

Черкаський державний технологічний університет
Міністерство освіти і науки України

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ЯЦЕНКО ІРИНА В'ЯЧЕСЛАВІВНА

УДК 621.338.27:537.221

ДИСЕРТАЦІЯ

**ЗАКОНОМІРНОСТІ ВПЛИВУ ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВОЇ
ТЕХНОЛОГІЇ НА ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ
ОПТИЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ**

спеціальність 05.11.07 – оптичні прилади та системи

технічні науки

Подається на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ І. В. Яценко

Науковий консультант **Антонюк Віктор Степанович**

доктор технічних наук, професор

Черкаси – Київ – 2017

Анотація

Яценко І.В. Закономірності впливу електронно-променевої технології на експлуатаційні характеристики оптичних елементів. – Кваліфікаційна наукова робота на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук зі спеціальності 05.11.07 “Оптичні прилади та системи”. – Черкаський державний технологічний університет Міністерства освіти і науки України, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Міністерства освіти і науки України, Київ, 2017.

Сучасний рівень розвитку оптико-електронного приладобудування висуває підвищені вимоги до експлуатаційних характеристик їх оптичних елементів: мікротвердості поверхні; міцності поверхневих шарів; спектрального коефіцієнта пропускання; стійкості до зовнішніх термічних та механічних ударів тощо, які впливають на техніко-експлуатаційні характеристики приладів (імпульсних лазерних далекомірів приладів прицільних комплексів, лазерних медичних приладів, ІЧ-приладів тощо).

Широке використання традиційних методів підготовки й обробки поверхонь оптичних елементів (механічних, хімічних, хіміко-механічних), а також сучасних методів, які використовують концентровані потоки енергії (сфокусовані потоки іонів, лазерне випромінювання, потоки низькотемпературної плазми тощо) показало, що неможливо одержати одночасно чисту та бездефектну поверхню, а також бездефектні поверхневі шари, що призводить до погіршення техніко-експлуатаційних характеристик оптико-електронних приладів.

Як показала практика, найбільш зручним, екологічно чистим та легкокерованим способом обробки оптичних елементів є електронно-променевий метод, який дозволяє за допомогою рухомого електронного променя шляхом полірування елементів з оптичного скла отримувати поверхні високої чистоти з мінімальною шорсткістю, бездефектні поверхневі шари, а

також зміцнювати елементи з оптичної кераміки та отримувати поверхні з підвищеною мікротвердістю та товщиною зміцнених шарів у десятки мкм.

Однак широке використання електронно-променевої технології у оптико-електронному приладобудуванні стримується відсутністю даних про закономірності впливу режимів електронно-променевої обробки на експлуатаційні характеристики оптичних елементів, керування якими дозволяє покращувати техніко-експлуатаційні характеристики приладів, зокрема точність та діапазони вимірювань, ймовірність безвідмовної роботи при експлуатації та ін.

При експлуатації оптичних елементів в умовах термічних та механічних ударів, а також в умовах застосування надзвукової техніки велике практичне значення має попереднє визначення критичних значень параметрів зовнішніх впливів (теплових потоків, тривалості їх впливу, швидкостей обдуву потоком повітря тощо) та місць розташування небезпечних ділянок на поверхні елементів, що піддаються максимальним впливам та які необхідно заздалегідь обробляти електронним променем для попередження погіршення їх експлуатаційних характеристик та руйнувань елементів. Однак нині відсутні дослідження з визначення вказаних критичних параметрів та небезпечних ділянок, які б базувались на сучасних методах математичного моделювання та програмного забезпечення, а також експериментальних даних.

В дисертаційній роботі визначена й вирішена актуальна **науково-технічна проблема** покращення експлуатаційних характеристик оптичних елементів оптико-електронних приладів на основі встановлених закономірностей впливу на них режимів електронно-променевої технології, розроблених математичних моделей, спеціалізованого програмного забезпечення, що в цілому являють собою технологічні основи керування якісними характеристиками поверхні та поверхневих шарів елементів.

У **першому розділі** виконано огляд вітчизняних та зарубіжних літературних джерел, наведено аналіз вимог, що пред'являються до експлуатаційних характеристик оптичних елементів, які прийнято у оптико-

електронному приладобудуванні, а також причин їх погіршення з врахуванням впливу термічних та механічних впливів, умов експлуатації надзвукової техніки тощо, розкрито суть та стан науково-технічної проблеми, сформульовано мету та завдання досліджень.

У **другому розділі** представлено методики експериментальних досліджень, обґрунтування та вибір об'єктів досліджень, опис експериментальних установок та методик, математичного моделювання і обробки експерименту.

Наведено загальну методику виконання експериментальних та теоретичних досліджень, яка передбачає: встановлення закономірностей впливу режимів електронно-променевої технології на оптичні елементи; визначення режимів електронно-променевої технології, в межах яких спостерігається покращення експлуатаційних характеристик оптичних елементів; визначення критичних значень параметрів зовнішніх термовпливів, контроль яких попереджає погіршення експлуатаційних характеристик оптичних елементів та їх руйнування в умовах термічних та механічних ударів; визначення ділянок на поверхні оптичних обтічників, що піддаються максимальним зовнішнім термовпливам та руйнуванням в умовах експлуатації надзвукової техніки, які необхідно попередньо обробляти електронним променем з метою попередження можливих руйнувань та відмов приладів; розробка методів покращення техніко-експлуатаційних характеристик оптико-електронних приладів шляхом встановлення закономірностей впливу режимів електронно-променевої технології на експлуатаційні характеристики їх оптичних елементів.

Для проведення експериментальних та теоретичних досліджень використовували сучасні методи фізико-хімічного аналізу, методи математичного моделювання, чисельно-аналітичні методи розв'язування задач тепло- та масоперенесення, задач термопружності та математичної статистики, гідрогазодинаміки, а також спеціалізовані пакети прикладних програм, що дозволяють на сучасних ПК вирішувати вказані вище задачі.

Для електронно-променевої обробки поверхневих шарів оптичних елементів використовували розроблене технологічне обладнання, яке

відрізняється від існуючих електронно-променевих установок технологічною оснасткою для автоматизованого вимірювання та контролю температури оброблюваної поверхні, а також зондування електронного променя (патенти України № 4177, № 91523).

У **третьому розділі** наведено результати експериментальних досліджень закономірностей впливу режимів електронно-променевої технології (густини теплового впливу променя F_n , швидкості його переміщення V) на оптичні елементи.

Встановлено, що після електронно-променевої обробки поверхні елементів з оптичного скла повністю очищується від дефектів, які були отримані при їх механічній поліровці (тріщин, подряпин та ін.); при цьому відбувається підвищення класу чистоти, зменшення мікросорсткості до 0,4...1,3 нм. В результаті проведених досліджень встановлені режими електронно-променевої обробки при яких максимальна глибина зони основного термовпливу або товщина оплавленого шару h_m не перевищує гранично допустимі значення $h_m^* = 100...150$ мкм, тобто зберігається площинність оптичних елементів та геометрична форма. Встановлено, що модифіковані електронним променем шари на поверхні елементів з оптичного скла мають у різній ступені змінений хімічний склад. При цьому відбувається орієнтована перебудова біля поверхні кремнекисневої сітки скла, яка стає наближеною до структури кварцового скла, що призводить до підвищення стійкості оптичних елементів до зовнішніх термічних та механічних впливів.

Аналіз отриманих змін параметрів кристалічних ґраток елементів з оптичних керамік після електронно-променевої обробки показав наявність стискаючих напружень у зміцнених поверхневих шарах елементів товщиною 90...210 мкм для розглядуваних діапазонів зміни режимів електронно-променевої технології. Визначено вплив режимів електронно-променевої технології на мікротвердість H_v поверхні елементів з оптичної кераміки: збільшення F_n від $7 \cdot 10^6$ Вт/м² до $1,5 \cdot 10^7$ Вт/м² призводить до збільшення мікротвердості поверхні елементів у 1,5...1,7 рази, а збільшення V від $5 \cdot 10^{-3}$ м/с

до $1,5 \cdot 10^{-2}$ м/с призводить до зменшення мікротвердості поверхні елементів у 1,3...1,4 рази. Крім цього, аналіз випробувань елементів з оптичних керамік, які зміцнені електронним променем по стандартній методиці показав, що значення критичних висот падіння сталеві кульки на їх поверхню, що призводять до руйнування елементів, збільшуються з 0,18...1,1 м до 0,37...1,35 м, тобто підвищується їх стійкість до механічних ударів.

Встановлено, що після електронно-променевої обробки оптичних елементів відбувається збільшення критичних значень зовнішнього теплового потоку, який призводить до руйнування елементів, в 1,5...2 рази, при цьому збільшення зовнішнього тиску до 10^7 Па зменшує вказані критичні значення у 1,3...1,5 рази; критичні значення термопружних напружень у оптичних елементах при температурах нагріву 300...1200 К зростають в 1,5...2,5 рази, що вказує на підвищення стійкості до термічних впливів та підвищених зовнішніх тисків елементів, які оброблені електронним променем.

В результаті проведених досліджень встановлено, що у випадку електронно-променевої обробки оптичних елементів відбувається підвищення спектрального коефіцієнта пропускання ІЧ-випромінювання $k_\lambda(\lambda)$ – на 4...6 % для елементів з оптичного скла та на 5...7 % – для елементів з оптичної кераміки.

На основі аналізу проведених експериментальних досліджень вперше встановлені закономірності впливу електронно-променевої технології на оптичні елементи та визначені режими, в межах яких спостерігається покращення їх експлуатаційних характеристик (мікротвердості поверхні H_v , спектрального коефіцієнта пропускання k_λ , стійкості до зовнішніх термічних та механічних впливів): $F_n = 7 \cdot 10^6 \dots 8 \cdot 10^8$ Вт/м², $V = 5 \cdot 10^{-3} \dots 5 \cdot 10^{-2}$ м/с.

У **четвертому розділі** представлено результати теоретичних досліджень з визначення критичних значень параметрів зовнішніх термічних впливів (теплових потоків, тривалості їх впливу та ін.) на оптичні елементи різної геометричної форми при їх експлуатації, перевищення яких призводить до руйнування елементів на стадії нагріву або до їх глибокого оплавлення, що, у

кінцевому підсумку, веде до порушення площинності елементів, втрати їх геометричної форми. Контролюючи значення параметрів зовнішніх термовпливів можна виключити появу вказаних негативних явищ.

Розроблено нову математичну модель зовнішніх термоударних впливів на оптичний обтічник, що враховує геометричну форму обтічника, режим обтікання потоком повітря, температурні залежності теплофізичних характеристик оптичного матеріалу, яка дозволяє визначати критичні значення швидкостей потоку повітря та тривалості його впливу, а також місця розташування небезпечних ділянок на поверхні обтічника, які піддаються максимальному нагріву, що дозволяє шляхом попередньої електронно-променевої обробки вказаних ділянок попереджати погіршення їх експлуатаційних характеристик та руйнування при експлуатації.

У **п'ятому розділі** на базі проведених експериментальних та теоретичних досліджень представлено розроблені нові методи покращення експлуатаційних характеристик оптичних елементів за допомогою електронно-променевої технології, визначення та контролю критичних значень параметрів зовнішніх термічних та механічних впливів на елементи, як дозволяють підвищувати техніко-експлуатаційні характеристики оптико-електронних приладів.

Розроблено новий метод обробки складних криволінійних поверхонь оптичних елементів та створення на них функціональних мікропрофілей різної геометричної форми на базі системи нерухомих дискретно розташованих електронних променів, що дозволяє шляхом оптимального керування технологічними параметрами установки (кількістю променів, їх струмами, прискорюючими напругами та відстанями до оброблюваних поверхонь) створювати мікрооптичні деталі для оптико-електронних приладів.

Також представлено перспективні напрямки подальшого розвитку електронно-променевої технології у точному приладобудуванні: електронно-променева обробка поверхонь елементів з п'єзоелектричних керамік; електронно-променева обробка нанорозмірних оксидних покриттів на оптичних елементах з метою покращення їх експлуатаційних характеристик.

Практичне значення отриманих результатів. Результати дисертаційного дослідження становлять наукову основу для розробки, технічної реалізації та впровадження у виробництво технології електронно-променевої обробки оптичних елементів оптико-електронних приладів з метою покращення їх експлуатаційних характеристик. Результати теоретичних та експериментальних досліджень, а також розроблені методи знайшли практичне використання та впровадження (підтверджено актами впровадження) на підприємствах України та республіки Беларусь, що дозволило: підвищити точність та розширити діапазони вимірювання дальності імпульсних лазерних далекомірів на 7...15 %; збільшити ймовірність безвідмовної роботи оптичних обтічників ІЧ-приладів та волоконно-оптичних світловодів лазерних медичних приладів при експлуатації на 10...20 %; отримати економічний ефект 360 тис. гривень.

Ключові слова: оптико-електронне приладобудування, елементи з оптичного скла та кераміки, експлуатаційні характеристики оптичних елементів, електронно-променева технологія.

Abstract

Yatsenko I. V. Regularities of influence of electron beam technology on the performance of optical elements. – Qualifying scientific work as a manuscript.

Dissertation for the degree of doctor of technical sciences on specialty 05.11.07 –“Optical devices and systems”. – Cherkassy State Technological University of the Ministry of Education and Science of Ukraine, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute” of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2017.

The modern level of development of opto-electronic instrument building brings increased requirements to the performance of their optical elements: microhardness of the surface; the strength of the surface layers; spectral transmission factor; resistance to external thermal and mechanical shocks, etc., that affect the technical

and performance characteristics of the devices (pulse laser range finders of sighting devices complexes, laser medical devices, infrared devices, etc.).

The widespread use of traditional methods of preparation and processing of surfaces of optical elements (mechanical, chemical, chemical and mechanical), as well as modern methods that use concentrated energy flows (focused flow of ions, laser radiation, the low-temperature plasma, etc) showed that it is impossible to obtain simultaneously clean and flawless surface, as well as flawless surface layers, which leads to the deterioration of the technical and operational characteristics of the opto-electronic devices.

As practice has shown, the most comfortable, environmentally friendly and handy way of handling optical elements is electron-beam method, which allows you with a help of a moving electron beam by buffing items from optical glass to get the surface of high purity with minimal surface roughness, non-failed surface layers, as well as to strengthen elements from optical ceramics and to get the surfaces with high microhardness and thickness of strengthened layers of tens of microns.

However, the widespread use of electron beam technologies in optical-electronic instrument manufacture is hindered by the lack of data on the patterns of exposure modes of electron beam treatment on the performance characteristics of optical elements, the control of which allows you to improve the technical and performance characteristics of the devices, in particular the accuracy and measurement range, the probability of non-failure performance during operation, etc.

During the operation of optical elements in conditions of thermal and mechanical shocks, as well as in the conditions of application of supersonic techniques, there is a great practical importance of predefined critical values of the parameters of external influences (heat flows, the times of their actions, blowing speed of airflow, etc.) and places of location of danger zones on the surface of the elements that are exposed to the maximum stresses and that need to be processed in advance by electron beam to prevent deterioration of their operational characteristics and damage of items. However, nowadays there are missing

researches as to the definition of specified critical parameters and dangerous units, which would be based on modern methods of mathematical modeling and software, as well as experimental data.

The relevant **scientific and technical problem** is defined and solved in dissertation: the improvement of the performance characteristics of optical elements in optoelectronic devices based on established patterns of exposure modes of electron-beam technology, mathematical models, specialized software that represent the technological bases of management of quality characteristics of surfaces and surface layers.

The first section completes a review of the domestic and foreign literary sources, it specifies the analysis of requirements to the operational characteristics of optical elements, that are adopted in optical-electronic instrument making as well as the reasons for their deterioration considering the exposure to thermal and mechanical stresses, the conditions of operation of supersonic equipment, etc., the essence and status of scientific and technical problems is revealed, the aim and objectives of the research are formulated.

The second section presents the methodology of experimental researches, study and selection of research objects, description of experimental set-ups and methods of mathematical modeling and processing experiment.

General method of performing of experimental and theoretical researches is specified, which includes: establishing the regularities of influence of modes of electron-beam technology at optical elements; defining modes of electron-beam technology, within which there is an improvement of the performance of the optical elements; determination of the critical values of the parameters of the external thermal influences, where the control of the latter prevents deterioration of the performance of optical elements and their destruction in conditions of thermal and mechanical shocks; definition of areas on the surface of optical fairings that are exposed to the maximum external thermal influences and the deterioration in the conditions of operation of the supersonic technique that need to be processed in advance by electronic beam to prevent possible destructions and failures of

devices; development of methods of improvement of the technical and operational characteristics of opto-electronic devices by establishing patterns of exposure modes of electron-beam technology on the performance of their optical elements.

For carrying out experimental and theoretical researches modern methods were used such as the methods of physical-chemical analysis, methods of mathematical modeling, numerical-analytical methods of solving the problems of heat and mass transfer, the problems of thermal power and mathematical statistics, hydrogasdynamics, as well as specialized packages of applied programs that allow the modern PC to solve the above problems.

For electron beam treatment of the surface layers of the optical elements the developed technological equipment was used, which differs from the existing electron beam units by technological fitting for automated measurements and temperature control of the processed surface, as well as probing of the electron beam (patent of Ukraine № 4177, № 91523).

The third section shows the results of experimental research of regularities of influence of modes of electron-beam technology (density of thermal influence of the beam F_n , the speed of its movement V) on the optical elements.

It is found out, that after electron beam treatment of the surface of elements from the optical glass, it is completely cleared from the defects that were obtained during mechanical polishing (cracks, scratches, etc.); thus there is an increase of purity class, reduce of micro smoothness parameters to 0.4 ... 1.3 nm. In the result of the conducted research regimes of electron beam processing were established, at which the maximum depth of the main thermal influence zone or the thickness of melted layer h_m does not exceed the maximum permissible value of $h_m^* = 100...150$ microns, i.e. the flatness of optical elements and geometric form is kept. It is found that modified electronic beam layers on the surface of elements from optical glass have in differing degree the modified chemical composition. Thus there is a focused realignment near the surface of the silicon-oxygen grid of glass, that becomes close to

the structure of quartz glass, that leads to the increase of stability of optical elements to external thermal and mechanical stresses.

Analysis of the received changes of parameters of crystal lattices of elements from optical ceramics after electron-beam treatment showed the presence of compressive stresses in the hardened surface layers of elements 90...210 microns thick for considering ranges of change of regimes of electron-beam technology. The impact of modes of electron-beam technology on microhardness H_v of surface elements from optical ceramics is determined: increase of F_n from $7 \cdot 10^6$ W/m² to $1,5 \cdot 10^7$ W/m² leads to the increase of microhardness of elemental surface in 1,5...1,7 times and the increase of V from $5 \cdot 10^{-3}$ m/s до $1,5 \cdot 10^{-2}$ m/s leads to a decrease of microhardness elemental surface in 1,3...1,4 times. In addition, analysis of testing elements from optical ceramics, which are strengthened with electronic beam by the standard technique showed that the value of the critical fall of heights of steel balls on their surface that lead to the destruction of the elements, increase in 0,18...1,1 m to 0,37...1,35 m, the i.e. increases their resistance to mechanical shocks.

It is defined that after the electron beam treatment of optical elements there takes place an increase of critical values of external heat flow, which leads to the destruction of the elements, in 1,5 ... 2 times, thereat increasing external pressure to 10^7 Pa reduces the specified critical values in 1,3...1,5 times; the critical values of thermoplastic stresses in optical elements at heating temperatures of 300 ... 1200 K increase in 1,5...2,5 times, indicating the increasing resistance to thermal stresses and high external pressures of elements processed by electron beam.

In the result of the studies it was found that in the case of electron beam treatment of optical elements there takes place an increase of spectral coefficient of transmittance of infrared radiation $k_\lambda(\lambda)$ – in 4...6 % for elements from optical glass and 5 ... 7% – for items from optical ceramics.

Based on the analysis of the conducted experimental research, for the first time regularities of influence of electron-beam technology on optical elements were determined and modes defined, within which there is an improvement of their performance characteristics (surface microhardness H_v , spectral transmission factor of

k_{λ} , resistance to external thermal and mechanical stresses): $F_n = 7 \cdot 10^6 \dots 8 \cdot 10^8 \text{ W/m}^2$,
 $V = 5 \cdot 10^{-3} \dots 5 \cdot 10^{-2} \text{ m/s}$.

The fourth section presents the results of theoretical studies on the determination of the critical values of the parameters of the external thermal stresses (heat flows, the times of their actions, etc.) on the optical elements of different geometric shapes in their operation, the excess of which leads to the destruction of the elements on the stage of heating or to their deep melting that, ultimately, leads to the violation of the flatness of the elements, the loss of their geometrical shape. Controlling values of parameters of external thermal influences, the appearance of the specified negative phenomena can be excluded.

A new mathematical model of external thermal stress effects on optical fairing was developed that takes into account the geometry of fairing, flowing mode by air flow, temperature dependences of thermal characteristics of an optical material, which allows to determine the critical values of the velocity of the airflow and the times of its action, as well as the location of dangerous areas on the surface of the fairing that are exposed to maximum heating, allowing through previous electron beam treatment of specified areas to warn as to the worsening of their performance characteristics and destruction during operation.

In the fifth section, on the basis of the carried out experimental and theoretical research new designed methods are presented aiming to improve the performance of optical elements using electron-beam technology, identification and control of critical values of the parameters of the external thermal and mechanical stresses on elements that allow to increase the technical and operational characteristics of opto-electronic devices.

A new method of processing complex curved surfaces of optical elements was developed as well as making on them functional microprofiles of different geometrical shape on the basis of a system of fixed discretely located electronic rays, allowing through optimal control of technological parameters of installation (number of rays, their currents, accelerating voltages and distances to the processed surfaces) to create microoptical details for opto-electronic devices.

Also the perspective directions of further development of electron-beam technology in precise instrument-making are presented: electron-beam treatment of surfaces from piezoelectric ceramic; electron-beam treatment of nanosized oxide coatings for optical elements to improve their performance.

Practical value of the obtained results. The results of dissertation constitute the scientific basis for the design, technical realization and implementation on production of technology of electron beam treatment of optical elements of opto-electronic devices to improve their operational characteristics. The results of theoretical and experimental research, as well as developed methods have found practical use and implementation (confirmed by acts of implementation) on the enterprises of Ukraine and the Republic of Belarus, that made possible: to improve the accuracy and expand the ranges of measurement of distance of pulse laser range finders at 7...15%; to increase the probability of non-failure operation of optical fairings of IR devices and fiber-optic beam guides of laser medical devices in operation at 10...20%; get economic benefit of 360 thousand hryvnias.

Keywords: optical and electronic instrumentation, elements from optical glass and ceramics, performance characteristics of optical elements, electron-beam technology.

Список публікацій здобувача

[1] В. А. Ващенко, І. В. Яценко, Ю. Г. Лега та О. В. Кириченко, *Основи електронної обробки виробів з оптичних матеріалів* (Наукова думка, Київ, 2011), 562 с.

Здобувачем запропоновано метод покращення властивостей поверхневих шарів оптичних елементів шляхом їх електронно-променевої обробки та сформульовано шляхи покращення техніко-експлуатаційних характеристик оптико-електронних приладів.

[2] І. В. Яценко, В. С. Антонюк, В. А. Ващенко та В. В. Цибулін, "Попередження можливих руйнувань оптичних елементів точного приладобудування в умовах зовнішніх термодій", Журн. нано- та електронної

фізики. **8** (1), 01027 (6cc) (2016). **(Видання включене до міжнародної науково-метричної бази SCOPUS та індексується директорією відкритого доступу (DOAJ)).**

Автором проведено аналіз можливих руйнувань оптичних елементів точного приладобудування, запропоновано шляхи їх попередження в умовах зовнішніх термовпливів.

[3] І. В. Яценко, В. С. Антонюк, В. А. Ващенко та В. В. Цибулін, "Визначення критичних значень параметрів електронного променя при поверхневому оплавленні оптичних елементів точного приладобудування", Журн. нано- та електронної фізики. **9** (1), 01010 (5cc) (2017). **(Видання включене до міжнародної науково-метричної бази SCOPUS та індексується директорією відкритого доступу (DOAJ)).**

Автором розроблено методика визначення оптимальних параметрів променя, що не призводять до глибокого оплавлення оптичних елементів, порушення їх площинності, утворення напливів та ін. негативних дефектів на їх поверхнях, які призводять до погіршення експлуатаційних характеристик та надійності приладів.

[4] І. В. Yatsenko, "Experimental and Statistical Models of Impact Determination of the Electron Beam Parameters on Surface Layers Properties of Optical Elements in Precision Instruments Building", "Pratsi. Odes'kyi Politechnichniy Universytet". **1(48)**, 63 – 69 (2016). **(Видання включене до міжнародних науково-метричних баз даних Citefactor, CrossRef, EBSCO (Applied Sciences Collection), Global Impact Factor, Google Scholar, Index Copernicus, Universal Impact Factor).**

[5] В. С. Антонюк, І. В. Яценко, О. В. Кириченко та В. А. Ващенко, "Підвищення фізико-механічних параметрів елементів з оптичних керамік фінішною електронно-променевою обробкою", Сучасні технології в машинобудуванні: зб. наук. пр. НТУ "ХП". Харків. **11**, 74 – 86 (2016). **(Видання включене у довідник періодичних видань бази даних Ulrich's Periodicals Directory (New Jersey, USA)).**

Здобувачем розроблено методу підвищення стійкості елементів з оптичних керамік до зовнішніх теплових та механічних навантажень, що дозволяє підвищувати ймовірність безвідмовної роботи приладів при їх експлуатації.

[6] В. А. Ващенко, Г. В. Канашев, В. М. Лукашенко, М. А. Бондаренко та І. В. Яценко, "Оптоэлектроника и микрооптика – перспективные отрасли науки и техники", Вісн. Черкас. держ. технол. ун-ту. **2**, 52 – 62 (2002).

Автором проведено аналіз функціональних схем та стану елементної бази приладів з мікрооптичними елементами, волоконно-оптичними світловодами та інтегрально-оптичними схемами.

[7] І. В. Яценко, Д. М. Краснов, В. А. Ващенко та О. В. Кириченко, "Математическое моделирование термоупругих напряжений при нагреве оптических полусферических изделий инфракрасных приборов", Вісн. Черкас. держ. технол. ун-ту. **1**, с.80 – 86 (2004).

Автором розроблено методи визначення розподілу термомпружних напружень у півсферичних обтічниках ІЧ-приладів, їх критичних значень, що викликають руйнування обтічників.

[8] Яценко І. В., "Дослідження залежностей енергетичних характеристик СЕП від його керованих параметрів при впливі на вироби мікрооптики і інтегральної оптики", Сб. "Труды Одесского политехнического университета". **2** (32), 143 – 149 (2009). **(Видання включене до міжнародних науково-метричних баз даних Citefactor, CrossRef, EBSCO (Applied Sciences Collection), Global Impact Factor, Google Scholar, Index Copernicus, Universal Impact Factor).**

[9] І. В. Яценко, В. А. Ващенко, В. В. Цибулін та О. М. Чепурна, "Тепловий вплив стрічкового електронного потоку на вироби оптичних інтегральних схем", Вісн. Черкас. держ. технол. ун-ту. **4**, 37 – 44 (2009).

Здобувачем запропоновано метод визначення впливу параметрів електронного променя на температурні поля у оптичних елементах, а також

визначено оптимальні параметри променя, що не руйнує поверхневі шари елементів.

[10] І. В. Яценко, “Дослідження впливу керованих параметрів СЕП на температуру в зоні впливу на підкладки оптичних інтегральних схем”, Вісн. Черкас. держ. технол. ун-ту. **2**, 111 – 115 (2009).

[11] І. В. Яценко, ”Дослідження впливу керованих параметрів СЕП на термопружні напруження у поверхневих шарах оптичних прямокутних елементів”, Вісн. Черкас. держ. технол. ун-ту. **3**, 88 – 94 (2009).

[12] І. В. Яценко, В. А. Ващенко, В. В. Цибулін, І. А. Рева та О. М. Чепурна, ”Підвищення ефективності електронної мікрообробки виробів з оптичних матеріалів”, Вісн. Черкас. держ. технол. ун-ту. **1**, 74 – 81 (2010).

Здобувачу належить ідея підвищення ефективності електронно-променевої обробки оптичних елементів шляхом встановлення оптимальних параметрів променя, що не призводить до руйнування елементів.

[13] І. В. Яценко І. В., В. А. Ващенко, В. В. Цибулін, І. В. Рева та О.М. Чепурна, ”Вплив параметрів стрічкового електронного потоку на температурні поля в елементах ВОЛЗ”, Вісн. Черкас. держ. технол. ун-ту. **3**, 107 – 113 (2010).

Автором проведено аналіз впливу діапазонів зміни параметрів електронного променя на стан поверхні оптичних елементів та властивості їх поверхневих шарів, визначено діапазони зміни їх властивостей, що покращують експлуатаційні характеристики елементів.

[14] Ю. І. Коваленко, М. О. Бондаренко, І. В. Яценко, М. П. Рудь та Г. В. Канашевич, ”Модифікація нанорельєфу на оптичному склі електронно-променевою мікрообробкою”, Вісн. Черкас. держ. технол. ун-ту. **4**, с. 159 – 165 (2010).

Здобувачем запропоновано метод очищення поверхні елементів з оптичного скла та зменшення на ній залишкових мікрошорсткостей за допомогою електронного променя, що впливають на коефіцієнт пропускання ІЧ-випромінювання, підвищують точність та розширюють діапазони вимірювань оптичних приладів.

[15] І. А. Рева, М. О. Бондаренко, Ю. І. Коваленко, Г. В. Канашевич, І. В. Яценко та В. А. Ващенко, “Дослідження впливу морської води на мікрогеометрію металевих покриттів на оптичному склі К8”, Вісн. Приазов. держ. техн. ун-ту. **20**, 222 – 225 (2010). **(Видання включене до міжнародних науково-метричних баз даних Google Scholar, Russian Science Citation Index, Ukrainian abstract journal “Dzherelo”, Referativnyi Zhurnal (VINITI)).**

Здобувачу належить ідея підвищення стійкості оксидних покриттів до агресивних середовищ шляхом їх фінішної електронно-променевої обробки.

[16] М. О. Бондаренко, В. А. Ващенко, С. О. Білокінь, Ю. Ю. Бондаренко, І. В. Яценко та І. А. Рева, “Вивчення умов утворення наноструктур на поверхнях п’єзоелектричних керамік під дією стрічкового електронного потоку”, Вісн. Східноукр. Нац. ун-ту ім. В. Даля. **8** (162), 30 – 34 (2011). **(Видання включене до міжнародної науково-метричної бази даних Google Scholar).**

Автором запропоновано метод покращення властивостей поверхневих шарів керамічних матеріалів, що призводять до підвищення їх стійкості до зовнішніх термовпливів при експлуатації.

[17] М. П. Рудь, Г. В. Канашевич, В. П. Бойко, М. О. Бондаренко, Ю. І. Коваленко, І. В. Яценко та В. А. Ващенко “Моделювання та алгоритм оптимального керування процесом електронно-променевої обробки оптичних матеріалів”, Наук. пр.: наук.-метод. журн. “Комп’ютерні технології” ЧДУ ім. П. Могили. Миколаїв. **173** (161), 150 – 155 (2011). **(Видання включене до міжнародної науково-метричної бази даних Google Scholar).**

Автором запропоновано програму керування параметрами електронного променя, що контролює діапазони зміни його оптимальних параметрів, які максимально покращують властивості поверхневих шарів оброблюваних елементів.

[18] І. В. Яценко, В. А. Ващенко, В. В. Цибулін, І. А. Рева та О. М. Чепурна, “Дослідження впливу параметрів СЕП на розподіли температур в елементах мікрооптики”, Вісн. Черкас. держ. технол. ун-ту. **1**, 104 – 107 (2012).

Здобувачем запропоновано метод визначення залежностей максимальної температури поверхні оптичних елементів від параметрів електронного променя, контроль за зміною яких попереджає можливі руйнування елементів та вихід з ладу приладів.

[19] І. В. Яценко, В. С. Антонюк, О. В. Кириченко та В. А. Ващенко, ”Визначення критичних значень параметрів зовнішніх термодій на оптичні елементи точного приладобудування”, Вісн. Нац. техн. ун-ту України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”. **51** (1), 71 – 75 (2016). **(Видання включене до міжнародних науково-метричних баз даних Google Scholar, Russian Science Citation Index, Ukrainian abstract journal “Dzherelo”, Referativnyi Zhurnal (VINITI))**

Здобувачем запропоновано метод визначення критичних значень зовнішніх теплових потоків та часу їх дії на плоскі оптичні елементи, перевищення яких призводить до їх руйнування та виходу з ладу приладів.

[20] І. В. Яценко, ”Визначення критичних параметрів зовнішніх термодій на прямокутні оптичні елементи точного приладобудування”, Наука та вир-во: міжвузів. темат. зб. наук. пр. Приазов. держ. техн. ун-ту. Маріуполь. **17**, 5 – 13 (2017). **(Видання включене до міжнародних науково-метричних баз даних Google Scholar, Russian Science Citation Index, Ukrainian abstract journal “Dzherelo”, Referativnyi Zhurnal (VINITI)).**

[21] I. V. Yatsenko, “Improvement of Surface Layers Properties of Precision Engineering Elements of Optical Ceramics by Preliminary Electron-beam Surfacing”, “Pratsi. Odes’kyi Politechnichniy Universytet”. **2** (49), 88 – 96 (2016). **(Видання включене до міжнародних науково-метричних баз даних Citefactor, CrossRef, EBSCO (Applied Sciences Collection), Global Impact Factor, Google Scholar, Index Copernicus, Universal Impact Factor).**

[22] І. В. Яценко, В. С. Антонюк, В. І. Гордієнко, О. В. Кириченко, В. А. Ващенко та В. В. Холін, “Підвищення надійності лазерних медичних приладів шляхом фінішної електронно-променевої обробки торцевих поверхонь їх світловодів”, Зб. наук. пр. Луцьк. нац. ун-ту. **9** (2), 154 – 160 (2016).

Здобувачем встановлено оптимальні діапазони зміни параметрів електронного променя, в межах яких спостерігається найбільш істотне покращення властивостей поверхневих шарів торцевих поверхонь світловодів.

[23] І. В. Яценко, В. І. Гордієнко, О. В. Кириченко, В. А. Ващенко та В. В. Цибулін, "Визначення термоударних зовнішніх дій на ІЧ-прилади при їх експлуатації", Вісн. Черкас. держ. технол. ун-ту. **3**, 95 – 102 (2016).

Здобувачем запропоновано метод визначення на поверхні оптичних обтічників ІЧ-приладів зон з максимальними зовнішніми термовпливами, де відбувається їх руйнування в умовах пострілу та польоту.

[24] І. В. Яценко, В. І. Гордієнко, О. В. Кириченко, В. А. Ващенко та В. В. Цибулін, "Визначення розподілів температури та термопружних напружень по товщині оптичних обтічників ІЧ-приладів в умовах інтенсивних зовнішніх термодій", Вісн. Черкас. держ. технол. ун-ту. **4**, 20 – 27 (2016).

Автором розроблено метод визначення критичних значень швидкостей надзвукового обдуву потоком повітря та тривалості його дії на обтічники, контроль яких попереджає їх руйнування та відмови ІЧ-приладів при експлуатації.

[25] I. V. Yatsenko, V. I. Hordienko and V. V. Kholin, "Improving the Reliability of Pulsed Laser Rangefinder and Infrared Devices of Homing and Surveillance by Final Electron Beam Processing of their Optical Components", Pratsi Odes'kyi Politechnichnyi Universytet. **1** (51), 72 – 81 (2017). **(Видання включене до міжнародних науково-метричних баз даних Citefactor, CrossRef, EBSCO (Applied Sciences Collection), Global Impact Factor, Google Scholar, Index Copernicus, Universal Impact Factor).**

Автором визначено ймовірність безвідмовної роботи ІЧ-приладів самонаведення та спостереження за результатами випробувань оптичних обтічників в умовах надзвукового обдуву потоком повітря.

[26] I. V. Yatsenko, V. S. Antoniuk, V. I. Hordienko, O. V. Kyrychenko and V. V. Kholin, "Improvement of Metrological Specifications of Impulse Laser Rangefinders by Finishing Electron Ray Processing of their Optical Elements", Вісн.

Нац. техн. ун-ту України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”. **52** (2), 52 – 57 (2016). **(Видання включене до міжнародних науково-метричних баз даних Google Scholar, Russian Science Citation Index, Ukrainian abstract journal “Dzherelo”, Referativnyi Zhurnal (VINITI)).**

Автором визначено точність та діапазони вимірювань імпульсних лазерних далекомірів за результатами випробувань.

[27] I. V. Yatsenko, “Influence Patterns of the Finishing Electron Beam Treatment of the Surface of Optical Parts on their Physical-mechanical Properties”, Journal of Multidisciplinary Engineering Science Studies (JMESS). Germany. **3** (5), 1764 – 1770 (2017), <<http://www.jmess.org/wp-content/uploads/2017/05/JMESSP13420346.pdf>>. **(Іноземне видання).**

[28] В. С. Антонюк, С. А. Билоконь, М. А. Бондаренко, Ю. Ю. Бондаренко, О. В. Кириченко и И. В. Яценко, “Особенности измерения микротвердости диэлектрических поверхностей кремниевым зондом атомно-силового микроскопа”, Ежем. науч.-техн. и произв. журн. “Наноинженерия” (Машиностроение. Москва). **3** (33), 13 – 16 (2014). **(Іноземне видання).**

Автором проведено аналіз методів вимірювання микротвердості поверхні оптичних елементів, показано переваги методу АСМ.

[29] I. Yatsenko, V. Antoniuk, M. Bondarenko and V. Vashchenko, “Influence of Parameters by Electronic Ray on Properties of Superficial Layers of Optical Elements of Exact Instrument-making”, Int. J. for Science and Innovations for the Industry “Innovations in Discrete Productions”. **1**, 13 – 15 (2015), <<http://www.stumejournals.com/innovations/archive/2015/1-2015.pdf>>. **(Іноземне видання).**

Здобувачем розроблено метод покращення властивостей поверхневих шарів елементів з оптичного скла за допомогою їх електронно-променевої обробки, що дозволяє підвищувати точність та розширювати діапазони вимірювань оптичними приладами, збільшувати ймовірність їх безвідмовної роботи.

[30] И. В. Яценко, В. С. Антонюк, В. А. Ващенко и В. В. Цыбулин, "Тепловое воздействие сверхзвукового газового потока на поверхность оптических обтекателей ИК-приборов", Ежем. науч.-техн. и произв. журн. "Наноинженерия" (Машиностроение. Москва). **10** (52), 38 – 42 (2015). **(Іноземне видання).**

Автором запропоновано метод визначення розподілів теплового потоку вздовж поверхні обтічників, які викликають їх руйнування, що знижує безвідмовність роботи ІЧ-приладів.

[31] И. В. Яценко, В. С. Антонюк, В. А. Ващенко и В. В. Цыбулин, "Определение критических значений параметров внешних термовоздействий на поверхность обтекателей ИК-приборов в условиях выстрела и полета", Ежем. науч.-техн. и произв. журн. "Наноинженерия" (Машиностроение. Москва) . **12** (54), 20 – 25 (2015). **(Іноземне видання).**

Автором запропоновано метод визначення критичних значень швидкостей обдуву потоком повітря оптичних обтічників ІЧ-приладів, перевищення яких призводить до їх руйнування.

[32] И. В. Яценко, В. С. Антонюк, В. А. Ващенко и В. В. Цыбулин, "Упреждение возможных разрушений оптических обтекателей ИК-приборов в условиях выстрела и полета", Ежем. науч.-техн. и произв. журн. "Наноинженерия" (Машиностроение. Москва). **12** (54), 26 – 31 (2015). **(Іноземне видання).**

Здобувачем розроблено метод попередження руйнувань обтічників ІЧ-приладів в умовах пострілу та польоту шляхом фінішної електронно-променевої обробки електронним променем ділянок на їх поверхнях, що піддаються максимальним зовнішнім термодіям.

[33] I. Yatsenko, V. Antoniuk, O. Kiritchenko and V. Vashchenko, "Improvement of Technical and Operational Characteristics of Devices with Optical Elements by Preliminary Electron Beam Treatment of their Surface", Int. J. for Science, Technics and Innovations for the Industry "Machines. Technologies.

Materials”. **6**, 47 – 50 (2016), <<http://www.stumejournals.com/mtm/Archive/2016/6-2016.pdf>>. **(Іноземне видання)**.

Здобувачем розроблено метод покращення властивостей поверхневих шарів елементів з оптичного скла, підвищення експлуатаційних характеристик приладів шляхом фінішної електронно-променевої обробки їх робочих поверхонь.

[34] I. Yatsenko, V. Antoniuk, O. Kiritchenko, V. Vashchenko and V. Tsybulin, "Increasing the Resistance of Precision Instrument-making Elements from Optical Glass to External Thermo-influences by Preliminary Electron-beam Processing of Surfaces". Int. J. for Science and Innovations for the Industry "Innovations in Discrete Productions". **1**, 9 – 12 (2016), <<http://www.stumejournals.com/innovations/archive/2016/1-2016.pdf>>. **(Іноземне видання)**.

Здобувачем розроблено засіб підвищення стійкості елементів з оптичної кераміки до зовнішніх термодій за допомогою рухомого електронного променя, що дозволяє підвищувати безвідмовність роботи приладів.

[35] I. Yatsenko, V. Antoniuk, O. Kiritchenko and V. Vashchenko, "Improving the reliability instruments of measuring and thermal control of objects of different physical nature by the finish of electron beam processing surfaces of optical elements", Int. J. for Science and Innovations for the Industry "Machines. Technologies. Materials". **1**, 20 – 23 (2017), <<http://www.stumejournals.com/mtm/Archive/2017/1-2017.pdf>>. **(Іноземне видання)**.

Автором розроблено метод визначення оптимальних діапазонів зміни параметрів електронного променя, що призводить до суттєвого підвищення стійкості оптичних елементів до зовнішніх теплових та механічних впливів.

[36] I. Yatsenko, "Improvement of Performance Characteristics of Optical Elements by Using Electron Beam Treatment", Worldwide Journal of Multidisciplinary Research and Development. **3** (8), 18 – 26 (2017), <<http://wwjmr.com/vol%203/issue8/assets/14.1.pdf>>. **(Іноземне видання)**.

[37] I. Yatsenko, V. Antoniuk, O. Kiritchenko, V. Gordienko and V. Vashchenko, "Improvement of optical characteristics of components of

optoelectronic devices in the harsh conditions of their functioning by using electron beam technology”, Int. Sci. J. “Material Science. Nonequilibrium Phase Transformations”. 2, 42 – 48 (2017), <<http://www.stumejournals.com/ms/archive/2017/2-2017.pdf>>. (Іноземне видання).

Здобувачем запропоновано метод підвищення точності та розширення діапазонів вимірювання приладів, збільшення їх безвідмовної роботи при експлуатації за допомогою електронно-променевої технології.

[38] Г. В. Канашевич, Ю. І. Коваленко, М. О. Бондаренко, В. А. Ващенко, В. П. Бойко, М. П. Рудь, та І. В. Яценко, “Пристрій для електронно-променевого полірування виробів”, Патент України № 4177 (17 Січень, 2005).

Участь у створенні винаходу всіх співавторів однакова.

[39] С. О. Білокінь, В. С. Антонюк, Ю. І. Коваленко, М. О. Бондаренко, І. В. Яценко та П. О. Фіалковський, “Спосіб позиціонування лазерного променя на зонд атомно-силового мікроскопа”, Патент України № 91523 (10 Липень, 2014).

Участь у створенні винаходу всіх співавторів однакова.

[40] М. П. Рудь, В. П. Бойко, Г. В. Канашевич, Ю. І. Коваленко, М. О. Бондаренко, І. В. Яценко та В. А. Ващенко, ”Визначення розподілу густини струму стрічкового електронного потоку при обробці оптичних матеріалів”, в: Динаміка наукових досліджень – 2006: Матеріали V міжнародної науково-практичної конференції (Наука і освіта, Дніпропетровськ, 2006), с. 45 – 47.

Автором проаналізовано методи зондування електронного променя, встановлено діапазони зміни його основних параметрів (густина теплової дії, швидкості руху), що впливають на властивості поверхневих шарів оптичних елементів та на характеристики приладів.

[41] М. А. Бондаренко, Ю. Б. Шевченко, В. П. Бойко, Ю. І. Коваленко, І. В. Яценко, Г. В. Канашевич та В. А. Ващенко, “Исследование микрогеометрии поверхности оптических стекол после электронной и после лазерной обработки методом атомно-силовой микроскопии”, в: Методологические аспекты

сканирующей зондовой микроскопии: Материалы VII международного семинара (г. Минск, Беларусь, 2006), с. 139 – 142.

Здобувачем зроблено порівняльний аналіз електронного та лазерного методів обробки поверхонь елементів з оптичного скла; встановлено основні переваги електронного променя, що дозволяють більш ефективно використовувати його у оптичному приладобудуванні.

[42] Г. В. Канашевич, М. О. Бондаренко, М. П. Рудь, В. П. Бойко, Ю. І. Коваленко, І. В. Яценко та В. А. Ващенко, “Впровадження комп’ютеризованої системи керування у процес електронної обробки оптичних матеріалів”, в: Эффективность реализации научного, ресурсного и промышленного потенциала в современных условиях: Материалы VII щорічної міжнародної промислової конференції (п. Славское, Карпаты, 2007), с. 460.

Автором розроблено алгоритм оптимального керування електронно-променевою обробкою оптичних елементів, що дозволяє більш ефективно покращувати властивості їх поверхневих шарів, які впливають на метрологічні характеристики та надійність приладів.

[43] М. О. Бондаренко, Ю. Ю. Бондаренко, Г. В. Канашевич, І. В. Яценко, В. А. Ващенко и Л. И. Конопальцева, “Исследование поверхностей пьезокерамических элементов, модифицированных электронным потоком методом атомно-силовой микроскопии”, в: Методологические аспекты сканирующей зондовой микроскопии “БелСЗМ-8”: Материалы VIII Международного семинара (г. Минск, Беларусь, 2008), с. 23 – 26.

Здобувачем встановлено оптимальні режими електронно-променевої обробки п’єзокерамічних елементів.

[44] Г. В. Канашевич, М. О. Бондаренко, Ю. Ю. Бондаренко, І. В. Яценко та В. А. Ващенко, “Вивчення впливу високих температур на мікрогеометрію поверхні оптичного скла та п’єзоелектричних керамік”, в: Природничі науки та їх застосування в діяльності служби цивільного захисту: Материалы II міжнародної науково-практичної конференції (АПБ ім. Героїв Чорнобиля МНС України, Черкаси, 2008), с. 132 – 134.

Автором встановлено оптимальні режими нагріву електронним променем поверхонь елементів з оптичного скла, що їх не руйнують та найбільш суттєво покращують властивості їх поверхневих шарів та характеристики приладів.

[45] М. П. Рудь, В. П. Бойко, М. О. Бондаренко, Ю. І. Коваленко, І. В. Яценко та В. А. Ващенко, “Дослідження просторово-енергетичних характеристик електронного потоку стрічкової форми”, в: Эффективность реализации научного, ресурсного и промышленного потенциала в современных условиях: Материалы X Юбилейной международной промышленной конференции (п. Славское, Карпаты, 2010), с. 162 – 164.

