Рис. 4** – Зображення розподілу теплового потоку  $q_w(\theta, u_\infty)$  на зовнішній поверхні обтічника, яка обтікається надзвукним потоком повітря ( $T_0 = 300$  К;  $R_w = 1,5 \cdot 10^{-2}$  м): 1 – турбулентний режим обтікання; 2 – ламінарний режим обтікання



**Рис. 5** – Залежність  $\theta_{max}(u_\infty)$  для турбулентного режиму обтікання обтічника ( $T_0 = 300$  К;  $R_w = 1,5 \cdot 10^{-2}$  м):  $\blacktriangle$ ,  $\blacksquare$  – результати лабораторних і натурних випробувань відповідно, які визначають ділянки руйнування обтічника

Встановлено, що товщина зміцненого шару ( $\Delta$ ), де виникають основні структурні зміни та підвищується мікротвердість оброблюваного матеріалу змінюється в діапазоні від 70-90 мкм до 210-230 мкм при товщинах оброблених виробів  $4 \cdot 6 \cdot 10^{-3}$  м (рис. 7).



**Рис. 6** – Залежність мікротвердості поверхні елементів з оптичних керамік КО12 (1), КО2 (2), КО1 (3), КО5 (4) та КО3 (5) при  $V = 7 \cdot 10^{-3}$  м/с (—) та  $V = 1,5 \cdot 10^{-2}$  м/с (- - -) від густини теплового впливу електронного променя ( $\Delta$ ,  $\circ$ ,  $\square$ ,  $\blacktriangle$ ,  $\blacksquare$ ,  $\blacklozenge$ ,  $\blacktriangledown$ ,  $\bullet$ ,  $\blacktriangleright$ ,  $\blacktriangleleft$  – експериментальні дані)

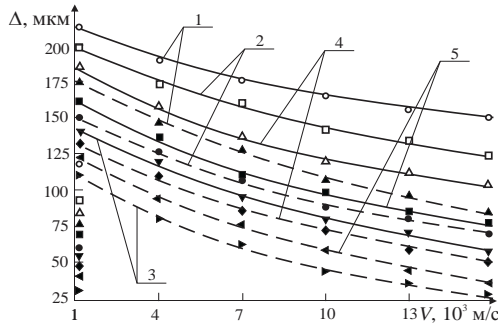


Рис. 7 – Залежність товщини зміцнених шарів елементів з оптичних керамік КО12 (1), КО2 (2), КО1 (3), КО3 (4) та КО5 (5) при  $F_n = 1,5 \cdot 10^7$  Вт/м<sup>2</sup> (—) та  $F_n = 2 \cdot 10^6$  Вт/м<sup>2</sup> (---) від швидкості переміщення електронного променя ( $\Delta$ ,  $\circ$ ,  $\square$ ,  $\blacktriangle$ ,  $\blacklozenge$ ,  $\blacktriangledown$ ,  $\bullet$ ,  $\blacktriangleright$ ,  $\blacktriangleleft$  – експериментальні дані)

Величина  $\Delta$  залежить від параметрів електронного променя: 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 рази, 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 рази.

Визначено наявність стискаючих напружень до 25-90 МПа у тонких поверхневих шарах елементів глибиною 40-60 мкм для центральної частини оброблених ділянок (розмір ділянок  $4 \cdot 10^{-2}$ - $5 \cdot 10^{-2}$  м) у діапазонах зміни параметрів електронного променя  $F_n = 10^7$ - $5 \cdot 10^8$  Вт/м<sup>2</sup> та  $V = 7 \cdot 10^{-3}$ - $3 \cdot 10^{-2}$  м/с.

Встановлено, що після фінішної електронно-променевої обробки оптичних елементів в результаті модифікації властивостей їх поверхневих шарів (перебудови кристалічної структури; збільшення мікротвердості поверхні; формування зміцнених шарів з стискаючими напруженнями) відбувається підвищення стійкості елементів до зовнішнього термічного впливу: збільшуються критичні значення зовнішніх теплових потоків  $q_n^*$  та тривалості їх впливу  $t^*$  у 2-4 рази.

Показано, що гранично допустимі значення термомпружних напружень  $\sigma^*$  при температурах нагріву  $T = 300$ - $1200$  К для оптичних елементів з оптичних керамік, оброблених електронним променем, збільшуються у 1,8-2,7 рази.