Здобувачем встановлено розподіл основних енергетичних характеристик стрічкового електронного променя вздовж його перерізу, керуючи якими можна покращувати експлуатаційні характеристики оптичних елементів.

[46] М. А. Бондаренко, В. А. Ващенко, И. А. Рева, Ю. Ю. Бондаренко, Г. В. Канашевич, та И. В. Яценко, “Методика измерения толщины тонких несплошных покрытий на диэлектрических поверхностях методом атомно-силовой микроскопии”, в: Современные методы и средства неразрушающего контроля и технической диагностики: Материалы XVIII Ежегодной международной конференции и выставки (УИЦ “Наука. Техника. Технология”, Киев, 2010), с. 209 – 212.

Здобувачем запропоновано метод підвищення чистоти та гладкості поверхні оксидних покриттів на оптичних елементах за допомогою електронно-променевої технології.

[47] Ю. И. Коваленко, Г. В. Канашевич, В. П. Бойко, В. А. Ващенко, М. П. Рудь та И. В. Яценко, ”Применение АСМ в исследовании стойкости к морской воде металлизированных поверхностей оптических стекол, модифицированных электронным потоком”, в: Методологические аспекты сканирующей зондовой микроскопии: Сборник докладов IX Международной конференции (Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАНБ, г. Минск, Беларусь, 2010), с. 50 – 56.

Здобувачем встановлено закономірності впливу параметрів електронного променя на стійкість оптичних елементів з оксидними покриттями до агресивних середовищ.

[48] И. В. Яценко, В. А. Ващенко, В. В. Цыбулин, И. А. Рева та О. Н. Чепурна, “Компьютерное моделирование температурных полей в многослойных оптических элементах при воздействии ленточного электронного потока”, в: Современные методы и средства неразрушающего контроля и технической диагностики: Материалы XVIII Международной конференции (г. Ялта, 2010), с. 215 – 217.

Здобувачем розроблено метод визначення критичних значень параметрів електронного променя, що призводить до руйнування багаточарових плоских оптичних елементів та відказу приладів.

[49] В. А. Ващенко, И. В. Яценко, Ю. И. Коваленко, И. А. Рева та В. П. Бойко, ”Особенности определения микрогеометрических характеристик наноразмерных оксидных покрытий на поверхностях оптических диэлектриков методом атомно-силовой микроскопии”, в: Современные методы и средства неразрушающего контроля и технической диагностики: Материалы XIX Международной конференции (г. Гурзуф, 2011), с. 193 – 195.

Здобувачем зроблено аналіз результатів вимірювання мікрогеометричних характеристик оксидних покриттів на оптичних матеріалах методом АСМ.

[50] М. А. Бондаренко, И. В. Яценко, П. В. Петлеваный, Ю. И. Коваленко та В. А. Ващенко, ”Применение метода атомно-силовой микроскопии в изучении доменно-диссипативных структур, сформированных в пьезокерамике электронно-лучевым методом”, в: Методологические аспекты сканирующей зондовой микроскопии: Сборник докладов X Международной конференции (Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАНБ, г. Минск, Беларусь, 2012), с. 48 – 52.

Автором розроблено методику попереднього очищення п'єзокерамічних елементів рухомим скануючим електронним променем.

[51] Ю. И. Коваленко, М. П. Рудь, И. В. Яценко, А. В. Котляр, В. П. Бойко та В. А. Ващенко, “Изучение упорядоченных структур, сформированных на металлизированных поверхностях диэлектриков комбинированной электронной технологией”, в: РКЭМ-2012: Материалы XXIV Российской конференции по электронной микроскопии (г. Черногловка, 2012), с. 97.

Здобувачем встановлено оптимальні режими комбінованої електронно-променевої обробки діелектричних поверхонь.

[52] Ю. И. Коваленко, И. А. Рева, В. А. Андриенко, И. В. Яценко, Ю. Ю. Бондаренко, М. А. Бондаренко та Е. В. Скорина, ”Особенности строения оксидных покрытий на оптических диэлектриках после их электронно-лучевой обработки”, в: Тезисы докладов XVIII Российского симпозиума по растровой электронной микроскопии и аналитическим методам исследования твердых тел (РАН, 2013), с. 298 – 299.

Здобувачем проведено аналіз структури оксидних покриттів на оптичному склі до та після їх електронно-променевої обробки.

[53] В. С. Антонюк, Ю. И. Коваленко, М. А. Бондаренко та И. В. Яценко, ”Модифицирование металлизированных поверхностей ленточным электронным потоком”, в: Инженерия поверхности и реновация изделий: Материалы 13-й Международной научно-технической конференции (г. Ялта, 2013), с. 15 – 19.
Автором встановлено залежності властивостей поверхневих шарів металізованих поверхонь від параметрів електронного променя.

[54] Y. I. Kovalenko, M. A. Bondarenko, E. V. Verstanova, I. V. Yatsenko, V. A. Andrienko and Y. Y. Bondarenko, “Study of Ordered Oxide Patterns Got on the Dielectric Surfaces with the Combined Electronic Technology”, в: Фізика і технологія тонких плівок та наносистем: Матеріали XIV Міжнародної конференції МКФТТІН – XIV (м. Івано-Франківськ, 2013), с. 92.

Здобувачем визначено оптимальні діапазони зміни параметрів електронного променя при отриманні оксидних покриттів на поверхнях діелектричних матеріалів.

[55] М. А. Бондаренко, Ю. И. Коваленко, Ю. Ю. Бондаренко, С. А. Билоконь та И. В. Яценко, “Изучение механизма формирования ультра тонких функциональных покрытий на оптическом стекле при комбинированной электронно-лучевой микрообработке”, в: Современные проблемы физики конденсированного состояния, нанотехнологий и наноматериалов: Сборник трудов III международной научной конференции (г. Алматы, Казахстан, 2014), с. 64 – 65.

Автором розглянуто можливість впливу параметрів електронного променя на формування ультратонких покриттів на оптичному склі.

[56] І. В. Яценко, В. А. Ващенко, В. В. Цибулін та В. С. Антонюк, “Критичні значення параметрів зовнішніх термодій при поверхневому оплавленні оптичних елементів приладобудування”, в: Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем: Матеріали V Міжнародної науково-практичної конференції (м. Чернігів, 2015), с. 121 – 122.

Здобувачем розроблено метод визначення критичних значень зовнішніх теплових потоків та часу їх дії на елементи з оптичного скла, що призводять до їх руйнування та, у кінцевому підсумку, до порушення площинності.

[57] І. В. Яценко, В. С. Антонюк, О. В. Кириченко та В. А. Ващенко, “Покращення техніко-експлуатаційних характеристик приладів з оптичними елементами шляхом збільшення їх коефіцієнта пропускання ІЧ-випромінювання”, в: Инженерия поверхности и реновации изделий: Материалы 16 Международной научно-технической конференции (АТМ України, Київ, 2016), с. 185 – 187.

Автором розроблено метод підвищення точності та діапазонів вимірювання приладів з оптичними елементами шляхом покращення властивостей їх поверхневих шарів після електронно-променевої обробки.

[58] І. В. Яценко, В. С. Антонюк, В. І. Гордієнко, О. В. Кириченко та В. А. Ващенко, “Підвищення метрологічних характеристик та надійності приладів для вимірювання та теплового контролю об’єктів різної фізичної природи шляхом електронно-променевої обробки їх оптичних елементів”, в:

Приладобудування та метрологія: сучасні проблеми, тенденції розвитку: Матеріали II всеукраїнської науково-практичної конференції (м. Луцьк, 2016), с. 100 – 101.

Автором показано можливості підвищення техніко-експлуатаційних характеристик оптичних приладів завдяки цілеспрямованій зміні фізико-механічних та теплофізичних властивостей поверхневих шарів оптичних елементів шляхом їх модифікації за допомогою електронно-променевої обробки.

[59] І. В. Яценко, В. С. Антонюк, В. І. Гордієнко, О. В. Кириченко та В. А. Ващенко, “Підвищення метрологічних характеристик та надійності лазерних далекомірів шляхом фінішної електронно-променевої обробки їх оптичних вікон”, в: Спеціальне приладобудування: стан та перспективи: Збірник тез доповідей 2-ї Української науково-технічної конференції (КП СПБ “Арсенал”, Київ, 2016), с. 147 – 150.

Автором запропоновано метод підвищення точності та розширення діапазонів вимірювання імпульсними лазерними далекомірами шляхом фінішної електронно-променевої обробки оптичних входних вікон приймального та передавального каналів.

ЗМІСТ

ВСТУП	36
РОЗДІЛ 1. СТАН ПРОБЛЕМИ ТА СУЧАСНІ ТЕНДЕНЦІЇ ЇЇ ВИРІШЕННЯ	48
1.1. Вимоги до параметрів якості оптичних елементів, які впливають на їх експлуатаційні характеристики.	49
1.2. Закономірності впливу стану поверхневого шару на міцність оптичних деталей.	56
1.3. Аналіз фізико-технічних методів обробки оптичних елементів, які модифікують їх поверхневі шари.	59
1.3.1. Механічні, хімічні, хіміко-механічні та теплові методи обробки оптичних елементів у порівнянні з електронно-променевим методом.	60
1.3.2. Методи математичного моделювання та визначення допустимих режимів обробки оптичних елементів концентрованими потоками енергії.	73
1.4. Аналіз впливу зовнішніх термічних та механічних дій, а також умов експлуатації надзвукової техніки на експлуатаційні характеристики оптичних елементів.	77
1.4.1. Методи визначення критичних значень параметрів зовнішніх термічних впливів, контроль яких дозволяє попереджати погіршення експлуатаційних характеристик оптичних елементів та їх руйнування.	79
Висновки до розділу 1, мета і задачі дослідження	84
РОЗДІЛ 2. ЗРАЗКИ ОПТИЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ, ФІЗИКО-ХІМІЧНІ МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ, ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВЕ ТЕХНОЛОГІЧНЕ ОБЛАДНАННЯ ТА ЛАБОРАТОРНО-ВИПРОБУВАЛЬНІ УСТАНОВКИ	88
2.1. Загальна методика досліджень.	88
2.2. Основні характеристики зразків оптичних елементів.	89
2.3. Методи експериментальних та теоретичних досліджень фізико-механічних характеристик поверхневих шарів оптичних елементів, які	

	32
модифіковані електронним променем.	93
2.4. Технологічне електронно-променеве обладнання для обробки поверхонь оптичних елементів.	104
2.4.1. Особливості термічної дії потоку електронів на поверхню оптичного елемента.	104
2.4.2. Технологічне обладнання та його основні елементи	105
2.5. Випробувальні установки для дослідження впливу параметрів зовнішніх термодій на оптичні елементи, яким вони піддаються при експлуатації.	116
2.5.1. Установка для дослідження впливу підвищених температур нагріву (до 1500 К) та зовнішніх тисків (до 10^7 Па) на оптичні елементи.	116
2.5.2. Установка для дослідження впливу підвищених швидкостей обдуву потокком повітря (до $2 \cdot 10^3$ м/с) і кутових швидкостей вісесиметричного обертання (до $4 \cdot 10^3$ рад/с) на оптичні елементи.	120
Висновки до розділу 2.	125
 РОЗДІЛ 3. ВИЗНАЧЕННЯ ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ ВПЛИВУ ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВОЇ ТЕХНОЛОГІЇ НА ЕКСПЛУАТА- ЦІЙНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОПТИЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ.	
3.1. Особливості електронно-променевої обробки оптичних елементів. . .	127
3.2. Закономірності впливу режимів електронно-променевої обробки на експлуатаційні характеристики елементів з оптичного скла	129
3.3. Закономірності впливу режимів електронно-променевої обробки на експлуатаційні характеристики елементів з оптичної кераміки	138
3.4. Закономірності впливу режимів електронно-променевої обробки на стійкість оптичних елементів до зовнішніх термічних та механічних впливів.	146
3.5. Експериментально-статистичні моделі для визначення закономір- ностей впливу режимів електронно-променевої обробки на експлуатаційні характеристики оптичних елементів.	157

Висновки до розділу 3.	164
РОЗДІЛ 4. МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ КРИТИЧНИХ ЗНАЧЕНЬ ПАРАМЕТРІВ ЗОВНІШНІХ ТЕРМОВПЛИВІВ НА ОПТИЧНІ ЕЛЕМЕНТИ.	168
4.1. Математичні моделі процесів зовнішнього нагріву оптичних елементів.	169
4.1.1. Визначення критичних значень зовнішніх теплових потоків та часу їх впливу що призводять до руйнування оптичних елементів	182
4.2. Математичне моделювання процесів поверхневого оплавлення оптичних елементів.	192
4.2.1. Визначення критичних значень зовнішніх теплових потоків та часу їх впливу, що призводять до глибокого оплавлення оптичних елементів, порушення їх площинності та геометричної форми	204
4.3. Математична модель зовнішньої термоударної дії потоку повітря на оптичний обтічник в умовах експлуатації надзвукової техніки.	207
4.3.1. Визначення місць розташування на поверхні обтічника небезпечних ділянок, де вони піддаються максимальним термовпливам та руйнуванням	209
4.3.2. Визначення критичних значень швидкостей обдуву потоком повітря оптичних обтічників та часу його впливу, що призводять до руйнування на ділянках максимальних зовнішніх термовпливів	213
Висновки до розділу 4.	237
РОЗДІЛ 5. ПРАКТИЧНЕ ВИКОРИСТАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ РОБОТИ.	241
5.1. Розробка методу покращення експлуатаційних характеристик оптичних елементів за допомогою електронно-променевої технології.	241
5.1.1. Застосування методу покращення експлуатаційних характеристик оптичних елементів.	244
5.2. Метод визначення та контролю критичних значень параметрів зовнішніх термовпливів, який дозволяє попереджати погіршення	

експлуатаційних характеристик оптичних елементів.	248
5.2.1. Застосування методу для визначення критичних значень параметрів зовнішніх термовпливів на оптичні елементи	257
5.3. Застосування розроблених методів для покращення техніко-експлуатаційних характеристик оптико-електронних приладів.	261
5.3.1. Підвищення точності та розширення діапазонів вимірювання дальності імпульсними лазерними далекомірами прицільних комплексів шляхом електронно-променевої обробки робочих поверхонь їх оптичних вікон	262
5.3.2. Підвищення ймовірності безвідмовної роботи волоконно-оптичних світловодів лазерних медичних приладів при їх експлуатації	265
5.3.3. Підвищення ймовірності безвідмовної роботи оптичних обтічників ІЧ-приладів при експлуатації	267
5.3.4. Використання розроблених методів на підприємствах оптичного приладобудування, а також окремих результатів роботи у навчальному процесі ВНЗ України	270
5.4. Перспективи подальшого практичного використання електронно-променевої технології в точному приладобудуванні.	271
5.4.1. Обробка криволінійних поверхонь оптичних елементів та створення на них функціональних мікропрофілів різної геометричної форми за допомогою системи нерухомих одиничних електронних променів	272
5.4.2. Покращення фізико-механічних властивостей поверхонь елементів з п'єзокераміки за допомогою електронно-променевої технології	297
5.4.3. Підвищення якості теплоізоляційних та зносостійких нанорозмірних оксидних покриттів на поверхнях оптичних елементів за допомогою електронно-променевої технології	299
Висновки до розділу 5.	308
ОСНОВНІ ВИСНОВКИ ТА РЕЗУЛЬТАТИ РОБОТИ.	311
ПОСИЛАННЯ	314

ДОДАТОК А Пакет прикладних програм “ППП1” для математичної обробки експериментальних даних та визначення впливу режимів електронно-променевої технології на експлуатаційні характеристики оптичних елементів оптико-електронних приладів	347
ДОДАТОК Б Пакет прикладних програм “ППП2” для визначення розподілів температур та термопружних напружень, товщин оплавлених шарів у оптичних елементах в умовах зовнішніх термовпливів, знаходження критичних значень їх параметрів.	370
ДОДАТОК В Пакет прикладних програм “ППП3” для розв’язку диференціальних рівнянь теплопровідності та термопружності для оптичних елементів, термогазодинамічних рівнянь нагріву оптичних обтічників ГЧ-приладів надзвуковим потоком повітря	377
ДОДАТОК Г Пакет прикладних програм “ППП4” з методів чисельної оптимізації технологічних режимів електронно-променевої обробки оптичних матеріалів	384
ДОДАТОК Д Програмне забезпечення для чисельного розв’язку задач реалізації заданих розподілених термовпливів вздовж поверхонь оптичних елементів за допомогою системи нерухомих одиничних електронних променів	410
ДОДАТОК Е. Документація про наукову значимість, практичне використання та впровадження основних результатів роботи	413
ДОДАТОК Ж. Список опублікованих праць за темою дисертації.	431

Вступ

Обґрунтування вибору теми дослідження. Сучасний рівень розвитку оптико-електронного приладобудування висуває підвищені вимоги до експлуатаційних характеристик їх оптичних елементів: мікротвердості поверхні; спектрального коефіцієнта пропускання; стійкості до зовнішніх термічних та механічних ударів тощо, які впливають на техніко-експлуатаційні характеристики приладів (імпульсних лазерних далекомірів приладів прицільних комплексів, лазерних медичних приладів, ГЧ-приладів тощо) [2, 6, 8, 25, 40, 43, 46, 56, 67, 75, 76, 83, 84, 88,89, 102, 104, 105, 108, 115, 119, 150 – 156, 159, 161 – 168, 170, 171, 179 – 183, 190 – 194, 203, 207, 214 – 217, 229, 234, 235, 242 – 248, 251, 287 – 289, 296, 297, 302 – 310, 313].

Широке використання традиційних методів підготовки й обробки поверхонь оптичних елементів (механічних, хімічних, хіміко-механічних) показало, що неможливо одержати одночасно чисту та бездефектну поверхню, а також бездефектні поверхневі шари, що призводить до погіршення техніко-експлуатаційних характеристик оптико-електронних приладів [3, 5, 15, 16, 22, 74, 78, 80, 118, 128, 138, 157, 160, 173, 212, 219, 221, 237, 244, 246, 285].

Фундаментальні дослідження, що проведені у області розробок нових високоінтенсивних технологій обробки різних матеріалів, у тому числі й оптичних матеріалів, показали, що найбільш перспективними джерелами енергії для таких технологій є сфокусовані потоки заряджених частинок (електронів, іонів), лазерне випромінювання та ін. [17, 24, 27, 28, 36, 41, 47, 49, 52, 55, 57, 66, 68, 85 – 87, 101, 111 – 116, 158, 184 – 188, 195, 202, 209, 225, 226, 238, 252, 282, 286, 290, 295, 298 – 301, 309, 312 – 315]. Це обумовлено тим, що концентровані потоки енергії характеризуються широкими діапазонами зміни густини їх теплової дії q у зонах впливу ($q=10^6\dots10^{13}$ Вт/м²) і часу τ взаємодії ($\tau=10^{-8}\dots10^2$ с), малими розмірами l цих зон ($l=10^{-6}\dots10^{-3}$ м), що дозволяє реалізувати в зоні обробки високі температури нагріву (до 2000...3000 К), градієнти температур (до $10^8\dots10^{13}$ К/м) та швидкості нагріву (до $10^3\dots10^5$ К/с). Однак застосування цих технологій для обробки оптичних елементів виявило

ряд недоліків, які обмежують можливості їх широкого використання у оптико-електронному приладобудуванні. Так, при іонній обробці на поверхні елементів утворюються зони з підвищеними температурами та фізико-механічними властивостями, що відрізняються від основного матеріалу, що призводить до виникнення критичних термічних напружень та руйнування їх поверхневих шарів тощо. У випадку лазерної обробки до числа недоліків відносяться: порушення мікрогеометрії поверхні; формування локальних високотемпературних зон з великими градієнтами температур, при яких термонапруження перевищують гранично допустимі значення та відбувається руйнування; складність керування (особливо скануючим лазерним променем) та ін..

Як показала практика, найбільш зручним, екологічно чистим та легкокерованим способом обробки оптичних елементів є електронно-променевий метод [36, 49, 52, 55, 57, 111 – 116, 158, 225, 226, 252, 295, 299, 301]. Було показано можливості застосування рухомого електронного променя стрічкової форми для полірування елементів з оптичного скла та одержання поверхонь високої чистоти з мінімальною шорсткістю, а також для зміцнення елементів з оптичної кераміки та одержання поверхонь з підвищеною мікротвердістю та товщиною зміцнених шарів у десятки мкм.

Значний внесок у вирішення багатьох проблем у області формування теоретичних та практичних засад удосконалення оптико-електронних приладів, проектування оптичних приладів, що мають промислове, медичне та військове призначення, та, зокрема, з використанням фізико-технічних методів фінішної обробки поверхневих шарів їх оптичних елементів, зробили вчені, а саме: Борисюк М. Д., Головка Л. Ф., Гордієнко В. І., Глущенко О. Р., Дудко Г. В., Коваленко В. С., Колобродов В. Г., Лисоченко В. М., Лихоліт М. І., Маслов В. П., Молодик А. В., Павлов С. В., Поперенко Л. В., Рикалін М. М., Розуменко В. Д., Углов О. О., Черняк С. І. та ін. [43, 83 – 86, 89, 102, 105, 138, 140, 141, 147 – 152, 168, 170, 171, 179 – 183, 190 - 193, 203, 214, 246 – 248, 287, 296, 305 -307, 310].

На даний час широке використання електронно-променевої технології в оптико-електронному приладобудуванні стримується відсутністю даних: щодо впливу режимів електронно-променевої обробки на кількісні характеристики якості поверхні та поверхневих шарів оптичних елементів; щодо визначення діапазонів зміни режимів електронно-променевої обробки, в межах яких відбувається покращення експлуатаційних характеристик оптичних елементів, керування якими дозволяє підвищувати техніко-експлуатаційні характеристики приладів, зокрема точність та діапазони вимірювань, ймовірність безвідмовної роботи тощо; щодо закономірностей впливу зовнішніх термічних та механічних дій на необроблені та оброблені електронним променем оптичні елементи, а також щодо визначення критичних значень їх параметрів, контроль яких попереджає погіршення експлуатаційних характеристик елементів та подальше руйнування.

При експлуатації оптичних елементів в умовах застосування надзвукової техніки практичне значення має попереднє визначення критичних значень параметрів зовнішніх термоударних впливів (швидкостей обдуву потоком повітря, часу його дії, режимів обтікання тощо) та місць розташування небезпечних ділянок на поверхні елементів, що піддаються максимальним впливам та які необхідно заздалегідь обробляти електронним променем для попередження руйнувань. Але на даний час дослідження за вказаним напрямком обмежені або відсутні: не встановлені закономірності розподілу зовнішнього теплового потоку вздовж поверхні оптичних елементів; не розроблена математична модель зовнішніх термоударних впливів потоку повітря на їх поверхню; відсутні методи визначення критичних значень вказаних параметрів термовпливів.

Таким чином актуальними питаннями в галузі розширення використання електронно-променевої технології в оптико-електронному приладобудуванні є встановлення закономірностей впливу її режимів на експлуатаційні характеристики оптичних елементів, в межах яких вони покращуються, в результаті чого відбувається підвищення техніко-експлуатаційних

характеристик приладів, а також визначення критичних значень параметрів зовнішніх термічних та механічних впливів, яким піддаються прилади при експлуатації.

Рішенню вказаних питань присвячена дана дисертаційна робота.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дисертаційна робота виконана в Черкаському державному технологічному університеті на кафедрі фізики та пов'язана із тематикою науково-дослідних робіт: “Діагностика функціональних шарів у виробках мікрооптики і наноелектроніки, отриманих електронними технологіями” (№ ДР 0106U004500); “Технологічні основи електронної нанообробки поверхонь виробів з п'єзоелектричних керамік” (№ ДР 0109U002738); “Отримання та дослідження зносостійких покриттів на поверхнях оптичних виробів спеціального призначення комбінованим методом термічного випаровування” (№ ДР 011U000852); “Технологічні основи створення теплоізоляційних нанорозмірних оксидних покриттів на поверхнях оптичних діелектриків комбінованим термовакuumним осадженням” (№ ДР 0112U001701).

Мета і задачі дослідження. Мета роботи полягає у створенні науково-обґрунтованих основ покращення експлуатаційних характеристик оптичних елементів шляхом встановлення закономірностей впливу на них режимів електронно-променевої технології.

Для досягнення поставленої мети необхідно було вирішити такі основні наукові та прикладні завдання.

1. На основі аналізу стану проблеми обґрунтувати науковий підхід вирішення проблеми покращення експлуатаційних характеристик оптичних елементів за допомогою електронно-променевої технології.
2. Запропонувати методологію проведення експериментальних та теоретичних досліджень з впливу режимів електронно-променевої обробки на експлуатаційні характеристики оптичних елементів з врахуванням впливу зовнішніх температур нагріву, зовнішніх тисків, термічних та механічних ударів тощо.

3. Провести експериментальні дослідження з визначення закономірностей впливу режимів електронно-променевої обробки на експлуатаційні характеристики оптичних елементів, визначити їх діапазони зміни, в межах яких спостерігається покращення вказаних характеристик.
4. Провести експериментальні дослідження з визначення закономірностей впливу зовнішніх термічних та механічних дій на необроблені та оброблені електронним променем оптичні елементи, визначити діапазони зміни критичних значень їх параметрів, контроль за якими дозволить попереджати можливі руйнування елементів.
5. Розробити математичні моделі зовнішніх впливів на оптичні елементи, яким вони піддаються при експлуатації, визначити діапазони зміни критичних значень їх параметрів (теплових потоків, тисків, швидкостей обдуву потоком повітря, тривалості їх дії та ін.), а також місця розташування ділянок на поверхні елементів, які піддаються максимальному зовнішньому нагріву, що дозволить шляхом електронно-променевої обробки вказаних ділянок на стадії виготовлення елементів попереджати їх руйнування в умовах експлуатації.
6. На базі проведених теоретико-експериментальних досліджень розробити: метод покращення експлуатаційних характеристик оптичних елементів за допомогою електронно-променевої технології; метод попереднього визначення критичних значень параметрів зовнішніх впливів, який дозволяє оцінювати небезпечні чинники, контроль яких попереджає погіршення експлуатаційних характеристик оптичних елементів.
7. Впровадити розроблені методи для покращення техніко-експлуатаційних характеристик оптико-електронних приладів промислового та медичного призначення.
8. Визначити нові перспективні напрямки подальшого застосування електронно-променевої технології в оптико-електронному приладобудуванні.

Об'єкт дослідження: процеси електронно-променевої обробки поверхневих шарів оптичних елементів оптико-електронних приладів.

Предмет дослідження: закономірності впливу режимів електронно-променевої обробки оптичних елементів на їх експлуатаційні характеристики.

Методи досліджень. Для вирішення поставлених задач використовувались сучасні методи фізико-хімічного аналізу (контактні та безконтактні методи вимірювання температури, методи растрової електронної мікроскопії (РЕМ) та трансемісійної електронної мікроскопії (ТЕМ); методи атомно-силової мікроскопії (АСМ) та мікроідентування по Вікерсу; методи рентгеноструктурного та мікрорентгеноспектрального (МРСА) аналізів; спектрофотометричні методи, метод центрально-кільцевого вигину (ЦКВ); шлірен-фотографічні методи тощо), чисельно-аналітичні методи вирішення задач газодинаміки, нелінійної теплопровідності та термостійкості, а також методи математичної статистики для обробки експериментальних даних.

Дослідження впливу електронного променя на експлуатаційні характеристики оптичних елементів проводились на розробленому електронно-технологічному обладнанні, що дозволяє здійснювати вимірювання температури оброблюваної поверхні та зондування електронного променя для контролю його енергетичних характеристик при електронно-променевої обробці елементів.

При дослідженні необроблених та оброблених електронним променем зразків оптичних елементів в умовах зовнішніх впливів (термічні та механічні удари, умови експлуатації надзвукової техніки тощо) використовували комплекс стандартних випробувальних установок.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у наступному.

1. Вперше встановлено закономірності впливу режимів електронно-променевої технології на фізико-механічні властивості поверхневих шарів оптичних елементів, в межах яких відбувається: очищення поверхні елементів від дефектів, підвищення класу чистоти, зменшення мікрошорсткості, збереження площинності; зміна хімічного складу та структури поверхневих шарів; виникнення стискаючих напружень в поверхневих шарах елементів з оптичної кераміки, що призводить до утворення зміцнених шарів.

2. Вперше отримані закономірності впливу електронно-променевої технології на експлуатаційні характеристики оптичних елементів та визначені режими, в межах яких відбувається їх покращення: збільшення мікротвердості поверхні в 2...3 рази, збільшення спектрального коефіцієнта пропускання на 4...7%, підвищення стійкості оптичних елементів до зовнішніх теплових та механічних впливів тощо.
3. Розроблено уточнені математичні моделі зовнішнього нагріву оптичних елементів різної геометричної форми та розмірів (плоско-паралельні пластини; прямокутні, циліндричні та сферичні елементи) у частині врахування температурних залежностей їх теплофізичних характеристик, що дозволяють більш точно визначати критичні значення зовнішніх теплових потоків та тривалості їх впливу.
4. Розроблено нову математичну модель термоударної дії зовнішнього потоку повітря на оптичний обтічник в умовах експлуатації надзвукової техніки, що враховує: геометричну форму обтічника у вигляді півсферичної оболонки; розподіл зовнішнього теплового потоку вздовж поверхні обтічника в залежності від режиму обтікання; температурні залежності теплофізичних характеристик оптичного матеріалу (об'ємної теплоємності, коефіцієнта теплопровідності), яка дозволяє визначати критичні значення швидкостей потоку та тривалості його впливу, а також місця розташування небезпечних ділянок на поверхні обтічника, які піддаються максимальному нагріву.
5. Запропоновано новий науково-обґрунтований метод електронно-променевої обробки криволінійних поверхонь оптичних елементів та формування на них функціональних мікропрофілей різної геометричної форми за допомогою системи нерухомих дискретно розташованих електронних променів шляхом оптимізації технологічних параметрів установки (кількості променів, їх струмів, прискорюючих напруг та відстаней до оброблюваних поверхонь), що дозволяє створювати різні мікрооптичні деталі для оптико-електронних приладів.

6. Вперше розроблено методи покращення техніко-експлуатаційних характеристик оптико-електронних приладів шляхом електронно-променевої обробки їх оптичних елементів.

Практичне значення одержаних результатів. Результати дисертаційного дослідження становлять наукову основу для розробки, технічної реалізації та впровадження у виробництво технології електронно-променевої обробки оптичних елементів оптико-електронних приладів з метою покращення їх експлуатаційних характеристик. Практична цінність отриманих результатів полягає в наступному:

- розширено технологічні можливості застосування електронно-променевої обробки оптичних елементів в оптико-електронному приладобудуванні;

- створено науково-технічну базу електронно-променевої обробки, яка може широко використовуватися в оптичній промисловості, а також в технологіях інтегральної та волоконної оптики, оптоелектроніці тощо;

- розроблено методи, що покращують експлуатаційні характеристики оптичних елементів в умовах зовнішніх термічних та механічних впливів: метод підвищення експлуатаційних характеристик оптичних елементів приладів шляхом покращення стану їх поверхневих шарів за допомогою електронно-променевої технології; метод визначення та контролю критичних значень параметрів зовнішніх впливів, який дозволяє попереджати погіршення експлуатаційних характеристик оптичних елементів.

- розроблено модифіковане електронно-променеве технологічне обладнання, що має спеціалізовану програмно керовану оснастку для автоматизованого вимірювання та контролю температури оброблювальної поверхні та зондування електронного променя, яке захищене патентами України (№ 4177, № 91523) і впроваджене в практику експериментальних досліджень.

Результати теоретичних та експериментальних досліджень, а також розроблені методи знайшли практичне використання та впровадження

(підтверджено актами впровадження) на підприємствах України (КП СПБ "Арсенал", Інститут фізики напівпровідників ім. Лашкарьова (м. Київ), ПраТ "Авікос" (м. Львів), ДПНВК "Фотоприлад" (м. Черкаси), ПМПП "Фотоніка Плюс" (м. Черкаси)) та за кордоном (ДНВО "Центр" НАНБ (м. Мінськ, Білорусь), ІТМП НАНБ ім. А. В. Ликова (м. Мінськ, Білорусь), ТДВ "Мікротестмашини" (м. Гомель, Білорусь)). Впровадження засобів контролю та технологічних рекомендацій дозволило: підвищити точність та розширити діапазони вимірювання дальності імпульсних лазерних далекомірів на 7...15 %; збільшити ймовірність безвідмовної роботи оптичних обтічників ІЧ-приладів та волоконно-оптичних світловодів лазерних медичних приладів при експлуатації на 10...20 %; отримати економічний ефект 360 тис. гривень.

Отримані результати також знайшли застосування в учбовому процесі на кафедрі виробництва приладів Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського" в лекційних курсах «Оптичні та медичні прилади», «Матеріалознавство», «Нанотехнології в медичному приладобудуванні» та в Черкаському державному технологічному університеті в лекційних курсах «Технологія приладобудування», «Проектування оптико-електронних приладів», «Методи обробки поверхонь», «Фізико-хімічні основи обробки матеріалів КПЕ» (підтверджено актами впровадження).

Особистий внесок здобувача. Основні теоретичні, розрахункові та експериментальні результати отримано здобувачем самостійно. Наукові положення, що виносяться на захист, та висновки дисертаційної роботи належать автору.

У роботах, опублікованих у співавторстві:

- проведено аналіз: вимог до експлуатаційних характеристик оптичних елементів, які прийняті у оптико-електронному приладобудуванні; зовнішніх впливів на елементи, що призводять до їх руйнувань; особливостей сучасних фізико-механічних методів обробки елементів у порівнянні з електронно-променевою технологією, а також сформульовано науково-технічну

- проблему та визначено шляхи її вирішення [14, 26, 62, 56, 132, 222 – 224, 133, 259 – 263, 265, 266];
- проведено експериментальні дослідження з визначення закономірностей впливу режимів електронно-променевої технології на експлуатаційні характеристики оптичних елементів, а також знайдено оптимальні режими, що покращують ці характеристики [12, 29, 318, 133, 143, 220, 269, 316, 317, 319 - 321, 323, 325];
 - експериментально встановлено закономірності впливу зовнішніх термічних та механічних дій на оптичні елементи, визначено критичні значення їх параметрів, що призводять до руйнування елементів, сформульовано шляхи виключення виходу з ладу приладів [268, 272, 274];
 - розроблено математичні моделі та методи розрахунку процесів нагріву, термопружного впливу та оплавлення поверхневих шарів оптичних елементів зовнішніми тепловими джерелами та надзвуковим потоком повітря, що дозволяють розраховувати критичні значення параметрів термовпливів, контроль яких попереджає руйнування елементів [257, 264, 267, 270, 271, 273, 275, 280];
 - розроблено новий метод обробки складних криволінійних поверхонь оптичних елементів та створення на них функціональних мікропрофілей за допомогою системи нерухомих дискретно розташованих електронних променів [62];
 - розроблено нові методи покращення техніко-експлуатаційних характеристик приладів (підвищення точності та розширення діапазонів вимірювання, збільшення ймовірності безвідмовної роботи та ін.), що базуються на покращенні експлуатаційних характеристик оптичних елементів [276 - 278, 319, 322, 324, 326];
 - отримано експериментальні дані з впливу електронно-променевої технології на інші перспективні елементи точного приладобудування (елементи з п'єзоелектричних керамік, елементи з оптичного скла з нанорозмірними покриттями з оксидів металів) [11, 30 - 32, 34, 35, 63, 134, 142, 144, 145, 299].

Апробація результатів дисертації. Матеріали, основні положення та результати дисертаційної роботи доповідались і надруковані в збірках докладів і матеріалів науково-технічних конференцій, семінарів, симпозіумів, конгресів: V Міжнародній науково-практичній конференції “Динаміка наукових досліджень – 2006” (м. Дніпропетровськ, 2006 р.); VII, VIII Міжнародних семінарах “Методологические аспекты сканирующей зондовой микроскопии” (м. Мінськ, Білорусь, 2006, 2008 р.р.); VII, X Щорічних міжнародних промислових конференціях “Эффективность реализации научного, ресурсного и промышленного потенциала в современных условиях” (п. Славское, Карпати, 2007, 2010 р.р.); II Міжнародній науково-практичній конференції “Природничі науки та їх застосування в діяльності служби цивільного захисту” (м. Черкаси, Академія пожежної безпеки ім. Героїв Чорнобиля, 2008 р.); IX, X Міжнародних конференціях “Методологические аспекты сканирующей зондовой микроскопии” (м. Мінськ, Інститут тепло- і масообміну ім. А. В. Ликова НАНБ, 2010, 2012 р.р.); XVIII, XIX Міжнародних конференціях “Современные методы и средства неразрушающего контроля и технической диагностики” (м. Ялта, 2010 р., м. Гурзуф, 2011 р.); XII Міжнародній науково-практичній конференції “Качество, стандартизация, контроль: теория и практика” (м. Ялта, 2012 р.); XXIV Російській конференції по електронній мікроскопії (РКЭМ – 2012) (м. Черноголовка, 2012 р.); XVIII Російському симпозіумі по растровій електронній мікроскопії та аналітичним методам дослідження твердих тіл (РЭМ, 2013); XIII Міжнародній науково-технічній конференції “Инженерия поверхности и реновация изделий” (м. Ялта, 2013 р.); XIV Міжнародній конференції МКФТТПН – XIV “Фізика і технологія тонких плівок та наносистем” (м. Івано-Франківськ, 2013 р.); III Міжнародній науковій конференції “Современные проблемы физики конденсированного состояния, нанотехнологий и наноматериалов” (м. Алматы, 2014 р.); V Міжнародній науково-практичній конференції “Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем” (м. Чернігів, 2015 р.); Scientific-technical conference “Innovations in engineering” (Burgas, Bulgaria, 2015); International

scientific conference “High technologies. Business. Society 2016” (Borovets, Bulgaria, 2016); XVI Міжнародній науково-технічній конференції “Инженерия поверхности и реновация изделий” (Одеська обл., Затока, 2016 р.); II International scientific congress “Innovations in engineering 2016” (Varna, Bulgaria, 2016); II Всеукраїнській науково-практичній конференції “Приладобудування та технологія: сучасні проблеми, тенденції розвитку” (м. Луцьк, Луцький національний технічний університет, 2016 р.); II Українська науково-технічна конференція “Спеціальне приладобудування: стан та перспективи” (м. Київ, 2016 р.); X International conference for young researchers “Technical sciences and industrial management” (Borovets, Bulgaria, 2016); III International scientific congress “Innovations 2017” (Varna, Bulgaria, 2017).

Публікації. Результати досліджень, що подані в дисертації, опубліковані у 59 наукових працях, серед яких 1 монографія, 36 статей у провідних фахових виданнях, з них 11 статей у іноземних виданнях, 13 статей у виданнях України, що включені до міжнародних науково-метричних баз; 2 патенти України на винахід, 20 доповідей та тез доповідей.

Структура та об’єм дисертації. Дисертація складається з анотації, змісту, вступу, п’яти розділів, висновків, списку використаних літературних джерел, додатків. Загальний обсяг роботи становить 440 сторінок, з них обсяг основного тексту – 278 сторінок, 149 рисунків, 32 таблиці, список використаних джерел складає 326 найменувань і займає 32 сторінки, а також 7 додатків на 93 сторінках.

РОЗДІЛ 1. СТАН ПРОБЛЕМИ ТА СУЧАСНІ ТЕНДЕНЦІЇ ЇЇ ВИРШЕННЯ

У розділі наведено критичний аналіз вітчизняної та зарубіжної науково-технічної літератури з визначення вимог, що пред'являються до якості оптичних елементів, які впливають на прийнятті у оптико-електронному приладобудуванні їх експлуатаційні характеристики, а також причин їх погіршення з врахуванням впливу термічних та механічних дій, умов експлуатації надзвукової техніки тощо [7, 15, 16, 18, 25, 39, 48, 91, 92, 96, 97, 121, 125, 165, 211, 212, 241].

Проаналізовано вплив таких важливих параметрів якості оптичних елементів, як стан їх поверхні та поверхневих шарів на предмет наявності у них дефектів (подряпин, тріщин, пухирців та ін.), які залишаються після стандартної механічної обробки та погіршують експлуатаційні характеристики елементів (мікротвердість поверхні, міцність та ін.) [3, 5, 74, 78, 80, 157, 160, 175]. При цьому встановлено, що нині найбільш повно досліджено вплив стану поверхневих шарів елементів на їх міцність, визначено шляхи її підвищення шляхом пошарового видалення порушених шарів [179 – 183].

Особливу увагу приділено розгляду та аналізу публікацій, в яких відображено питання розробки методів покращення параметрів якості оптичних елементів за допомогою різних фізико-технічних методів їх поверхневої обробки, показано переваги рухомого електронного променя, використання якого на стадії виготовлення елементів дозволяє покращувати їх експлуатаційні характеристики та підвищувати техніко-експлуатаційні характеристики приладів.

Також проаналізовано вплив спеціальних умов експлуатації елементів (зовнішніх термічних та механічних впливів, умов експлуатації надзвукової техніки тощо) на їх експлуатаційні характеристики, запропоновано шляхи покращення вказаних характеристик.

На основі критичного аналізу визначено коло основоположних задач, що потребують розв'язання та пов'язані з використанням електронно-променевої технології у оптичному приладобудуванні: дослідження закономірностей

впливу режимів електронно-променевої обробки на експлуатаційні характеристики оптичних елементів; визначення режимів електронно-променевої обробки, в межах яких спостерігається покращення експлуатаційних характеристик оптичних елементів та підвищення техніко-експлуатаційних характеристик приладів; дослідження впливу зовнішніх термічних та механічних впливів на необроблені та оброблені електронним променем оптичні елементи, визначення діапазонів зміни їх параметрів, що не погіршують експлуатаційні характеристики елементів; розробка математичних моделей та методів визначення критичних значень параметрів зовнішніх впливів, перевищення яких призводить до руйнування оптичних елементів та відмов приладів.

1.1. Вимоги до параметрів якості оптичних елементів, які впливають на їх експлуатаційні характеристики

Вироби з оптичного скла. Для виготовлення оптичних елементів різних оптико-електронних приладів (лазерних далекомірів прицільних комплексів, лазерних медичних приладів, дзеркал космічного та аерокосмічного призначення тощо) застосовують оптичне скло, безкольорове та кольорове, кварцове оптичне скло, кристали, пластмаси та інші матеріали [73, 93, 94, 99, 103, 107, 119, 123, 172, 174, 176, 204, 208, 210, 228, 253].

В основному, вказані елементи виготовляють з оптичного безкольорового скла, яке поставляється у заготівках розміром (діаметром, або найбільшою стороною) не більше 0,5 м наступних основних типів: ЛК – легкий крон, БК – баритовий крон, ТФ – важкий флінт тощо (табл. 1.1). При цьому скло виготовляють двох серій: звичайні – з нумерацією марок від 1 до 99; малотемніючі під впливом іонізуючого випромінювання – з нумерацією марок від 100 до 199. Марки скла та оптичні і фізико-механічні характеристики, що їм відповідають, докладно подані в таблицях (розділ 2). Нині оцінка якості оптичних елементів (оптичних пластин, прямокутних елементів, дисків та ін.) проводиться по наступним основним критеріям, що чинять суттєвий вплив на їх

експлуатаційні характеристики (міцність поверхневих шарів, спектральний коефіцієнт пропускання, стійкість до зовнішніх термічних впливів тощо) [90 – 99, 106, 107, 196 – 199, 291 – 294]: дефекти на поверхні та товщина дефектного шару; недосконалість геометричної форми (неплощинність, прогин); мікрошорсткість поверхні (залишкові мікрошорсткості); відповідність заданій товщині в межах допуску.

Дефекти на поверхні та товщина дефектного поверхневого шару (рис. 1.1) визначаються відомими методами фізичного аналізу (методами растрової електронної мікроскопії, мікрозондового аналізу, рентгенографічними або електроннографічними методами тощо) [13, 19, 109, 187, 189].

Відхилення від площинності (неплощинність) δh – це найбільша відстань від точок реального профілю (або реальної поверхні) до прилеглої прямої або площини (рис. 1.2 а, б).

Відхилення від площинності виникає внаслідок глибокого поверхневого оплавлення елемента, що призводить до його значної деформації внаслідок утворення капілярно-гравітаційних хвиль на поверхні елементів (наявність напливів, ребристість поверхні, утворення ділянок інтенсивного закипання, втрата геометричної форми та ін.). При цьому проведено широкі експериментальні дослідження стану поверхні та поверхневих шарів оптичних елементів після зовнішніх термовпливів [39, 49, 59, 62] показали, що вказані вище відхилення від площинності спостерігаються при товщинах оплавлених шарів $h_m^* > 100 \dots 150$ мкм).

Прогин елемента Δg – найбільша відстань від точок реального профілю в радіальному перерізу до відповідної сторони прилеглого профілю (рис. 1.2 в). Прогин елемента викликається перевищенням різниці залишкових термонапружень на різних сторонах елементів деякого критичного значення σ_c^* (ефект Тваймена [204, 212]). Крім того, внаслідок внутрішніх напружень може також виникати таке небажане явище, як подвійне променезаломлення.

Хімічний склад оптичного скла

Вміст компонентів, %	Оптичне скло		
	Крони (К8)	Баритові (БК10)	Фосфатні (ТФ10)
SiO ₂	72,0	49,5	–
B ₂ O ₃	8,1	4,8	3,0
K ₂ O	10,5	7,6	12,0
Al ₂ O ₃	–	–	10,0
As ₂ O ₃	0,2	0,2	0,5
BaO	–	21,6	–
ZnO	–	12,5	–
MgO	0,5	–	4,0
PbO	–	2,6	–
Na ₂ O	7,2	–	–
CaO	1,5	–	–
P ₂ O ₅	–	–	70,5

При цьому, в результаті проведених експериментів [39, 49, 59, 62], було встановлено, що при високих температурах попереднього нагріву оптичного скла (до 900 К), рівень значень залишкових термонапружень не перевищує, наприклад, для скла К8 значень $\sigma_c^* = 0,21...3,2$ МПа. Контроль порушень форми елементів для запобігання ушкоджень поверхні проводиться безконтактними оптичними або фотоелектричними методами (розділ 2).

Мікрошорсткість поверхні (залишкові мікрошорсткості) оцінюються або по середньому арифметичному відхиленню профілю R_a від базової площини, або по висоті мікрошорсткостей R_z . В деяких випадках для оцінки мікрошорсткості використовують додаткові параметри: R_{max} – найбільшу висоту нерівностей профілю; S_m – середній крок нерівностей профілю; S –

середній крок нерівностей по вершинам. Середнє арифметичне відхилення R_a – це середнє значення відстаней $y_1, y_2, y_3, \dots, y_n$ від точок профілю до його середньої лінії в межах базової довжини \bar{l} (рис. 1.3), причому ці відстані додаються без врахування знаку. Висота нерівностей R_z – середня відстань між п'ятьма точками виступів та п'ятьма точками западин в межах базової довжини \bar{l} , що виміряна від лінії A , паралельної середній лінії:

$$R_z = \frac{(h_1 + h_2 + \dots + h_9) - (h_2 + h_4 + \dots + h_{10})}{5}. \quad (1.1)$$

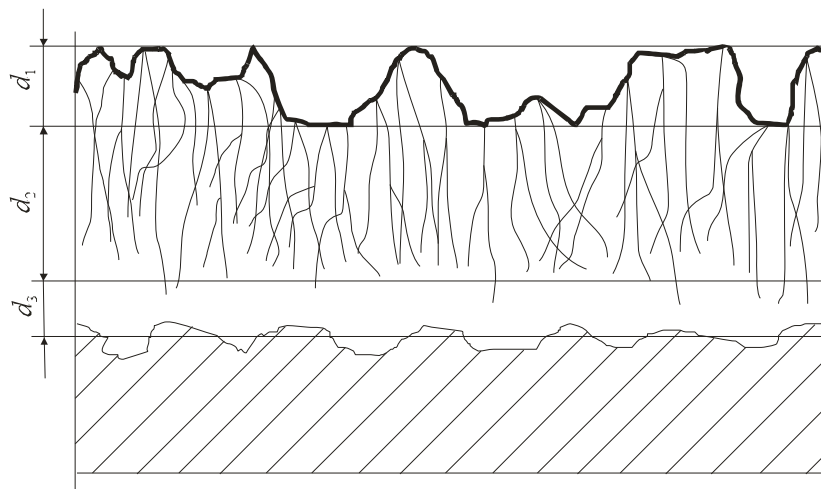


Рис. 1.1. Структура дефектного поверхневого шару: d_1 – товщина рельєфного шару; d_2 – товщина тріщинуватого шару; d_3 – товщина напруженого шару; $d = d_1 + d_2 + d_3$ – товщина дефектного шару.

При цьому базовою довжиною \bar{l} називається мінімальна довжина ділянки поверхні, що використовується для вимірювання нерівностей, які характеризують мікросорсткість поверхні. Оцінюють мікросорсткість або порівнянням поверхні виробу з еталоном, або безпосереднім вимірюванням висоти нерівностей. При цьому поверхні з мікросорсткостями в десятки та сотні мкм контролюють за допомогою профілографів-профілометрів, принцип дії яких оснований на контактному стеженні алмазною голкою за профілем поверхні з подальшим індукційним перетворюванням її переміщень у електричні сигнали.

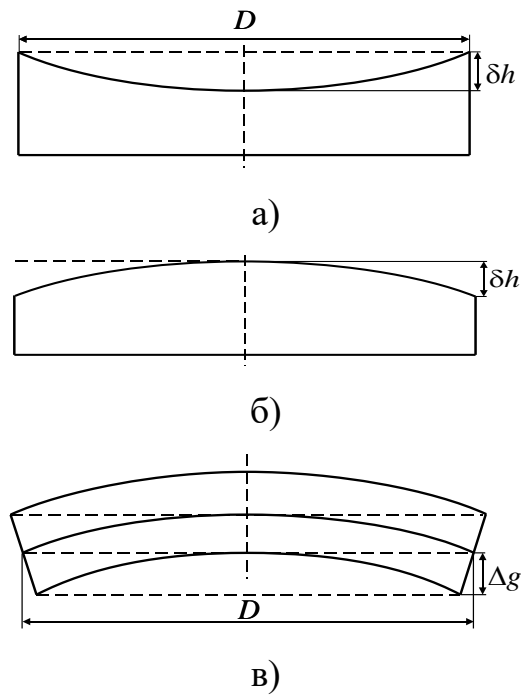


Рис. 1.2. Основні види порушень форми елементів.

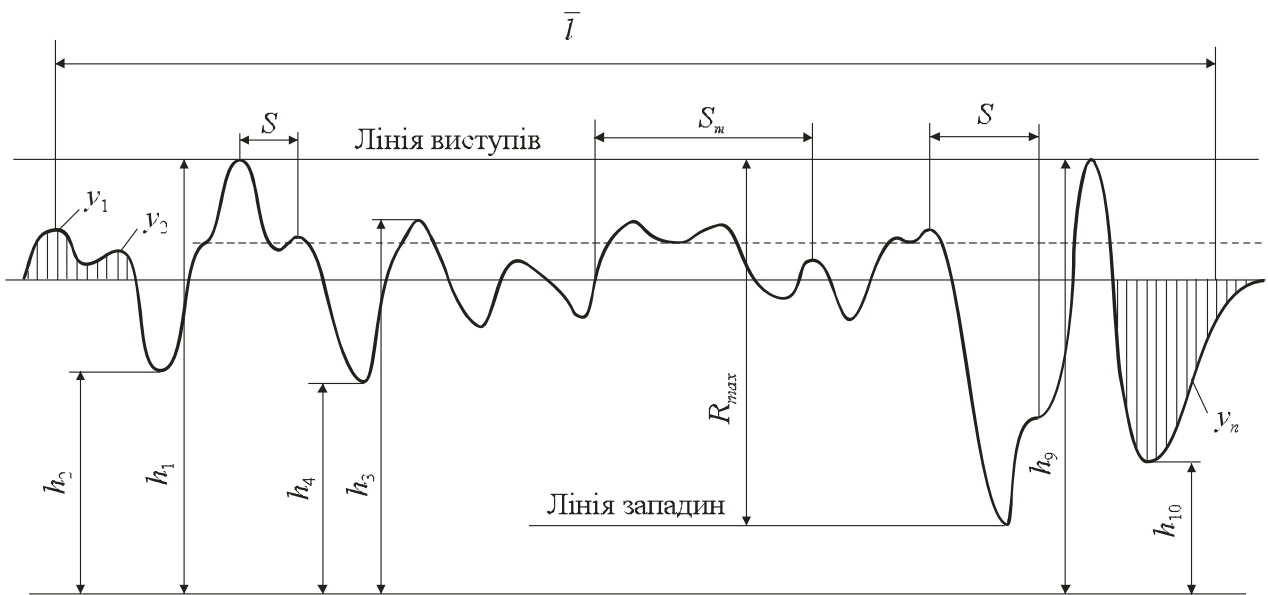


Рис. 1.3. Схема визначення параметрів, що характеризують мікрошорсткість (залишкові мікрошорсткості) оптичних елементів.

Для реєстрації мікрошорсткостей порядку одиниць та десятих часток мкм використовують інтерферометри Лінніка, наприклад, МІІ-4, а для реєстрації мікрошорсткостей порядку одиниць та десятків нм – методи атомно-силової мікроскопії, які базуються на скануванні плоскої поверхні зразка, що дозволяють отримувати зображення топографії досліджуваної поверхні оптичних елементів (розділ 2). Існуючі дані [39, 59, 62] показують, що для

оптичних елементів оптико-електронних приладів значення R_a не повинні перевищувати величину R_a^* (наприклад, для скла К8 значення $R_a^* = 3...4$ нм).

Контроль товщини елемента проводять в декількох точках поверхні (рис. 1.4). Як показали експерименти [59, 62], на зміну товщини виробу найбільш суттєво впливає величина глибини його оплавлення. Як вказувалось вище, для великих товщин оплавлених шарів (більше, ніж $h^* = 100...150$ мкм) оптичних елементів спостерігається нерівномірне розтікання розплаву вздовж їх поверхонь, що призводить до суттєвої різниці в значеннях товщини елемента в різних точках поверхні та, в кінцевому підсумку, до втрати їх форми.

Згідно існуючих стандартів [90 – 99, 106, 107, 196 – 199, 291 – 294], нормативними значеннями основних критеріїв якості елементів з оптичного скла, є наступні: відсутність сколів, западин та виступів, дефектного шару; неплосцинність $\delta h \leq 0,4$ мкм; залишкові напруження $\sigma_c \leq 3,2$ МПа (для елемента товщиною $4 \cdot 10^{-3}$ м); середній розмір залишкових мікрошорсткостей $R_a \leq 4$ нм; глибина оплавленого шару $h \leq 150$ мкм.

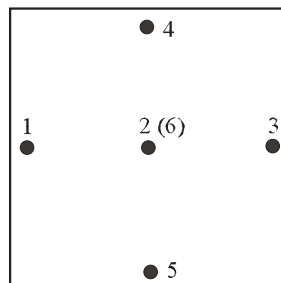


Рис. 1.4. Розташування контрольних точок при вимірюванні товщини виробу.

Вироби з оптичних керамік. Для виготовлення оптичних елементів ІЧ-техніки (оптичних обтічників, вікон видимості, світлорозсіювальних екранів та ін.), що працюють в умовах високих механічних та термічних навантажень, використовують оптичну кераміку (КО1, КО2, КО5 тощо) [73, 77, 99, 103, 119, 123, 174, 176, 200, 201]. Оптична кераміка (табл. 1.2) є полікристалічним матеріалом, отриманим методом пресування під великим тиском в вакуумі, механічно ізотропним, по термомеханічним властивостям значно перевищує відповідний монокристал, добре обробляється та має високу стійкість до

теплових та механічних ударів [58, 64, 161, 162]. Заготовки з оптичної кераміки постачаються у вигляді пластин, дисків, півсферичних обтічників (розділ 2).

Таблиця 1.2.

Хімічний склад оптичної кераміки

Вміст компонентів, %	Оптична кераміка		
	KO1	KO2	KO5
MgO	–	–	99,3
MgF ₂	98,9	–	–
ZnS	–	99,1	–

Оцінка якості оптичних елементів ІЧ-техніки (пластин, дисків, півсферичних обтічників та ін.) проводиться, в основному, за наступними критеріями, що чинять суттєвий вплив на їх експлуатаційні характеристики (мікротвердість поверхні, міцність поверхневих шарів, спектральний коефіцієнт пропускання ІЧ-випромінювання, стійкість до зовнішніх термічних та механічних впливів, умов експлуатації надзвукової техніки тощо): наявність дефектів на поверхні та у поверхневих шарах (подряпин, тріщин, відколів, об'ємних газових включень тощо), що залишаються після стандартних фінішних методів обробки [3, 5, 15, 74, 78, 80, 128, 160, 281, 283]. При цьому дефекти та об'ємні включення визначаються вказаними вище методами фізичного аналізу (методами растрової електронної мікроскопії, мікрозондового аналізу та ін.).

Згідно з існуючими стандартами [98, 99, 106, 196, 198, 199, 292, 294] нормативними значеннями основних критеріїв якості фінішної обробки елементів з оптичної кераміки є відсутність тріщин та відколів, газоподібних включень та ін. дефектів на їх поверхнях та у поверхневих шарах.

На завершення слід відмітити, що існуючі експериментальні дослідження [39, 49, 59, 62] показують, що найбільш суттєвий вплив на експлуатаційні характеристики оптичних елементів чинять такі їх параметри якості, як стан

поверхні (її чистота, мікрошорсткість та ін.) та поверхневих шарів: наприклад, наявність у них прихованих дефектів (подряпин, тріщин, пухирців та ін.) призводить до зменшення мікротвердості поверхні та міцності поверхневих шарів, наслідком чого є зниження стійкості елементів до зовнішніх термічних та механічних ударів.

Нині у роботах [179 – 183] найбільш докладно вивчено вплив стану поверхневих шарів деталей з оптичних матеріалів (оптичне скло К8, БК10, ТК14, ЛК5, ситал СО-115М, кварцове скло КВ та ін.) на їх міцність. Короткий аналіз робіт наведено нижче.

1.2. Закономірності впливу стану поверхневого шару на міцність оптичних деталей

В результаті проведених досліджень встановлено [179 – 183], що при механічних випробуваннях елементів з оптичного скла, кераміки та ін. оптичних матеріалів руйнування починається з поверхневих шарів, які містять підвищену кількість дефектів, що залишаються після стандартної механічної обробки.

Також вивчено вплив виду механічної обробки на механічну міцність елементів з оптичного скла та ситалу (табл. 1.3). При цьому проведені дослідження міцності елементів з оптичного скла та ситалу дозволили встановити, що найбільшу питому міцність мають елементи з оптичного ситалу СО-115М, які знайшли застосування при виготовленні дзеркал наземного та космічного базування.

Отримані результати впливу порушеного шару (ПШ) на міцність елементів з оптичного скла та ситалу показали, що високу механічну міцність показує алюмосилікатне скло, яке має більший модуль Юнга E та малий термічний коефіцієнт лінійного розширення α_T .

Таблиця 1.3

Вплив видів механічної обробки на механічну міцність елементів з оптичного скла та ситалу

Матеріал	Вид обробки	Межа міцності, 10 МПа
Оптичне скло К8, БК10, ТК14, ЛК5	Шліфовка абразивом М28	8 ± 2
	Теж саме, М10	10 ± 2
	Полірування на смолі	12 ± 3
Ситал СО-115	Шліфовка абразивом М28	5 ± 1
	Теж саме, М10	7 ± 2
	Полірування на смолі	10 ± 3
Кварцове скло КВ	Шліфовка абразивом М28	4 ± 1
	Теж саме, М10	5 ± 1
	Полірування на смолі	9 ± 1

Встановлено, що видалення порушеного шару (ПШ) з поверхні оптичних деталей у розчині плавикової кислоти у гліцерині призводить до істотного підвищення їх міцності. У дослідженнях об'єктами випробувань були призматичні зразки розміром $9 \times 12 \times 120 \cdot 10^{-3}$ м з оптичного ситалу СО-115М, які вирізані з виливків алмазним інструментом. Попереднє шліфування заготовок у блоках до $R_z = 40 \dots 80$ мкм проводилось абразивом (діаметр зерна до 100 мкм) на чавунній планшайбі верстату ПРО-350. Більш високу чистоту поверхні зразків забезпечували шліфуванням мікропорошками на верстаті ШПЗ-350. Алмазна обробка здійснювалась інструментом з алмазним шліфпорошком АСМ 80/63. Хімічне травлення проводилось у 70 % плавиковій кислоті. Навантажували зразки на гідравлічній машині ZD-4 за схемою поперечного вигину зі швидкістю росту навантажень $\sigma_g = 2 \dots 4$ МПа/с. Відстань між опорами дорівнювала 0,1 м. Усереднення проводили за результатами випробування 10 зразків. Точність вимірювань склала ± 1 %.

На рис. 1.5 наведено результати проведених досліджень, що ілюструють залежність міцності в умовах вигину від розміру абразиву при механічній обробці та величини порушеного шару h у плавиковій кислоті.

З отриманих результатів можна зробити висновок, що міцність ситалу суттєво залежить від способу механічної обробки поверхонь зразків. При цьому додаткове підвищення міцності практично у 3 рази у порівнянні з вихідним досягається шляхом зменшення величини абразивних зерен при обробці та травленні ситалу у плавиковій кислоті.

Крім цього, встановлено, що шляхом глибокого полірування вдається зменшити товщину дефектного шару до 1...2 мкм. Однак механічна міцність при цьому підвищується незначно, до 180...200 МПа.

Отримано, що при травленні елементів з оптичного скла, яке пройшло глибоке полірування, постійні значення досягались після зняття шару товщиною 1...2 мкм (рис. 1.6). Після такої обробки величина міцності у 3 рази перевищувала міцність полірованої поверхні, при цьому зберігався третій клас чистоти. Поряд з вимірюванням міцності методом вигину, визначали ударну міцність методом падаючої кулі. Було встановлено, що ударна міцність оброблених зразків зростала у 3...4 рази.

Аналіз отриманих результатів досліджень показує, що навіть шляхом глибокого шліфування-полірування поверхонь оптичних елементів можна тільки зменшити товщину дефективного шару i , тим самим, незначно збільшити механічну стійкість елементів. Більш суттєво можна її збільшити шляхом зняття дефектних шарів за допомогою хімічного травлення у розчині плавикової кислоти у гліцерині. Однак вказані операції є достатньо трудомістким та не екологічно чистими.

Тому в даній роботі пропонується електронно-променевий метод для поверхневої обробки оптичних елементів, який дозволяє шляхом глибокого оплавлення елементів (розділ 3) усувати дефектні шари i , тим самим, суттєво підвищувати їх міцність як при нормальній температурі, так й при підвищених температурах нагріву.

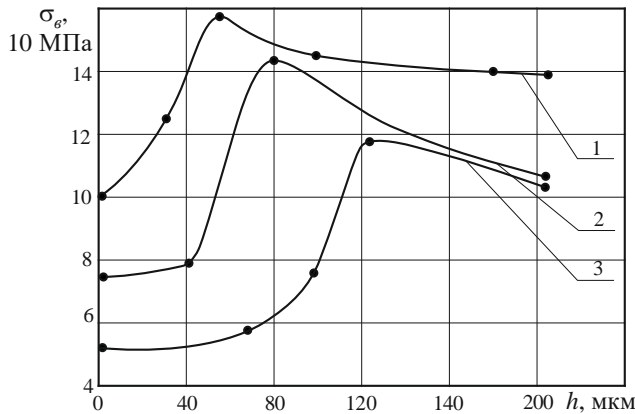


Рис. 1.5. Залежності міцності при вигині σ_s від глибини травлення h у плавиковій кислоті елемента з оптичного ситалу СО-115М після попереднього шліфування шліфаабразивом (3) та абразивом М10 (1), а також після алмазної обробки (2): ● – експериментальні дані.

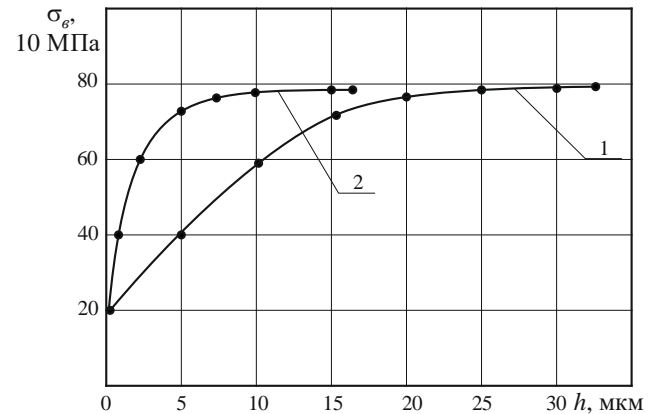


Рис. 1.6. Залежності міцності елемента з алюмосилікатного скла від товщини знятого поверхневого шару: 1 – після традиційного полірування; 2 – після глибокого полірування: ● – експериментальні дані.

Нижче розглядаються переваги даного методу у порівнянні з іншими фізико-технічними методами обробки різних матеріалів, у тому числі й оптичних елементів, які широко використовуються.

1.3. Аналіз фізико-технічних методів обробки оптичних елементів, які модифікують їх поверхневі шари

Нині для покращення властивостей поверхневих шарів твердих матеріалів у тому числі оптичних елементів (підвищення чистоти та зменшення мікрошорсткості, термозміцнення тощо), використовуються різні фізико-технічні методи їх фінішної обробки (механічні, хімічні, хіміко-механічні та теплові, що включають концентровані потоки енергії (лазерне випромінювання, сфокусовані потоки іонів, електронний промінь, потоки

низькотемпературної плазми тощо)) [3, 5, 15 – 17, 22, 24, 27, 28, 36, 41, 47, 49, 52, 55, 57, 66, 68, 74, 78, 80, 85 – 87, 101, 111 – 116, 118, 128, 138, 157, 158, 160, 173, 184 – 188, 195, 202, 209, 212, 219, 221, 225, 226, 237, 238, 244, 246, 252, 282, 285, 286, 290, 295, 298 – 301, 309, 312 – 315].

Це дозволяє на стадії виготовлення, наприклад, приладів з різними оптичними елементами шляхом покращення властивостей їх робочих поверхонь підвищувати їх експлуатаційні характеристики [39, 59, 62].

Нижче наводиться порівняльний аналіз вказаних методів, показано їх переваги та недоліки. При цьому особливу увагу приділено рухомому електронному променю, як найбільш ефективному та екологічно чистому інструменту обробки поверхонь елементів з оптичного скла та кераміки [36, 49, 52, 55, 57, 111 – 116, 158, 225, 226, 252, 295, 299, 301].

1.3.1. Механічні, хімічні, хіміко-механічні та теплові методи обробки оптичних елементів у порівнянні з електронно-променевим методом

Механічна обробка поверхонь елементів являє собою звичайне шліфування й полірування (ЗШП) і глибоке шліфування й полірування (ГШП), при якому механічному поліруванню передують процес глибокого шліфування виробів за допомогою абразивних наповнювачів, наприклад, мікропорошків електрокорунду на металевому (звичайно латунному) інструменті-полірувальнику.

При цьому після глибокого шліфування на поверхні виробів з'являється порушений або дефектний шар. Цей шар має зовнішній рельєф (так званий рельєфний шар) та товщину до 1,5...2,0 мкм. У порушеному шарі наявні геометричні неоднорідності у вигляді тріщин, пор, виходів на поверхню різноманітних за хімічною й адсорбційною можливістю дефектів матеріалу. Було показано, що при багаторазовому проведенні циклів полірування оптичного скла з послідовно зменшуваною зернистістю полірувальних порошоків незалежно від способу полірування й виду полірувальника дефектний

шар можна тільки зменшити по глибині (не більш, ніж в 1,5...2,0 рази), але повністю виключити його не можна.

Таким чином, навіть тривале механічне полірування оптичних матеріалів не усуває дефектного шару, отриманого при шліфуванні, тому що й у процесі полірування дрібним абразивом утворюється дефектний шар, що призводить до істотного погіршення експлуатаційних характеристик елементів з оптичного скла. Крім цього, у процесі механічного полірування елементів залишаються подряпини, локальні включення абразивних зерен та інші приховані дефекти, які, врешті решт, призводять до значного скорочення термінів служби приладів.

Сутність хімічної обробки оптичних елементів полягає у витравлюванні дефектного шару за допомогою травильного розчину. Процес полірування здійснюється в закритому об'ємі, заповнюваному травильним розчином і промивною водою. Через цей об'єм пропускається повітря, призначене для сушіння відполірованих виробів. При цьому пара, що утворюється при поліруванні, відводиться на всіх етапах обробки елементів за допомогою вентиляції й потім піддається нейтралізації. Величина сумарного питомого сполірування при хімічному поліруванні залежить від складу розчину й загальної тривалості процесу, причому вплив розчину значно сильніший при одноконтактному процесі, ніж при багатоконтактному. Крім цього, існують значні розбіжності в значеннях питомого сполірування від контакту до контакту. На основі отриманих даних про глибину й будову дефектного поверхневого шару матеріалу, а також зміни в динаміці процесу його сполірування встановлено, що зростання на першому етапі сполірування концентрації іонів і солей у розчині значно ускладнює процес хімічної взаємодії на поверхні й на різних відстанях від неї вглиб дефектного шару матеріалу. При цьому в зазначених процесах лімітуючими є дифузійні складові, виведення продуктів травлення матеріалу з найглибших тріщин ускладнене, що призводить до їх нагромадження в тріщинах, викликаючи різку зміну складу розчину, що впливає на стінки тріщин. Це спричиняє утворення нерозчинних

солей на поверхні матеріалу, що перешкоджає хімічному споліруванню найглибших тріщин.

Необхідно також відзначити, що постійна наявність розкладання кремнефторидів на неопрацьованій поверхні елементів з оптичного скла є однією із причин його корозії й матування. Отже, процес хімічного полірування необхідно здійснювати при постійному звільненні поверхні елемента від продуктів його розчинення, тобто процес хімічного полірування має бути багатоцикловим.

Таким чином, якість поверхні при хімічному поліруванні істотно залежить від полірувальної здатності травильного розчину, яка визначається його складом і значно погіршується при зростанні в ньому концентрації солей і продуктів сполірування. Отже, якість полірованої поверхні істотно знижується в міру використання травильного розчину. Іншим важливим недоліком хімічного полірування є використання гостродефіцитних і дорогих плавикових і сірчаных кислот, що потребує значних витрат на екологічні заходи, обумовлені застосуванням зазначених кислот. Крім цього, до недоліків процесу хімічного полірування варто віднести також складність контролю й керування процесом обробки, забезпечення збереженості вихідних геометричних форм полірованих елементів, а також виконання операцій по видаленню продуктів сполірування й солей з полірованої поверхні й заміні травильного розчину.

Використання комбінованої хіміко-механічної обробки дозволяє для конкретного полірованого оптичного елемента усунути зазначені вище недоліки, властиві механічному і хімічному поліруванням (наявність дефектного шару – для механічного полірування елемента; неконтрольовані характеристики геометрії полірованої поверхні елемента – для його хімічного полірування), і одержати практично бездефектну поверхню (глибина дефектного шару зменшується до 0,1...0,3 мкм) з незмінними значеннями її геометричних параметрів. Проте, й розглядуваному комбінованому поліруванню елементів також властиві такі недоліки: необхідність виконання постійних операцій по усуненню продуктів сполірування й заміні полірувальної

речовин; складність контролю й керування процесом; екологічно забруднене виробництво.

Крім цього, незважаючи на малу глибину дефектного шару після комбінованого хіміко-механічного полірування, якість полірованої поверхні не відповідає сучасним вимогам, що ставляться до цілого ряду елементів оптико-електронного приладобудування (мікрооптики, оптоелектроніки та ін.).

Суть теплових методів обробки (вогневого, інфрачервоного, плазмового, концентрованими потоками енергії) оптичних елементів полягає у формуванні теплового потоку, під дією якого дефектний поверхневий шар оплавляється й відбувається усунення перелічених вище дефектів.

Серед теплових методів полірування широко поширений метод вогневого полірування. Як тепловий потік використовується полум'я пальників, які працюють у безперервному режимі. Відповідно до зазначеного методу оптичні елементи попередньо нагріваються до 733 К и встановлюються на оправки з сірого чавуну, що повторюють за формою й розмірами внутрішню порожнину елементів. Полірування здійснюють при температурі 1673 К и витраті горючого газу $7 \cdot 10^{-3}$ м³/с. Для здійснення рівномірного нагріву елементів їх обертають, а потім відполіровані елементи відпалюють. Становить інтерес вогневий спосіб полірування, відповідно до якого під час обробки елемента в його поверхневому шарі створюють пружні коливання з густиною енергії $0,8 \cdot 10^4 \dots 3 \cdot 10^4$ Вт/м² за допомогою електродинамічного вібратора або звукової сирени. При цьому в результаті виникнення в тонкому поверхневому шарі розплаву механічних знакозмінних сил виникає ефект псевдорозрідження розплаву (різке зниження коефіцієнта в'язкості розплаву), що дозволяє силам поверхневого натягу за набагато коротший час формувати гладкі поліровані поверхні.

Встановлено, що для підвищення якості полірованої поверхні елемента необхідно її обробку робити декількома стрічковими тепловими потоками шириною $(0,5 \dots 6,0) \cdot 10^{-3}$ м, які одержуються за допомогою щілинного газового пальника й мають можливість пересуватися відносно елемента.

Основними недоліками методів вогневого полірування елементів є: при впливі полум'я пальника на всю поліровану поверхню елемента відбувається неконтрольований її нагрів, що призводить до локальних перегрівів й істотної зміни геометричних розмірів оброблюваної поверхні; у результаті нерівномірного нагріву поверхні елемента щільними джерелами тепла якість окремих її ділянок може істотно різнитися й не відповідати технічним вимогам, що ставляться до елементів у процесі їхньої експлуатації; для всіх методів вогневого полірування властиві труднощі в одержанні великих значень теплового потоку (більше $10^6 \dots 10^7$ Вт/м²) і керуванні процесами полірування елементів.

При інфрачервоному (ІЧ) поліруванні оптичних елементів у результаті збігу спектральних діапазонів випромінювання джерела теплового впливу й поглинання випромінювання елементом, його поверхневий шар нагрівається й оплавляється. Як джерела ІЧ-випромінювання найширше використовуються кварцово-галогенні лампи типу КГ-1000 і менше – спеціальні стрічкові джерела. Відповідно до загальноприйнятої технології весь процес ІЧ-полірування поділяється на такі три стадії: нагрів виробу протягом 180 с без зміни середньої величини мікрошорсткості на його поверхні; оплавлення поверхні виробу протягом 540 с; деформація оплавленої поверхні під дією поверхневих сил протягом 540 с.

Головними недоліками ІЧ-полірування є: значна тривалість процесу обробки й велика глибина термовпливу, що негативно позначається на геометричній формі й розмірах полірованого елемента; значна залежність величини коефіцієнта поглинання випромінювання від хімічного складу його поверхні й т. д., тобто спостерігається істотна зміна якості полірування елементів, що надходять у виробництво, від партії до партії; необхідність додаткового хімічного полірування для деяких елементів після їх ІЧ-полірування для видалення матовості, що виникає в результаті контакту із пресформою.

Таким чином, розглянуті вище теплові методи обробки оптичних елементів є ефективнішими порівняно з методами механічної, хімічної й хіміко-механічної обробки, тому що дозволяють оплавляти поверхню цих елементів і силами поверхневого натягу в розплаві, що утворився, вирівнювати поверхню до атомно-гладкого стану, а подальше затвердіння фіксує цей стан. Крім цього, зазначені методи теплової обробки при достатній глибині оплавлення, регульованій шляхом вибору відповідних режимів обробки, повністю усувають поверхневий дефектний шар.

Проте, через зазначені вище недоліки, вогневі й ІЧ-методи поверхневого оплавлення оптичних елементів нині не знайшли широкого застосування у оптико-електронному приладобудуванні.

Однак, як показали дослідження в галузі розробок високоефективних технологій полірування оптичних елементів, більш ефективними виявилися методи, що використовують концентровані потоки енергії (КПЕ), зокрема, сфокусовані потоки заряджених частинок (електронів, іонів тощо), лазерне випромінювання, низькотемпературна плазма тощо. При багатоцикловому іонному поліруванні скла відбувається послідовне усунення тонкого (одиниці мікрометрів) поверхневого дефектного шару без погіршення якості оброблюваної поверхні.

При цьому найкращі результати по іонному поліруванню були отримані для елементів, які були попередньо оброблені методом ГШП. Однак подальше застосування зазначених методів виявило цілий ряд перешкод, які обмежують можливість широкого використання цього методу в оптико-електронному приладобудуванні. До основних перешкод, по-перше, відноситься формування, які істотно відрізняються за своїми фізичними і фізико-механічними властивостями від основного матеріалу. По-друге, встановлена наявність локальних перегрівів елементів (до 400...500 К), які призводять до виникнення критичних термічних напружень і руйнування їх поверхневих шарів.

При використанні потоків низькотемпературної плазми для полірування оптичних елементів також відбувається видалення дефектного шару шляхом

оплавлення (так званого “розтоплення”) поверхневих шарів елементів на глибину від декількох мікронів до десятків мікронів. Однак при деяких режимах плазмового полірування оптичних елементів мають місце локальні глибокі оплавлення їхніх поверхонь (до кількох сотень мікронів), що призводять до закипання поверхневих шарів розплаву, значних прогинів цих ділянок поверхонь і, в решті решт, до втрати їх площинності й геометричної форми. Крім цього, процесам плазмового полірування також властиві такі недоліки: низький коефіцієнт корисної дії плазмових технологічних систем; висока вартість плазмовмісного газу, що становить до 60...70 % витрат на весь технологічний процес; низька повторюваність результатів технологічних процесів обробки. Всі перелічені вище недоліки методів плазмового полірування оптичних елементів обмежують його широке застосування в технологіях оптичної промисловості.

Лазерне полірування оптичних елементів здійснюється як при одноциклового, так і при багаточиклового (скануючого) неспіфокусованому й спіфокусованому випромінюванні CO₂-лазера з різними швидкостями його переміщення (до 0,08...0,1 м/с) з різною густиною теплового впливу (до $1,5 \cdot 10^6 \dots 2,0 \cdot 10^6$ Вт/м²) і радіусом зони нагріву (до 5...6 мкм). Встановлено, що підвищення густини теплового впливу в обох випадках забезпечує підвищення температури поверхні, але в другому випадку підвищення зазначеної температури здійснюється більш плавно (приблизно 310 К за один цикл обробки). При цьому попередній нагрів елемента також в обох випадках приводить до підвищення якості обробки поверхні, хоча в другому випадку величина мікрошорсткості на поверхні менша (приблизно в 2...3 рази), ніж у першому. Аналіз проведених досліджень показав, що при певних режимах полірування (густина теплового впливу, швидкості переміщення лазерного променя, часу обробки) для лазерного випромінювання з довжиною хвилі $\lambda = 10,6$ мкм відбувається однорідне по всій поверхні усунення дефектного шару шляхом оплавлення поверхневих шарів. Разом з тим, при практичному використанні методів лазерного полірування були виявлені такі недоліки, що

також обмежують широке застосування зазначених методів у точному приладобудуванні: порушення мікрогеометрії поверхні (утворення локальних виступів і западин); формування локальних високотемпературних зон (наприклад, до 1300 К при обробці елементів з силікатного скла, до 2300 К при обробці елементів з кварцового скла та інших оптичних матеріалів), наявність у цих зонах великих градієнтів температур (до $10^5 \dots 10^7$ К/м), що призводять до виникнення критичних термонапружень у матеріалах і його руйнування, а також до різкого зменшення в'язкості поверхневого розплаву (на 9...11 порядків), що спричиняє його інтенсивне розтікання по поверхні й порушення її площинності; низький коефіцієнт корисної дії лазерних технологічних систем полірування оптичних елементів (не більше 10...20 %), а також складність керування потужним лазерним випромінюванням (особливо скануючим лазерним променем).

Як показала практика, найбільш зручним і ефективним з теплових методів полірування оптичних елементів шляхом їх поверхневого оплавлення виявився електронний промінь. Як тепловий потік при електронній обробці оптичних елементів використовувався сфокусований потік електронів, формований електронною гарматою Пірса з ниткоподібним катодом. При цьому, на відміну від електронного устаткування, широко використовуваного в промисловості для плавки, зварювання й термообробки різних матеріалів, використовувалося спеціально розроблене технологічне устаткування для електронно-променевої обробки елементів з різних діелектричних матеріалів, що відповідає таким основним вимогам: можливість керування процесом полірування; можливість одержання великих питомих потужностей електронного потоку стрічкової форми до $10^7 \dots 10^8$ Вт/м²); широка доступність електронно-променевого устаткування для реалізації різних технологічних процесів (полірування, відпалу, термозміцнення, розмірної обробки й ін.); високий коефіцієнт корисної дії технологічних електронних систем (до 60...70 %), гарна керованість цими системами та їх екологічна чистота.

Проведені дослідження стану поверхонь елементів з оптичних матеріалів (скло К8, ситал СТ50 й ін.), оброблених електронним променем і необроблених (тільки абразивне глибоке шліфування-полірування), показали, що елементи з оптичного скла після абразивного полірування мають по всій поверхні макродефекти порядку 200...300 нм. Після електронної обробки поверхня вже є однорідною й макродефекти повністю відсутні. Елементи з ситалів після абразивного полірування мають поверхню з великими макродефектами рельєфу, спричиненими різною твердістю окремих зерен матеріалу (м'які ділянки поверхні вишліфовуються абразивом глибше). Розміри виступаючих зерен становлять 300...400 нм, а їхня висота досягає 100...150 нм і більше. При цьому після електронно-променевої обробки на поверхні елементів з ситалів, також як і оптичного скла макродефекти повністю відсутні. Більш детальні дослідження стану поверхні й поверхневих шарів оптичних матеріалів після електронно-променевої обробки показали, що при досить глибокому оплавленні матеріалів (до кількох десятків мікронів) “загладжуються” подряпини й інші приховані дефекти за рахунок розтікання розплаву уздовж оброблюваної поверхні.

Таким чином, при використанні електронно-променевого полірування оптичних матеріалів показана принципова можливість одержання після впливу електронного променю поверхонь практично атомарно-гладких, хімічно чистих і бездефектних, включаючи поверхневий шар.

Фізико-технічні методи поверхневої обробки елементів з оптичних керамік. Одним з перспективних способів спрямованої зміни властивостей оптичних елементів є спеціальна поверхнева обробка. При цьому, як показали чисельні технологічні експерименти, основними з традиційних методів поверхневої обробки елементів є: механічні методи (дробоструминний наклеп, ударне й фазове зміцнення); методи фізико-хімічної модифікації (іонна імплантація, азотування й цементация). В основу зазначених методів обробки елементів покладено цілеспрямовану зміну швидкості нагріву (охолодження) елементів, а також деформацію поверхневих шарів й об'ємів елементів, що

дозволяє підвищити концентрацію дефектів кристалічних ґрат у полікристалах, змінити їх розподіл і в результаті поліпшити фізико-механічні та інші важливі для техніки властивості (наприклад, коефіцієнт ПЧ-пропускання матеріалу) оброблюваних елементів.

Проведені дослідження дозволили встановити, що навіть у таких крихких матеріалів, як кристали α -оксиду алюмінію, мікротвердість може значно зрости (в 2...3 рази) у процесі грубого шліфування за рахунок інтенсивної деформації поверхневого шару. При цьому зазначена зміна властивостей крихкої кераміки α -оксид алюмінію аналогічна деформаційному зміцненню оксиду магнію, яке одержується методом поверхневого наклепу і яке супроводжує поява значних напружень у поверхневих шарах (як розтяжних, так і стискаючих).

У технологічних процесах для підвищення міцності й в'язкості елементів також використовуються фазові перетворення в їх поверхневих шарах, які викликаються, наприклад, методом глибокого шліфування. До зазначених методів зміцнення елементів відносяться й термічні фазові перетворення, наприклад, у сегнетоелектриках типу титанат-цирконату свинцю. При цьому й у системах оксид алюмінію – оксид цирконію також можна підвищити міцнісні властивості, спричинивши фазові перетворення термічним шляхом.

До перспективних методів відносять методи, спрямовані на створення стискаючих напружень у поверхневих шарах елементів, що забезпечують захист їхніх поверхонь від зовнішніх впливів. До сучасних методів поверхневої обробки, спрямованих на підвищення міцності елементів, відносять методи, що дозволяють усувати порушення суцільності поверхневих шарів елемента (пухирці, подряпини, горбки, кратери й ін.), корозійні западини й продукти корозії й ін., що дозволяють знімати шкідливі залишкові напруження й створювати поверхневі шари зі стискаючими напруженнями.

Серед зазначених методів перспективнішим виявився лазерний метод зміцнення оптичних елементів, що являє собою швидке сканування по поверхні елемента безперервним або імпульсним лазерним випромінюванням (в

основному, використовувався CO₂-лазер). У результаті проведених досліджень було встановлено, що найсильніший вплив на фізико-хімічні процеси, які проходять у зоні впливу променя лазера на елемент, чинять питома потужність випромінювання й час його взаємодії з матеріалом. Аналіз цих процесів показав, що зазначені два фактори є вирішальними при виборі найефективніших режимів зміцнення матеріалів: наприклад, при дуже високих питомих потужностях випромінювання (більше 10¹³ Вт/м²) і малих тривалостях його впливу (менше 10⁻⁷...10⁻⁸с), що досягають при використанні імпульсних лазерів, відбувається практично миттєве випаровування поверхневого шару елемента й наступне швидке розширення потоку парів, у результаті виникають ударні хвилі, що приводять до зміни структури наступних поверхневих шарів і досить інтенсивного їх зміцнення. Однак, досвід застосування лазерних методів зміцнення поверхневих шарів оптичних елементів показав, що цим методам властиві практично ті ж недоліки, що й у випадку розглянутих вище лазерних методів полірування цих елементів (низький коефіцієнт корисної дії, складність керування процесом, особливо параметрами променя при його переміщенні по елементу, висока вартість лазерного устаткування тощо).

Пошук нових більш ефективних методів поверхневого зміцнення оптичних елементів показав, що найбільш перспективним є електронно-променевий метод зміцнення цих елементів. Проведені дослідження показали, що використання електронно-променевих методів обробки елементів, що призводять до усунення різних дефектів на їх поверхнях, які мають місце після стандартної механічної обробки, веде до підвищення механічної міцності (в 1,5...2,0 рази) цих матеріалів. Крім цього, було встановлено, що електронно-променева обробка елементів дозволяє в 1,8...2,3 рази підвищити їх стійкість до розтяжних напружень і в 3,2 рази збільшити реальну міцність виробів. Отримані результати дозволили виявити також ряд переваг електронно-променевого зміцнення оптичних елементів порівняно з їх лазерним зміцненням. Наприклад, до однієї з головних переваг електронно-променевої обробки елементів відносять практично безінерційне керування електронним

променем і можливість досить точного регулювання процесом шляхом програмної зміни питомої потужності, швидкості переміщення електронного променя й часу обробки. Крім цього, електронно-променево зміцнення оптичних елементів здійснюється у вакуумній камері, тобто в замкненому просторі, з якого відсутні викиди продуктів обробки в навколишнє середовище, що робить електронну обробку екологічно чистим технологічним процесом.

Таким чином, аналіз існуючих методів фінішної обробки (полірування й термозміцнення) оптичних елементів виявив такі їх недоліки: наслідки механічного полірування – наявність поверхневого дефектного шару, що містить подряпини, локальні впровадження абразивних зерен тощо; наслідки хімічного полірування – низька точність збереження геометричних характеристик оброблюваної поверхні й екологічно брудне виробництво; наслідки хіміко-механічного полірування – наявність дефектного шару, хоча й меншої товщини (десяті частки мікрметра) порівняно з механічним поліруванням, і відсутність екологічної чистоти; наслідки теплових методів полірування (вогневі, ІЧ-випромінюванням, плазмові, іонні й лазерні) – низький коефіцієнт корисної дії, складність керування процесом обробки, висока вартість технологічного устаткування.

Встановлено, що одним з перспективних методів обробки оптичних елементів є електронно-променево обробка, до переваг якої відносяться такі: універсальність, тобто придатність до операцій полірування та зміцнення; при поліруванні елементів з оптичного скла усувається дефектний шар, подряпини, риси тощо, формується поверхня з високою чистотою й мінімальною шорсткістю; зберігається її геометрична форма; технологічний процес є екологічно чистим; при зміцненні елементів з оптичних керамік усуваються дефекти механічної обробки, та підвищується стійкість до розтяжних напружень (у 1,8...2,3 рази) і стискаючих напружень (у 3,2...4,5 рази); придатність до програмного електронного керування процесом обробки.

Разом з тим, нині відсутні важливі для практики дослідження з встановлення закономірностей впливу режимів електронно-променевої обробки

(густини теплового впливу електронного променя, швидкості його переміщення) на фізико-механічні властивості поверхневих шарів оптичних елементів, що визначають їх параметри якості (чистоту та мікрошорсткість поверхні, стискаючі напруження та товщину зміцнених шарів, товщину оплавленого шару, збереження площинності та геометричної форми тощо). Також відсутні дослідження з визначення режимів електронно-променевої обробки оптичних елементів, у межах яких відбувається покращення їх експлуатаційних характеристик (мікротвердості поверхневих шарів, міцності поверхневих шарів, спектрального коефіцієнта пропускання ІЧ-випромінювання, стійкості до зовнішніх термічних та механічних впливів, а також до умов експлуатації надзвукової техніки тощо), що призводять до підвищення техніко-експлуатаційних характеристик оптико-електронних приладів (точності та діапазонів вимірювання, вірогідності безвідмовної роботи тощо). Не розроблено експериментально-статистичні моделі для більш ефективного формування у режимі діалогу та реального часу на сучасних ПК бази даних з визначення режимів електронно-променевої обробки, що покращують їх експлуатаційні характеристики.

Слід зазначити, що нині є декілька теоретичних робіт з вирішення задач реалізації заданих розподілених теплових впливів на поверхні оптичних елементів за допомогою системи нерухомих джерел тепла (розподіл за законом Гауса) [50, 51, 54]. Але через відсутність зв'язку параметрів джерел теплового впливу (густини теплових дій, коефіцієнтів зосередженості, розмірів зон впливу) з керованими технологічними параметрами електронно-променевої установки (струмами променів, прискорюючими напругами, відстанями до оброблюваних поверхонь) можливості технічної реалізації та практичного використання отриманих результатів, наприклад, для підвищення якості обробки складних криволінійних поверхонь оптичних елементів та формування на них функціональних мікропрофілів, відсутні.

1.3.2. Методи математичного моделювання та визначення допустимих режимів обробки оптичних елементів концентрованими потоками енергії

Як було показано вище, найбільш перспективними фізико-технічними методами обробки оптичних елементів є методи, що використовують концентровані потоки енергії (сфокусовані потоки заряджених частинок, лазерне випромінювання, потоки низькотемпературної плазми та ін.) (КПЕ), до яких відноситься й електронний промінь.

Нижче наводиться аналіз діапазонів зміни режимів обробки КПЕ (густини теплового впливу q , часу впливу τ , швидкості переміщення V) [53, 54, 58, 86, 225, 226], в межах яких можлива поверхнева обробка оптичних елементів без їх руйнування, тобто визначаються допустимі діапазони їх зміни.

Для визначення вказаних діапазонів зміни режимів обробки КПЕ використовуються відомі методи теорії теплопровідності [64, 122, 135, 137, 139, 177].

У більшості процесів обробки елементів використовуються величини q , що не перевищують 10^{13} Вт/м², а основним процесом дисипації уведеної енергії є теплопровідність. Поряд із зазначеними явищами спостерігається взаємозв'язок і взаємозумовленість процесів, що проходять поблизу поверхні елемента, які приводять до зміни просторово-часових і енергетичних характеристик джерела теплоти як результату впливу КПЕ на матеріали порівняно з вихідними. Причина полягає у взаємодії КПЕ з потоками пари, частинок твердої й рідкої фаз, крапель конденсату, що утворюються в шарі газу, який прилягає до поверхні тіла. Процеси тепло- і масоперенесення в цьому випадку є досить складними й маловивченими (особливо це стосується коефіцієнтів перенесення), можливі різні нестійкі режими, що призводять до автоколивань. Так, уже в діапазоні зміни $q = 10^9 \dots 10^{10}$ Вт/м² помітну роль починають грати автоколивальні режими передачі енергії від КПЕ до оброблюваного елемента, при цьому спостерігається глибоке його проплавлення (так зване "кинджальне").

Досить значними є гідродинамічні явища у ванні розплаву, що утворена під дією КПЕ, оскільки товщина розплаву порівнянна з розмірами зони термічного впливу. Проведені оцінки показують, що внаслідок нерівномірності розподілу потужності КПЕ на поверхні тіла центр ванни перегрітий, там інтенсивніше відбуваються процеси випаровування й сильніше розвинена деформація поверхні, що приводить до заглиблення джерела тепла. Процес формування глибокого проплавлення має квазіперіодичний характер через зміну форми поверхні ванни, і, як наслідок, збільшення її площі, що знижує q , а також зниження q , що досягає поверхні ванни при взаємодії КПЕ із продуктами руйнування тіла.

Таким чином, побудова математичних моделей теплового впливу КПЕ на елементи в діапазоні густин потоку $10^9 < q < 10^{13}$ Вт/м² та їх аналіз пов'язані зі значними труднощами, обумовленими необхідністю врахування таких чинників: неодновимірності рівняння теплопровідності, температурної залежності теплофізичних коефіцієнтів і поглинальної здатності поверхні тіла, динаміки формування розплаву, деформації його поверхні тощо. У повному обсязі, необхідному для проведення практичних розрахунків, вирішення даного завдання нині не видається можливим, тому що відсутні експериментальні дослідження окремих стадій, що не дозволяє побудувати адекватні моделі. Є лише окремі роботи з розробки моделей для двох- і тривимірних об'єктів, які лише приблизно описують реальну картину процесу взаємодії КПЕ з матеріалами, що виявилися досить громіздкими навіть для реалізації на сучасних ПК.