Проведені випробування півсферичних обтічників ГЧ-приладів (рис. 8) на вказаній вище установці, що моделює надзвуковий обдув потоком повітря обтічників зі швидкістю  $V$  до  $2 \cdot 10^3$  м/с та їх віссиметричне обертання з кутовою швидкістю  $\omega$  до  $4 \cdot 10^3$  рад/с, яким піддаються ГЧ-прилади при їх експлуатації в умовах пострілу та польоту, показали, що у випадку оброблених електронним променем обтічників в зонах максимального зовнішнього термовпливу (найбільш небезпечних зонах на їх поверхнях, де обтічники піддаються руйнуванням), в результаті підвищення їх стійкості до зовнішніх теплових дій, спостерігається у 1,7-2,3 рази менше їх руйнувань, ніж для необроблених обтічників (табл. 1).

Вірогідність безвідмовної роботи ГЧ-приладів самонаведення та спостереження в умовах пострілу та польоту визначалась стандартним методом, згідно якого:

Таблиця 1 – Вплив електронно-променевої обробки півсферичних обтічників ГЧ-приладів самонаведення та спостереження на кількість їх руйнувань  $\bar{n}$  (%) в залежності від швидкості надзвукового обдуву потоком повітря  $V_1$  (м/с)

Обтічник $V$ , м/с	$\bar{n}$ , %	
	До електронно-променевої обробки	Після електронно-променевої обробки
$5 \cdot 10^2$ - $10^3$	30-40	10-20
$10^3$ - $1,5 \cdot 10^3$	40-60	20-40
$1,5 \cdot 10^3$ - $2 \cdot 10^3$	60-80	30-50

\*Примітка. Обтічник з оптичної кераміки КО2;  $\bar{n} = \frac{n}{n_0}$ , де  $n_0$ ,  $n$  –

загальна кількість випробуваних обтічників та кількість, яка піддалась руйнуванню відповідно; кутова швидкість віссиметричного обертання обтічників у розглядуваному діапазоні зміни (до  $4 \cdot 10^3$  рад/с) не впливає помітно на кількість їх руйнувань.

$$W(V_1) = 1 - \frac{N(V_1)}{N_0}, \quad (4)$$

де  $N(V_1)$  – кількість обтічників, які зруйнувались при заданих швидкостях обдуву потоком повітря (руйнування обтічників ГЧ-приладів приймалось за відмову приладів в цілому);  $N_0$  – загальна кількість обтічників, які піддані випробуванням.

Результати проведених досліджень з використанням формули (4) дозволили встановити, що підвищення швидкості обдуву потоком повітря обтічників ГЧ-приладів (від  $7 \cdot 10^2$  м/с до  $2 \cdot 10^3$  м/с) призводить у випадку фінішної електронно-променевої обробки їх поверхонь (параметри променя:  $F_n = 2 \cdot 10^7$  Вт/м<sup>2</sup>,  $V = 10^{-3}$  м/с) до збільшення вірогідності їх безвідмовної роботи у 1,4-2,1 рази (рис. 8).

Таким чином, фінішна електронно-променева обробка ділянок на поверхнях оптичних обтічників ГЧ-приладів самонаведення та спостереження, де вони піддаються максимальному зовнішньому термовпливу, шляхом підвищення стійкості їх поверхневих шарів до зовнішніх теплових дій призводить до підвищення їх надійності при експлуатації в умовах інтенсивного зовнішнього термовпливу.

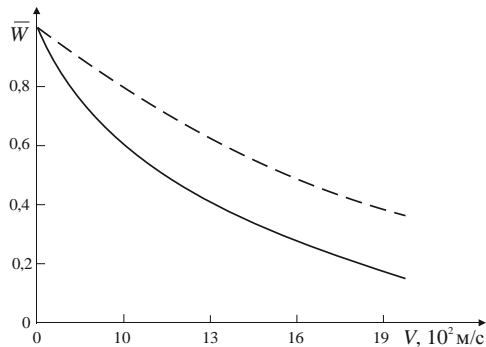
Результати досліджень покладені в основу технологічних рекомендацій, впровадження яких у виробничі процеси ДПНВК "Фотоприлад" (м. Черкаси) дозволило підвищити метрологічні характеристики і надійність приладів з оптичними елементами для вимірювання та теплового контролю об'єктів різної фізичної природи.

## 5. ВИСНОВКИ

1. Встановлено, що місця розташування максимальних значень теплового потоку  $(q_w)_{max}$  на поверхні обтічника залежать від режиму обтікання: для ламінарного режиму обтікання значення  $(q_w)_{max}$  знаходяться поблизу передньої критичної точки ( $\theta = 0^\circ$ ) обтічника; для турбулентного режиму обтікання значення  $(q_w)_{max}$  вже зміщуються від  $\theta = 0^\circ$  до  $\theta_{max} = 19$ - $23^\circ$ .