Для нижчих рівнів $q = 10^8 \dots 10^9$ Вт/м² вже не спостерігається помітне руйнування оброблюваної поверхні, що супроводжується викидом значних мас речовини в навколишнє середовище. Якщо обробка КПЕ відбувається у вакуумі (наприклад, при електронній обробці) або в середовищі нейтрального газу, тобто хімічні й термохімічні реакції на поверхні тіла відіграють малу роль, то основні процеси пов'язані з фазовими переходами першого роду – розвитком

зони плавлення, ускладненої випарами речовини й переміщенням межі фазового переходу в об'ємі тіла, а також з деформацією поверхні утвореного розплаву тиском віддачі речовини, яка випаровується, коли сила тиску віддачі при випаровуванні помітно перевершує силу поверхневого натягу розплаву.

Зазначені процеси також є досить складними для математичного опису й проведення кількісних розрахунків, тому що теплофізичні коефіцієнти твердої й рідкої фаз у високотемпературній області відомі з невисоким ступенем точності й тільки для обмеженого кола матеріалів. Тому для розглядуваного рівня потоків q досить адекватні моделі відсутні, а є лише наближені моделі для одновимірного випадку, що не враховують деформацію поверхні розплаву.

При малих тривалостях процесу обробки t (не більше десятків часток секунд) або при відносно низьких величин q ($q = 10^7 \dots 10^8$ Вт/м²) спостерігається вже тільки термічний нагрів матеріалу та його плавлення без помітного випаровування (максимальною температурою поверхні оброблюваного матеріалу вважається його температура плавлення). При цьому розподіл потужності КПЕ по поверхні тіла найчастіше близький до нормального. Зазначене є справедливим для технологічних електронних потоків, сфокусованого лазерного випромінювання й ін., хоча можливі відхилення від нормального розподілу, обумовлені особливостями генерації КПЕ й фокусуючими системами. При розглядуваних рівнях q типовими процесами обробки матеріалів КПЕ є процеси полірування (наприклад, оптичного скла й інших діелектричних матеріалів) і загартування (наприклад, термозміцнення поверхневих шарів оптичних керамік і ряду інших матеріалів). У загальному випадку при реалізації зазначених процесів джерела тепла можуть бути нерухомими й рухомими, імпульсними й безперервними, точковими й просторово-розподіленими.

Аналіз моделей, виконаний для ряду матеріалів числовими й наближеними аналітичними методами, показав, що в ряді випадків істотна відмінність нелінійної моделі від лінійної має не тільки кількісний, але й якісний характер.

Так, результати розрахунків показали, що значення температури поверхні, розрахованої за лінійною моделлю, набагато менші температури, отриманої з рішення нелінійної моделі для різних тривалостей обробки, і ця різниця досягала в деяких випадках 800 К для даної енергії й тривалості обробки. Це пояснюється тим, що теплофізичні й оптичні характеристики в розглядуваному діапазоні температур змінюються як у бік збільшення, так й у бік зменшення, що призводить при постійних значеннях цих коефіцієнтів у лінійній моделі до одержання розбіжностей у значеннях температури.

Щодо розробок комплексів моделей і пакетів прикладних програм (ППП) для їхньої реалізації на ПК, які дозволяють цілеспрямовано шляхом числових експериментів оптимізувати технологічні режими обробки матеріалів КПЕ, то в цьому напрямку є лише обмежена кількість досліджень, які присвячені оптимізації складних нелінійних теплофізичних процесів, де роль КПЕ грають задані зовнішні теплові потоки (радіаційний тепловий потік, теплові потоки в індукційних печах, високотемпературні газові потоки й ін.). Відносно моделей теплового впливу КПЕ, у тому числі й електронного потоку різної форми (смугове й нормально-розподілене джерело тепла), на оптичні елементи (оптичне скло й оптична кераміка), а також ППП, то нині потрібно відзначити, що також є обмежена кількість робіт.

У цих роботах розроблені нелінійні моделі і програмне забезпечення у вигляді ППП теплової дії електронного потоку зазначеної форми на оптичні елементи різної форми й розмірів (тонкоплівкові елементи, прямокутні, циліндричні, сферичні й криволінійні елементи), які враховують температурні залежності теплофізичних властивостей матеріалів (відносна похибка розрахунків 10...15 %): нестационарні моделі нагріву елементів з оптичного скла й кераміки, які дозволяють прогнозувати з прийнятною для практики точністю діапазони зміни енергетичних характеристик електронного потоку (потужності в центрі впливу, швидкості переміщення потоку, коефіцієнта зосередженості, розмірів зони впливу й часу обробки), які реалізують задані

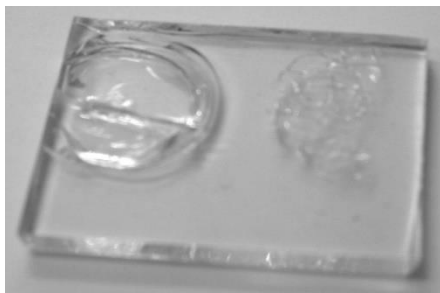
розподіли температури, градієнта температури й швидкості нагріву в оброблюваних елементах.

Таким чином, аналіз моделей процесів впливу КПЕ на оптичні елементи показав, що для більшості процесів обробки елементів КПЕ загальною методологією аналізу їх теплового впливу на елементи є методи класичної теорії теплопровідності (лінійної й нелінійної). При цьому, для значень теплового потоку $q = 10^8 \dots 10^{13}$ Вт/м² побудова моделей їх теплового впливу на елементи пов'язана зі значними труднощами і поки що відсутні адекватні моделі через неможливість урахування неодновимірності рівнянь теплопровідності, температурних залежностей теплофізичних властивостей елемента й поглинальної здатності його поверхні, інтенсивного випаровування, викиду значних мас у навколишнє середовище й т. д., а також через відсутність необхідних експериментальних даних про зазначені процеси. Для відносно низьких значень теплового потоку $q = 10^7 \dots 10^8$ Вт/м², коли спостерігається тільки термічний нагрів та його плавлення без значного випаровування, побудова моделей їх теплового впливу на матеріали спрощується, тому розрахунки температурних полів можна робити з прийнятною для практики точністю (відносна похибка 10...15 %)

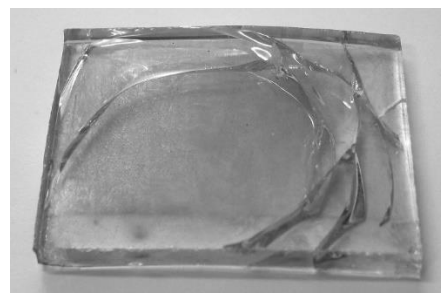
1.4. Аналіз впливу зовнішніх термічних та механічних дій, а також умов експлуатації надзвукової техніки на експлуатаційні характеристики оптичних елементів

Проведені дослідження [39, 49, 59, 62] показують, що при деяких значеннях зовнішніх теплових потоків та часів їх впливу, так званих критичних значеннях (q_n^* , t^*), на поверхнях оптичних елементів та у поверхневих шарах починають розвиватись різні негативні дефекти (пухирці, горбики, подряпини, западини та ін.), які утворюються після стандартної механічної обробки елементів. Це призводить до їх руйнування (з'являються відшарування, глибокі тріщини, відколи, напливи та хвилеподібні поверхні, ділянки швидкого

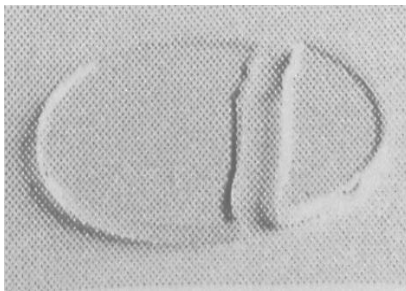
закипання та ін.) (рис. 1.7), що вже не відповідає вказаним вище нормативним критеріям якості оптичних елементів. В результаті відбувається погіршення експлуатаційних характеристик елементів (зменшується мікротвердість поверхні, міцність поверхневих шарів, спектральний коефіцієнт пропускання ІЧ-випромінювання, знижується стійкість до зовнішніх термічних та механічних впливів та ін.), що призводить до погіршення техніко-експлуатаційних характеристик оптико-електронних приладів (точності та діапазонів вимірювань, безвідмовності роботи та ін.).



а)



б)



в)



г)



д)

Рис. 1.7. Зразки елементів з оптичного скла К8 та кераміки КО2, які зазнали руйнувань при перевищенні параметрами зовнішніх термовпливів їх критичних значень (густини теплового впливу q_n^* та часу його дії t^*): а) – відшарування, К8, $q_n^* = 3 \cdot 10^5$ Вт/м², $t^* > 10$ с; б) – утворення глибоких тріщин, К8, $q_n^* = 1,5 \cdot 10^5$

Вт/м², $t^* > 14$ с; в) – відколи, КО2, $q_n^* = 1,2 \cdot 10^6$ Вт/м², $t^* > 25$ с; г) – напливи та хвилеподібні поверхні, К8, $q_n^* = 6 \cdot 10^5$ Вт/м², $t^* > 6$ с; д) – ділянки швидкого закипання, К8, $q_n^* = 10^6$ Вт/м², $t^* > 4$ с.

Нині є спроби вирішення вказаної проблеми шляхом внесення необхідних змін у нормативні документи на умови їх експлуатації: наприклад, шляхом регламентації змін швидкостей зовнішнього нагріву оптичних вікон лазерних далекомірів; шляхом обмеження потужності лазерного випромінювання, що вводиться у світловоди медичних приладів; шляхом контролю величин швидкостей та напрямків запуску виробів з ІЧ-приладами тощо. Однак регламентувати та контролювати вказані зміни, враховуючи усю складність та різноманітність умов експлуатації розглядуваних приладів достатньо складно, а у деяких випадках просто неефективно.

Є обмежена кількість робіт з моделювання зовнішніх теплових впливів на оптичні елементи, однак у них не розглянуто питання визначення критичних значень їх параметрів (теплогового потоку q_n^* , часів його дії t^*), перевищення яких призводить до утворення вказаних вище негативних дефектів на поверхні елементів та погіршення їх експлуатаційних характеристик аж до руйнування елементів.

Нижче наводиться аналіз методів визнання критичних значень параметрів зовнішніх термічних впливів на оптичні елементи, яким вони піддаються при експлуатації.

1.4.1. Методи визначення критичних значень параметрів зовнішніх термічних впливів, контроль яких дозволяє попереджати погіршення експлуатаційних характеристик оптичних елементів та їх руйнування

При експлуатації приладів їх оптичні елементи (наприклад, оптичні вікна передавального та приймального каналів імпульсних лазерних далекомірів прицільних комплексів, торцеві поверхневі волоконно-оптичних світловодів лазерних медичних приладів, оптичні обтічники ІЧ-приладів тощо) піддаються

інтенсивним зовнішнім термовпливам попадаючи у зони з підвищеними температурами нагріву та зовнішніми тисками (наприклад, осередки пожеж з високими температурами полум'їв, зони бойових дій з підвищеним температурним впливом тощо) (табл. 1.4) та піддаються зовнішнім ударним термовпливам в умовах експлуатації надзвукової техніки (нагрів поверхонь обтічників ГЧ-приладів надзвуковим газовим потоком зі швидкістю до $2 \cdot 10^3$ м/с та перепадом тисків у фронті ударної хвилі до $5 \cdot 10^6$ Па) (табл. 1.5) [49, 58, 161, 162].

Таким чином, на поверхні оптичних елементів приладів при їх експлуатації можуть поступати значні теплові потоки (до $1,5 \cdot 10^5 \dots 2,3 \cdot 10^5$ Вт/м² при впливі зон з підвищеними температурами полум'їв (до 1373...2623 К); до $2 \cdot 10^5 \dots 2,3 \cdot 10^6$ Вт/м² при впливі надзвукового потоку повітря (швидкість обдуву до $2 \cdot 10^3$ м/с, перепад тиску у фронті ударної хвилі до $5 \cdot 10^6$ Па)), які при їх дії на протязі від декількох секунд до десятків секунд призводять до утворення різних негативних дефектів (тріщин, горбиків, западин, напливів тощо), розвиток яких призводить до локальних руйнувань елементів (відшарування, відколи, розпад на декілька частин тощо). В результаті погіршуються експлуатаційні характеристики оптичних елементів.

При цьому фізичний аналіз процесів, що протікають у оптичних елементах при впливі на їх поверхні підвищених теплових потоків, показує, що у поверхневих шарах елементів реалізуються значні градієнти температур, які призводять до виникнення термопружних напружень σ : стискаючих ($\sigma < 0$) – поблизу поверхні елемента; напружень розтягу ($\sigma > 0$) – поблизу його нижнього боку [49, 62]. Подальше збільшення σ призводить до перевищення його критичних значень σ^* (межа міцності для даного оптичного матеріалу (див. розділ 2)), що веде до початку утворення вказаних дефектів та руйнування елементів, які суттєво впливають на якість приладів. Крім цього, утворення таких дефектів, як напливи, порушення площинності та втрата геометричної форми є наслідком глибокого оплавлення оптичних елементів, коли

максимальна товщина розплавленого шару h_m перевищує гранично допустимі значення h_m^* [62].

Для розробки методів визначення критичних значень параметрів зовнішніх термовпливів (q_n^* , t^*) на оптичні елементи, які визначають вказані вище негативні явища у їх поверхневих шарах необхідно вміти розраховувати з необхідною для практики точністю (відносна похибка на повинна перевищувати 5...10 %) розподіли температур, термопружних напружень та товщин розплавлених шарів у оптичних елементах в залежності від параметрів зовнішніх термовпливів (q_n , t).

Таблиця 1.4

Значення температур полум'їв та ступені їх чорноти основних паливих матеріалів [58]

№	Пальний матеріал	Температура полум'я, К	Ступінь чорноти
1	Торф, мазут	1273	0,88
2	Деревина, буре вугілля, сира нафта, дизельне паливо, тракторний гас	1373...1423	0,6
3	Кам'яне вугілля, каучук та вироби з нього, бензин	1473...1523	0,9
4	Антрацит, сірка	1573	0,6
5	Горючі гази	1773...1973	0,7
6	Метали	> 2373...2623	0,45

Примітка. Діапазон зміни зовнішнього теплого потоку: $q_w^{(1)} = 1,5 \cdot 10^5 \dots 2,3 \cdot 10^6$ Вт/м².

Далі шляхом зіставлення з їх критичними значеннями

$$\sigma > \sigma^*, \quad h_m > h_m^* \quad (1.1)$$

знаходяться діапазони зміни критичних параметрів, що призводять до утворення вказаних вище дефектів.

Тому контроль за виключенням діапазонів зміни параметрів q_n^* та t^* при функціонуванні оптичних елементів дозволяє попереджати утворення негативних дефектів та їх руйнування, що призводять до погіршення техніко-експлуатаційних характеристик приладів.

Для визначення розподілів температур, термopружних напружень та визначення товщин розплавленого шару на поверхні оптичних елементів необхідно мати математичні моделі процесів нагріву, термозміцнення та оплавлення елементів різної геометричної форми та розмірів, що враховують температурні залежності теплофізичних властивостей оптичного матеріалу (об'ємної теплоємності $C_V(T)$ та коефіцієнта теплопровідності $\lambda(T)$) для підвищення точності у визначенні діапазонів Δq_n^* та Δt^* .

Таблиця 1.5

Значення температури поверхонь вісесиметричних тіл (T_n , К) залежно від швидкості обдуву повітряним потоком (V , м/с) та режиму обтікання (за даними продувок тіл різної геометричної форми в аеродинамічних трубах [82, 169])

$V, 10^2 \text{ м/с}$	$T_n, \text{ К}$	
	Ламінарний режим	Турбулентний режим
5	540	620
6,5	730	840
10	820	950
14	1040	1170
17	1320	1480
20	1650	1850

Примітка. Діапазони зміни зовнішнього теплового потоку: $q_w^{(2)} = 2 \cdot 10^5 \dots$

$2,3 \cdot 10^6 \text{ Вт/м}^2$ (ламінарний режим обтікання, $Re = \frac{D \cdot V}{\nu} < 10^5$ (D – діаметр

виробу, ν – коефіцієнт кінематичної в'язкості повітря)); $q_w^{(2)} = 3 \cdot 10^5 \dots$

$3,4 \cdot 10^6 \text{ Вт/м}^2$ (турбулентний режим обтікання, $Re > 10^5$).

Нині є багато фундаментальних робіт [64, 122, 135, 137, 139, 177, 239, 240] щодо розглянутих процесів зовнішніх термовпливів на тверді тіла різної геометричної форми та розмірів, математичних моделей та методів розрахунку їх основних характеристик: розподілів температури та термопружних напружень, швидкостей оплавлення та товщин оплавленого шару. При цьому розглядались, у основному, лінійні задачі нагріву тіл (не враховувались залежності $C_V(T)$ та $\lambda(T)$, нехтували радіаційними тепловтратами без належного аналізу температурного стану поверхні тощо). Для чисельних розрахунків використовувались відомі чисельно-аналітичні методи: різницевий метод та метод кінцевих елементів тощо, а також методи інтегральних перетворень Фур'є для отримання аналітичних розв'язків (тільки для лінійних задач), які легко піддавались фізичному аналізу.

Однак кількість робіт щодо теплового впливу на розглядувані оптичні елементи вже набагато менша [53, 54, 58, 86]. Більше того, практично відсутні дослідження з розрахунку розподілів температури та термопружних напружень у елементах з оптичного скла та керамік в залежності від параметрів зовнішніх термовпливів (величини зовнішнього теплового потоку, часу його дії), геометричної форми та розмірів елемента (наприклад, циліндричні стрижени та диски, сферичні оболонки). При цьому відсутні роботи по знаходженню критичних значень параметрів зовнішніх термовпливів (теплового потоку, часу його дії тощо), які призводять до руйнування оптичних елементів (поява відшарувань, сколів та ін. дефектів).

Щодо дослідження процесу оплавлення оптичних елементів є тільки декілька робіт [239, 240], в яких розглядається процес їх неглибокого оплавлення (товщина розплавленого шару не перевищувала 10...15 мкм), а товщина розплавленого шару знаходилася по координатній лінії початку утворення рідкої фази. Дослідження ж по глибокому оплавленню оптичних елементів (товщина розплавленого шару вже може досягати 300...500 мкм) в залежності від параметрів зовнішніх термовпливів нині відсутні. Крім того відсутні дослідження з знаходження критичних значень параметрів зовнішніх

термовпливів, перевищення яких призводить до утворення шару розплаву, товщина якого перевищує допустимі значення та на поверхні елементів утворюються напливи та ін. дефекти, що призводить до порушення її площинності, суттєвої зміни їх геометричної форми та, у кінцевому випадку, до відмови приладів.

Дослідження теплових впливів зовнішнього надзвукового газового потоку на оптичні обтічники ІЧ-приладів в умовах експлуатації надзвукової техніки обмежені [58, 62]: відсутні дані з розподілу теплового потоку з прикордонного шару вздовж поверхні обтічника для різних режимів обтікання (ламінарного, турбулентного); не знайдено небезпечні ділянки на поверхні обтічника, які піддаються максимальним зовнішнім термовпливам, в яких відбувається їх руйнування; не розроблено математичну модель нагріву обтічника у вигляді півсферичної оболонки з врахуванням температурних залежностей теплофізичних параметрів оптичного матеріалу; не розроблено методи знаходження критичних значень параметрів зовнішніх термовпливів (швидкості обдуву потоком повітря та часу його впливу), перевищення яких призводить до руйнування обтічників.

Висновки до розділу 1, мета і задачі дослідження

Аналіз науково-технічної вітчизняної та зарубіжної літератури показав, що широке використання електронно-променевої технології у оптико-електронному приладобудуванні стримується відсутністю даних про закономірності впливу її режимів обробки на експлуатаційні характеристики оптичних елементів (мікротвердість поверхні, міцність поверхневих шарів, спектральний коефіцієнт пропускання, стійкість до зовнішніх термічних та механічних ударів тощо), керування якими дозволяє покращувати техніко-експлуатаційні характеристики оптико-електронних приладів, зокрема точність та діапазони вимірювань, ймовірність безвідмовної роботи при експлуатації та ін.

Встановлено, що вимушений зовнішній нагрів оптичних елементів призводить до виникнення у їх поверхневих шарах термопружних напружень, які при критичних значеннях параметрів зовнішнього термовпливу перевищують їх критичні значення, що призводить до погіршення експлуатаційних характеристик приладів. При цьому в умовах експлуатації надзвукової техніки оптичні обтічники при критичних значеннях швидкостей обдуву потоком повітря та часів його теплового впливу піддаються термічним та механічним ударам, які призводять до їх руйнування та виходу з ладу приладів. Тому важливим питання є попередження можливих руйнувань їх оптичних елементів у вказаних умовах. Для цього необхідно розробити науково-обґрунтовані методи визначення критичних значень параметрів зовнішніх термічних впливів, контроль яких виключає передчасне руйнування оптичних елементів.

Крім цього, існує невизначеність у рекомендаціях щодо критичних значень параметрів зовнішніх термовпливів, що базуються на визначенні критичних значень термонапружень та товщин оплавленого шару в залежності від форми та розмірів оптичного елемента а також місць знаходження на елементі небезпечних ділянок, де зовнішні термовпливи досягають максимальних значень, внаслідок чого відбувається погіршення їх експлуатаційних характеристик та руйнування. Не існує робіт та концепцій, які б чітко визначали розподіл температур та термопружних напружень по товщині оптичних елементів з врахуванням температурних залежностей теплофізичних параметрів оптичного матеріалу в умовах зовнішніх термічних та механічних ударних впливів.

Таким чином, покращення експлуатаційних характеристик оптичних елементів оптико-електронних приладів на основі встановлених закономірностей впливу на них режимів електронно-променевої технології, розроблених математичних моделей, спеціалізованого програмного забезпечення, що в цілому представляють собою технологічні основи керування якісними характеристиками поверхні та поверхневих шарів

елементів для підвищення техніко-експлуатаційних характеристик приладів з подальшим їх впровадженням у виробництво є важливою науко-технічною проблемою.

В результаті було сформульовано мету та задачі досліджень.

Мета роботи полягає у створенні науково-обґрунтованих основ покращення експлуатаційних характеристик оптичних елементів шляхом встановлення закономірностей впливу на них режимів електронно-променевої технології.

Для досягнення поставленої мети необхідно було вирішити такі основні наукові та прикладні завдання.

1. На основі аналізу стану проблеми обґрунтувати науковий підхід вирішення проблеми покращення експлуатаційних характеристик оптичних елементів за допомогою електронно-променевої технології.
2. Запропонувати методологію проведення експериментальних та теоретичних досліджень з впливу режимів електронно-променевої обробки на експлуатаційні характеристики оптичних елементів з врахуванням впливу зовнішніх температур нагріву, зовнішніх тисків, термічних та механічних ударів тощо.
3. Провести експериментальні дослідження з визначення закономірностей впливу режимів електронно-променевої обробки на експлуатаційні характеристики оптичних елементів, визначити їх діапазони зміни, в межах яких спостерігається покращення вказаних характеристик.
4. Провести експериментальні дослідження з визначення закономірностей впливу зовнішніх термічних та механічних дій на необроблені та оброблені електронним променем оптичні елементи, визначити діапазони зміни критичних значень їх параметрів, контроль за якими дозволить попереджати можливі руйнування елементів.
5. Розробити математичні моделі зовнішніх впливів на оптичні елементи, яким вони піддаються при експлуатації, визначити діапазони зміни критичних значень їх параметрів (теплових потоків, тисків, швидкостей

обдуву потоком повітря, тривалості їх дії та ін.), а також місця розташування ділянок на поверхні елементів, які піддаються максимальному зовнішньому нагріву, що дозволить шляхом електронно-променевої обробки вказаних ділянок на стадії виготовлення елементів попереджати їх руйнування в умовах експлуатації.

6. На базі проведених теоретико-експериментальних досліджень розробити: метод покращення експлуатаційних характеристик оптичних елементів за допомогою електронно-променевої технології; метод попереднього визначення критичних значень параметрів зовнішніх впливів, який дозволяє оцінювати небезпечні чинники, контроль яких попереджає погіршення експлуатаційних характеристик оптичних елементів.
7. Впровадити розроблені методи для покращення техніко-експлуатаційних характеристик оптико-електронних приладів промислового та медичного призначення.
8. Визначити нові перспективні напрямки подальшого застосування електронно-променевої технології в оптико-електронному приладобудуванні.

РОЗДІЛ 2. ЗРАЗКИ ОПТИЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ, ФІЗИКО-ХІМІЧНІ МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ, ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВЕ ТЕХНОЛОГІЧНЕ ОБЛАДНАННЯ ТА ЛАБОРАТОРНО-ВИПРОБУВАЛЬНІ УСТАНОВКИ

Спочатку наводиться загальна методика проведення експериментальних та теоретичних досліджень.

Потім розглядаються основні теплофізичні та фізико-механічні характеристики оптичних елементів, методики експериментальних досліджень, опис експериментальних установок, методів математичного моделювання та обробки результатів експериментів.

2.1. Загальна методика досліджень

Розроблена загальна методика передбачає наступний порядок проведення досліджень:

- встановлення закономірностей впливу режимів електронно-променевої технології (густини теплової дії електронного променя, швидкості його переміщення) на оптичні елементи;
- визначення діапазонів зміни режимів електронно-променевої технології на експлуатаційні характеристики оптичних елементів (мікротвердість поверхні, спектральний коефіцієнт пропускання, стійкість до зовнішніх термічних та механічних ударів тощо), в межах яких спостерігається їх покращення;
- визначення критичних значень параметрів зовнішніх впливів, контроль яких дозволяє попереджати погіршення експлуатаційних характеристик оптичних елементів та їх руйнування при експлуатації;
- розробка методів покращення техніко-експлуатаційних характеристик оптико-електронних приладів шляхом встановлення закономірностей впливу режимів електронно-променевої технології на експлуатаційні характеристики їх оптичних елементів, а також попереднього встановлення критичних значень параметрів зовнішніх термічних та механічних впливів, які можуть призводити до погіршення вказаних характеристик аж до руйнування елементів;

– знаходження практичного використання та впровадження результатів роботи на підприємствах України та за кордоном у вигляді технологічних рекомендацій для включення у нормативні документи на виготовлення та застосування загальнопромислових оптико-електронних приладів. Використання результатів дисертації при організації учбового процесу у ВНЗ України.

2.2. Основні характеристики зразків оптичних елементів

Елементи з оптичного скла. Для виготовлення оптичних елементів різних галузей оптико-електронного приладобудування (інтегральної та волоконної оптики, мікрооптики, оптоелектроніки та ін.) широко застосовують безкольорове оптичне скло, оптичну кераміку та інші матеріали [73, 77, 93, 94, 99, 103, 119, 123, 172, 200, 201, 204, 206, 208] (табл. 1.1).

Основні фізико-механічні й теплофізичні характеристики різних марок оптичного скла нині достатньо добре вивчені та представлені у табл. 2.1.

При цьому, згідно з існуючими експериментальними даними, основні теплофізичні характеристики оптичного скла (об'ємна теплоємність C_V , Дж/м³·К; коефіцієнт теплопровідності λ , Вт/м·К; термічний коефіцієнт лінійного розширення α_T , К⁻¹) суттєво залежать від температури нагріву, і тому при розгляді процесів нагріву оптичних елементів необхідно враховувати температурні залежності $C_V(T)$, $\lambda(T)$ та $\alpha_T(T)$. Проведена математична обробка експериментальних даних показала, що вказані залежності з достатнім ступенем точності (відносна похибка не більше 7...9 %) можуть бути представлені у вигляді

$$C_V(T) = C_{V0} \cdot T^{\nu_0}, \quad \lambda(T) = \lambda_0 \cdot T^{\nu_0}, \quad \alpha_T(T) = \alpha_{T0} \cdot T^{\nu_1}, \quad (2.1)$$

де C_{V0} , λ_0 , α_{T0} та ν – емпіричні константи (табл. 2.2).

Елементи з оптичних керамік. Для виготовлення оптичних елементів ІЧ-приладів (півсферичні обтічники, вікна видимості у вигляді плоских пластин, світлорозсіювальні екрани тощо), що працюють в умовах високих

механічних та термічних навантажень, використовують оптичну кераміку (КО1, КО2, КО5 та ін.). Оптична кераміка (див. табл. 1.2) є полікристалічним матеріалом, отриманим методом пресування під великим тиском у вакуумі, механічно ізотропним, по термомеханічним властивостям значно перевищує відповідний монокристал, добре обробляється та має високу стійкість до теплових ударів.

Таблиця 2.1

Основні теплофізичні та фізико-механічні характеристики оптичного скла (значення характеристик наведено при нормальних умовах ($P = 10^5$ Па, $T_0 = 293$ К))

Марка матеріалу	К8	БК10	ТФ110
Характеристика			
$\rho \cdot 10^3$, кг/м ³	2,52	3,12	5,19
$\alpha_T \cdot 10^6$, К ⁻¹	7,6	6,8	7,8
$E \cdot 10^{-10}$, Па	8,07	1,1	1,3
$G \cdot 10^{-10}$, Па	3,35	0,85	0,91
$\bar{\nu}$	0,21	0,281	0,253
$T_{пл}$, К	1400	1390	1450
$H_v \cdot 10^{-9}$, Па	1,12	0,75	0,84
λ , Вт/м·К	1,05	1,15	0,67
$C_V \cdot 10^{-6}$, Дж/м ³ ·К	1,74	1,75	1,83
σ^* , МПа	23,5	10	17

Примітка. ρ – густина, α_T – коефіцієнт лінійного розширення, E – модуль Юнга, G – модуль зсуву, $\bar{\nu}$ – коефіцієнт Пуасона, $T_{пл}$ – температура плавлення, H_v – мікротвердість, σ^* – критичні значення термопружних напружень.

Таблиця 2.2

Значення емпіричних констант C_{v0} , λ_0 , α_{T0} та ν у регресійних залежностях (2.1) для оптичного скла

Марка кераміки Константа	К8	БК10	ТФ10
C_{v0}	$1,13 \cdot 10^5$	$0,87 \cdot 10^5$	$1,32 \cdot 10^5$
λ_0	0,068	0,057	0,045
ν_0	0,479	0,527	0,455
α_{T0}	3,448	2,776	2,736
ν_1	0,135	0,153	0,178

Основні фізико-механічні та теплофізичні властивості вказаних марок оптичних керамік нині також достатньо добре вивчені та представлені у табл. 2.3, 2.4.

Таблиця 2.3

Основні теплофізичні та фізико-механічні характеристики оптичних керамік (значення характеристик наведено при нормальних умовах ($P = 10^5$ Па, $T_0 = 293$ К))

Марка матеріалу Характеристика	КО1	КО2	КО5
$\rho \cdot 10^3$, кг/м ³	3,17	4,09	3,58
$\alpha_T \cdot 10^6$, К ⁻¹	11,7	6,7	10,8
$E \cdot 10^{-10}$, Па	7,93	8,75	26,5
$G \cdot 10^{-10}$, Па	2,53	3,32	8,6
ν	0,276	0,321	0,264
$T_{пл}$, К	1673	2123	1448

Продовження таблиці 2.3

Марка матеріалу	КО1	КО2	КО5
Характеристика			
$H_v \cdot 10^{-9}$, Па	5,85	1,21	2,17
λ , Вт/м·К	15,1	17	44,3
$C_V \cdot 10^{-6}$, Дж/м ³ ·К	0,73	2,1	1,44
σ^* , МПа	80	75	112

Таблиця 2.4

Значення емпіричних констант C_{V0} , λ_0 , α_{T0} та ν у регресійних залежностях (2.1) для оптичної кераміки

Марка кераміки	КО1	КО2	КО5
Константа			
C_{V0}	0,0329	0,094	0,0198
λ_0	0,707	0,393	1,856
ν_0	0,531	0,605	0,635
α_{T0}	2,027	2,2907	3,235
ν_1	0,299	0,247	0,212

Для експериментальних досліджень використовували наступні зразки оптичних елементів оптико-електронних приладів: плоскопаралельні пластини, прямокутні елементи, диски (підкладки, світлорозсіювальні екрани у мікрооптиці, інтегральній та волоконній оптиці та ін.) та сферичні елементи (лінзи, півсферичні обтічники та ін.) з оптичного скла (К8, БК10) та оптичної кераміки (КО1, КО2, КО5) з товщиною $H = 2 \cdot 10^{-3} \dots 6 \cdot 10^{-3}$ м; шириною $B = 3 \cdot 10^{-2} \dots 8 \cdot 10^{-2}$ м; довжиною $L = 3 \cdot 10^{-2} \dots 10^{-1}$ м; радіусами $R = 1,5 \cdot 10^{-2} \dots 6 \cdot 10^{-2}$ м.

2.3. Методи експериментальних та теоретичних досліджень фізико-механічних характеристик поверхневих шарів оптичних елементів, які модифіковані електронним променем

Методи фізико-хімічного аналізу. Експериментальні дослідження структури поверхні та товщини оплавлених шарів оптичних елементів, проводилися, в основному, за допомогою відомих методів оптичної мікроскопії і мікрозондового аналізу, що включає растрову та скануючу мікроскопію (РЕМ), а також трасемісійну електронну мікроскопію (ТЕМ) [12, 13, 100, 108, 256, 304, 313].

Вимірювання мікрошорсткості поверхні оптичного скла проводилося методами атомно-силової мікроскопії (АСМ) [233, 284]. У експериментальних дослідженнях використовувався АСМ NT-206 (виробник ТДВ “Мікротестмашини”, м. Гомель, Беларусь) у комплексі з керуючим програмним забезпеченням Surface View, який призначений для вимірювання й аналізу мікро- і субмікронного рельєфу поверхонь об’єктів мікро- і нанометрового розмірного діапазону з високим розділенням (рис. 2.1, 2.2).

Типові мікрофотографії результатів дослідження поверхонь елементів з оптичного скла методами АСМ (наприклад, для оптичного скла К8) подано на рис. 2.3 а, 2.3 б (після стандартного механічного полірування) та рис. 2.4 а, 2.4 б (після полірування електронним променем), а типовий профіль поперечного перерізу досліджуваної поверхні – на рис. 2.3 в (після механічного полірування) та рис. 2.4 в (після полірування електронним променем). Проведені дослідження морфології поверхні оптичних елементів після стандартного механічного полірування й полірування електронним променем показали, що в першому випадку поверхня є істотно неоднорідною за величинами мікрошорсткості. При цьому, значення як середнього арифметичного відхилення профілю R_a від базової площини, так і середньоквадратичного відхилення профілю R_q від зазначеної площини (значення R_a й R_q визначалися за профілями (типу рис. 2.3 в, 2.4 в) з використанням стандартних методик) у різних місцях розглядуваної поверхні можуть різнитися в кілька разів, а в

другому випадку – зазначені неоднорідності помітно згладжуються й розходження в значеннях R_a й R_q для різних ділянок поверхні вже не перевищують 10...15 %. Крім цього, значення R_a й R_q для поверхні оптичних елементів, які поліровані стандартним механічним методом, на порядок і більше вищі, ніж для поверхні, яка зазнала полірування електронним променем.

Тому в межах зазначеної похибки величину мікросорсткості h на обробленій електронним променем поверхні оптичного елемента визначали, наприклад, як середню величину \overline{Ra} ($h \approx \overline{Ra}$) для кількох довільно обраних ділянок (звичайно досліджували 5...6 ділянок).



Рис. 2.1. Комплекс на базі атомно-силового мікроскопа “NT-206” для контролю лінійних розмірів і мікрорельєфу топології оптичних елементів.

Вимірювання мікротвердості H_v проводилося за такою методикою [42, 79, 258]. Зразки відповідним боком приклеювали лаком до металевої підставки й попередньо підводили індентор на місце, що не містить дефектів, так, щоб, рухаючись у зворотному напрямку, краї зразка не зачіпали оправу об’єктива. При цьому при вимірюванні H_v на зовнішньому боці алмазна пірамідка залишала відбиток і симетричну розетку тріщин біля кутів відбитка. На боці, обробленому електронним променем, навколо відбитка тріщини не виявляються.

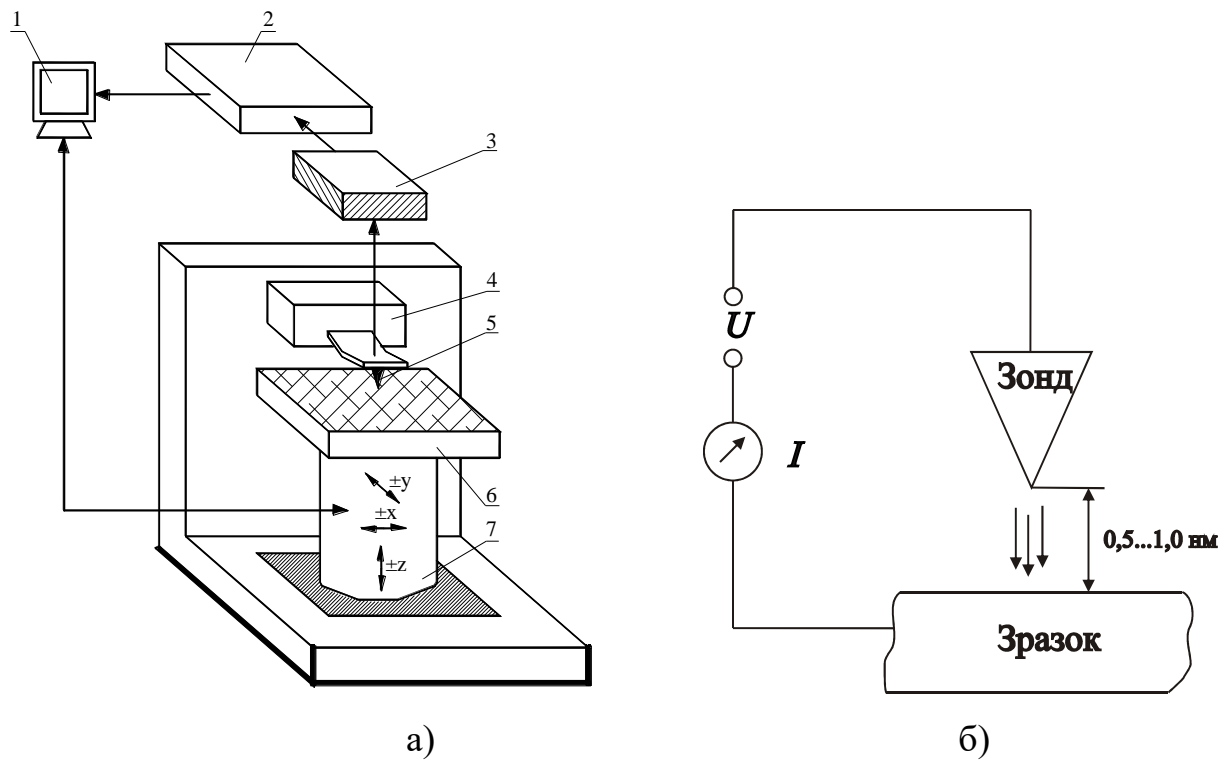
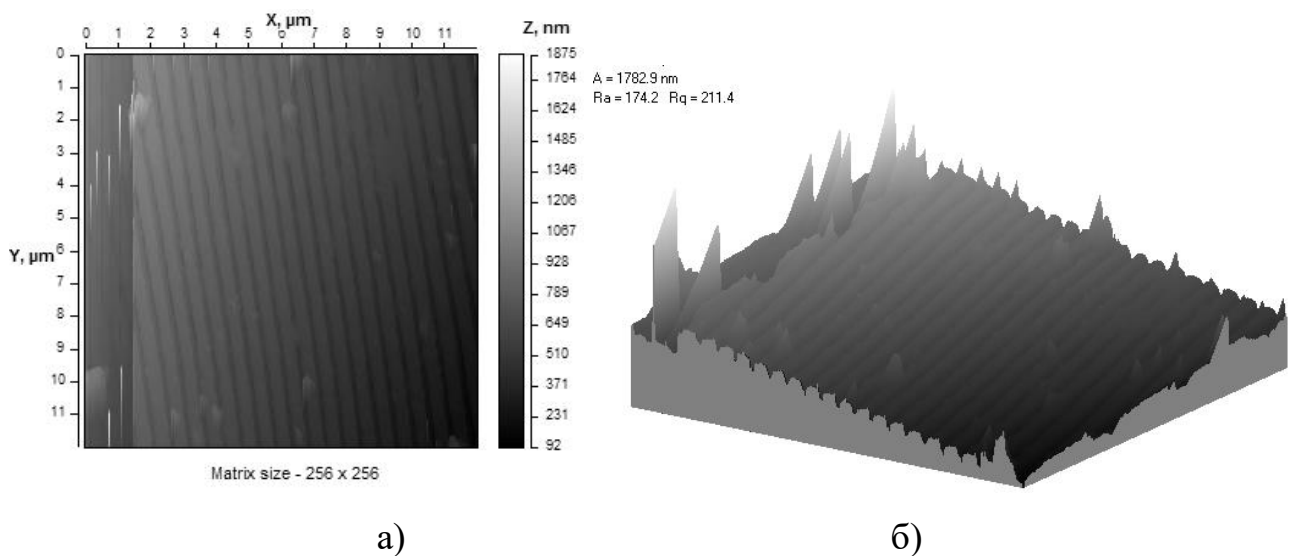
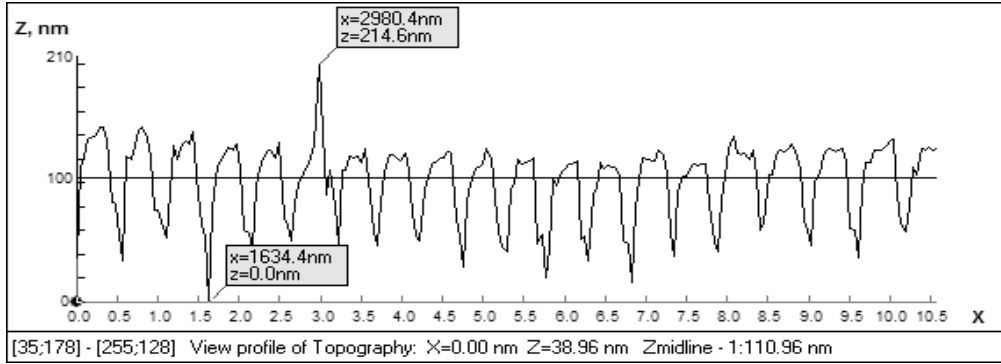


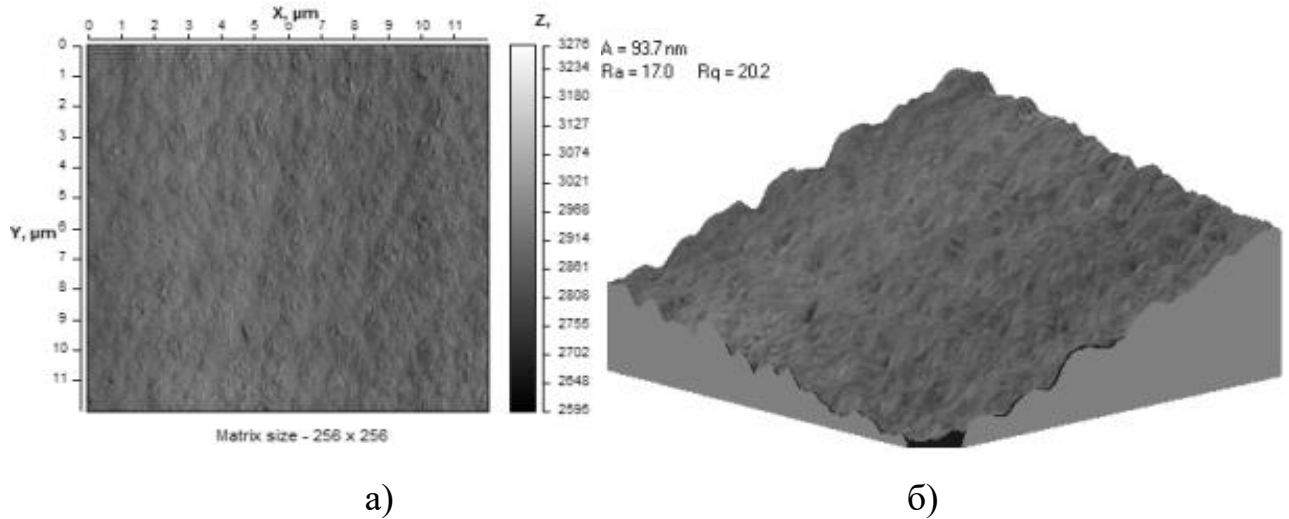
Рис. 2.2. Загальна схема (а) і принцип роботи (б) скануючого зондового мікроскопа (типу “NT-206”): 1 – комп’ютерна система керування рухом скануючого пристрою, збору, візуалізації й аналізу даних; 2 – система зворотного зв’язку для контролю за вертикальним рухом скануючого пристрою; 3 – датчик положення зонда; 4 – система грубого підведення й позиціонування зонда; 5 – скануюча голка (зонд); 6 – зразок; 7 – п’єзоелектричний скануючий пристрій, що переміщує зразок під голкою (голку над зразком) за растровою схемою.





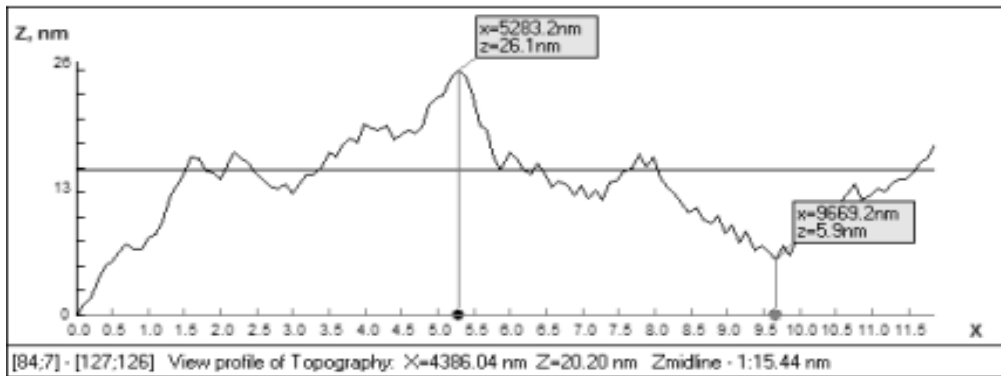
в)

Рис. 2.3. Двовимірне (а) і тривимірне (б) АСМ-зображення частини обробленої методом механічного полірування поверхні елемента з оптичного скла К8, уздовж якої здійснюється сканування вимірювального зонда, а також профіль поперечного перерізу сканованої поверхні (в).



а)

б)



в)

Рис. 2.4. Двовимірне (а) і тривимірне (б) АСМ-зображення частини обробленої електронним променем поверхні елемента з оптичного скла К8, а також профіль поперечного перерізу сканованої поверхні (в).

Кількість зразків для кожного режиму обробки становила не менше трьох. Для підвищення точності даних вимірювань проводили 10 паралельних визначень середніх діагоналей відбитків піраміди. Мікротвердість розраховували за формулою:

$$H_v = 1818,8 \cdot \frac{P}{\bar{c}^2}, \quad (2.2)$$

де H_v – мікротвердість, МПа; P – навантаження на індентор, кг; $\bar{c} = 0,0031 \cdot n$ (n – середня кількість поділок мікрометра з 10 вимірів; 0,0031 – ціна поділки мікрометра).

Для проведення хімічного аналізу на елементи від бору до урану у мікрооб'єкті розміром 3...15 мкм поверхневих шарів оптичних елементів використовувався метод мікрорентгеноспектрального аналізу (МРСА) [110, 232]. Основний принцип цього методу полягає у тому, що потік електронів, який створений електронною гарматою та маючи визначену довжину, взаємодіє з мікрооб'єктами по поверхні елемента, викликає характерне рентгенівське випромінювання. Його довжина хвилі властива тільки одному окремому елементу, що входить у склад локальної ділянки поверхні елемента. Вимірюючи інтенсивність характерного випромінювання та порівнюючи її з інтенсивністю випромінювання від еталону, що містить відому кількість цього ж елемента, розраховується його концентрація у досліджуваній ділянці.

Результати досліджень представляють у вигляді вісі ординат, на якій відкладаються значення інтенсивності спектральних ліній в імпульсах за секунду для елементів, що визначаються, а по вісі абсцис – величини напрямлення сканування зонду по зразку з визначеним кроком сканування.

Наприклад, на рис. 2.5 представлено графічну концентраційну залежність інтенсивності розподілу $Na_{K\alpha}$ та $K_{K\alpha}$ углиб поверхні елемента з оптичного скла К8 після електронно-променевої обробки. Досліджено поверхневий шар по відколу (сканування углиб елемента з кроком 20 мкм). При порівнянні характеру розподілення елементів у одному і тому ж мікрооб'ємі після

електронно-променевої обробки та у вихідному стані, знайдено зменшення вмісту Na у поверхневому шарі та збільшення Si.

Дослідження фазового складу та стану структури поверхневих шарів керамік проводились на дифрактометрах загального призначення типу ДРОН-2,0 та ДРОН 3,0 за допомогою методів, розроблених для аналізу структури полікристалів [19, 187, 189]. Для вимірювання величин макронапружень у поверхневих шарах за допомогою зйомки у рентгенівських променях з різними довжинами хвиль використовувалися спеціальні підставки до дифрактометрів. З метою підвищення точності результатів досліджень дифрактометрична зйомка зразків кераміки проводилася у FeK_α -випромінюванні та CuK_α -випромінюванні.

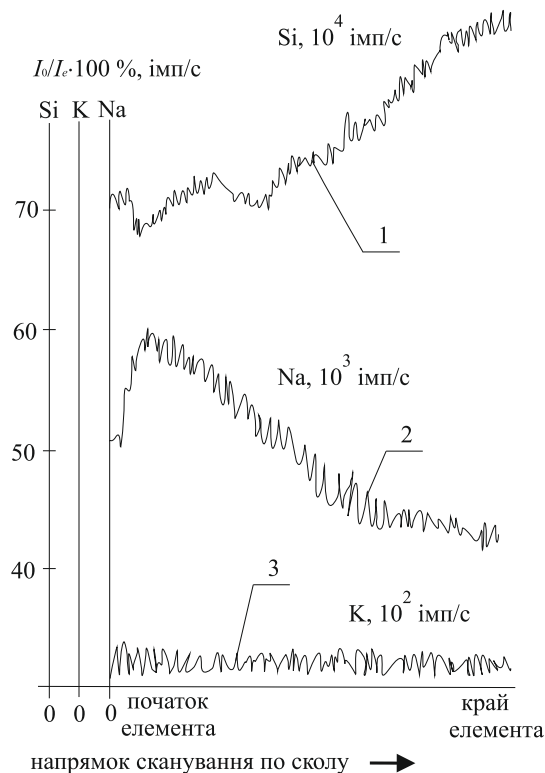


Рис. 2.5. Відносні концентраційні залежності інтенсивностей розподілу у поверхневих шарах елементів з оптичного скла К8: I_0 , I_e – значення інтенсивностей відповідно до та після електронно-променевої обробки.

Для дослідження стану структури керамік визначали фізичне розширення ліній та їхнє кутове положення на дифрактограмах. Згідно використаної методики [187] характеристики структурного стану розраховували на основі

аналізу двох ліній різного порядку відбивання від другої площини. При цьому для отримання надійних та достовірних результатів виконувалися наступні вимоги: вибрані лінії різного порядку відбивання повинні як можливо більше розрізнятися по своєму кутовому положенню та не співпадати з іншими відбиваннями, які викривляють профіль лінії. При цьому відносна інтенсивність піків при дифрактометричній реєстрації оцінювалася по висоті піка від точок його максимуму до лінії у %. Крім цього, для виявлення мікрвикривлень та розміру блоків мозаїчної структури при ідентифікації дифрактограм визначалася ширина або профіль ліній після визначення кутів відбивання (θ) та міжплощинних відстаней (d), що відповідають дифракційним максимумам. Кут θ обраховували по реперним відміткам, що проставляються на діаграмі при зйомці через $0,1^0$ та $0,25^0$. На дифрактограмі отримувалися лінії з малими та великими кутами відбивання при обертанні зразка за схемою $\theta - 2\theta$. По знайденим для кожного піка значенням θ та відомій довжині хвилі застосованого випромінювання визначали величину міжплощинних відстаней по довідковим таблицям.

Межу міцності оптичних елементів до та після електронно-променевої обробки знаходили методом центрально-кільцевого вигину (ЦКВ) [204]. Згідно цього методу елемент з оптичної кераміки у вигляді диску вільно спирався на круглу опору та руйнувався за допомогою кільцевого пуансона меншого діаметра, до якого з постійною швидкістю прикладалось навантаження. Гранична міцність при заданій температурі T розраховувалась по формулі

$$\sigma^*(T) = \frac{3P^*}{2\pi H^2} \cdot \left[(1 - \bar{\nu}) \cdot \frac{r_1^2 - r_0^2}{2R^2} + (1 + \bar{\nu}) \cdot \ln \frac{r_1}{r_0} \right], \quad (2.3)$$

де P^* – навантаження на пуансон у момент руйнування; H – товщина елемента; $\bar{\nu}$ – коефіцієнт Пуасона; r_1, r_2 – радіуси кільцевої опори та пуансона; R – радіус оптичного елемента. При цьому, для виключення впливу дефектних країв на

σ^* , передбачено, щоб краї елемента виступали за контур опори з кожного боку на величину, що не менше, ніж у шість разів перевищує його товщину.

Для дослідження механічної стійкості виробів з оптичної кераміки до ударних зовнішніх навантажень використовувалась стандартна методика “Автоскло” [49, 62], суть якої полягає в знаходженні критичної висоти $H_{кр}$, з якої стальна куля діаметром 0,004...0,005 м, що вільно падає, руйнує поверхню виробу (виникнення тріщин, сколів та ін. дефектів). Точність вимірювання величини $H_{кр}$ – $\pm 8\%$.

Для вимірювання спектрального коефіцієнта пропускання ІЧ-випромінювання k_λ оптичних елементів використовувались серійні спектрофотометри СФ-46 (в області спектра від 0,76...1,1 мкм) та ИКС-29 (в області спектра 2,38...25 мкм) [95, 230, 231]. Вимірювання проводились за стандартними методиками [37, 98, 228, 245], в основу яких покладено принцип порівняння двох світлових потоків: потоку, що проходить через випробувальний зразок оптичного елемента, та потоку, що падає на нього (або потоку, що проходить через еталонний зразок).

Методи визначення впливу електронно-променевої обробки оптичних елементів на відхилення їх полірованих поверхонь від заданої геометричної форми та дефекти чистоти полірування. Після електронно-променевої обробки різних оптичних елементів (лінз, призм, дзеркал та ін.) оптико-електронних приладів (лазерних далекомірів прицільних комплексів, лазерних медичних приладів, аерокосмічних телескопічних систем тощо) в результаті їх поверхневого оплавлення може погіршуватися їх якість (наприклад, геометрична форма може відрізнятись від заданої, порушуються прийняті допуски на дефекти чистоти полірування та ін.) [174].

Нині якість оптичних елементів оцінюється наступними стандартними методами: методом аналізу кола розсіювання, методом контролю частотно-контрастних характеристик (ЧКХ) та іншими методами [219]. При цьому на

практиці якість сферичних та плоских полірованих поверхонь проводять за допомогою пробного скла або інтерферометра.

Поліровані поверхні оптичних елементів мають відхилення від заданих геометричних, що оцінюються допусками на стрілку кривизни оптичних поверхонь елементів, що вимірюються числом інтерференційних кілець N_A , які вкладаються на діаметрі елемента при контролі пробним склом.

При накладанні пробного скла на контрольовану поверхню у тонкому, перемінному по товщині повітряному зазорі відбувається інтерференція світла. Інтерференційна картина при освітленні білим світлом має вид веселкових кілець чи смуг. При цьому у заводській практиці інтерференційну картину зазвичай називають “кольором” [228].

Допуск форми оптичних поверхонь. Якщо на поверхні оптичного елемента є місцеві відхилення від заданої форми, то вони призводять до місцевих викривлень інтерференційних смуг. Місцеві відхилення ΔN вимірюються у долях смуги та визначаються відношенням ввігнутості h місцевого викривлення смуги до її ширини H . При цьому похибки форми оптичних поверхонь зменшують роздільну здатність системи. Наприклад, для довжини хвилі зеленого кольору ($\lambda = 0,546$ мкм) максимальний повітряний проміжок відповідає $\lambda/2$. Тобто, при наявності одного кільця $H = \lambda/2 = 0,25$ мкм, при двох кільцях – 0,5 мкм і т. д.

Допуск на дефекти чистоти полірування P виражають у класах чистоти оптичних поверхонь по ГОСТ 11141-84 [97], яким визначаються розміри та число дефектів (подряпин та точок).

Вимоги регламентовані одинадцятими класами P від IX до I для поверхонь, які віддалені від площини зображення та ще більше строгим класом PO з підрозділами 0-40, 0-20 та 0-10 для поверхонь, розташованих у площині зображення предметів. Наприклад, по класу P з підрозділом 10 допускається ширина подряпини 2 мкм та діаметр точки 4 мкм.

Слід відмітити, що останні вимоги жорсткі та для них обумовлюються кругові середня та крайова зони діаметром $1/3$ та $2/3$ світлового діаметра.

Дефекти у крайових зонах допускаються, а у центральній зоні їх не повинно бути.

На даний момент при розрахунках оптичних систем з полірованими елементами дотримуються допусків на їх оптичні поверхні, які прийняті у оптико-електронному приладобудуванні (табл. 2.5).

Для моделювання зовнішніх термодій на оптичні елементи приладів при нормальних умовах ($P = 10^5$ Па, $T = 293$ К) використовувався керований ІЧ-нагрів кварцовими лампами типу КГМ-220-1000-1 з застосуванням термодатчиків РИФ-101 для контролю температури на поверхні виробів в діапазоні 300...1900 К та зовнішніх теплових потоків в діапазоні $1,5 \cdot 10^5 \dots 2,3 \cdot 10^6$ Вт/м² [62]. При цьому для вимірювання температури оброблюваної поверхні оптичних елементів використовувались контактні методи (хромель-алюмелеві термопари, діапазон вимірювання температур до 1600 К) та безконтактні методи (фоторезистор ФУО-613, діапазон вимірювання температур до 1500 К) [81, 213, 218, 236].

Таблиця 2.5

Значення допусків на показники якості оптичних деталей [37, 228]

Елементи оптичних приладів		Допуски на оптичні поверхні по			
		кривизні N	формі ΔN	класам чистоти P	
Об'єктиви	коліматорів та астрономічні	1 – 3	0,2 – 0,3	VII, VIII	
	телескопічні	3 – 5	0,3	IV, V	
	аерофотознімальні	1 – 3	0,1 – 0,5	IV – VI	
	фотографічні	3 – 5	0,3 – 0,5	IV – VI	
	мікроскопів	до $\times 10$	2 – 3	0,2 – 0,5	III
		від $\times 10$ до $\times 40$	1 – 2	0,1 – 0,2	II
більше $\times 40$		0,5 – 1	0,1 – 0,2	III – V	

Продовження таблиці 2.5

Окуляри, лупи		3 – 5	0,5 – 1	III – V
Призми	що відображують	0,5 – 1	0,1 – 0,3	II, III
	що заломлюють	2 – 4	0,5 – 1	III – IV
Сітки і колективи		5 – 10	1 – 2	0 – 10, 0 – 20, 0 – 40
Захисні стекла і світлофільтри перед об'єктивом		3 – 5	0,3 – 0,5	V
Світлофільтри за та перед окуляром		5 – 10	0,8 – 2	II, III
Дзеркала		1 – 2	0,2 – 0,3	III, IV

Для моделювання зовнішнього нагріву (до 1500 К) оптичних елементів приладів при підвищених зовнішніх тисків (до 10^7 Па), а також ударних термодій газового потоку (швидкість потоку до $2 \cdot 10^3$ м/с) на поверхню обтічників ГЧ-приладів при їх обертанні (кутова швидкість обертання до $4 \cdot 10^3$ рад/с) в умовах експлуатації надзвукової техніки використовувались установки, що наводяться нижче.

При цьому для візуалізації та дослідження структури надзвукового газового потоку, що надає термоударні впливи на поверхню обтічників ГЧ-приладів, застосувались шлірен-фотографічні методи (використовувався тіньовий прилад ІАБ-451 [82, 169]).

В теоретичних дослідженнях використовувалися сучасні методи математичного і експериментально-статистичного моделювання, чисельно-аналітичні методи розв'язання задач аерогазодинаміки, нелінійної теплопровідності і термопружності (інтегральні перетворення Фур'є, методи розв'язання трансцендентних рівнянь, обчислення інтегралів і ін.), а також методи математичної обробки експериментальних даних (регресії, інтерполяції) [20, 72, 227].

Всі розрахунки по моделях проводилися в режимі діалогу і реального часу на ПК з використанням спеціалізованих пакетів прикладних програм (див. додатки А – Г).

2.4. Технологічне електронно-променеве обладнання для обробки поверхонь оптичних елементів

Електронно-променеве устаткування, що використовувалося в даній роботі, розроблено у лабораторії “Вакуумна техніка й електронно-променеві методи обробки” Черкаського державного технологічного університету при участі та під керівництвом автора у рамках госпдоговірних та держбюджетних науково-дослідницьких робіт з ПО “Завод Арсенал” (м. Київ), яке захищене патентами України [26, 132, 133, 224, 228].

2.4.1. Особливості термічної дії потоку електронів на поверхню оптичного елемента

Для обробки поверхонь оптичних елементів перспективним є метод низькоенергетичної ($E \leq 10$ кеВ) електронно-променевої обробки потоком електронів стрічкової форми, який відноситься до високотемпературних (робоча температура в зоні дії електронного променя досягає 1200...1300 К) і швидкоплинних (час дії електронного променя на матеріал не перевищує одиниць секунд) методів обробки [39, 62].

Основними фізичними процесами [1, 62, 225, 226], що протікають при електронно-променевої обробці оптичних елементів є процеси перетворення кінетичної енергії електронів у теплову енергію матеріалу, взаємодії потоку електронів з зарядом, що накопичується на поверхні елемента, дифузії іонів домішок оптичного матеріалу з розплавленого поверхневого шару у вакуум та поширення теплового потоку в його об’ємі. При цьому, основний вплив чинять процеси теплової взаємодії електронного променя фіксованої потужності (з енергіями електронів $E = 2...10$ кеВ) з поверхнею оптичного елемента. У результаті взаємодії потоку низькоенергетичних електронів з матеріалом, у

його поверхні виникає область рідинно-текучого стану речовини (ванна розплаву) (рис. 2.6). При використанні рухомого електронного променя ванна розплаву також буде рухомою і застигаючи представляє собою тонкий шар, який відрізняється від основного матеріалу своєю структурою та фізико-хімічними властивостями.

2.4.2. Технологічне обладнання та його основні елементи

Технологічне обладнання для електронно-променевої обробки оптичних елементів створене на базі універсальної вакуумної установки УВН-74ПЗ (рис. 2.7) [39, 62]. Вакуумна система складається з вакуумної камери і вакуумного поста установки УВН-74ПЗ, паромасляного дифузійного насосу НП-400, форвакуумного насосу АВЗ-20, вакуумметрів ВИТ-3, та ВМБ-8, датчиків вакууму (термопарного ТП-1, іонізаційного ИП-1, магнітно-блокувального М-2) розташованих у вакуумному об'ємі. В вакуумній камері установки розташовано спеціальне технологічне оснащення для електронної обробки, а саме: кварцеву інфрачервону піч попереднього нагріву та завершального охолодження, електронну гармату Пірса з оптикою для формування стрічковго електронного потоку, механізм переміщення оптичних елементів. Забезпечують роботу спеціального технологічного оснащення наступні зовнішні пристрої, а саме: високовольтне джерело живлення електронної гармати на базі блоку УЭЛИ-1, блок керування кварцевої печі на базі термозадатчика-терморегулятора РИФ-101, розроблена автоматизована система керування процесом обробки [132, 133, 224].

Загальна схема установки для електронно-променевої обробки оптичних елементів представлена на рис. 2.8.

На рис. 2.9 представлено вакуумну камеру електронної установки зі встановленим технологічним оснащенням.

Кварцова піч. Термопіч виготовлена з листової сталі Х18Н10Т, розташована в технологічному об'ємі і призначена для контрольованого нагріву

оптичних елементів перед електронно-променевою обробкою та наступного охолодження до кімнатної температури після процесу електронної обробки.

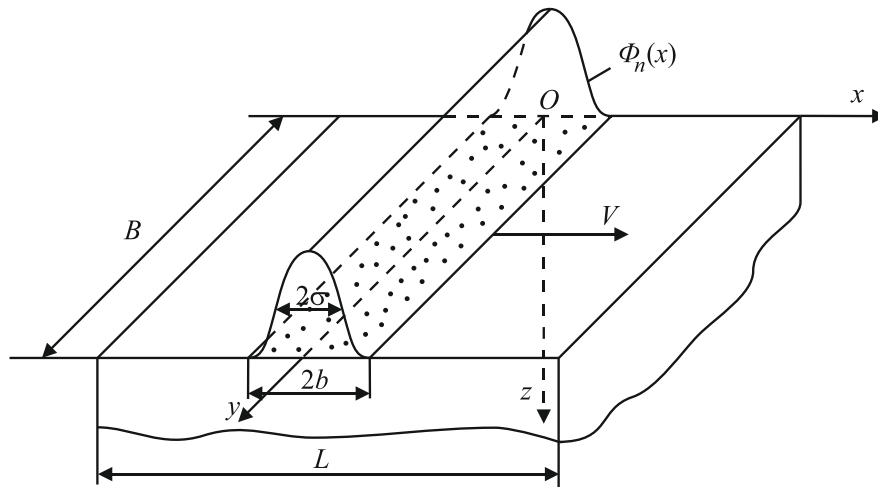


Рис. 2.6. Схема теплового впливу рухомого стрічкового електронного променя на оптичний елемент: Φ_n – тепловий потік, нормально розподілений уздовж x і рівномірно – уздовж y , Вт/м²; $2b$, B , $k_0 = \frac{1}{2\sigma^2}$ (2σ – відстань між точкам перегину на кривій $\Phi_n(x)$) – товщина, ширина та коефіцієнт зосередженості електронного променя, м; V – швидкість руху променя, м/с.

Попередній нагрів елементів є необхідною умовою їх підготовки до електронно-променевої обробки [39]. Для інтенсифікації процесу знегажування і для зняття термічних напружень в оптичних елементах після обробки електронним потоком в установці використано систему нагріву/охолодження, рис. 2.10.

В якості ІЧ-нагрівника в електронній установці використані галогенні кварцові лампи, наприклад, КГТ220-1000-1 (ОСТ160.535.024-76), КГМ220-1000-1 (ТУ16-545.010-80) [62].

Для створення направленого потоку ІЧ-випромінювання кожна лампа укомплектована параболічним рефлектором, який дозволяє отримати густину потужності $10^5 \dots 10^6$ Вт/м² для матеріалів непрозорих для ІЧ-випромінювання з довжиною хвилі $1 \dots 10$ мкм.

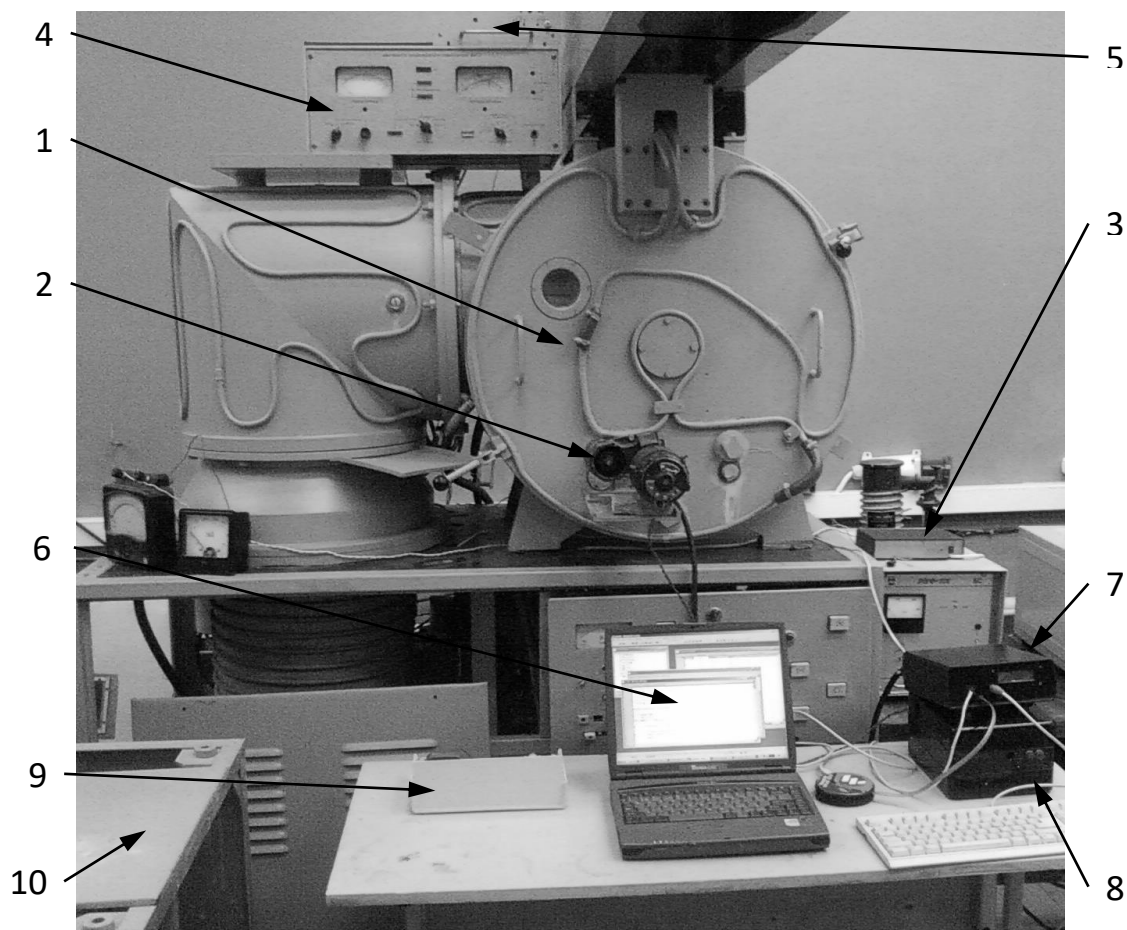


Рис. 2.7. Зовнішній вигляд технологічного обладнання для фінішної електронно-променевої обробки оптичних елементів: 1 – вакуумна камера; 2 – електропривід механізму переміщення оптичних елементів; 3 – система керування температурним режимом оптичних елементів на базі приладу РИФ-101; 4 – вакуумметр іонізаційно-термопарний ВІТ-3; 5 – вакуумметр магніто-блокувальний ВМБ-8; 6 – ПЕОМ керування установкою; 7 – центральний блок системи автоматизованого керування; 8 – блок керування електроприводом; 9 – модулі вимірювання температури в зоні обробки та зондування електронного потоку; 10 – блок живлення та система керування електронної гармати Пірса.

Для підвищення ефективності нагріву елемента, відбиваючу частину рефлектора покривають нітридом бору (відбиває випромінювання з $\lambda = 0,4 \dots 6,0$ мкм).

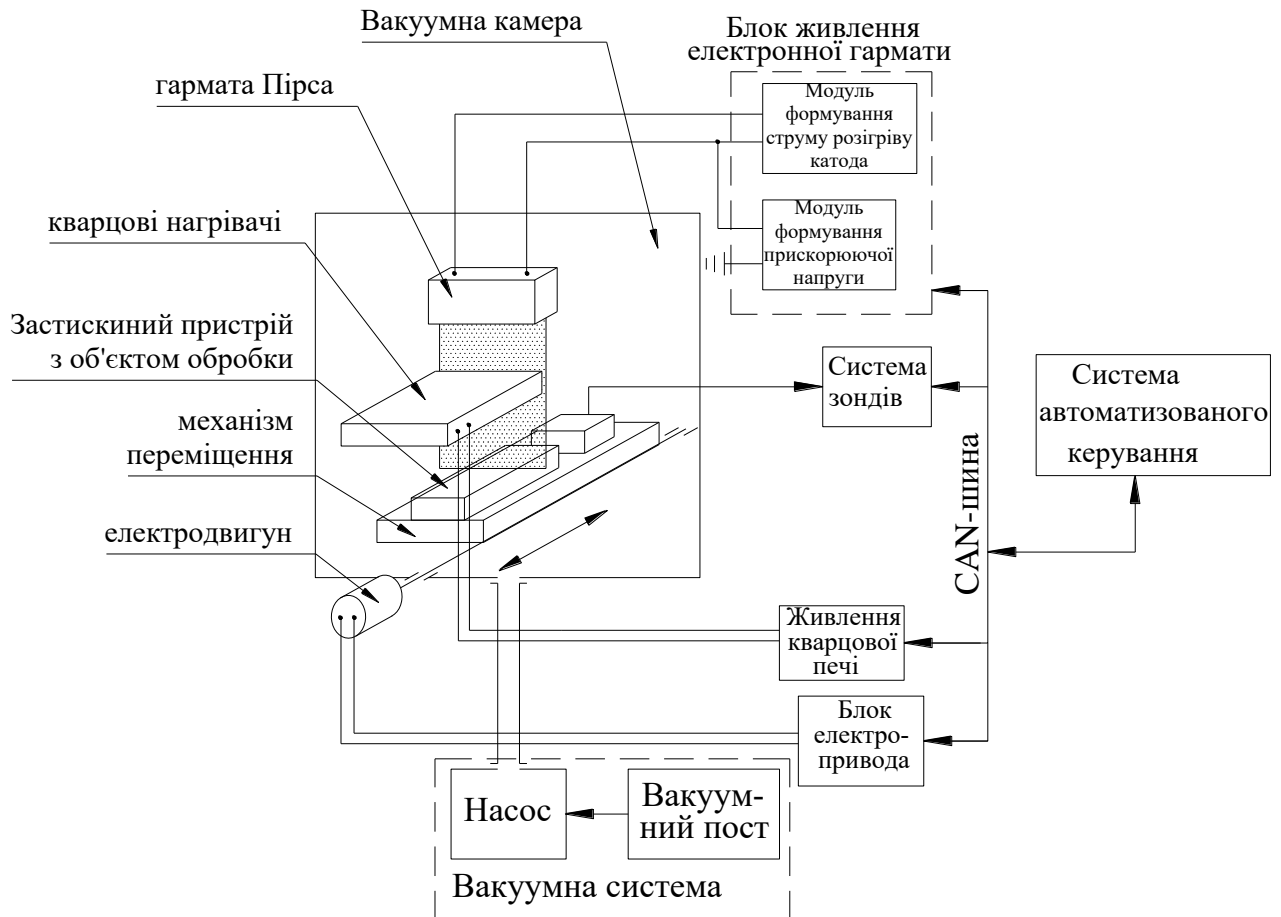


Рис. 2.8. Загальна схема електронно-променевої установки.

Електронна гармата. В установці використано електронну гармату Пірса (ЕГП), яка генерує параксіальні потоки електронів стрічкової форми [21, 215, 252]. Електронна гармата працює в таких діапазонах: прискорююча напруга 1...12 кВ, струм розжарення катода 10...30 А.

На рис. 2.11 представлено зовнішній вигляд та конструктивна схема електронно-оптичної системи гармати Пірса, яка використана в даній роботі. З рис. 2.11 видно, що гармата Пірса з дротяним катодом, формує стрічковий потік електронів і має такі основні елементи: дротяний катод, прикатодний електрод (модулятор) і анод.

Механізм переміщення. Одним з важливіших елементів електронно-променевої установки є механізм переміщення (рис. 2.12), який призначений для кріплення, базування і транспортування оптичних елементів в зону обробки електронним потоком.

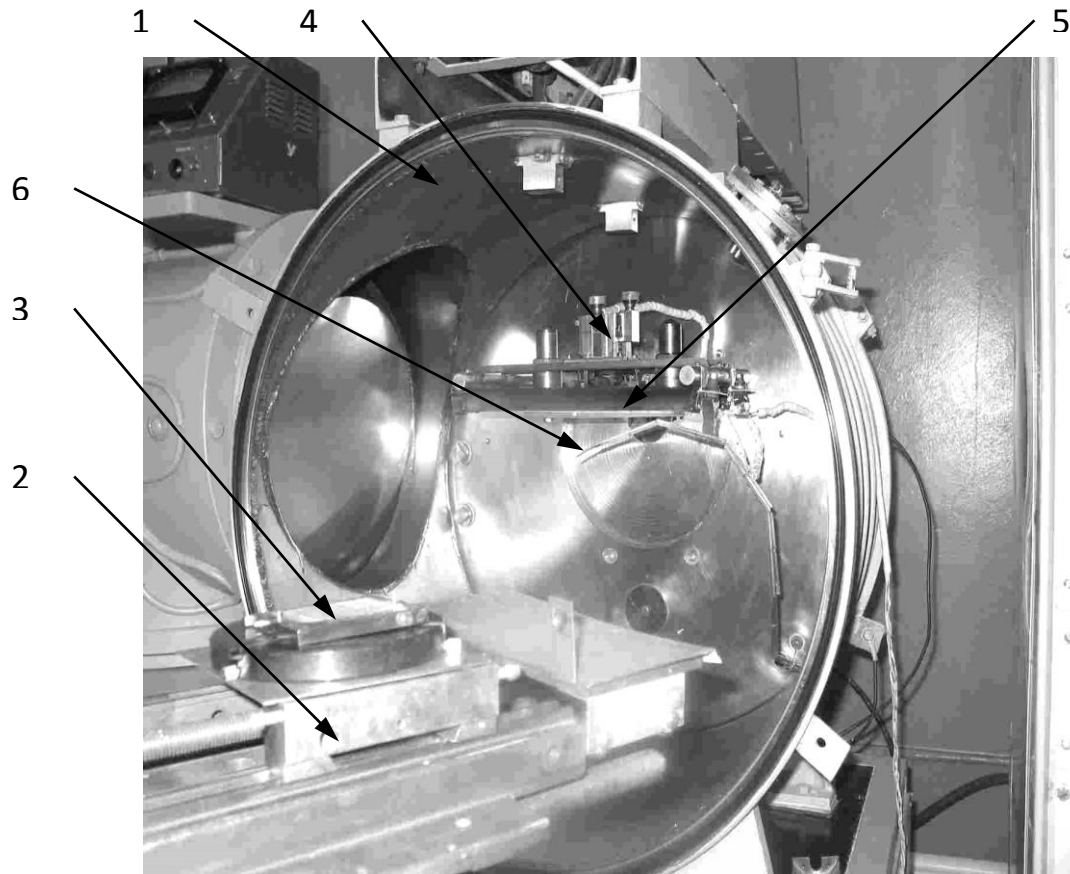


Рис. 2.9. Технологічне оснащення у вакуумній камері електронно-променевої установки: 1 – робочий об’єм вакуумної камери; 2 – механізм переміщення елементів; 3 – пристрій для затиску та базування оптичних елементів; 4 – електронна гармата Пірса зі стрічковою формою потоку; 5 – кварцові нагрівачі КГТ220-1000-1 з параболічними рефлекторами; 6 – термопарний датчик температури (термопара ТХА-1Е) попереднього нагріву елементів.

Механізм переміщення даної установки приводиться в рух двигуном постійного струму СЛ-369, який розташовано зовні вакуумної камери. Використання двигуна постійного струму, на відміну від двигунів інших типів, відрізняється простотою керуваності за допомогою мікропроцесорної системи, високою рівномірністю переміщення об’єктів, лінійністю та плавністю регулювання швидкості.

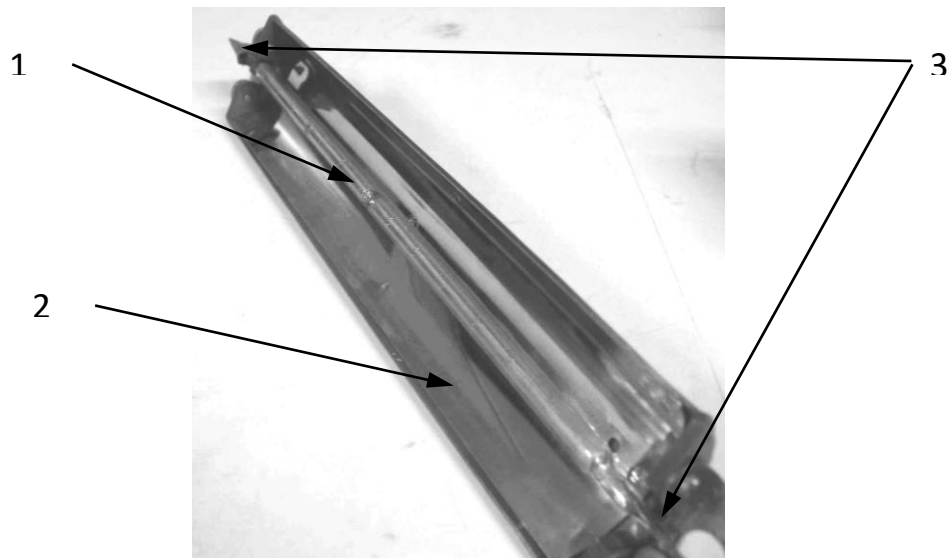


Рис. 2.10. Система ПЧ-нагріву оптичного елемента: 1 – лампа КГТ220-1000-1; 2 – параболічний рефлектор; 3 – пристосування для затиску лампи та подачі живлення.

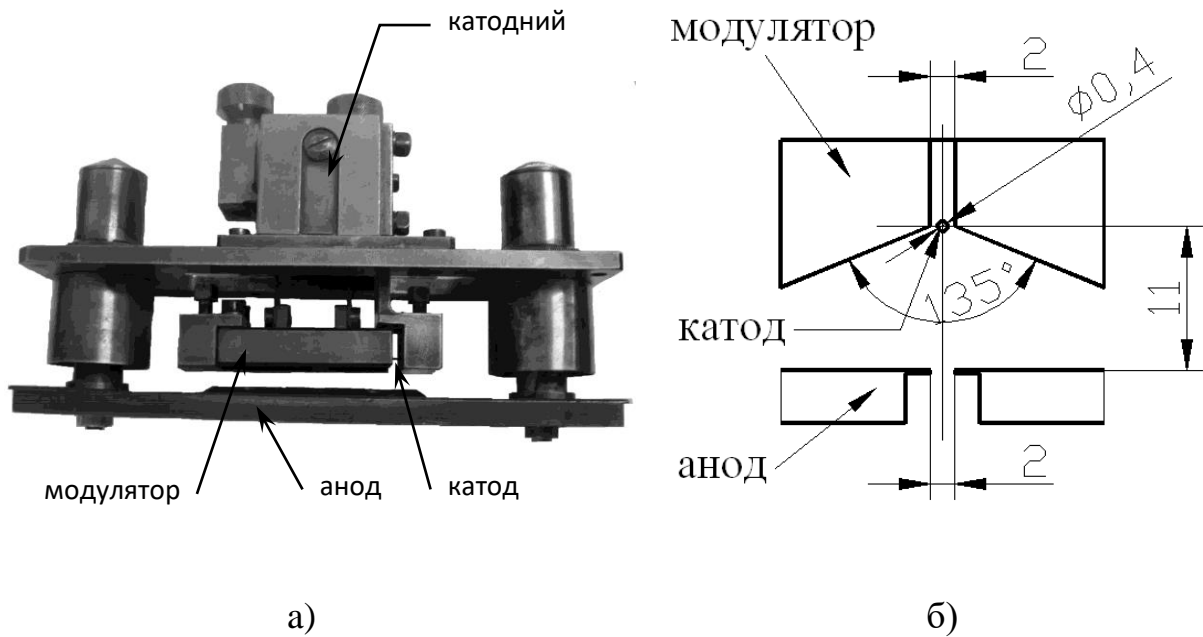


Рис. 2.11. Зовнішній вигляд (а) та конструктивна схема (б) електронно-оптичної системи електронної гармати Пірса.

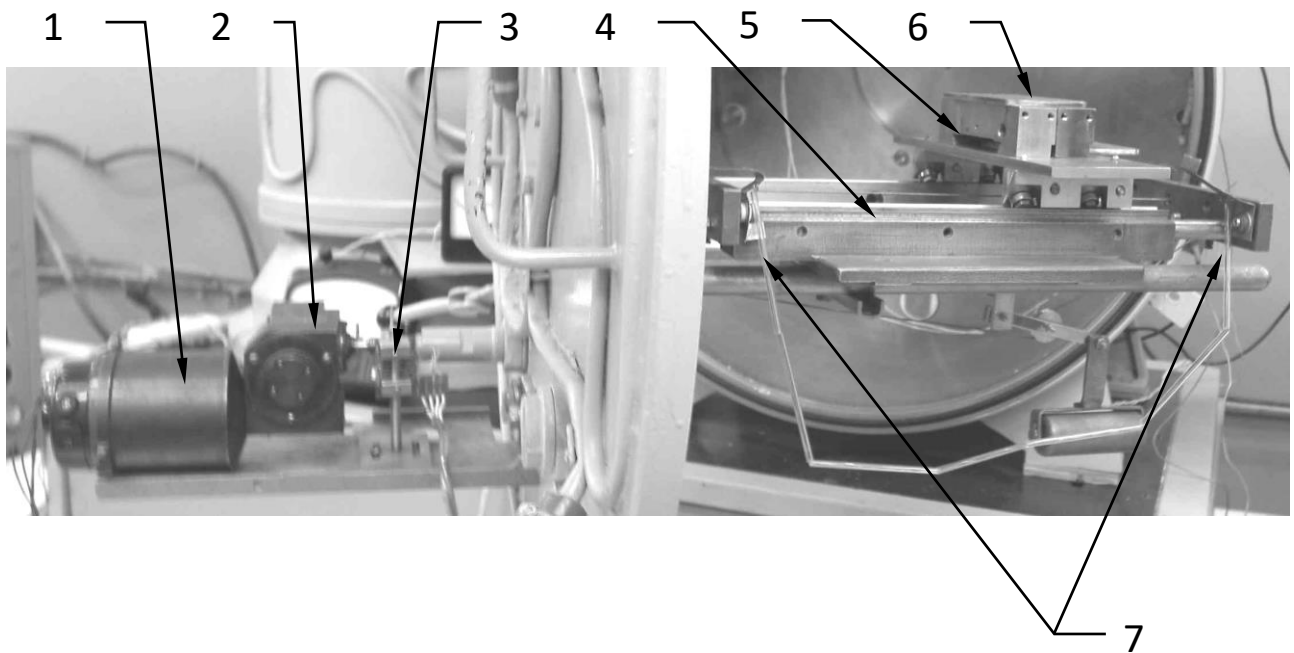


Рис. 2.12. Зовнішній вигляд механізму переміщення з затискним пристосуванням: 1 – двигун постійного струму СЛ-369; 2 – редуктор К-1-120; 3 – поворотний шифратор; 4 – механізм переміщення; 5 – візок; 6 – затискне пристосування; 7 – кінцеві вимикачі.

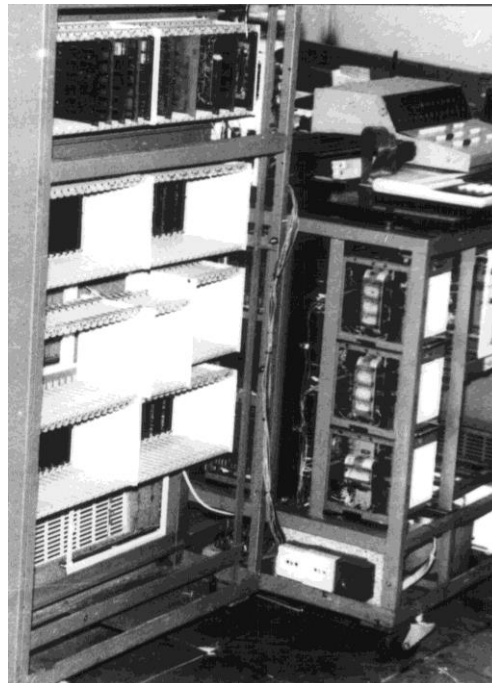
Системи вимірювання та контролю температури в зоні обробки та зондування електронного потоку. Для проведення спеціальних досліджень (вимірювання та контролю температури в зоні обробки залежно від керованих параметрів електронного потоку; його зондування і встановлення залежностей між його енергетичними характеристиками (потужністю P_0 , коефіцієнтом зосередженості k_0 і шириною зони впливу $2b$) і керованими параметрами потоку використовувались спеціальні лабораторно-вимірювальні комплекси, які були удосконалені у частині автоматизації проведення досліджень, що значно підвищило якість усього процесу обробки поверхні оптичних елементів (рис. 2.13).

Система для вимірювання та контролю температури в зоні впливу електронного променя складається з таких елементів: приймальної частини інфрачервоного (ІЧ) випромінювання від оброблюваного елемента на базі фоторезистора і механічного пристрою, що виключає засвічення розпеченою

ниткою катода електронної гармати; аналого-цифрового перетворювача, що перетворює сигнал з підсилювача у двійковий код подальшої машинної обробки; керуючої міні-ЕОМ типу К1-20 для накопичення інформації про вимірювання температури в зоні впливу ЕП на елемент.



Вимірювальні системи



Блок керування системами

Рис. 2.13. Лабораторно-вимірювальні комплекси для вимірювання та контролю температури поверхонь оптичних елементів та зондування електронних потоків.

Як фотоприймальний пристрій для ІЧ-випромінювання використовувався стандартний фоторезистор ФУО-613, техніко-експлуатаційні характеристики якого докладно описані в роботі [236]. Градування зазначеного фоторезистора здійснювалося по істинній температурі об'єкта й проходило з використанням прецизійного програмного терморегулятора РИФ-101 у такій послідовності: 1) на оброблюваний електронним променем елемент встановлювався термоперетворювач ТПП-0679-01; 2) термоперетворювач ТПП-0679-01 підключався до терморегулятора РИФ-101; 3) вимірювання вихідного аналогового сигналу з підсилювача здійснювалося цифровим вольтметром типу В7-21.

Розігрів оброблюваних елементів здійснювався до температури 1200 К – для елементів з оптичної кераміки, 1500 К – для елементів з оптичного скла протягом 2 годин з метою виключення похибки вимірювання за рахунок постійної часу термоперетворювача ТПП-06979-01. Похибка вимірювання температури становила $\pm 7\%$. Отримані в результаті проведених досліджень середньостатистичні градувальні криві (розкид значень температури в межах кожної експериментальної точки не перевищував $\pm 3\%$) зображені на рис. 2.14.

Система зондування електронного променю (метод зонда, що обертається).

У проведених дослідженнях [4, 124, 206, 222, 223, 262] було встановлено, що найповнішим, тобто таким, що залежить від найбільшої кількості енергетичних параметрів електронного променю, і точнішим (результати розрахунків температурних полів в оброблюваних оптичних елементів точніше відповідають експериментальним даним) математичним описом електронного променю як рухомого джерела тепла є нормальний закон розподілу густини його теплового впливу (теплового потоку Φ_n) по поверхні оброблюваного оптичного елемента:

$$\Phi_n(x,t) = \Phi_0(t) \cdot e^{-k(t) \cdot x^2}, \quad (2.4)$$

де $\Phi_0(t)$ – тепловий потік у центрі джерела; $k(t)$ – коефіцієнт зосередженості (гострота теплового імпульсу), м^{-2} . Тоді потужність джерела $P(t)$ буде пов'язана з функцією $\Phi_0(t)$ в такий спосіб:

$$P(t) = \iint_S \Phi_n(x,t) dx dy = \int_0^B dy \int_{-b}^b \Phi_n(x,t) dx = B \cdot \Phi_0(t) \cdot \int_{-b}^b e^{-k(t) \cdot x^2} dx. \quad (2.5)$$

Використовуючи поняття спеціальної функції (інтеграла помилок) [64]

$$\text{erf}(u) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \int_0^u e^{-t^2} dt, \quad (2.6)$$

одержуємо

$$\Phi_0(t) = \frac{P(t)}{B} \cdot \sqrt{\frac{k(t)}{\pi}} \cdot \frac{1}{\operatorname{erf}(b \cdot \sqrt{k(t)})}. \quad (2.7)$$

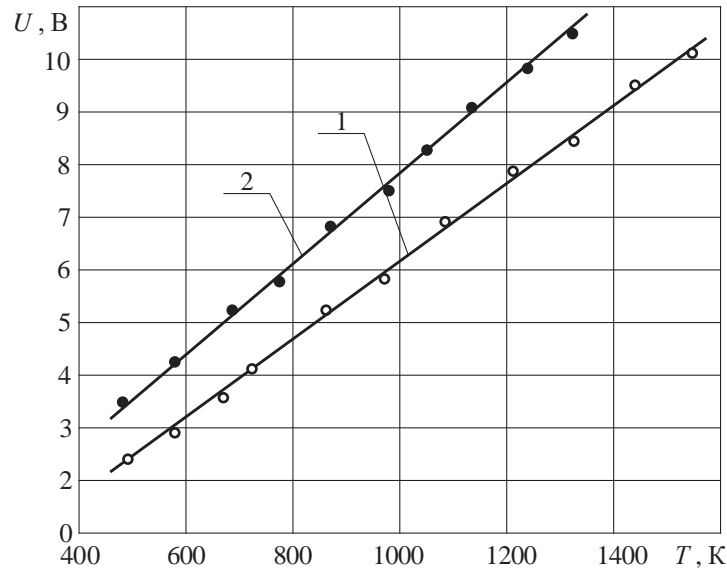


Рис. 2.14. Градувальні криві фоторезистора ФУО-613 для елементів з оптичного скла К8 (1) і оптичної кераміки КО1 (2): U – вихідна напруга фоторезистора з підсилювачем, В; О, ● – експериментальні точки, отримані за допомогою термоперетворювача ТПП – 0679-01 відповідно на склі К8 і кераміці КО1.