2. Вперше встановлено, що шляхом фінішної обробки поверхні елементів з оптичних керамік (КО1, КО2, КО3, КО5, КО12) рухомим електронним променем, регулюючи його оптимальні параметри (густину





**Рис. 8** – Залежність вірогідності безвідмовної роботи ІЧ-приладів від швидкості надзвукового обдуву потоком повітря їх півсферичних обтічників: — — — обтічники, не оброблені електронним променем; — — — обтічники, оброблені електронним променем

теплого впливу  $F_n = 10^6-8,5 \cdot 10^8 \text{ Вт/м}^2$ , швидкість його переміщення відносно елемента  $V = 10^{-3}-5 \cdot 10^{-2} \text{ м/с}$ ), можна покращити основні фізико-механічні властивості поверхневих шарів елементів та підвищити їх стійкість до зовнішніх теплових впливів:

- збільшення густини теплового впливу променю від  $10^6 \text{ Вт/м}^2$  до  $1,5 \cdot 10^7 \text{ Вт/м}^2$  призводить до збільшення мікротвердості поверхні елемента у 1,5-

1,7 рази, а збільшення швидкості переміщення променю від  $10^{-3} \text{ м/с}$  до  $1,5 \cdot 10^{-2} \text{ м/с}$  призводить до зменшення мікротвердості поверхні елемента у 1,3-1,4 рази;

- товщина зміцненого шару, де виникають основні структурні зміни та підвищується мікротвердість оброблюваного матеріалу елемента для розглянутих параметрів електронного променю збільшується від 70-90 мкм до 210-230 мкм; при цьому збільшення  $F_n$  від  $10^6 \text{ Вт/м}^2$  до  $2 \cdot 10^7 \text{ Вт/м}^2$  призводить до збільшення товщини зміцненого шару у 1,8-2,6 рази, а збільшення швидкості руху променю від  $1,5 \cdot 10^{-3} \text{ м/с}$  до  $2 \cdot 10^{-2} \text{ м/с}$  призводить до зменшення товщини зміцненого шару у 1,7-2,5 рази;
- для руйнування елементів потрібно у 2-4 рази більші зовнішні теплові потоки та часи їх дії.

3. Фінішна електронно-променева обробка ділянок максимальних зовнішніх термодій на поверхні обтічників призводить до зменшення кількості їх руйнувань та збільшення вірогідності безвідмовної роботи ІЧ-приладів у 1,4-2,1 рази в умовах надзвукового обдуву потоком повітря та віссиметричного обертання, що моделюють умови пострілу та польоту виробів з ІЧ-приладами.

### Увеличение вероятности безотказной работы ИК-приборов самонаведения и слежения путем электронно-лучевой обработки оптических обтекателей

І.В. Яценко<sup>1</sup>, В.С. Антонюк<sup>2</sup>, В.І. Гордиенко<sup>3</sup>, О.В. Кириченко<sup>4</sup>, В.А. Ващенко<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Черкаський державний технологічний університет, бул. Шевченка, 460, 18030 Черкаси, Україна

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

<sup>3</sup> Підприємство Научно-виробничий комплекс «Фотоприбор», ул. Б. Вишневецького, 85, 18000 Черкаси, Україна

<sup>4</sup> Черкаський інститут пожежної безпеки ім. Героїв Чорнобыля Національного університету громадянської захисту України, ул. Онопрієнко, 8, 18034, Черкаси, Україна

Представлены результаты теоретических исследований процесса теплового воздействия сверхзвукового газового потока на полусферические обтекатели из оптической керамики ИК-приборов самонаведения и слежения, определяющие месторасположения на их поверхностях участков максимальных внешних термовоздействий, где происходят разрушения обтекателей, что приводит к выходу из строя приборов. Приведены результаты экспериментальных исследований улучшения свойств поверхностных слоев указанных участков путем их финишной электронно-лучевой обработки, что приводит к повышению стойкости обтекателей к внешним тепловым воздействиям и уменьшению количества их разрушений и повышению надежности приборов при их эксплуатации.