Підставляючи (2.7) у (2.4), остаточно одержуємо

$$\Phi_n(x,t) = \frac{P(t)}{B} \cdot \sqrt{\frac{k(t)}{\pi}} \cdot \frac{e^{-k(t) \cdot x^2}}{\operatorname{erf}(b \cdot \sqrt{k(t)})}. \quad (2.8)$$

Для випадку постійно діючого джерела ($k(t) = k_0 = \text{const}$, $P(t) = P_0 = \text{const}$):

$$\Phi_n(x) = \frac{P_0}{B} \cdot \sqrt{\frac{k_0}{\pi}} \cdot \frac{e^{-k_0 \cdot x^2}}{\operatorname{erf}(b \cdot \sqrt{k_0})}. \quad (2.9)$$

У формулу (2.9) входять такі енергетичні параметри джерела: P_0 , b й k_0 , які визначають інтенсивність теплового впливу електронного променя на оптичні елементи. Для підвищення ефективності керування тепловими режимами електронно-променевої обробки оптичних елементів, і тим самим підвищення ефективності всього процесу обробки, необхідно зв'язати зазначені параметри

електронного променю з керованими технологічними параметрами установки, основними з яких є зазначені вище струм електронного потоку I_l , прискорююча напруга V_y й відстань від оброблюваної поверхні l . При цьому ширина електронного променю (довжина вольфрамового катода в розглядуваній конструкції електронної гармати Пірса [21, 215, 252]) є постійною величиною і дорівнює 0,6 м. Потужність електронного променю виражається такою відомою формулою [225, 226]:

$$P_0 = I_l \cdot V_y. \quad (2.10)$$

Підставляючи (2.10) у (2.9), одержуємо такий вираз для теплового потоку $\Phi_n(x)$, що надходить в оброблюваний матеріал (згідно з експериментальними даними [225] втрати енергії в загальному енергетичному балансі з зони обробки на електронну емісію (вторинні електрони, не пружно розсіяні, пружно відбиті), світлове й рентгенівське випромінювання знехтувано малі порівняно з використовуваною енергією електронного променю [226]):

$$\Phi_n(x) = \frac{I_l \cdot V_y}{B} \cdot \sqrt{\frac{k_0}{\pi}} \cdot \frac{e^{-k_0 \cdot x^2}}{\operatorname{erf}(b \cdot \sqrt{k_0})}. \quad (2.11)$$

Для знаходження енергетичних параметрів b й k_0 у формулі (2.11) використовувалася лабораторно-вимірювальна система, пристосована для зондування електронних потоків різної форми (кругової, стрічкової й ін.) [62].

Як метод зондування електронного променю, застосовуваний в зазначеній системі, використовується відомий метод обертового зонда [224], сутність якого полягає в тому, що тонкий обертовий зонд, перетинаючи електронний потік перпендикулярно його осі, відбирає на себе частину струму.

В результаті проведених досліджень по зондуванню електронного променю встановлено наступні емпіричні залежності густини теплового впливу у його центрі (відносна похибка 5...8 %) [62]:

$$F_n = \Phi(x)_{x=0} = \sqrt{\frac{k_0(I_l, l)}{\pi}} \cdot \frac{I_l \cdot V_y}{B \cdot \operatorname{erf}[b(I_l, l) \cdot \sqrt{k_0(I_l, l)}]}, \quad (2.12)$$

$$k_0(I_n, l) = 1,237 \cdot 10^7 - 6,587 \cdot 10^5 \cdot l - 3,725 \cdot 10^4 \cdot I_n + 1,518 \cdot 10^2 \cdot I_n \cdot l, \quad (2.13)$$

$$b(I_n, l) = \frac{1,75}{\sqrt{k_0(I_n, l)}}. \quad (2.14)$$

Встановлено, що для робочих діапазонів зміни вказаних параметрів установки ($I_n = 50 \dots 300$ мА, $V_y = 6 \dots 8$ кВ, $l = 0,04 \dots 0,08$ м) реалізуються наступні діапазони зміни енергетичних характеристик електронного променю: $k_0 = (0,5 \dots 5) \cdot 10^7$ м²; $2b = (0,5 \dots 1,5) \cdot 10^{-3}$ м; $F_n = 10^6 \dots 10^9$ Вт/м². При цьому швидкість переміщення променю змінювалась у межах $V = 0 \dots 0,1$ м/с. Це повністю відповідає рівню значень цих параметрів для інших типів електронних потоків, наприклад, електронних потоків, що мають нормальний розподіл теплового потоку по радіусу (так званих колоподібних джерел теплового впливу) [225, 226].

2.5. Випробувальні установки для дослідження впливу параметрів зовнішніх термодій на оптичні елементи, яким вони піддаються при експлуатації

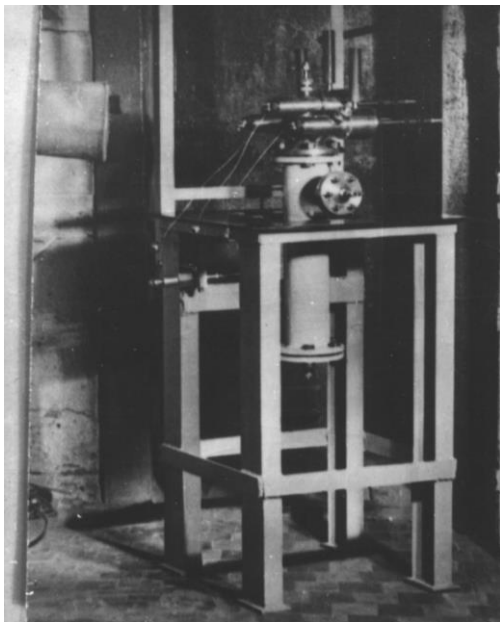
Для проведення випробувань оптичних елементів в умовах, близьких до реальних умов експлуатації приладів (сумісний вплив підвищених температур нагріву та зовнішніх тисків, надзвукового обдуву потоком повітря та вісесиметричного обертання елемента), використовувався наступний комплекс лабораторно-випробувальних установок, дослідження на яких при участі та під керівництвом автора проводились по методикам, розробленим у Черкаському державному технологічному університеті у рамках сумісних науково-дослідницьких госпдоговірних та держбюджетних робіт [49, 62].

2.5.1. Установка для дослідження впливу підвищених температур нагріву (до 1500 К) та зовнішніх тисків (до 10^7 Па) на оптичні елементи

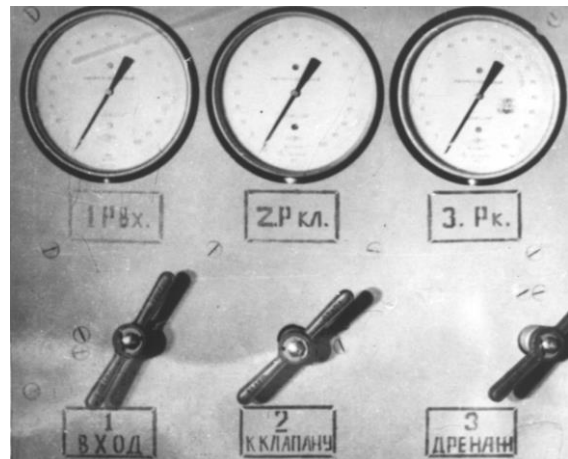
Установка (рис. 2.15) призначена для одночасного випробування трьох елементів. Точність підтримки робочого тиску в цій установці складає $\pm 5\%$. Установка включає прилад постійного тиску і систему нагріву,

терморегулювання і реєстрації температури. Прилад постійного тиску (рис. 2.16) 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. При випробуванні прилад постійного тиску наддувається інертним газом. Всі три елементи випробуються одночасно. Продукти, охолоджені і очищені від конденсованих частинок в рідинному фільтрі, поступають до клапана постійного тиску, керованого стислим газом.

Випробувальна камера (рис. 2.17) складається з корпусу 1, сполученого патрубком з загальною кришкою блоку камер. На тій частині камери, де розташований зразок 5, встановлюється знімний електронагрівач 3. Електронагрівач складається з ніхромової спіралі, укладеної в ізоляційну



а)



б)

Рис. 2.15. Зовнішній вигляд (а) і панель керування (б) установки.

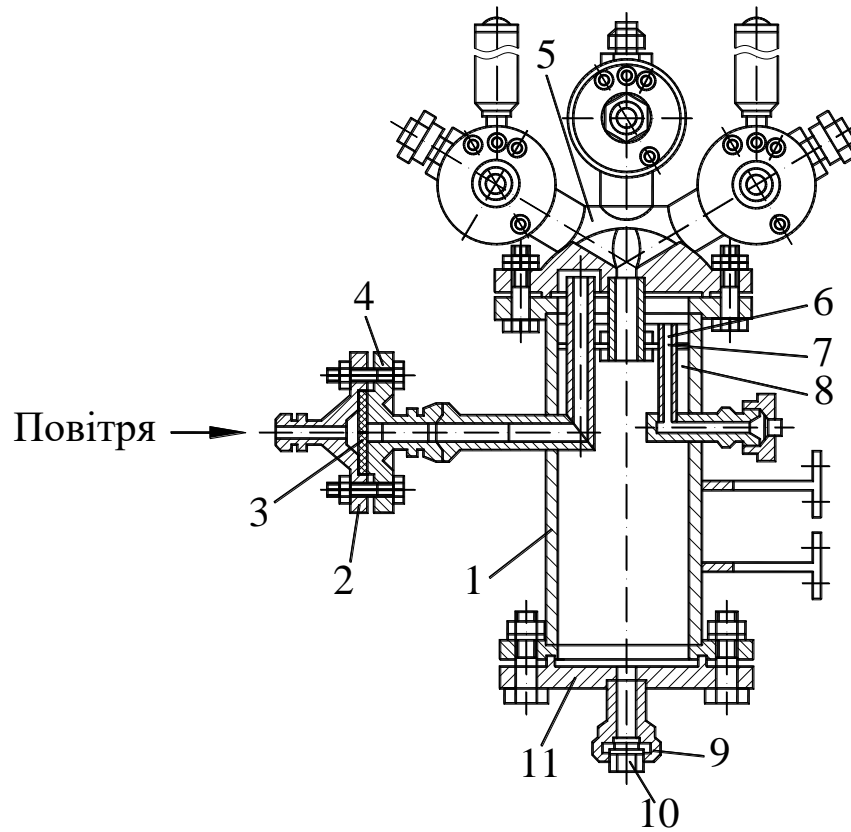


Рис. 2.16. Прилад постійного тиску установки: 1 – корпус фільтра; 2 – кришка клапана; 3 – мембрана; 4 – корпус клапана; 5 – блок випробувальних камер; 6 – зливний патрубок; 7 – механічний дисковий фільтр; 8 – вода; 9 – гайка; 10 – заглушка; 11 – кришка фільтра.

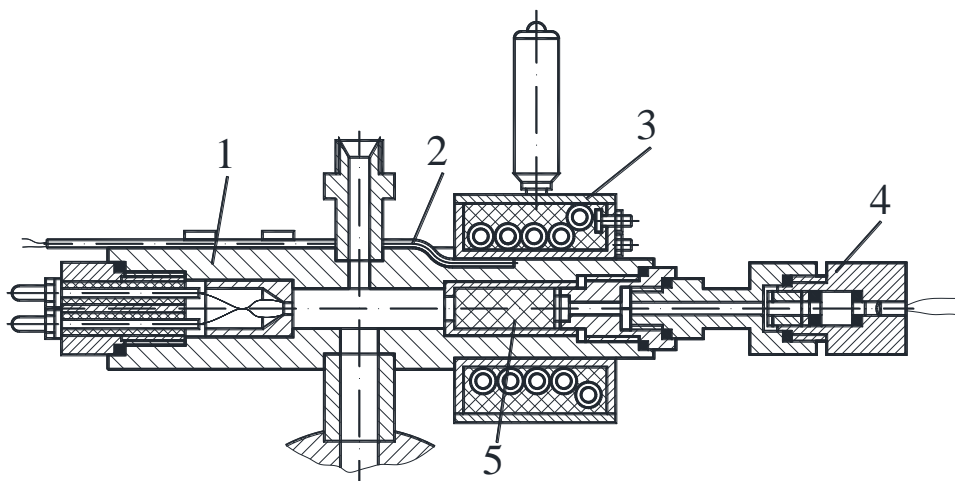


Рис. 2.17. Випробувальна камера установки: 1 – корпус камери; 2 – термопара; 3 – нагрівач; 4 – фотодатчик; 5 – зразок елемента.

кераміку. Корпус нагрівача – зварний, герметичний, виконаний з неіржавіючої сталі. 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 укрупчується фотодатчик для реєстрації моменту закінчення нагріву зразка через отвір в донному бронюванні. Для контролю і регулювання температури термостатування в корпусі камери закарбована ХА-термопара, сполучена з системою терморегулювання, змонтованою на основі електронного регулюючого потенціометра ЕПР – 09МЗ. Електронний регулюючий потенціометр є основним вузлом системи і служить для послідовного запису температури в трьох камерах установки на діаграмній стрічці, а також для видачі електричних сигналів на включення і виключення нагрівальних камер при досягненні заданих температур. Точність підтримки температури термостатування складає $\pm 2\%$. Для створення попереднього наддування перед випробуванням елемента установка забезпечена відповідною пневмосистемою, що складається з пневмоцилінка, редукторів, балонної батареї і т. д.

Мультиплікатор (рис. 2.18) призначений для підвищення тиску в установці до величин, більш високих, ніж тиск зовнішнього джерела (компресора, балонної батареї і т. д.). Він складається з двох сполучених між собою циліндрів – великого 26 і малого 14. Великий циліндр має внутрішній діаметр 0,14 м, малий – $7,5 \cdot 10^{-2}$ м. Таким чином, співвідношення площ мультиплікатора дорівнює 3,5. Вільний кінець великого циліндра закривається заглушкою 3 і гайкою 1. З'єднання великого циліндра з малим проводиться за допомогою перехідника 10, гайки 9, кільця 11 з привареним до нього кронштейном і гайки 25. На фланці 20 малого циліндра змонтований зворотний клапан з штуцером 19 і приварений штуцер для підведення газу. У середині великого і малого циліндрів розташовано дві пари поршнів – у великому циліндрі поршні 4 і 7, в малому – 12 і 24. Поршні встановлені попарно для підвищення надійності рухомого ущільнення. Пробки служать для випуску повітря з міжпоршневих порожнин при збірці. Поршні забезпечені

стандартними безкаркасними гумовими манжетами 6, 23, закріпленими на поршнях за допомогою підтискних кілець 5, 13, 22. Штовхач 8 служить для передачі зусилля від великих поршнів до малих.

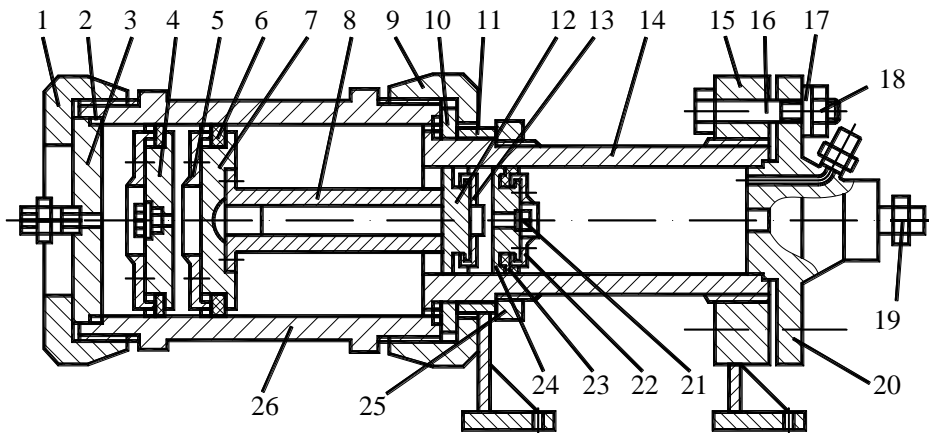


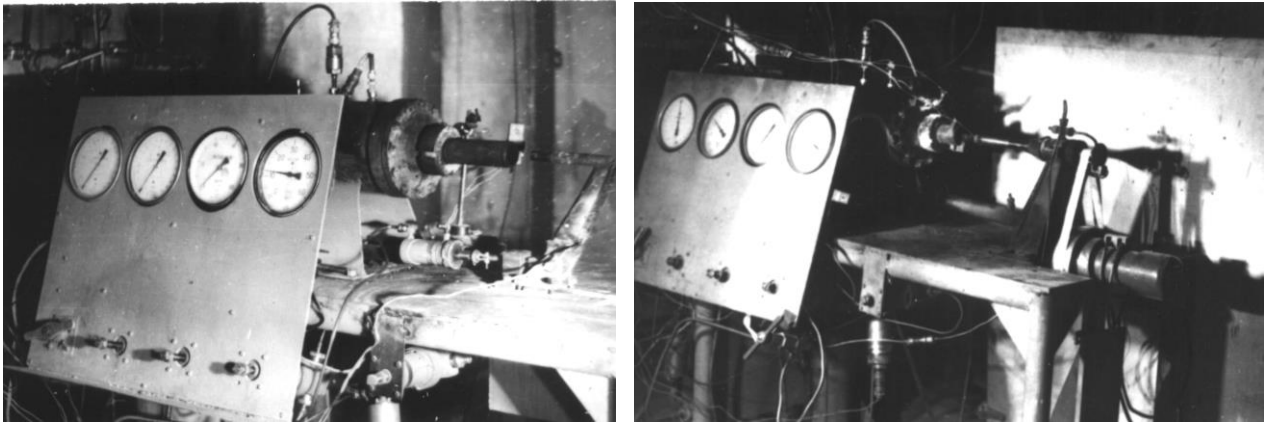
Рис. 2.18. Мультиплікатор установки: 1, 9, 18, 25 – гайки; 2 – прокладка; 3 – заглушка; 4, 7, 12, 24 – поршні; 5, 13, 22 – кільця підтискні; 6, 23 – манжети; 8 – штовхач; 10 – перехідник; 11 – кільце з кронштейном в зборі; 14 – циліндр малий; 15 – фланець з кронштейном в зборі; 16 – болт; 17 – шайба; 19 – штуцер; 20 – фланець; 21 – пробка; 26 – циліндр великий.

Проведені випробування на вказаній установці показали, що одночасні випробування в однакових умовах трьох зразків оптичних елементів дозволяє знизити відносну похибку вимірювання властивостей поверхневих шарів оптичних елементів до 5...7 % (замість 10...12 % у випадку випробування тільки одного зразка елемента).

2.5.2. Установка для дослідження впливу підвищених швидкостей обдуву потоком повітря (до $2 \cdot 10^3$ м/с) і кутових швидкостей вісесиметричного обертання (до $4 \cdot 10^3$ рад/с) на оптичні елементи

Повітряний потік, що обдуває зразок при випробуванні, створюється витіканням з сопла до- або надзвукового струменя, задалегідь підігрітого з метою компенсації охолодження потоку при течії по соплу. Діаметр повітряного струменя (діаметр зрізу сопла) складає $4 \cdot 10^{-2} \dots 6 \cdot 10^{-2}$ м. Загальний

вид установки представлений на рис. 2.19. Сопла змінні, що дозволяють варіювати швидкість потоку до $V = 2 \cdot 10^3$ м/с. Установка (рис. 2.20) містить камеру 1 з соплами 2, змонтовану на станині 7. Нагрів повітря в камері 1 відбувається при змішуванні холодного повітря з гарячими газами, що генеруються підігрівачем 11. З бачка 8 пальне (бензин) подається через форсунку в камеру згорання підігрівача. Туди ж подається окиснювач (повітря). Обидва компоненти подаються через відсічні крани 10, керовані електропневмоклапанами 9. На станині кріпиться співвісний з соплом вузол обертання 4 з датчиком частоти обертання 5 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 ременя. Датчик частоти обертання складається з металевого диска з прорізом (закріпленого на валу державки), фотодіода і джерела світла (змонтованих на нерухомій станині). Світлові імпульси сприймаються фотодіодом, перетворюються в електричні, посилюються і подаються на електронний частотомір. Установка забезпечена також нерухомою державкою, що дозволяє випробувати зразки, що не обертаються. Відстань від торця зразка, що випробується, до зрізу сопла вибирається на підставі шлірен-фотографічних досліджень картини обтікання на тіньовому приладі ІАБ – 451 [82, 169], а також вимірювання тиску на передньому торці моделей зразка. Для якісної оцінки формування потоку, візуалізації картини обтікання, визначення оптимальної відстані перешкоди, імітуючої елемент, 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. 2.21 – 2.24). Проведені вимірювання показали, що відстань S_0 прямого стрибка від зрізу моделі зразка при $S_1 = 4 \cdot 10^{-2} \dots 0,1$ м змінюється незначно і лежить в межах $S_0 = 1,3 \cdot 10^{-2} \dots 1,5 \cdot 10^{-2}$ м. На підставі проведених досліджень на тіньовому приладі ІАБ – 451 при випробуванні



а)

б)

Рис. 2.19. Зовнішній вигляд установки: а) – установка без вузла обертання; б) – установка з вузлом обертання.

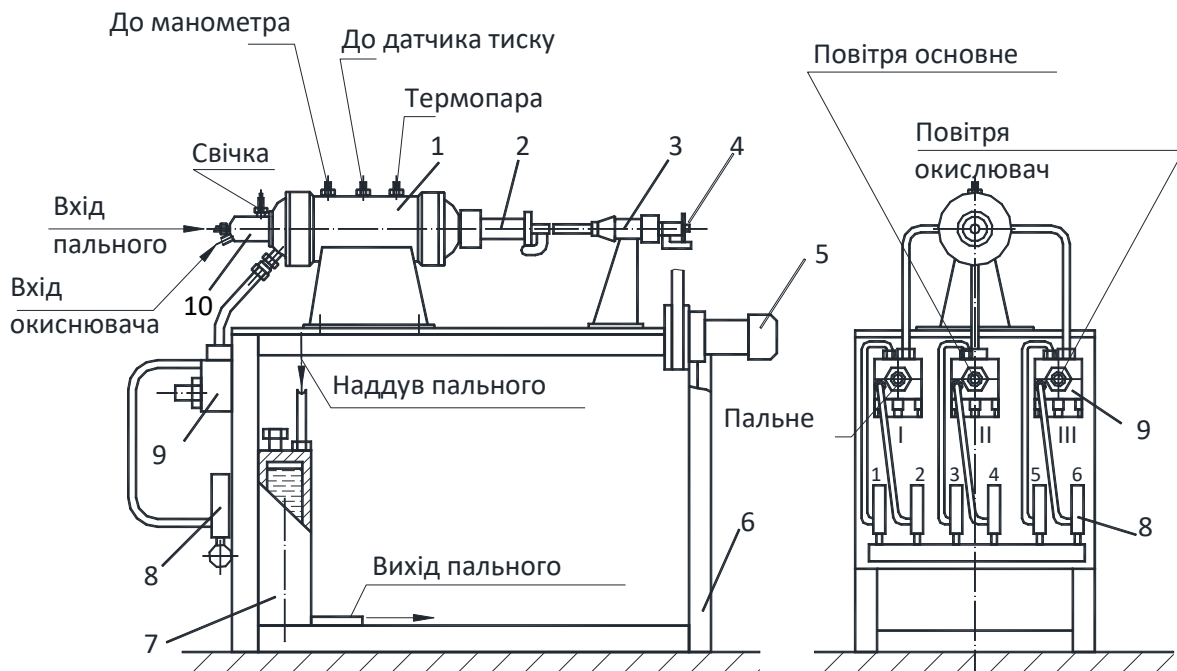


Рис. 2.20. Загальна схема установки: 1 – камера; 2 – змінне сопло; 3 – вузол обертання; 4 – державка з зразком елемента та датчик частоти обертання; 5 – електродвигун; 6 – станина; 7 – бак з паливом; 8 – електропневмоклапан; 9 – відсічний кран; 10 – підігрівач повітря.

зразків 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, використавши в цих цілях відомі газодинамічні функції [82].

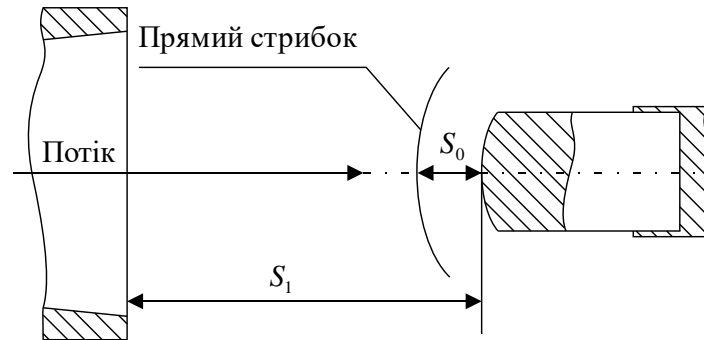


Рис. 2.21. Схема установки моделі при проведенні експериментів на приладі ІАБ – 451.

Так параметри повітряного потоку на надзвукових режимах можуть бути обчислені за допомогою газодинамічних функцій, виходячи з коефіцієнта швидкості λ_a , що визначається виразом [169]:

$$\lambda_a^2 = \frac{k+1}{k-1} \left[1 - \left(\frac{P_a}{P_0} \right) \frac{k-1}{k} \right], \quad (2.15)$$

де P_0 – повний тиск, що зв'язує два чинники: швидкість V_a і тиск у потоці P_a , який називають статичним; $k = \frac{C_P}{C_V}$; C_P , C_V – теплоємності повітря відповідно при постійному тиску і об'ємі.

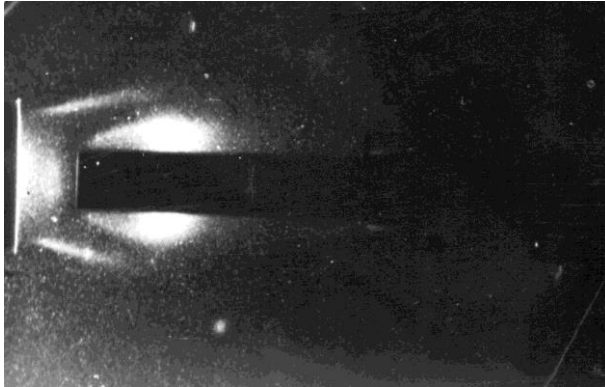
Витрата бензину складає декілька відсотків від загальної витрати повітря. Зважаючи на це параметри робочого тіла практично рівні параметрам повітря (зокрема, $k = 1,4$). Швидкість повітряного потоку з сопла [82]

$$V_a = 0,95 \lambda_a \sqrt{\frac{2k}{k+1} RT_a}. \quad (2.16)$$

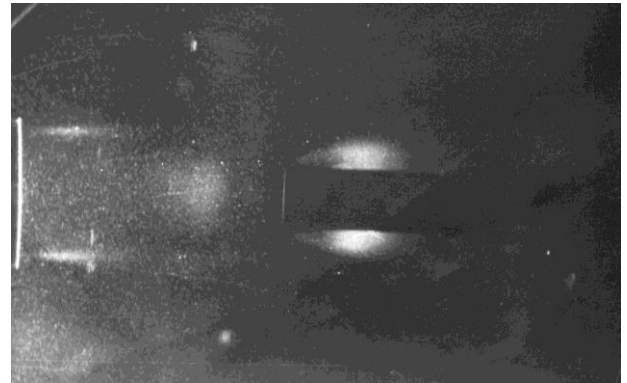
Повний тиск P_0 у переднього торця зразка при надзвуковому режимі обтікання (з врахуванням прямого стрибка ущільнення) визначається по залежності [169]:

$$\frac{P_0}{P_a} = \left(\frac{k+1}{2}\right)^{\frac{k+1}{k-1}} \left(\frac{2}{k-1}\right)^{\frac{1}{k-1}} \frac{M_a^{\frac{2k}{k-1}}}{\left(\frac{2k}{k-1}M_a^2 - 1\right)^{\frac{1}{k-1}}}, \quad (2.17)$$

де $M_a = \frac{V_a}{a_*}$ – число Маха (a_* – швидкість звуку).

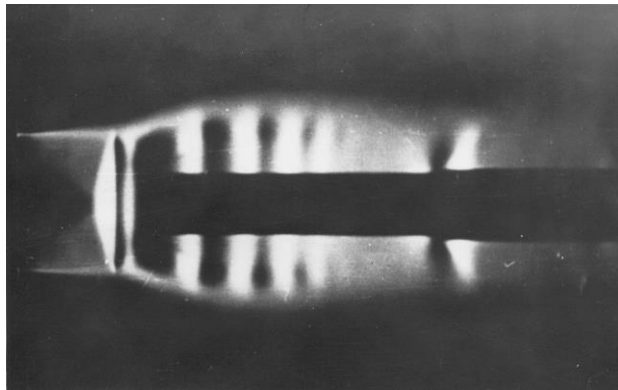


а)

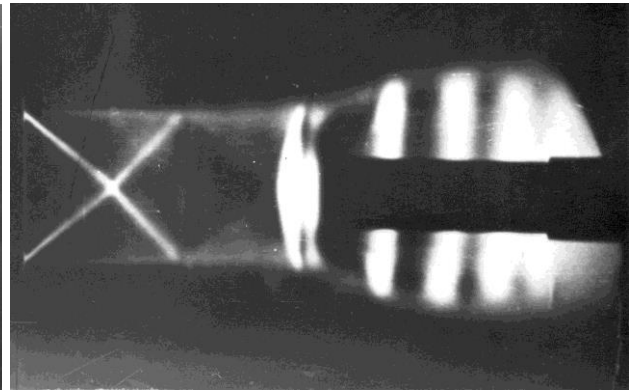


б)

Рис. 2.22. Шлірен-фотографії обтікання зразка повітряним потоком ($V = 6 \cdot 10^2$ м/с): а) – відстань від зразка до зрізу сопла – $1,2 \cdot 10^{-2}$ м; б) – відстань від зразка до зрізу сопла – $8 \cdot 10^{-2}$ м.



а)

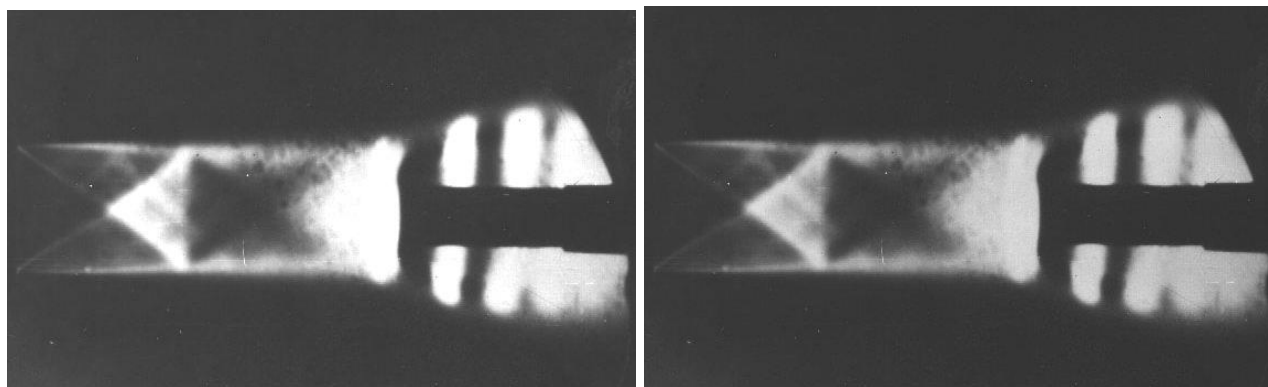


б)

Рис. 2.23. Шлірен-фотографії обтікання зразка повітряним потоком ($V = 2 \cdot 10^3$ м/с): а) – відстань від зразка до зрізу сопла – $4 \cdot 10^{-2}$ м; б) – відстань від зразка до зрізу сопла – $7 \cdot 10^{-2}$ м.

При $k = 1,4$ ця формула має вигляд

$$\frac{P_0}{P_a} = \frac{166,7M_a^7}{(7M_a^2 - 1)^{2,5}}. \quad (2.18)$$



а)

б)

Рис. 2.24. Шлірен-фотографії обтікання зразка повітряним потоком ($V = 1,5 \cdot 10^3$ м/с): а) – відстань від зразка до зрізу сопла $7,5 \cdot 10^{-2}$ м; б) – відстань від зразка до зрізу сопла $8,5 \cdot 10^{-2}$ м.

Для забезпечення високої продуктивності випробувань був використаний спеціальний пульт автоматичного керування установкою за заданою програмою. Послідовність увімкнення та вимикання елементів автоматично забезпечувалась вбудованими у схему реле часу в кількості 10 штук, як реле часу використовувалися електромеханічні реле типу “ЭМРВ-27В”.

Сформований комплекс, що складається з розробленої автором електронно-променевої установки та двох стандартних установок, дозволяє на базі сучасних методів вимірювання та фізико-хімічного аналізу у єдиному циклі проводити наступні дослідження: на першому етапі за допомогою електронно-променевої установки модифікувати поверхневі шари оптичних елементів, а на другому – проводити випробування модифікованих зразків оптичних елементів в умовах інтенсивних зовнішніх термовпливів (підвищені температури та швидкості нагріву, зовнішні тиски, надзвуковий обдув потоком повітря та вісесиметричне обертання), яким піддаються оптико-електронні прилади при їх експлуатації.

Висновки до розділу 2

1. Розроблено удосконалене електронно-променеве обладнання у частині використання розробленої технологічної оснастки для автоматизованого

вимірювання та контролю температури оброблюваної поверхні, а також зондування електронного променя, що захищено патентами України (№ 4177, № 91523), дозволяє зробити весь процес обробки поверхні елементів більш гнучким та ефективним.

2. Сформовано керований комплекс випробувальних установок, що дозволяє моделювати основні зовнішні термодії (підвищені температури нагріву (до 1500 К) та зовнішні тиски (до 10^7 Па), надзвуковий обдув потоком повітря (швидкість до $2 \cdot 10^3$ м/с) та вісесиметричне обертання (кутова швидкість до $4 \cdot 10^3$ рад/с)) на поверхневі шари необроблених та оброблених електронним променем оптичних елементів і, тим самим, передбачати можливі небезпечні ситуації, що виникають у реальних мовах їх експлуатації, попереджаючи можливі руйнування елементів.
3. Для підвищення ефективності роботи випробувальних установок вони були удосконалені наступним чином: в умовах підвищених температур нагріву та зовнішніх тисків одночасне випробування одразу трьох зразків оптичних елементів дозволило підвищити точність вимірювань фізико-механічних властивостей їх поверхневих шарів (відносна похибка знижено до 5...7 % замість 10...12 % при випробуваннях тільки одного зразка елемента); в умовах надзвукового обдуву потоком повітря та вісесиметричного обертання проведені шлірен-фотографічні дослідження формування газового потоку, візуалізації картини обтікання дозволили встановити, що відстань прямого стрибка від зрізу зразка при відстанях між зрізом сопла і зразком $S_1 = 4 \cdot 10^{-2} \dots 0,1$ м складає $S_0 = 1,3 \cdot 10^{-2} \dots 1,5 \cdot 10^{-2}$ м, а також вибрати оптимальну відстань від зрізу сопла до зразка $S_{1opt} = 5 \cdot 10^{-2}$ м, при якому надзвуковий газовий струмінь зберігає структуру своєї початкової ділянки, що дозволяє у декілька разів підвищити точність розрахунків її параметрів, використавши для цього відомі газодинамічні функції.

РОЗДІЛ 3. ВИЗНАЧЕННЯ ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ ВПЛИВУ ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВОЇ ТЕХНОЛОГІЇ НА ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОПТИЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ

В даному розділі представлено результати експериментальних досліджень закономірностей впливу електронно-променевої технології на експлуатаційні характеристики оптичних елементів (мікротвердості поверхні, спектрального коефіцієнта пропускання, стійкості до зовнішніх термічних та механічних ударів тощо), визначення її режимів (густини теплового впливу електронного променя, швидкості його переміщення), в межах яких відбувається їх покращення, що дозволяє підвищувати техніко-експлуатаційні характеристики оптико-електронних приладів (точність та діапазони вимірювань, вірогідність безвідмовної роботи тощо) [14, 29, 59, 62, 134, 143, 268, 273, 316, 317, 319, 320].

Для підвищення ефективності практичного використання отриманні бази даних були розроблені експериментально-статистичні моделі, що дозволяють в режимі діалогу та реального часу на сучасних ПК оперативно визначати режими обробки, які покращують експлуатаційні характеристики оптичних елементів, та підвищують техніко-експлуатаційні характеристики приладів [318, 324, 325].

3.1. Особливості електронно-променевої обробки оптичних елементів

Для виявлення загальних закономірностей процесу впливу електронного променя на оптичні елементи та керування режимами їх обробки необхідним є знання змін структури модифікованих шарів матеріалів, величин мікрошорсткостей на оброблених поверхнях, глибини проплавлення, мікротвердості, механічної міцності, товщини зміцнених шарів тощо в залежності від режимів обробки, що реалізуються на практиці (густини теплового впливу $F_n = 10^6 \dots 10^9$ Вт/м², швидкості переміщення відносно елемента $V = 0 \dots 0,1$ м/с).

Перед електронно-променевою обробкою оптичних елементів з метою видалення з поверхонь чужорідних частинок, органічних та неорганічних

забруднень їхні поверхні очищали розчином спирту з поляритом “Крокус”, а якість поверхонь після очистки перевіряли згідно ДСТУ 11141-90 спостереженням поверхонь у косо відбитих променях на чорному фоні [39, 59, 60, 62, 153]. Це обумовлено тим, що вказані частинки та забруднення суттєво змінюють фізико-механічні властивості поверхонь, що, у свою чергу, впливає на експлуатаційні характеристики елементів.

Крім цього, з метою зниження термонапружень, що виникають при дії електронного променя на елементи з оптичного скла, які можуть призвести до їхнього руйнування, елементи з оптичного скла перед поверхневим оплавленням нагрівали до температури 700...800 К. При більш високих температурах попереднього нагріву елементів помітно змінюється їхня площинність аж до порушення заданої форми та розмірів [59, 62].

Проведені дослідження показали, що попередній нагрів елементів, крім зниження термонапружень, сприяє також знегажуванню та висушуванню поверхневого шару, за рахунок чого очищується поверхня від залишків миючих та травлячих засобів. Так при прогріві елементів з оптичного скла у вакуумі (до 10^{-3} Па) до вказаних температур можливе видалення газів з поверхневих шарів товщиною у декілька мкм [39, 153].

Після обробки елементів з оптичного скла рухомим електронним променем вони відпалювались з метою зняття термонапружень, що виникають внаслідок перепадів температури у поверхневих шарах при оплавленні їх електронним променем. Вказані напруження небажані, тому що вони призводять до подвійного променезаломлення у склі, помітних оптичних втрат та можуть викликати самовільне руйнування елементів. Процес відпалу елементів полягає у їхньому нагріві до температур, при яких їх поверхневі шари переходять у пружно-в'язкий стан, при якому спостерігається пластична деформація та релаксація напружень. У результаті відпалу виробів термонапруження, що виникають в них після впливу електронно-променевої обробки, повністю релаксують, що підтверджується результатами численних вимірювань, проведених на полярископі-поляриметрі ПКС-125 [39, 62].

3.2. Закономірності впливу режимів електронно-променевої обробки на експлуатаційні характеристики елементів з оптичного скла

Встановлено, що після стандартної механічної обробки на поверхні елементів найбільш характерним є наявність мікродфектів – тріщин глибиною до $0,1 \dots 0,7$ мкм, подряпин довжиною до $2 \dots 5$ мкм, а також пухирців розміром $10^{-3} \dots 10^{-2}$ мкм. Після електронно-променевої обробки розміри пухирців (діаметри) на поверхні елементів зменшуються у $2 \dots 4$ рази, при цьому інші мікродфекти розміром менше $1 \dots 2$ мкм не спостерігаються, тобто в результаті обробки електронним променем поверхні елементів якби “очищуються”, дрібні дефекти усуваються. При цьому, при збільшенні F_n до $7 \cdot 10^7$ Вт/м² площа вказаних дефектів зменшується у $1,8 \dots 2,7$ рази.

Чистота поверхні елементів з оптичного скла у класі *P* після обробки електронним променем, що виміряна у прохідному світлі, підвищується з IV та III до II та I. Контроль площинності та відхилення від площинності елементів показав збереження техніко-експлуатаційних характеристик за точністю поверхні для оптичних елементів ($N = 2$ з точністю $\Delta N = 0,1$; $N = 5$ з точністю $\Delta N = 0,3$), які відповідають допускам, що прийняті у оптико-електронному приладобудуванні (табл. 2.5) [90, 91, 96, 97, 103, 189, 196 - 199].

Вивчення топології поверхонь елементів до та після електронно-променевої обробки показують, що у першому випадку мікрошорсткість поверхні складає $30 \dots 40$ нм, а у другому – знижується до рівня $0,5 \dots 1,2$ нм.

Детальні дослідження структури поверхні елементів з оптичного скла методами АСМ дозволили визначити наступний вплив режимів електронно-променевої обробки на мікрошорсткість поверхні (рис. 3.1 – 3.5): збільшення густини теплового впливу електронного потоку F_n від $7 \cdot 10^6$ Вт/м² до $7 \cdot 10^8$ Вт/м² та зменшення швидкості переміщення V від $3 \cdot 10^{-2}$ м/с до $5 \cdot 10^{-3}$ м/с призводить до зменшення висоти мікрошорсткості від $5 \dots 6$ нм до $0,7 \dots 1,2$ нм; при цьому, характер впливу F_n та V на h не залежить від марки скла.

Аналіз поперечних шліфів, відколів-зламів елементів з оптичного скла після механічної поліровки та електронної обробки показує, що: чіткої границі

між обробленою потоком поверхнею та самою основою матеріалу елемента не спостерігається; є суттєва відмінність сторін елемента – обробленої та необробленої; відбувається модифікація структури поверхні на глибину 250...300 мкм з найбільш суттєвою її зміною в оплавленому шарі.

Вивчення фрактограм поверхневих шарів елементів з оптичного скла до та після електронної обробки показало, що максимальна глибина зони основного термовпливу або товщина оплавленого шару h_m може досягати 300...350 мкм та суттєво залежить від величини F_n і швидкості його переміщення V (рис. 3.6 – 3.11).

Так збільшення F_n від $5 \cdot 10^6$ Вт/м² до $5 \cdot 10^8$ Вт/м² при використаній на практиці швидкості руху електронного потоку $V = 7 \cdot 10^{-3}$ м/с призводить до збільшення глибини оплавлення: від 70 мкм до 250 мкм для елементів з оптичного скла БК10; від 50 мкм до 200 мкм для елементів з оптичного скла К8 та від 45 мкм до 160 мкм для елементів з оптичного скла ТФ10.

Навпаки, збільшення швидкості руху електронного променя від $3 \cdot 10^{-3}$ м/с до $5 \cdot 10^{-2}$ м/с при використаних на практиці значеннях F_n призводить вже до зменшення глибини оплавлення: від 250 мкм до 80 мкм для елементів з оптичного скла БК10; від 190 мкм до 85 мкм для елементів з оптичного скла К8 та від 165 мкм до 50 мкм для елементів з оптичного скла ТФ10.

Встановлено, що при глибокому оплавленні (до 300...350 мкм) спостерігається чітко визначена хвилеподібна поверхня. При цьому модифікований оплавлений шар має чітко орієнтовану структуру по глибині оплавлення.

Таким чином, величина h_m може перевищувати її гранично допустимі значення $h_m^* = 100 \dots 150$ мкм при деяких критичних значеннях F_{ni}^* та V_i^* ($i = 1, 2, \dots$), що призводить до утворення напливів на поверхні елементів, порушення її площинності та, у кінцевому підсумку, до порушення геометричної форми оптичних елементів та їх відбракуванні.

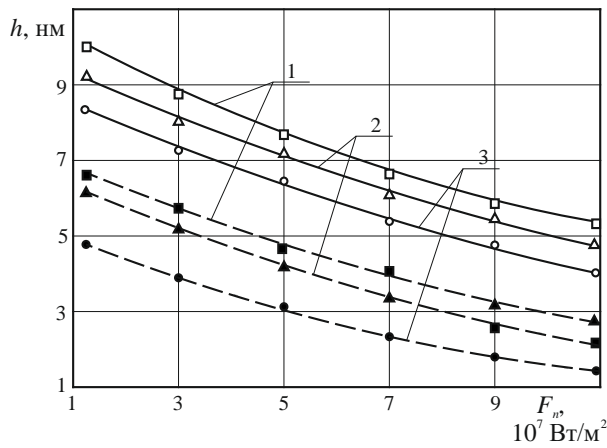


Рис. 3.1. Залежність величини мікросорсткості поверхні елементів з оптичного скла БК10 (1), К8 (2) та ТФ10 (3) від густини теплового впливу електронного променя: — — — — швидкість руху електронного променя $V = 7 \cdot 10^{-2}$ м/с; — — — — швидкість руху електронного променя $V = 5 \cdot 10^{-3}$ м/с; Δ , \circ , \square , \blacktriangle , \bullet , \blacksquare — експериментальні точки.

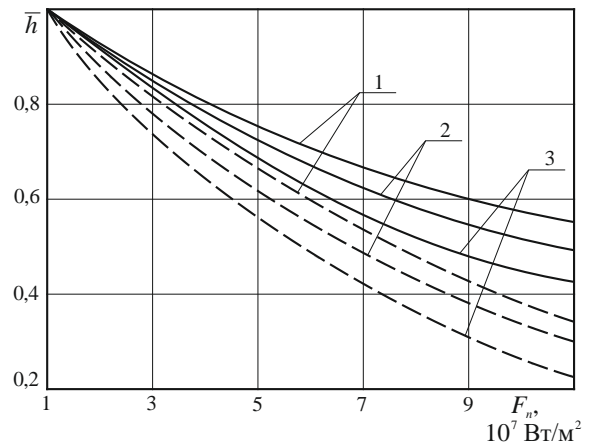


Рис. 3.2. Залежність відносної величини мікросорсткості поверхні елементів з оптичного скла БК10 (1), К8 (2) та ТФ10 (3) від густини теплового впливу електронного променя $(\bar{h} = \frac{h}{h_0})$, де h — мікросорсткості на обробленій електронним променем поверхні; h_0 — значення мікросорсткостей при $F_n = 10^7$ Вт/м²): — — — — швидкість руху електронного променя $V = 7 \cdot 10^{-2}$ м/с; — — — — швидкість руху електронного променя $V = 5 \cdot 10^{-3}$ м/с.

Тому при електронно-променевої обробці елементів необхідно вибирати такі режими, в межах яких відбувається покращення властивостей поверхневих шарів елементів та відсутні процеси глибокого оплавлення, тобто виконується умова $h_m < h_m^*$.

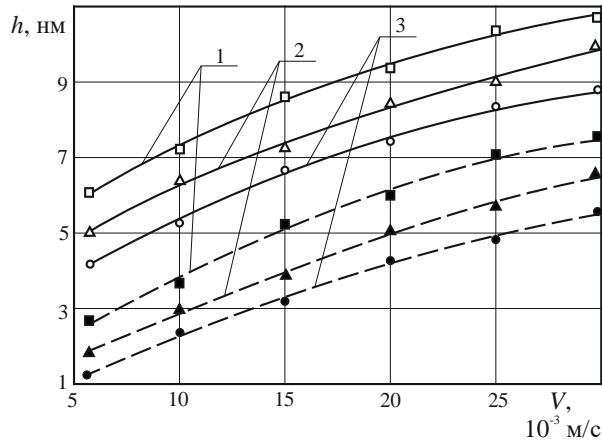


Рис. 3.3. Залежність величини мікрошорсткості поверхні елементів з оптичного скла BK10 (1), K8 (2) та ТФ10 (3) від швидкості руху електронного променя: — — — — густина теплового впливу електронного променя $F_n = 5 \cdot 10^8$ Вт/м²; - - - - густина теплового впливу електронного променя $F_n = 7 \cdot 10^6$ Вт/м²; Δ , \circ , \square , \blacktriangle , \bullet , \blacksquare – експериментальні точки.

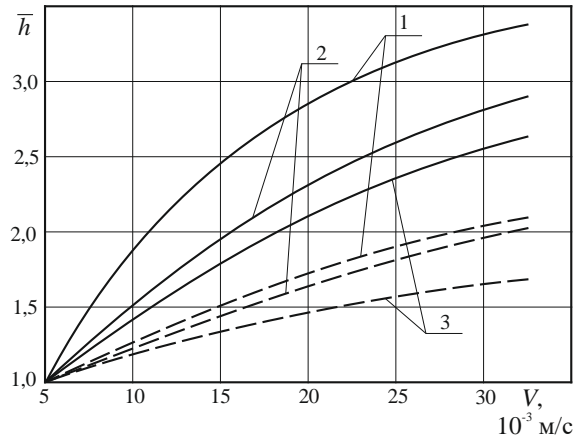


Рис. 3.4. Залежність відносної величини мікрошорсткості поверхні елементів з оптичного скла BK10 (1), K8 (2) та ТФ10 (3) від швидкості руху електронного променя: — — — — густина теплового впливу електронного променя $F_n = 5 \cdot 10^8$ Вт/м²; - - - - густина теплового впливу електронного променя $F_n = 7 \cdot 10^6$ Вт/м².

Встановлено, що модифіковані електронним променем шари на поверхні елементів з оптичного скла мають у різній ступені змінений хімічний склад. Так, аналіз зміни елементного складу шарів товщиною 10...20 мкм на поверхні елементів з оптичного скла К8 показав зменшення концентрації Na і O, збільшення концентрації Si та незмінність концентрації K (рис. 3.9). В той же час на прикладі необробленого та обробленого електронним променем елементів з оптичного скла BK10 показано, що помітної кількісної зміни хімічного складу шарів на їх поверхні не спостерігається, однак можна зробити висновок про поліпшення однорідності розподілу елементів у мікроб'ємах поверхневого шару після електронної обробки (рис. 3.10).

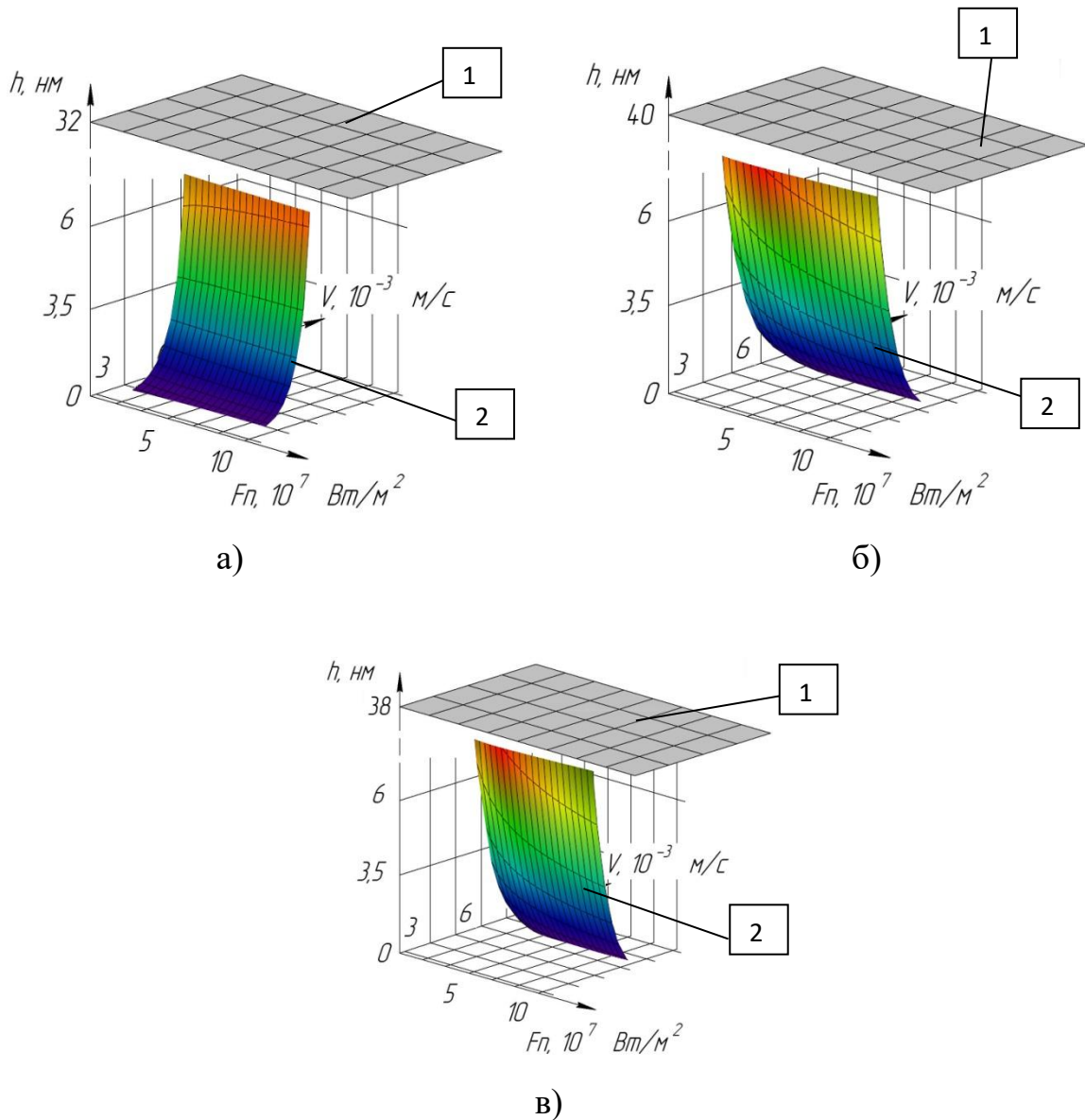


Рис. 3.5. Залежності $h(F_n, V)$ для елементів з оптичного скла ТФ10 (а), БК10 (б), К8 (в): 1 – необроблений електронним променем елемент; 2 – оброблений електронним променем елемент.

Встановлено також, що електронна обробка елементів з оптичного скла опаленням призводить не тільки до гомогенізації шарів, але й до орієнтованої перебудови біля поверхні кремнекисневої сітки скла, яка стає наближеною до структури кварцового скла. Це обумовлено, в основному, видаленням іонів К, а також інших елементів – модифікаторів при одночасному впливі високих температур на поверхні, аж до 1300...1600 К, що призводить до підвищення стійкості оптичних елементів до зовнішніх термічних та механічних впливів.

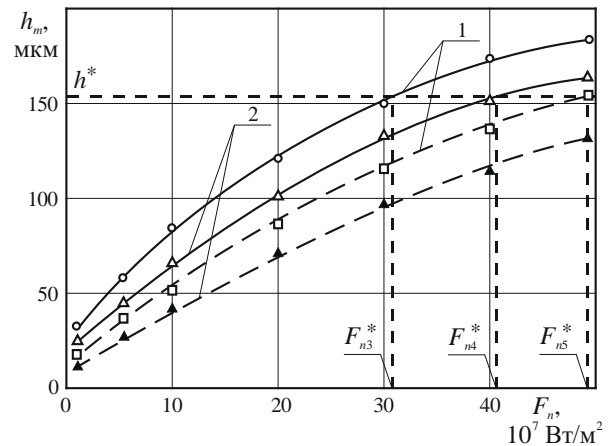
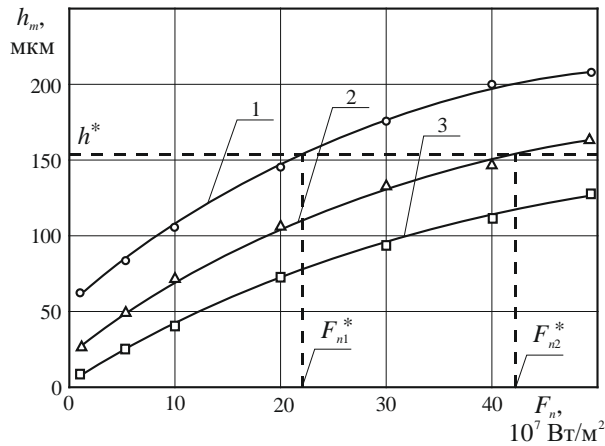


Рис. 3.6. Залежність товщини оплавленого шару h_m у елементах з оптичного скла від густини теплового впливу електронного променя ($V = 5 \cdot 10^{-3}$ м/с): 1 – елемент з оптичного скла БК10; 2 – елемент з оптичного скла К8; 3 – елемент з оптичного скла ТФ10; Δ , \circ , \square , \blacktriangle – експериментальні точки.

Рис. 3.7. Залежність товщини оплавленого шару h_m у елементах з оптичного скла БК10 (1) та ТФ110 (2) від густини теплового впливу електронного променя: $V = 6 \cdot 10^{-3}$ м/с; $V = 4 \cdot 10^{-2}$ м/с; Δ , \circ , \square , \blacktriangle – експериментальні точки.

В результаті проведених досліджень встановлено, що після електронно-променевої обробки елементів з оптичного скла відбувається збільшення такої важливої експлуатаційної характеристики, як спектральний коефіцієнт пропускання ІЧ-випромінювання $k_\lambda(\lambda)$ (λ – довжина хвилі) для діапазону ІЧ-прозорості елементів: $\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1 = 0,76 \dots 2,25$ мкм (рис. 3.13, 3.14).

Отримано, що для елементів з оптичного скла К8 та БК10 значення k_λ зростають до 4...6 %.

Збільшення спектрального коефіцієнта пропускання ІЧ-випромінювання для елементів з оптичного скла відбувається в результаті зменшення кількості та розмірів негативних дефектів на поверхні та у поверхневих шарах (подряпин, тріщин, западин тощо) шляхом їх поверхневого оплавлення на глибину, що не перевищує її гранично допустимі значення.

Наслідком цього є покращення таких важливих властивостей оптичних елементів як чистота їх поверхні та величина її мікросорсткості.

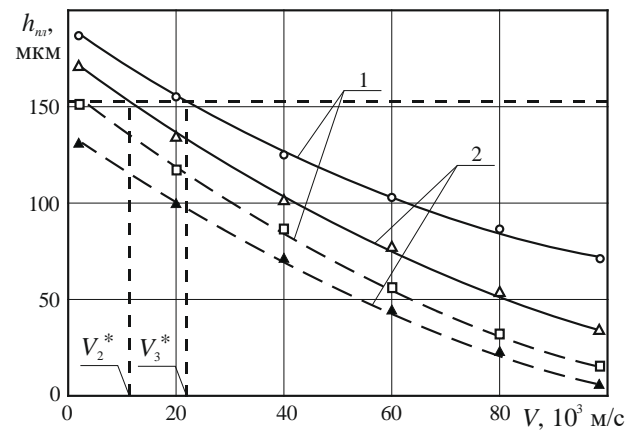
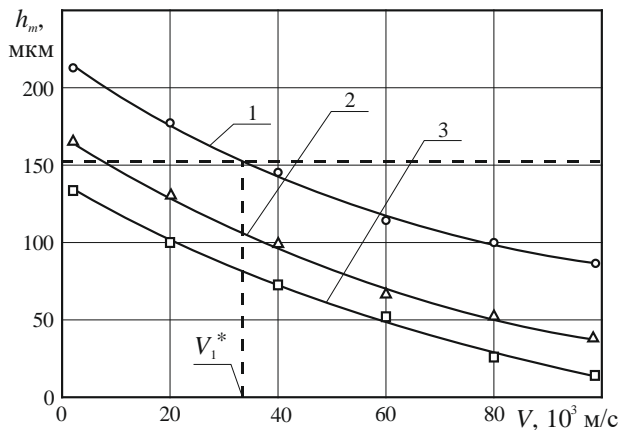


Рис. 3.8. Залежність товщини оплавленого шару h_m у елементах з оптичного скла від швидкості руху електронного потоку ($F_n = 6 \cdot 10^8$ Вт/м²): 1 – елемент з оптичного скла БК10; 2 – елемент з оптичного скла К8; 3 – елемент з оптичного скла ТФ10; Δ , \circ , \square – експериментальні точки.

Рис. 3.9. Залежність товщини оплавленого шару h_m у елементах з оптичного скла БК10 (1) та ТФ10 (2) від швидкості руху електронного потоку: — — — — $F_n = 5 \cdot 10^8$ Вт/м²; — — — — $F_n = 3 \cdot 10^8$ Вт/м²; Δ , \circ , \square , \blacktriangle – експериментальні точки.

Крім цього, під впливом електронного променя відбувається гомогенізація та “кварцування” поверхневих шарів елементів з оптичного скла. При цьому їх кремнекиснева сітка стає близькою до кварцового скла, що має більш високий коефіцієнт k_λ : $k_\lambda = 0,81 \dots 0,93$ для скла К8, БК10 (діапазон ПЧ-прозорості: $\Delta\lambda = 0,76 - 2,25$ мкм, $H = 10^{-2}$ м), а для кварцового скла – $k_\lambda = 0,88 \dots 0,97$ [98, 99, 204, 208].

Також встановлено (табл. 3.1), що після фінішної електронно-променевої обробки поверхонь оптичних елементів приладів для параметрів променю з встановлених оптимальних діапазонів їх застосування, відхилення геометричної форми від заданих відповідають прийнятим у оптико-електронному приладобудуванні. При цьому чистота поверхні оптичних

елементів у класі P після електронно-променевої обробки підвищується на один клас чистоти (наприклад, для аерофотознімальних об'єктивів з VI на V клас; для дзеркал – з IV на III і т. д.).

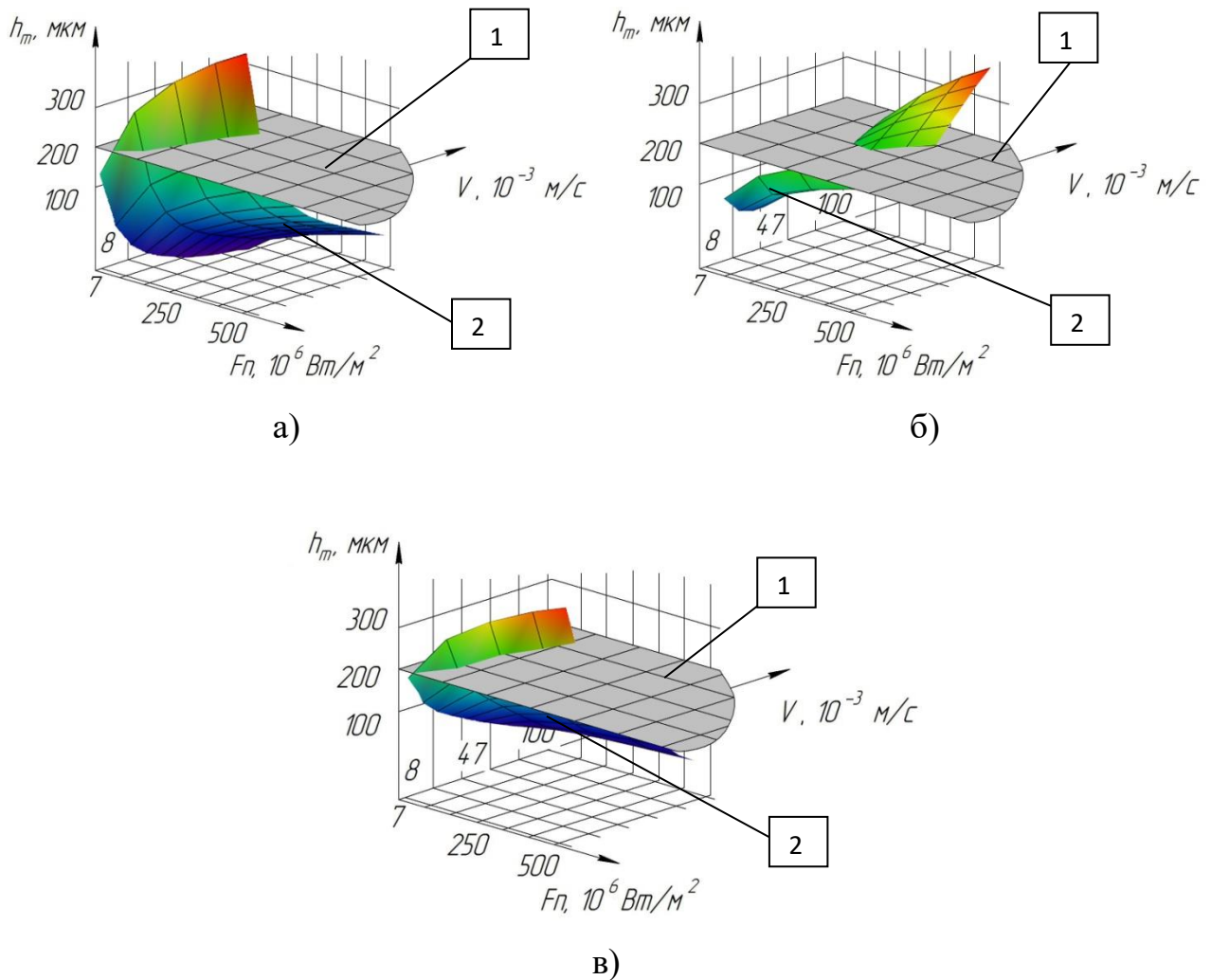


Рис. 3.10. Залежності $h_m(F_n, V)$ для елементів з оптичного скла BK10 (а), К8 (б), ТФ10 (в): 1 – гранично допустимі значення h_m^* ; 2 – значення h_m , які отримано при обробці елементів електронним променем.

Встановлено, що збільшення F_n до $8 \cdot 10^8 \text{ Вт/м}^2$ та V до $5 \cdot 10^{-2} \text{ м/с}$ призводить до зростання температури поверхневих шарів елементів до $1200 \dots 1300 \text{ К}$ та, згідно встановленим залежностям $C_V(T)$, $\lambda(T)$ та $\alpha_T(T)$ (розділ 2), до збільшення об'ємної теплоємності C_V у $1,8 \dots 2,1$ рази, коефіцієнта теплопровідності λ – у $1,9 \dots 2,3$ рази та термічного коефіцієнта лінійного розширення α_T – у $1,1 \dots 1,2$ рази (табл. 3.2).

Таблиця 3.1

Значення допусків на показники якості оптичних елементів, які необроблені та оброблені електронним променем ($F_n = 5 \cdot 10^7$ Вт/м², $V = 7 \cdot 10^{-3}$ м/с)

Допуски на поверхні оптичних елементів по Елементи оптико-електронних приладів		кривизні $N_0, N^{обр}$		формі $\Delta N_0, \Delta N^{обр}$		класам чистоти $P_0, P^{обр}$	
		N_0	$N^{обр}$	ΔN_0	$\Delta N^{обр}$	P_0	$P^{обр}$
Об'єктиви	коліматорів та астрономічні	1 – 3	3	0,2 – 0,3	0,2	VIII	VII
	аерофотознімальні	1 – 3	3	0,1 – 0,5	0,5	VI	V
	фотографічні	3 – 5	5	0,3 – 0,5	0,3	VI	V
Окуляри, лупи		3 – 5	3	0,5 – 0,1	0,5	V	IV
Призми	що відображують	0,5 – 1	0,5	0,1 – 0,3	0,1	III	II
	що заломлюють	2 – 4	2	0,5 – 1	0,5	IV	III
Світлофільтри за та перед окуляром		5 – 10	5	0,8 – 2	0,8	III	II
Дзеркала		1 – 2	2	0,2 – 0,3	0,3	IV	III

Примітка. Прийняті наступні позначення: $N_0, \Delta N_0, P_0, N^{обр}, \Delta N^{обр}$ та $P^{обр}$ – значення показників якості необроблених та оброблених електронним променем оптичних елементів відповідно.

Таблиця 3.2

Діапазони зміни теплофізичних характеристик елементів з оптичного скла для температур нагріву $T = 300 \dots 1300$ К під впливом електронного променя

Теплофізична характеристика \ Марка скла	К8	БК10	ТФ10
$C_V \cdot 10^{-6}$, Дж/м ³ ·К	1,71...3,37	1,77...3,65	1,8...3,91
λ , Вт/м·К	1,05...2,03	1,15...2,39	0,67...1,13
$\alpha_T \cdot 10^6$, К ⁻¹	7,6...8,1	6,8...7,2	7,8...9,2

3.3. Закономірності впливу режимів електронно-променевої обробки на експлуатаційні характеристики елементів з оптичної кераміки

Експерименти з електронно-променевої обробки елементів з оптичних керамік (КО1, КО2, КО5) показали, що вони не можуть бути оплавлені у вакуумі внаслідок високої пружності парів [39, 49, 62].

Так, попередній нагрів у вакуумі оптичних елементів навіть до 1200...1300 К, призводить до розвинутого випаровування матеріалу, а при намаганні його оплавлення рідка фаза практично не утворюється.

Встановлено, що після електронно-променевої обробки елементів з оптичної кераміки відбувається помітна зміна структури по глибині матеріалу (до 200...250 мкм), яка найбільш суттєво залежить від режимів обробки (густини теплового впливу електронного променя F_n , швидкості його переміщення V).

Отримано, що вплив електронного променя на елементи з оптичної кераміки ($F_n = 7 \cdot 10^6 \dots 2 \cdot 10^7$ Вт/м², $V = 5 \cdot 10^{-3} \dots 2 \cdot 10^{-2}$ м/с) призводить до різкого збільшення важливої експлуатаційної характеристики (мікротвердості) її поверхні в залежності від режимів електронно-променевої обробки: збільшення F_n від $7 \cdot 10^6$ Вт/м² до $1,5 \cdot 10^7$ Вт/м² призводить до збільшення мікротвердості поверхні елементів у 1,5...1,7 рази, а збільшення V від $5 \cdot 10^{-3}$ м/с

до $1,5 \cdot 10^{-2}$ м/с призводить до зменшення мікротвердості поверхні елементів у 1,3...1,4 рази (рис. 3.15 – 3.16).

В результаті проведених досліджень було показано, що незалежно від природи кераміки (КО1, КО2, КО5) у поверхневих шарах елементів, які оброблені електронним променем, для розглядуваних діапазонів зміни густини теплового впливу (до $5 \cdot 10^7$ Вт/м²) та швидкості переміщення (до $5 \cdot 10^{-2}$ м/с) помітних фазових змін не спостерігається, але має місце збільшення розміру кристалічних зерен матеріалу.

По відносному розширенню ліній у рентгенограмах встановлено, що практично незалежно від кристалографічних напрямків у кристалічних решітках керамік після електронної обробки виникає помітна зміна розмірів блоків мозаїки та параметрів кристалічної ґратки (табл. 3.3).

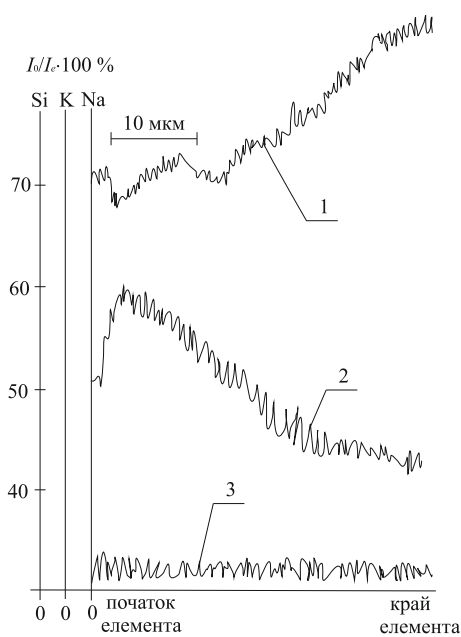


Рис. 3.11. Концентраційні розподіли елементів на поверхні елементів з оптичного скла К8 після електронної обробки: 1 – $\text{Si} \cdot 10^4$, імп/с; 2 – $\text{Na} \cdot 10^3$, імп/с; 3 – $\text{K} \cdot 10^2$, імп/с.

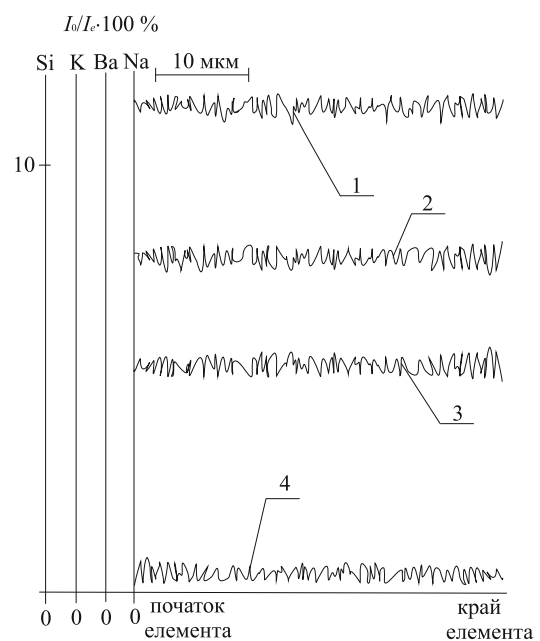


Рис. 3.12. Концентраційні розподіли елементів на поверхні елементів з оптичного скла БК10 після електронної обробки: 1 – Si, імп/с; 2 – $\text{K} \cdot 10^3$, імп/с; 3 – $\text{Ba} \cdot 10^3$, імп/с; 4 – $\text{Na} \cdot 10^2$, імп/с.

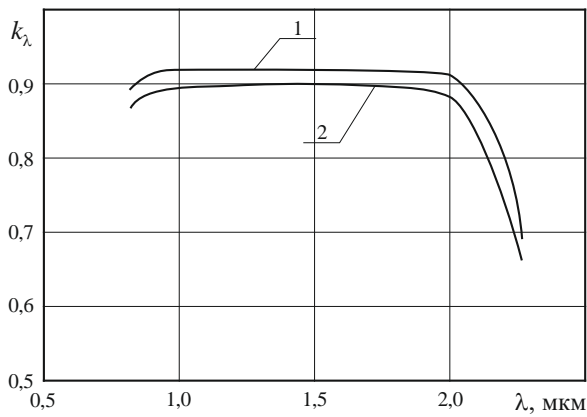


Рис. 3.13. Залежність спектрального коефіцієнта пропускання ІЧ-випромінювання необроблених елементів з оптичного скла К8 (1) та БК10 (2) (товщина елемента $H = 10^{-2}$ м).

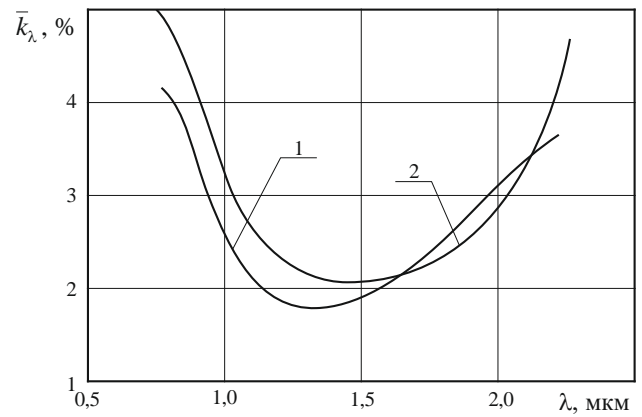


Рис. 3.14. Залежність відносного спектрального коефіцієнта пропускання ІЧ-випромінювання оптичними елементами з скла К8 (1) та БК10 (2) (товщина плоского шару елемента $H = 10^{-2}$ м; $T_0 = 300$ К; $F_n = 1,5 \cdot 10^7$ Вт/м², $V = 7 \cdot 10^{-3}$ м/с) від довжини хвилі.

$$\bar{k}_\lambda = \frac{k_\lambda^{обр}}{k_{\lambda 0}}, \quad \text{де } k_\lambda^{обр} \text{ — значення}$$

коефіцієнта k_λ після електронно-променевої обробки; $k_{\lambda 0}$ — його значення до електронно-променевої обробки; $F_n = 1,5 \cdot 10^7$ Вт/м², $V = 7 \cdot 10^{-3}$ м/с) від довжини хвилі.

З даних табл. 3.3 витікає, що вплив електронного променя на поверхню елементів з оптичної кераміки призводить до збільшення блоків мозаїки та зменшення мікродеформацій кристалічної ґратки: величина блоків мозаїки від вихідного до обробленого електронним променем оптичних елементів збільшується у 3,8 рази для елементів з КО1, у 5,4 рази для елементів з КО2, у 3,1 рази для елементів з КО12, у 4,5 рази для елементів з КО3 та у 7,8 рази для елементів з КО5, а величина мікродеформацій зменшується у 3,9 рази для

елементів з КО1, у 5,7 рази для елементів з КО2, у 4,3 рази для елементів з КО12, у 5,7 рази для елементів з КО3 та у 5,8 рази для елементів з КО5.

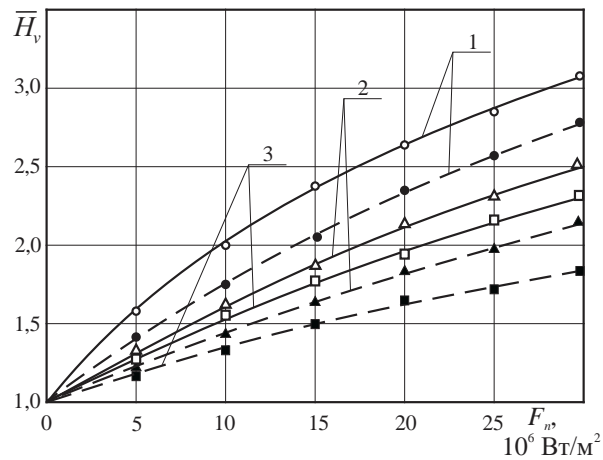
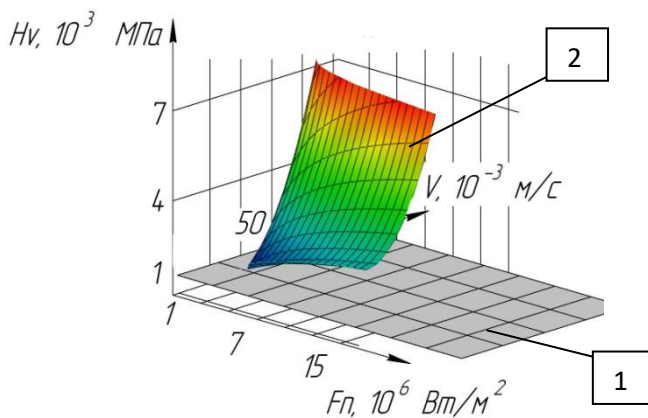
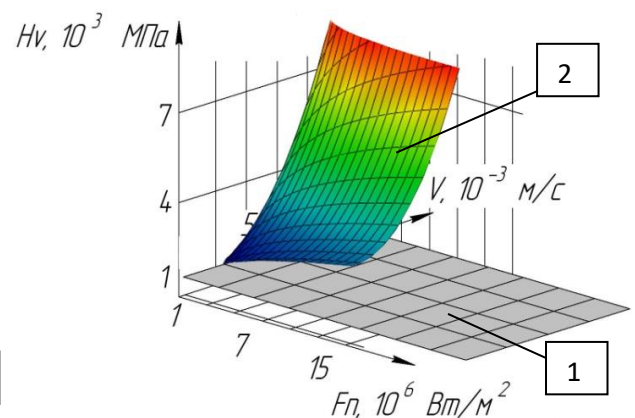


Рис. 3.15. Залежність відносної мікротвердості \bar{H}_v ($\bar{H}_v = \frac{H_v}{H_{v0}}$, де H_v , H_{v0} – мікротвердість обробленого та необробленого елемента відповідно) поверхні елементів з оптичних керамік КО1 (1), КО5 (2) та КО2 (3) від густини теплового впливу електронного променя ($H_{v0} = 1,21 \cdot 10^2$ МПа (КО5); $2,17 \cdot 10^3$ МПа (КО2); $2,86 \cdot 10^3$ МПа (КО1)): — — $V = 5 \cdot 10^{-3}$ м/с; - - - - $V = 1,5 \cdot 10^{-2}$ м/с; Δ , \circ , \square , \blacktriangle , \blacksquare , \bullet – експериментальні дані.



а)



б)

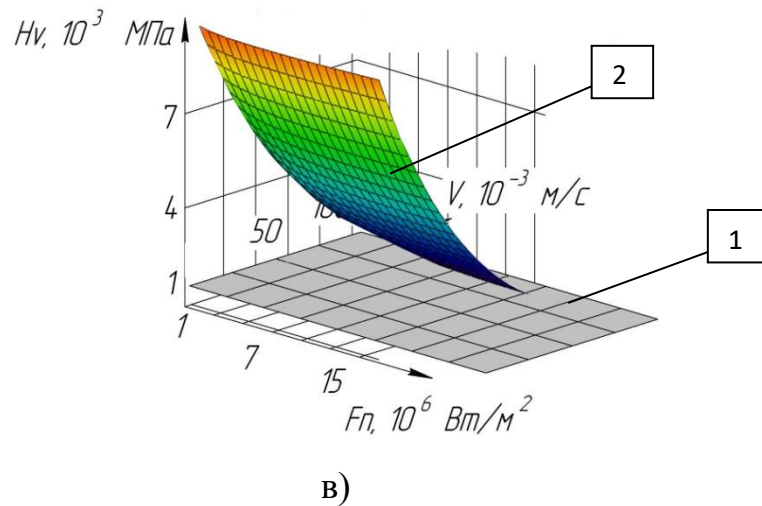


Рис. 3.16. Залежності $H_v(F_n, V)$ для елементів з оптичної кераміки КО2 (а), КО5 (б), КО1 (в): 1 – необроблений електронним променем елемент; 2 – оброблений електронним променем елемент.

Аналіз отриманих змін параметрів кристалічних ґраток елементів після електронно-променевої обробки у відповідності з відомими методами розрахунку даних рентгенограм [19, 189], що базуються на прямій аналітичній залежності між залишковим напруженням, які діють по поверхні елемента та зміною періоду кристалічної ґратки основних компонентів розглядуваних керамік, показав наявність стискаючих напружень у зміцнених поверхневих шарах елементів з товщиною 90...210 мкм для центральної частини оброблених ділянок (розмір ділянок $5 \cdot 10^{-2} \dots 7 \cdot 10^{-2}$ м): для елементів з оптичної кераміки КО2 – до 40...50 МПа; для елементів з оптичної кераміки КО1 – до 70...80 МПа; для елементів з оптичної кераміки КО5 – до 60...70 МПа (рис. 3.17).

Таблиця 3.3

Результати обробки експериментальних даних з розширення ліній на рентгенограмах, розміри блоків мозаїки (D) та зміна параметрів кристалічної ґратки ($F_n = 5 \cdot 10^7$ Вт/м², $V = 5 \cdot 10^{-2}$ м/с)

Параметр	Необроблений зразок			
	Фізичне розширення двох ліній		Розмір блоків D , А	Зміна параметрів кристалічної ґратки $\frac{\Delta d}{d} \cdot 10^{-4}$
Марка кераміки	$\beta_1 \cdot 10^{-3}$, рад	$\beta_2 \cdot 10^{-3}$, рад		
КО1	1,472	1,734	1150	3,421
КО2	1,283	1,452	980	1,643
КО5	1,132	1,289	760	1,117
Оброблений зразок				
КО1	0,687	0,231	4530	0,873
КО2	0,321	0,108	5250	0,291
КО5	0,589	0,637	5850	0,987

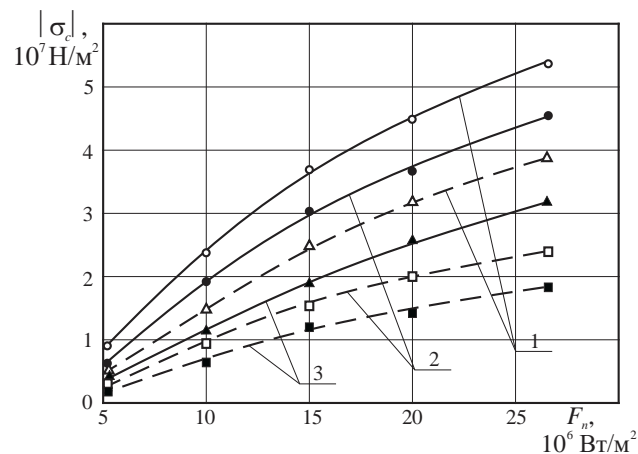


Рис. 3.17. Залежність модуля стискаючих термопружних напружень $|\sigma_c|$ у поверхневих шарах елементів з оптичних керамік КО1 (1), КО5 (2) та КО2 (3) від густини теплового впливу електронного променю: — — — $V = 5 \cdot 10^{-3}$ м/с; — — — — $V = 1,5 \cdot 10^{-2}$ м/с; Δ , \circ , \square , \blacktriangle , \blacksquare , \bullet — експериментальні дані.

Таким чином, 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 мікродеформацій їхніх кристалічних ґраток, тобто в результаті електронно-променевої обробки отримуються більш крупнозернисті поверхневі шари зі стискаючими напруженнями.

В результаті проведених досліджень встановлено (рис. 3.18, 3.19), що у випадку електронно-променевої обробки елементів з оптичних керамік відбувається підвищення такої важливої експлуатаційної характеристики, як спектральний коефіцієнт пропускання ІЧ-випромінювання $k_\lambda(\lambda)$, для усіх діапазонів ІЧ-прозорості елементів (табл. 3.4): для елементів з оптичних керамік КО1, КО2 та КО5 значення k_λ зростають на 5...7 %.

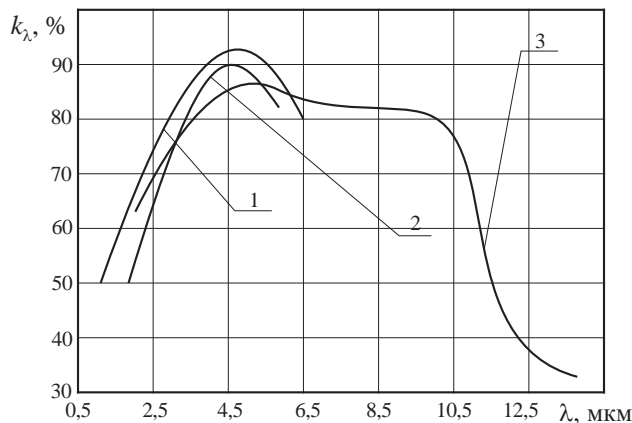


Рис. 3.18. Залежність спектрального коефіцієнта пропускання ІЧ-випромінювання для необроблених елементів з оптичних керамік КО5 (1), КО1 (2) та КО2 (3) (товщина елемента $H = 10^{-2}$ м) від довжини хвилі.

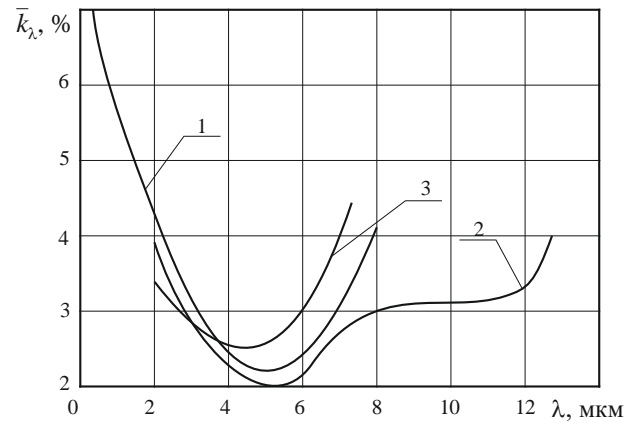


Рис. 3.19. Залежність відносного спектрального коефіцієнта пропускання ІЧ-випромінювання елементами з оптичних керамік КО5 (1), КО2 (2) та КО1 (3) (товщина плоского шару елемента $H = 10^{-2}$ м; $T_0 = 300$ К; $F_n = 1,5 \cdot 10^7$ Вт/м²; $V = 7 \cdot 10^{-3}$ м/с) від довжини хвилі.

Як показали проведені дослідження, зростання k_λ відбувається в результаті структурних змін поверхневих шарів: збільшуються розміри блоків мозаїки, шари стають більш компактними, виникають стискаючі напруження тощо.

Таблиця 3.4

Області ІЧ-прозорості $\Delta\lambda$ оптичних елементів з оптичних керамік (для $H = 10^{-2}$ м)

Матеріал елемента $\Delta\lambda$, мкм	КО1	КО2	КО5
$\Delta\lambda = \lambda_1 - \lambda_2$, мкм	2 – 7	2 – 12,5	0,76 – 8

Також встановлено, що збільшення F_n до $7 \cdot 10^7$ Вт/м² та V до $5 \cdot 10^{-3}$ м/с призводить до зростання температури поверхневих шарів з оптичної кераміки до 1000...1100 К та збільшення об'ємної теплоємності C_V у 2,1...2,5 рази, коефіцієнт теплопровідності λ – у 2,3...2,7 рази, термічного коефіцієнта лінійного розширення α_T – у 1,1...1,2 рази (табл. 3.5).

Таблиця 3.5

Діапазони зміни теплофізичних характеристик елементів з оптичної кераміки для температур нагріву $T = 300...1100$ К під впливом електронного променя

Марка кераміки Теплофізична характеристика	КО1	КО2	КО5
$C_V \cdot 10^{-6}$, Дж/м ³ ·К	0,73...1,52	2,1...4,8	1,44...3,89
λ , Вт/м·К	15,1...31,5	17,1...42,5	44,3...93,1
$\alpha_T \cdot 10^6$, К ⁻¹	11,7...14,1	9,7...11,9	10,8...12,5

3.4. Закономірності впливу режимів електронно-променевої обробки на стійкість оптичних елементів до зовнішніх термічних та механічних впливів

Встановлено, що після електронно-променевої обробки оптичних елементів в результаті підвищення чистоти та зменшення мікросорсткості поверхні шляхом її оплавлення, зміни хімічного складу та перебудови кристалічної структури, формування зміцнених шарів зі стискаючими напруженнями відбувається підвищення стійкості елементів до зовнішнього термічного впливу: для елементів, які оброблені електронним променем, критичні значення зовнішніх теплових потоків q_n^* та часів їх дії t^* перевищують їх значення для необроблених елементів, а вплив зовнішнього тиску послаблюється.

Елементи з оптичного скла. З даних, представлених на рис. 3.20 – 3.24, випливає, що як для оброблених електронним променем оптичних елементів, так й для необроблених, 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 рази, а при заданому q_n^* – до зменшення t^* у 1,3...1,5 рази.

Встановлено, що для елементів з оптичного скла, оброблених електронним променем, значення критичних параметрів q_n^* та t^* перевищують їх значення для необроблених елементів у 2...2,5 рази; при цьому вплив зовнішнього тиску P послаблюється у 1,5...1,7 рази.

Показано, що гранично допустимі значення термопружних напружень σ^* при температурах нагріву $T = 300...1200$ К для оптичних елементів, які оброблені електронним променем, у 1,7...2,3 рази більше, ніж для необроблених (рис. 3.25).

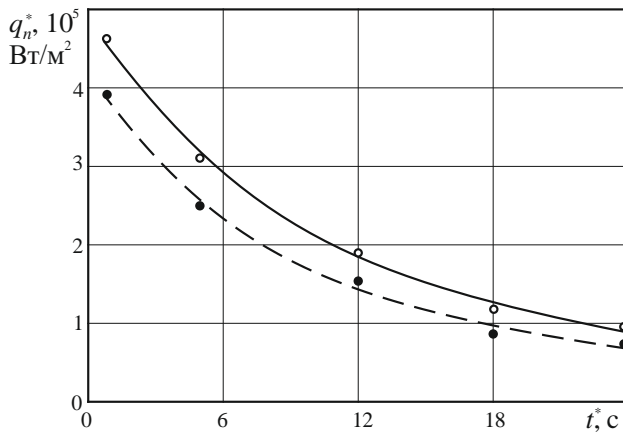


Рис. 3.20. Залежності $q_n^*(t^*)$ для необроблених електронним променем елементів з оптичного скла К8 (товщина зразка $H = 4 \cdot 10^{-3}$ м):
 — — — — $P = 10^5$ Па;
 - - - - $P = 10^7$ Па;
 ●, ○ — експериментальні дані.

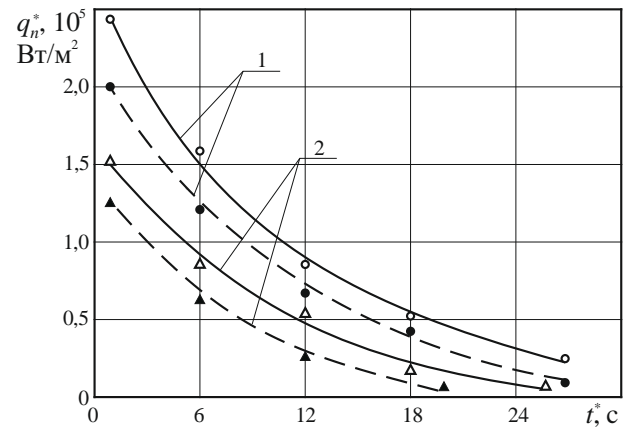


Рис. 3.21. Залежності $q_n^*(t^*)$ для необроблених електронним променем елементів з оптичного скла ТФ10 (1) та БК10 (2), (товщина зразка $H = 4 \cdot 10^{-3}$ м):
 — — — — $P = 10^5$ Па;
 - - - - $P = 10^7$ Па;
 ●, ○, ▲ — експериментальні дані.

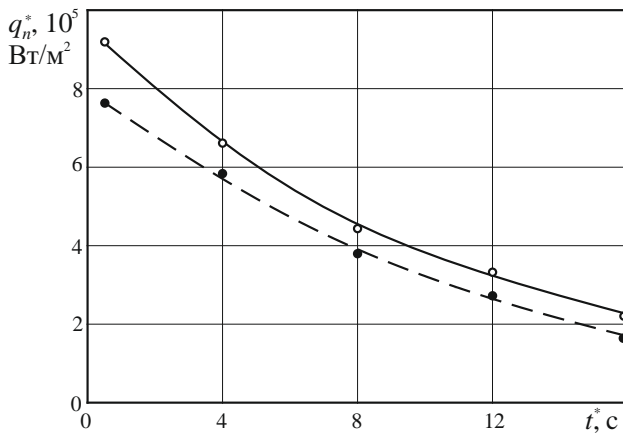


Рис. 3.22. Залежності $q_n^*(t^*)$ для оброблених електронним променем елементів з оптичного скла К8 (товщина зразка $H = 4 \cdot 10^{-3}$ м, $F_n = 8 \cdot 10^8$ Вт/м² та $V = 5 \cdot 10^{-3}$ м/с):
 — — — — $P = 10^5$ Па;
 - - - - $P = 10^7$ Па;
 ●, ○ — експериментальні дані.

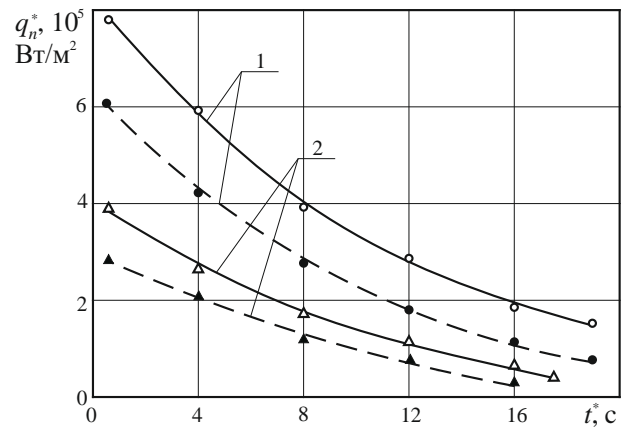


Рис. 3.23. Залежності $q_n^*(t^*)$ для оброблених електронним променем елементів з оптичного скла ТФ10 (1) та БК10 (2) (товщина зразка $H = 4 \cdot 10^{-3}$ м, $F_n = 8 \cdot 10^8$ Вт/м² та $V = 5 \cdot 10^{-3}$ м/с):
 — — — — $P = 10^5$ Па;
 - - - - $P = 10^7$ Па;
 ●, ○, ▲ — експериментальні дані.