**Ключевые слова:** Внешние термовоздействия, Оптические обтекатели, Электронный луч.

### The Increase in the Probability of Failure-Free Operation of the IR-Devices Homing and Tracking by the of Electron Beam Processing of Optical Fairings on the Areas

I.V. Yatsenko<sup>1</sup>, V.S. Antonyuk<sup>2</sup>, V.I. Gordienko<sup>3</sup>, O.V. Kiritchenko<sup>4</sup>, V.A. Vaschenko<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Cherkasy State Technological University, 460, Shevchenko Blvd., 18030 Cherkasy, Ukraine

<sup>2</sup> National Technical University of Ukraine «KPI», 37, Pobeda Prosp., 03056 Kiev, Ukraine

<sup>3</sup> Enterprise Scientific-production Complex «Photopribor», 85, B. Vishnevetsky Str., 18000 Cherkasy, Ukraine

<sup>4</sup> Cherkasy Institute of Fire Safety named Heroes of Chernobyl National University of Civil Protection of Ukraine, 8, Onoprienko Str., 18034, Cherkasy, Ukraine

The results of theoretical researches of process of the thermal effects of supersonic gas flow on the hemispherical fairings of optical ceramics IR-devices homing and tracking, determining the location on the surface plots the maximum external thermo-influences, where the destruction of the fairings, which leads to

failure of the device. The results of experimental researches of properties of surface layers of these areas by the finish of electron beam processing, which leads to increased durability of the fairings to the external thermal and mechanical stresses and decrease in the amount of damage and improve efficiency of the devices during their operation.

**Keywords:** External thermo-influences, Optical fairings, The electron beam.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. А.Р. Глущенко, В.И. Гордиенко, А.А. Бурковский, А.В. Буряк, В.Н. Замосенчук, Г.Я. Соловьев, *Лазерные системы танковых прицелов* (Черкассы: Маклаут: 2009) (A.R. Glushchenko, V.I. Gordienko, A.A. Burkovsky, A.V. Buryak, V.N. Zamosenchuk, G.Ya. Solovyov, *Lazernyye sistemy tankovyih pritselov* (Cherkassy: Maklaut: 2009)) [In Russian].
2. I. Yatsenko, V. Antoniuk, M. Bondarenko, V. Vashchenko, *Int. J. Sci. Innov. Industry "Innovations in discrete productions"* 1, 13 (Sofia: 2015).
3. I.V. Yatsenko, V.S. Antoniuk, V.A. Vaschenko, V.V. Tsibulin, *J. Nano-Electron. Phys.* 8, 01027 (2016).
4. I.V. Yatsenko, V.I. Hordienko, V.V. Kholin, *Pratsi Odes'koi Politechnichnyi Universytet* 1 (51) (2017).
5. М.П. Бочок, Н.П. Будко, В.А. Ващенко, *Спеціальні методи обробки оптичного скла* (Чернігів: ЧДТУ: 2001) (M.P. Bochok, N.P. Budko, V.A. Vaschenko, *Spetsialni metody obrobky optichnogo skla* (Chernigiv: ChDTU: 2001)) [In Ukrainian].
6. I. Yatsenko, V. Antoniuk, O. Kiritchenko, V. Vashchenko, *Int. J. Sci. Innov. Industry "Machines. Technologies. Materials"* 6, 47 (Bulgaria: 2016).
7. 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: Наукова думка: 2006). (V.A. Vaschenko, D.I. Kotelnikov, Yu.G. Lega, D.M. Krasnov, I.V. Yatsenko, O.V. Kirichenko, *Teplovyie protsessyi pri elektronnoy obrabotke opticheskikh materialov i ekspluatatsii izdeliy na ih osnove* (Kyiv: Naukova dumka: 2006)) [In Russian].
8. В.А. Ващенко, І.В. Яценко, Ю.Г. Лега, О.В. Кириченко, *Основи електронної обробки виробів з оптичних матеріалів* (Київ: Наукова думка: 2011) (V.A. Vaschenko, I.V. Yatsenko, Yu.G. Lega, O.V. Kirichenko, *Osnovy elektronnoyi obrobky vrobiv z optichnih materialiv* (Kyiv: Naukova dumka: 2011)) [In Ukrainian].
9. I.V. Yatsenko, *J. Multidisciplin. Eng. Sci. Stud. (JMESS). Germany* 3 (5), (2017).
10. М.А. Окатов, Э.А. Антонов, А.Б. Байгожин, *Справочник оптика-технолога* (СПб.: Политехника: 2004) (M.A. Okatov, E.A. Antonov, A.B. Baygozhin, *Spravochnik optika-tehnologa* (SPb.: Politehnika: 2004)) [In Russian].
11. В.А. Зверев, Е.В. Кривоустова, Т.В. Точилина, *Оптические материалы. Учебное пособие для конструкторов оптических систем и приборов* (СПб.: Издательство СП НИУИТМО: 2009) (V.A. Zverev, E.V. Krivopustova, T.V. Tochilina, *Opticheskie materialy. Uchebnoe posobie dlya konstruktorov opticheskikh sistem i priborov* (SPb.: Izdatelstvo SP NIUITMO: 2009)).