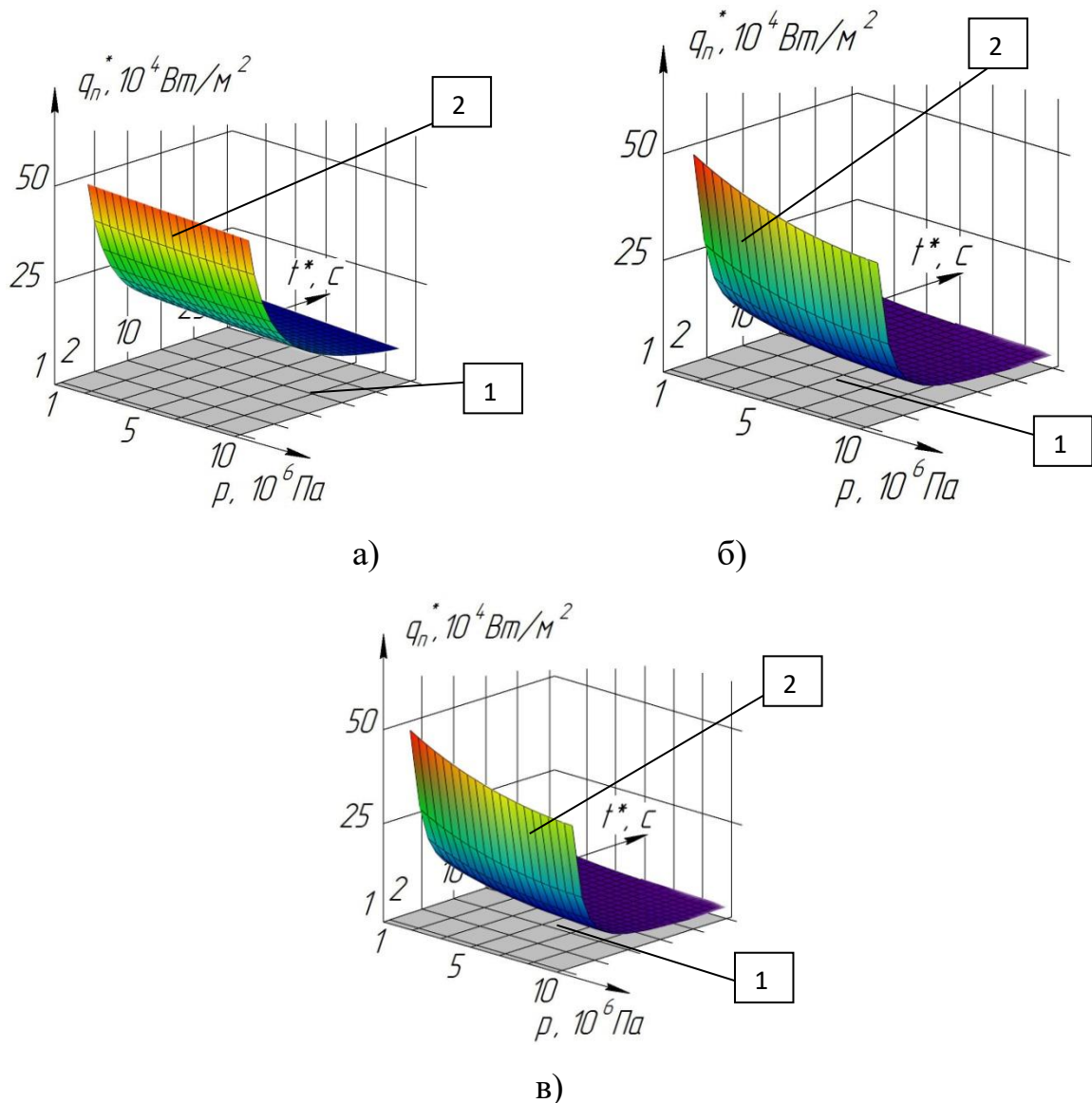


Рис. 3.24. Залежності $q_n^*(P, t^*)$ для елементів з оптичного скла К8 (а), БК10 (б) та ТФ10 (в): 1 – необроблений електронним променем елемент; 2 – оброблений електронним променем елемент.

Елементи з оптичних керамік. З даних, представлених на рис. 3.26 – 3.31, випливає, що, як для оброблених електронним променем оптичних елементів, так й для необроблених, при зменшенні q_n^* від $2,5 \cdot 10^6$ Вт/м² до $1,5 \cdot 10^5$ Вт/м² величина t^* збільшується у 6...8 разів. При цьому зменшення зовнішнього тиску від $P = 10^7$ Па до $P = 10^5$ Па призводить при заданому q_n^* до збільшення t^* у 2...2,5 рази, а при заданому t^* – до збільшення q_n^* у 3...4 рази.

Встановлено, що для елементів з оптичної кераміки, оброблених електронним променем, значення критичних параметрів q_n^* та t^* перевищують їх значення для необроблених елементів у 2,7...3 рази; при цьому вплив зовнішнього тиску P послаблюється у 1,9...2,3 рази.

Встановлено, що гранично допустимі значення термопружних напружень σ^* при температурах нагріву $T = 300...1200$ К для оптичних елементів, які оброблені електронним променем, вище у 1,8...2,7 рази (рис. 3.32).

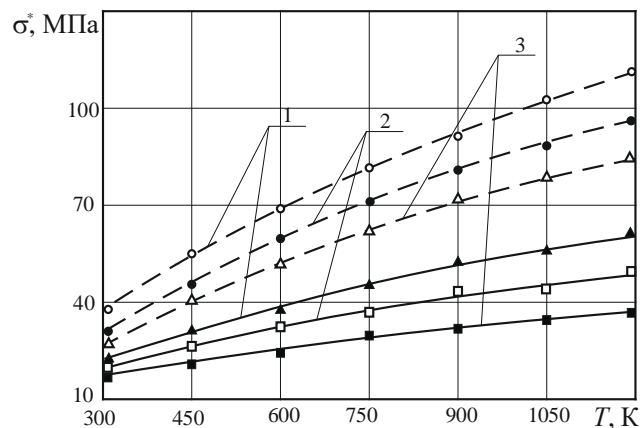


Рис. 3.25. Залежність величини критичних термопружних напружень в елементах з оптичного скла К8 (1), ТФ10 (2) та БК10 (3) від температури нагріву ($P = 10^5$ Па, товщина елемента $H = 4 \cdot 10^{-3}$ м, $F_n = 1,5 \cdot 10^7$ Вт/м², $V = 5 \cdot 10^{-3}$ м/с): ———— — елементи, які не оброблені електронним променем; - - - - оброблені елементи; Δ, ○, □, ▲, ■, ● — експериментальні дані.

Визначення стійкості оптичних елементів до зовнішніх механічних впливів. Аналіз випробувань елементів з оптичних керамік, які зміцнені електронним променем по стандартній методиці (розділ 2) (знаходження граничних значень критичної висоти $H_{кр}$, з якої сталева кулька ($d = 4 \cdot 10^{-3}...5 \cdot 10^{-3}$ м), що вільно падає, руйнує поверхню виробу (виникнення тріщин, відколів)) (рис. 3.33 – 3.35) показав, що для всіх типів розглядуваних керамік спостерігається помітне збільшення середніх значень $H_{кр}$ (для $F_n = 10^7... 5,5 \cdot 10^8$ Вт/м², $V = 7 \cdot 10^{-3}...5 \cdot 10^{-2}$ м/с): наприклад, для необробленого елемента з оптичної кераміки КО1 – $H_{кр} = 0,31...0,95$ м, а для обробленого –

$H_{кр} = 0,41...1,27$ м; для необробленого елемента з оптичної кераміки КО2 – $H_{кр} = 0,27...0,85$ м, а для обробленого – $H_{кр} = 0,39...1,13$ м; для необробленого елемента з оптичної кераміки КО5 – $H_{кр} = 0,51...1,17$ м, а для обробленого – $H_{кр} = 0,71...1,37$ м.

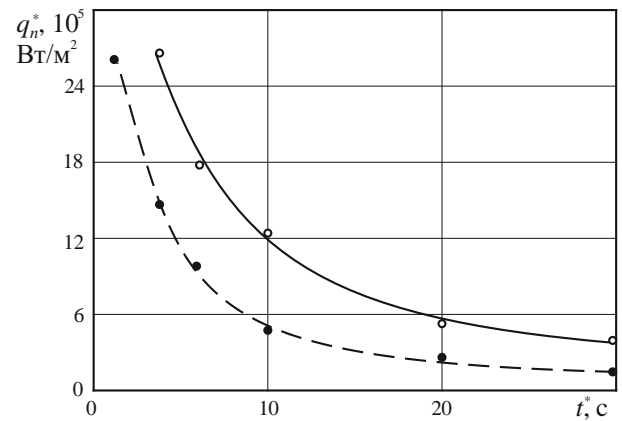
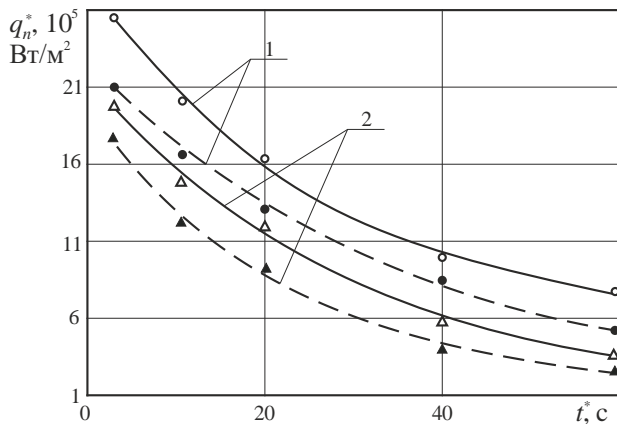


Рис. 3.26. Залежності $q_n^*(t^*)$ для необроблених електронним променем елементів з оптичних керамік КО5 (1) та КО1 (2) (товщина зразка $H = 6 \cdot 10^{-3}$ м): — — — — $P = 10^5$ Па; — — — — $P = 10^7$ Па; ●, ○, Δ, ▲ – експериментальні дані.

Рис. 3.27. Залежності $q_n^*(t^*)$ для необроблених електронним променем елементів з оптичної кераміки КО2 (товщина зразка $H = 6 \cdot 10^{-3}$ м): — — — — $P = 10^5$ Па; — — — — $P = 10^7$ Па; ●, ○ – експериментальні дані.

Отримані дані показують, що для елементів, які оброблені електронним променем, значення $H_{кр}$ на 30...40 % перевищують їх значення для необроблених елементів.

Таким чином, проведені випробування елементів з оптичних керамік (КО1, КО2, КО5) на ударну міцність показали принципову можливість використання метода електронно-променевої обробки для зміцнення та підвищення механічної міцності їх поверхневих шарів.

Визначення небезпечних ділянок на поверхні обтічників ГЧ-приладів, що піддаються максимальному нагріву та руйнуванням в умовах надзвукового обдуву потоком повітря та вісесиметричного обертання. В результаті

проведених випробувань було встановлено, що зростання кутової швидкості вісесиметричного обертання обтічників (до $4 \cdot 10^3$ рад/с) практично не впливає на формування термоударних впливів газового потоку на поверхню обтічників та їх руйнування. Крім цього, за результатами шлірен-фотографічних досліджень структури газового потоку (розділ 2) і безпосередньо за кінцевими результатами випробувань встановлено, що основний внесок в руйнування обтічників надає турбулентний надзвуковий обдув потоком повітря, що призводить до істотно нерівномірного нагріву їх поверхні і формування зон

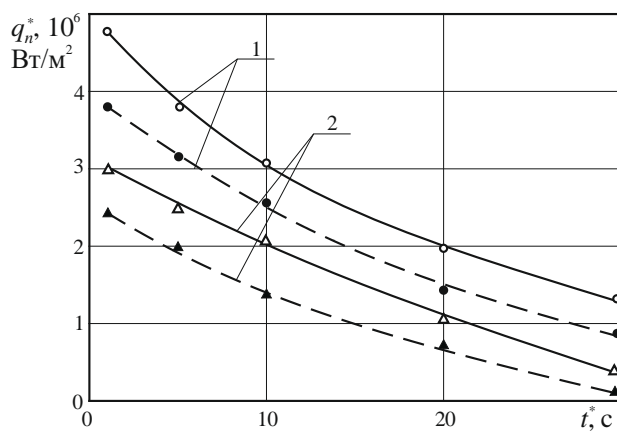


Рис. 3.28. Залежності $q_n^*(t^*)$ для оброблених електронним променем елементів з оптичних керамік КО5 (1) та КО1 (2) (товщина зразка $H = 10^{-2}$ м, $F_n = 8 \cdot 10^8$ Вт/м² та $V = 5 \cdot 10^{-3}$ м/с):
 — — — — $P = 10^5$ Па;
 — — — — $P = 10^7$ Па; ●, ○, Δ, ▲ — експериментальні дані.

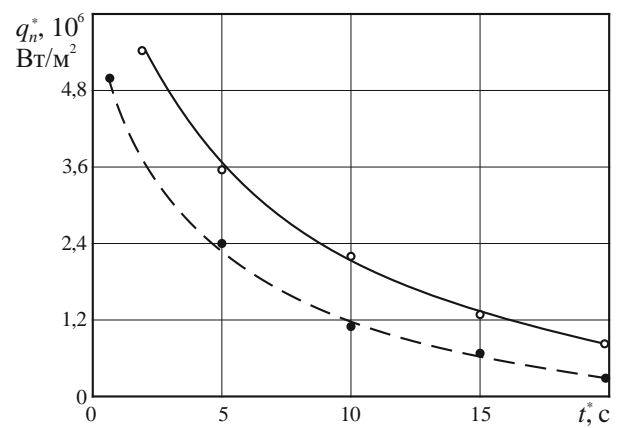


Рис. 3.29. Залежності $q_n^*(t^*)$ для оброблених електронним променем елементів з оптичної кераміки КО2 (товщина зразка $H = 6 \cdot 10^{-3}$ м, $F_n = 8 \cdot 10^8$ Вт/м² та $V = 5 \cdot 10^{-3}$ м/с):
 — — — — $P = 10^5$ Па;
 — — — — $P = 10^7$ Па; ●, ○ — експериментальні дані.

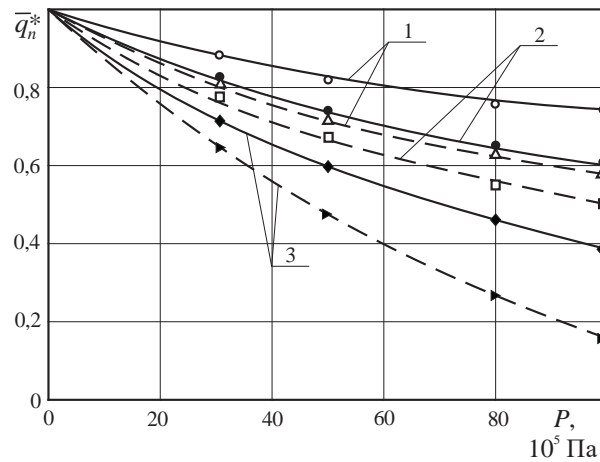


Рис. 3.30. Залежність відносних критичних значень зовнішнього теплового

потoku \bar{q}_n^* ($\bar{q}_n^* = \frac{q_n^*}{q_{n0}^*}$, де q_n^* та q_{n0}^* – поточні значення q_n^* та його значення при

$P = 10^5$ Па відповідно) для різних часів його дії на елементи з оптичних керамік КО5 (1), КО1 (2) та КО2 (3): — — — — $t = 20$ с; - - - - $t = 10$ с; Δ , \circ , \square , \blacktriangleright , \blacklozenge , \bullet – експериментальні дані.

підвищених термовпливів, в яких відбуваються локальні перегріву обтічників, що призводить до їх руйнування. При цьому місця розташування цих зон для ламінарного режиму обтікання знаходяться в околиці передньої критичної точки для всіх досліджених діапазонів V , а у разі турбулентного режиму – значно зміщені вздовж поверхні обтічників. В результаті проведених досліджень для турбулентного режиму обтікання півсферичного обтічника було отримано залежність $\theta(V)$ (θ – кутова координата вздовж поверхні обтічника від передньої критичної точки ($\theta = \theta^* = 0$) до місця, де відбувається максимальний нагрів обтічника та його руйнування ($\theta = \theta_{max}^*$) (рис. 3.36). З результатів, представлених на рис. 3.36 випливає, що із збільшенням швидкості обдуву потоком повітря місця розташування зон поверхневого руйнування обтічника практично не змінюються: при збільшенні V від $7 \cdot 10^2$ м/с до $2 \cdot 10^3$ м/с значення θ_{max}^* лежать в межах $21 \dots 23^\circ$.

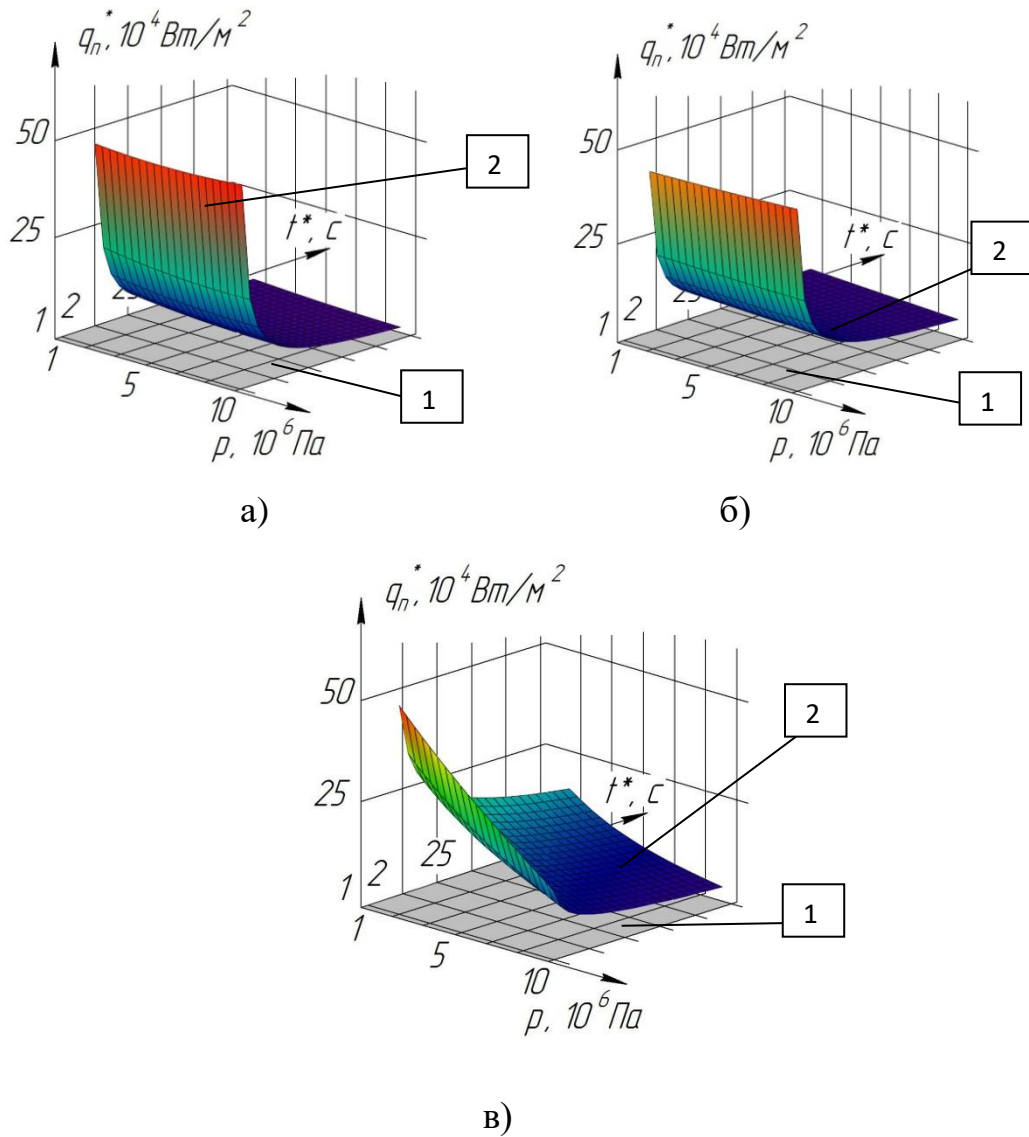


Рис. 3.31. Залежності $q_n^*(P, t^*)$ для елементів з оптичної кераміки КО1 (а), КО2 (б) та КО5 (в): 1 – необроблений електронним променем елемент; 2 – оброблений електронним променем елемент.

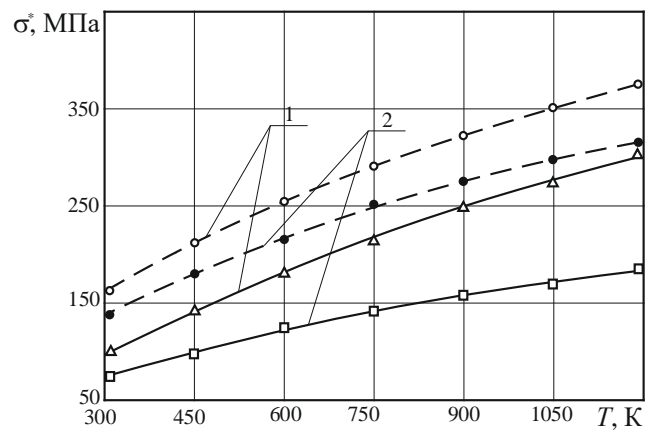


Рис. 3.32. Залежність величини критичних термопружних напружень в елементах з оптичних керамік КО1 (1) та КО2 (2) від температури нагріву

($P = 10^5$ Па, товщина елемента $H = 10^{-2}$ м, $F_n = 1,6 \cdot 10^7$ Вт/м², $V = 5 \cdot 10^{-3}$ м/с): ———— — елементи, які не оброблені електронним променем; — — — — оброблені елементи; Δ , \circ , \square , \bullet — експериментальні дані.

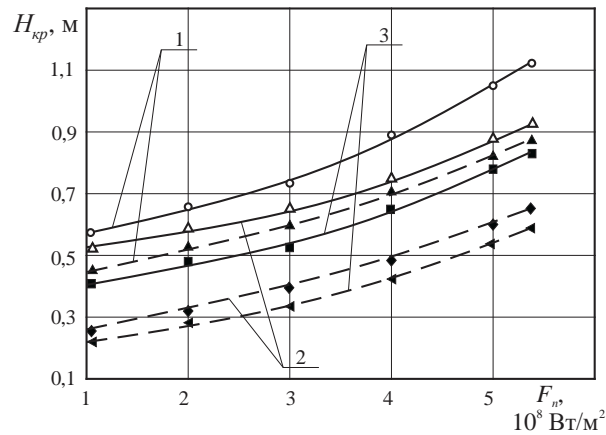
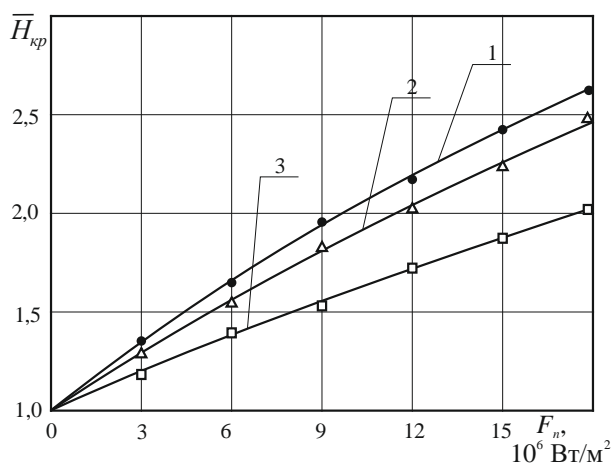
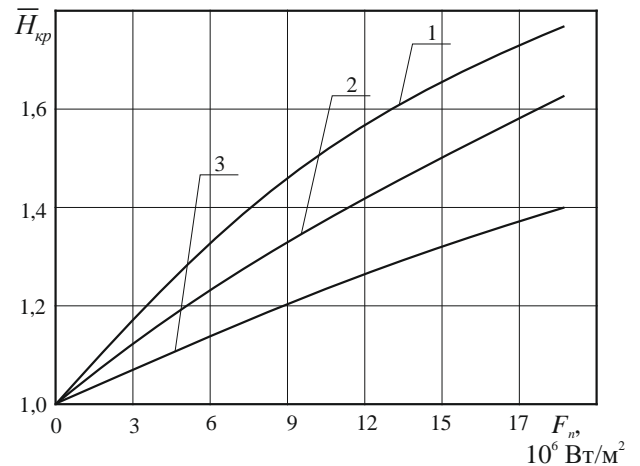


Рис. 3.33. Залежність критичної висоти падіння сталеві кульки на поверхню елемента з оптичних керамік КО5 (1), КО1 (2) та КО2 (3) від густини теплового впливу електронного променя для різних швидкостей його переміщення ($T_0 = 300$ К, товщина елемента 10^{-2} м): ———— $V = 10^{-2}$ м/с; — — — — $V = 6 \cdot 10^{-2}$ м/с; Δ , \circ , \blacktriangle , \blacksquare , \blacklozenge , \blacktriangleleft — експериментальні дані.



а)



б)

Рис. 3.34. Залежність відносних значень критичних висот падіння сталеві кульки $\bar{H}_{кр}$ ($\bar{H}_{кр} = \frac{H_{кр}}{H_{кр0}}$, де $H_{кр}$, $H_{кр0}$ — значення висот для елементів, які

оброблені та необроблені електронним променем відповідно ($H_{кр0} = 0,42$ м (КО1), 0,33 м (КО2), 0,51 м (КО5)) на поверхню елементів з оптичних керамік КО2 (1), КО5 (2) та КО1 (3) від густини теплового впливу електронного

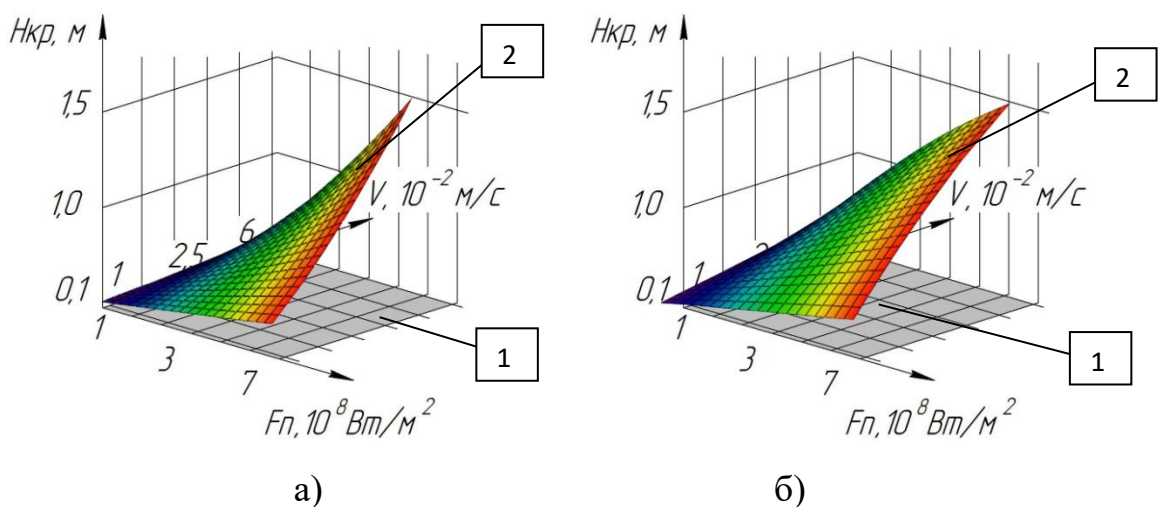
променя для різних швидкостей його переміщення ($T_0 = 300$ К, товщина елемента 10^{-2} м): ———— $V = 10^{-2}$ м/с; — — — — $V = 6 \cdot 10^{-2}$ м/с; Δ , \circ , \blacktriangle , \blacksquare , \blacklozenge , \blacktriangleleft — експериментальні дані.

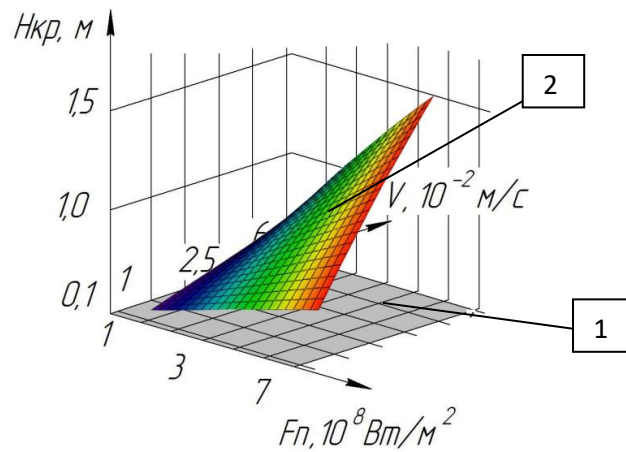
променя для різних швидкостей його переміщення ($T_0 = 300$ К, товщина елемента $6 \cdot 10^{-3}$ м): а) – $V = 5 \cdot 10^{-3}$ м/с; б) – $V = 1,5 \cdot 10^{-2}$ м/с; Δ , \bullet , \square – експериментальні дані.

При цьому встановлено, що руйнування обтічників у вказаних зонах спостерігаються при перевищенні критичних значень швидкостей обдуву потоком повітря та часів його дії (рис. 3.37).

Отримані результати випробувань обтічників з оптичної кераміки в умовах надзвукового обдуву потоком повітря обумовлені, як показали проведені чисельні розрахунки кінетичного нагріву поверхні обтічника у вказаних умовах (розділ 4), вельми високими температурами в зонах поверхні обтічника, що піддаються руйнуванню в процесі експлуатації (рис. 3.38): збільшення V до $V = 2 \cdot 10^3$ м/с призводить до підвищення температури у вказаних зонах до 1400...1500 К, а у передній критичній точці – до 1000...1100 К.

Підвищені значення температур та швидкостей нагріву поверхонь обтічників у вказаних вище небезпечних зонах призводить до виникнення значних термонапружень в цих зонах, які перевищують їх критичні значення, що для розглядуваних оптичних керамік є причиною руйнування поверхневих шарів обтічників.





в)

Рис. 3.35. Залежності $H_{кр}(F_n, V)$ для елементів з оптичної кераміки КО1 (а), КО2 (б) та КО5 (в): 1 – необроблений електронним променем елемент; 2 – оброблений електронним променем елемент.

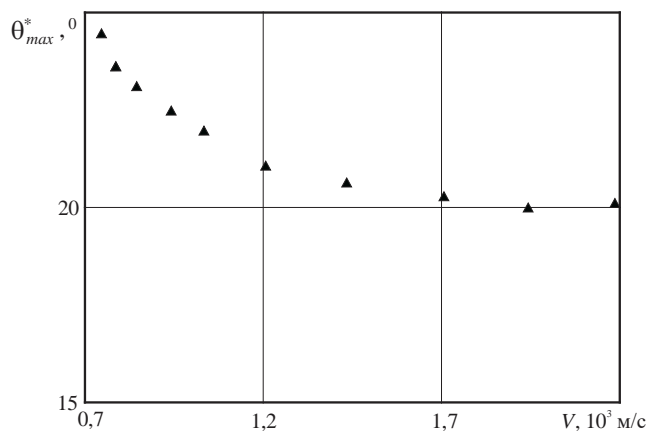


Рис. 3.36. Залежність $\theta_{max}^*(V)$ для турбулентного обдуву обтічника надзвуковим потоком повітря: \blacktriangle – результати випробувань, отримані на вказаній вище установці (див. розділ. 2).

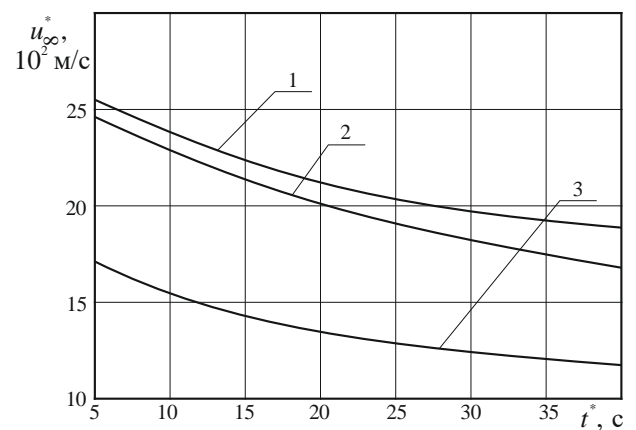


Рис. 3.37. Залежність критичних значень швидкостей обдуву потоком повітря від часів його теплової дії на поверхню обтічника з оптичних керамік КО1 (1), КО2 (2) та КО5 (3) ($T_0 = 300$ К; $R_w = 0,02$ м; $R_H = 0,015$ м; турбулентний режим обтікання).

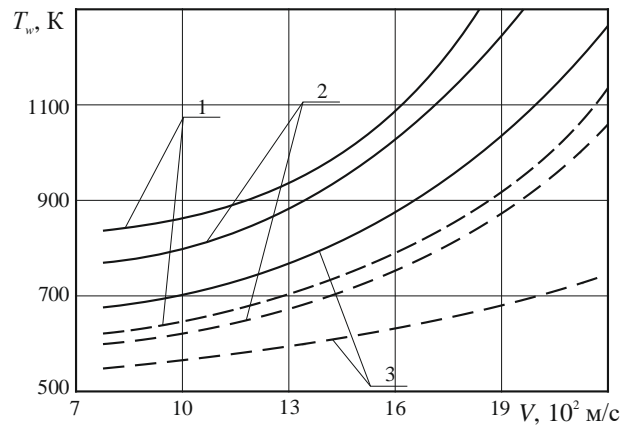


Рис. 3.38. Залежність температури T_w різних точок поверхні обтічників з оптичних керамік КО1 (1), КО2 (2) та КО5 (3) від швидкості зовнішнього надзвукового газового потоку: ———— — температура в зонах максимального термовпливу, які розташовані вздовж поверхні обтічника від його передньої критичної точки ($\theta \neq 0^\circ$); - - - - температура в передній критичній точці обтічника ($\theta = 0^\circ$).

Аналіз проведених експериментальних досліджень дозволив встановити наступні діапазони зміни режимів електронно-променевої обробки, в межах яких спостерігається покращення експлуатаційних характеристик оптичних матеріалів:

- густина теплового впливу $F_n = 7 \cdot 10^6 \dots 8 \cdot 10^8$ Вт/м²;
- швидкість переміщення $V = 5 \cdot 10^{-3} \dots 5 \cdot 10^{-2}$ м/с.

3.5. Експериментально-статистичні моделі для визначення закономірностей впливу режимів електронно-променевої обробки на експлуатаційні характеристики оптичних елементів

Для більш ефективного використання результатів досліджень в якості інформаційної бази даних з визначення впливу режимів електронно-променевої обробки на експлуатаційні характеристики оптичних елементів за допомогою спеціалізованого пакету прикладних програм з методів регресії та інтерполяції [69, 72, 117, 130, 136, 178, 227] (див. додаток А) було розроблено комплекс експериментально-статистичних моделей (рис. 3.39).

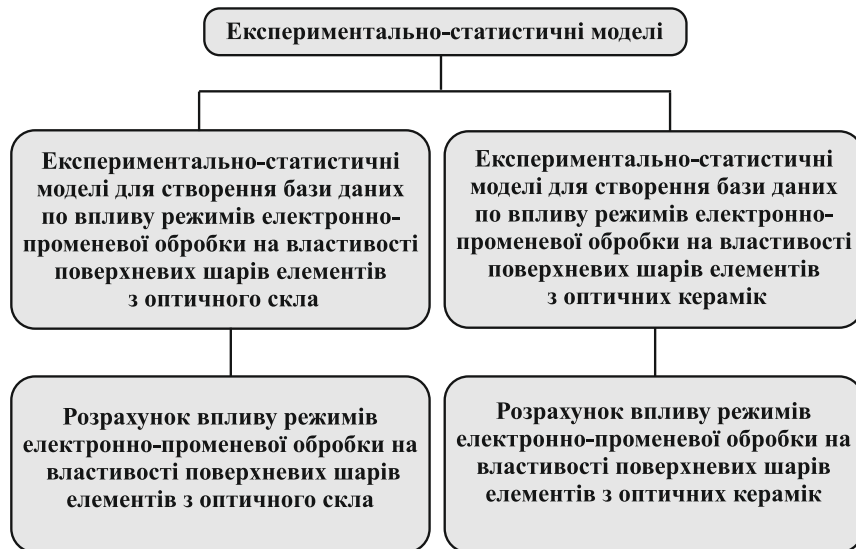


Рис. 3.39. Структура комплексу експериментально-статистичних моделей.

За допомогою вказаного комплексу моделей на сучасних ПК в режимі діалогу та реального часу можна визначати необхідні діапазони зміни режимів електронно-променевої обробки, що призводять до заданих змін експлуатаційних характеристик оптичних елементів.

Експериментально-статистичні моделі для визначення впливу режимів електронно-променевої обробки на величину мікросорсткості поверхонь елементів з оптичного скла. Для визначення впливу режимів електронно-променевої обробки на величину мікросорсткості оброблених поверхонь елементів з оптичного скла (К8, БК10, ТФ10) було отримано наступні експериментально-статистичні моделі (відносна похибка 5...7 %):

$$h(F_n, V) = A \cdot F_n^{b_0 + b_1 \cdot V + b_2 \cdot V^2} \cdot V^c, \quad (3.1)$$

де h – у нм; F_n – у Вт/м²; V – у м/с; A, b_0, b_1, b_2, c – емпіричні константи, значення яких залежать від природи оптичного скла (табл. 3.6).

Експериментально-статистичні моделі для визначення впливу режимів електронно-променевої обробки на товщину оплавленого шару на поверхні елементів з оптичного скла. Для визначення впливу режимів електронно-променевої обробки на товщину рідкої ванни, що утворюється на поверхні

оброблюваного елемента з оптичного скла (К8, БК10, ТФ10,), було отримано наступні експериментально-статистичні моделі (відносна похибка 5...7 %):

$$h_m(F_n, V) = M \cdot F_n^{n_0 + n_1 \cdot V + n_2 \cdot V^2} \cdot V^l, \quad (3.2)$$

де h_m – у мкм; F_n – у Вт/м²; V – у м/с; M, n_0, n_1, n_2, l – емпіричні константи, значення яких залежать від природи оптичного скла (табл. 3.7).

Експериментально-статистичні моделі для визначення впливу режимів електронно-променевої обробки на мікротвердість поверхні елементів з оптичних керамік. Для визначення впливу режимів електронно-променевої обробки на підвищення мікротвердості поверхні елементів з оптичних керамік (КО1, КО2, КО5) за допомогою вказаного вище спеціалізованого пакету прикладних програм було отримано наступні експериментально-статистичні моделі (відносна похибка 4...6 %):

$$H_v(F_n, V) = N \cdot F_n^{c_0 + c_1 \cdot V + c_2 \cdot V^2} \cdot V^D, \quad (3.3)$$

де H_v – у МПа; F_n – у Вт/м²; V – у м/с; N, c_0, c_1, c_2, D – емпіричні константи, значення яких залежать від природи оптичної кераміки (табл. 3.8).

Експериментально-статистичні моделі для визначення впливу режимів електронно-променевої обробки на величину $H_{кр}$. Для визначення впливу режимів електронно-променевої обробки на критичну висоту падіння сталеві кульки на оброблені поверхні елементів з оптичних керамік (КО1, КО2, КО5) було отримано наступні експериментально-статистичні моделі (відносна похибка 5...8 %):

$$H_{кр}(F_n, V) = \sum_{i=1}^4 a_i \cdot V^i + F_n \cdot \sum_{i=1}^4 b_i \cdot V^i + F_n^2 \cdot \sum_{j=2}^4 c_j \cdot V^j, \quad (3.4)$$

де $H_{кр}$ – у м; F_n – у Вт/м²; V – у м/с; a_i та b_i ($i = \overline{1,4}$), c_j ($j = \overline{2,4}$) – емпіричні константи, значення яких залежать від природи оптичної кераміки (табл. 3.9).

Таблиця 3.6

Значення емпіричних констант у експериментально-статистичних моделях (3.1) для елементів з оптичного скла

Марка Константа \ скла	К8	БК10	ТФ10
A	16,13	10,19	12,11
b_0	0,064	0,029	0,037
b_1	- 45,86	- 52,34	- 51,91
b_2	$5,59 \cdot 10^2$	$1,95 \cdot 10^2$	$2,27 \cdot 10^2$
c	- 0,52	- 0,94	- 0,89

Таблиця 3.7

Значення емпіричних констант у експериментально-статистичних моделях (3.2) для елементів з оптичного скла

Марка Константа \ скла	К8	ТФ10	БК10
M	$4,01 \cdot 10^{-3}$	$4,15 \cdot 10^{-4}$	$2,13 \cdot 10^{-4}$
n_0	0,25	0,21	0,25
n_1	3,17	9,84	6,71
n_2	- 27,31	- 131,73	- 43,65
l	- 1,35	- 1,64	- 1,59

Експериментально-статистичні моделі для визначення впливу режимів електронно-променевої обробки на критичні значення зовнішнього теплового потоку q_n^* та часу його дії t^* . Для підвищення ефективності практичного використання цих даних при проектуванні та виготовленні різних приладів на основі оптичних елементів було отримано наступні експериментально-статистичні моделі (відносна похибка 3...5 %):

$$q_n^*(t^*, P) = (a_0 + a_1 \cdot P + a_2 \cdot P^2) \cdot (t^*)^{b_0 + b_1 \cdot P + b_2 \cdot P^2}, \quad (3.5)$$

де q_n^* – у Вт/м²; t^* – у с; P – у Па; $a_0, a_1, a_2, b_0, b_1, b_2$ – емпіричні константи, значення яких залежать від природи оптичного скла (табл. 3.10).

Таблиця 3.8

Значення емпіричних констант у експериментально-статистичних моделях (3.3) для елементів з оптичних керамік

Марка кераміки Константа	КО1	КО2	КО5
N	$1,92 \cdot 10^3$	$2,15 \cdot 10^3$	$3,14 \cdot 10^3$
c_0	0,041	0,049	0,058
c_1	$6,1 \cdot 10^{-2}$	- 2,13	- 1,53
c_2	43,51	$- 1,54 \cdot 10^2$	53,41
D	- 0,21	- 0,17	- 0,073

Для підвищення ефективності практичного використання отриманих результатів, також як й для елементів з оптичних керамік, було розроблено наступні експериментально-статистичні моделі (відносна похибка 5...7 %):

$$q_n^*(t^*, P) = (c_0 + c_1 \cdot P + c_2 \cdot P^2) \cdot (t^*)^{d_0 + d_1 \cdot P + d_2 \cdot P^2}, \quad (3.6)$$

де q_n^* – у Вт/м²; t^* – у с; P – у Па; $c_0, c_1, c_2, d_0, d_1, d_2$ – емпіричні константи, значення яких залежать від природи оптичної кераміки (табл. 3.11).

Експериментально-статистичні моделі для визначення залежностей критичних значень швидкостей надзвукового обдуву потоком повітря та часів його дії на оптичні обтічники. Для підвищення ефективності практичного використання отриманих даних при проектуванні та виготовленні обтічників ГЧ-приладів було отримано наступні експериментально-статистичні моделі (відносна похибка 5...7 %):

$$u_\infty^*(t^*) = u_\infty^{(0)} + u_\infty^{(1)} \cdot t^* + u_\infty^{(2)} \cdot (t^*)^2, \quad (3.7)$$

де u_{∞}^* – у м/с; t^* – у с; $u_{\infty}^{(0)}$, $u_{\infty}^{(1)}$, $u_{\infty}^{(2)}$ – емпіричні константи, значення яких залежать від природи оптичної кераміки (табл. 3.12).

Таблиця 3.9

Значення емпіричних констант у експериментально-статистичних моделях (3.4) для елементів з оптичних керамік

Марка кераміки Константа	КО1	КО2	КО5
a_1	- 0,32	$1,1 \cdot 10^{-5}$	$1,5 \cdot 10^{-4}$
a_2	$7,8 \cdot 10^{-2}$	0,17	$- 1,9 \cdot 10^{-2}$
a_3	$- 6 \cdot 10^{-2}$	$3,8 \cdot 10^{-2}$	$1,8 \cdot 10^{-3}$
a_4	$1,1 \cdot 10^{-4}$	$- 2,8 \cdot 10^{-3}$	$1,3 \cdot 10^{-5}$
b_1	0,11	$1,5 \cdot 10^{-5}$	$1,7 \cdot 10^{-5}$
b_2	$- 3,2 \cdot 10^{-2}$	0,16	- 0,36
b_3	$2,8 \cdot 10^{-3}$	$- 3,6 \cdot 10^{-2}$	$8,3 \cdot 10^{-2}$
b_4	$1,3 \cdot 10^{-6}$	$2,7 \cdot 10^{-3}$	$2,1 \cdot 10^{-7}$
c_2	$2,7 \cdot 10^{-2}$	$- 2,5 \cdot 10^{-2}$	$- 1,1 \cdot 10^{-2}$
c_3	$- 5,7 \cdot 10^{-3}$	$5,6 \cdot 10^{-3}$	$4,6 \cdot 10^{-4}$
c_4	$4,2 \cdot 10^{-4}$	$- 4,5 \cdot 10^{-3}$	$6,7 \cdot 10^{-5}$

Таблиця 3.10

Значення емпіричних констант у експериментально-статистичних моделях (3.5) для елементів з оптичного скла

Марка скла Константа	К8	БК10	ТФ10
a_0	$1,76 \cdot 10^6$	$9,02 \cdot 10^5$	$1,28 \cdot 10^6$
a_1	$- 10^{-2}$	0,13	$3,6 \cdot 10^{-2}$
a_2	$4,7 \cdot 10^{-10}$	$- 10^{-13}$	$- 6,2 \cdot 10^{-14}$

Продовження таблиці 3.10

b_0	-0,94	- 1,21	- 1,11
b_1	$- 7,9 \cdot 10^{-9}$	$- 8,3 \cdot 10^{-8}$	$- 3,7 \cdot 10^{-8}$
b_2	$9,5 \cdot 10^{-17}$	$5,1 \cdot 10^{-15}$	$3,8 \cdot 10^{-15}$

Таблиця 3.11

Значення емпіричних констант у експериментально-статистичних моделях (3.6) для елементів з оптичних керамік

Марка кераміки Константа	КО1	КО2	КО5
c_0	$7,84 \cdot 10^6$	$5,91 \cdot 10^6$	$5,68 \cdot 10^6$
c_1	0,32	$- 8,3 \cdot 10^{-2}$	$- 4,21 \cdot 10^{-2}$
c_2	$- 3,8 \cdot 10^{-8}$	$6,6 \cdot 10^{-10}$	$- 1,3 \cdot 10^{-14}$
d_0	- 0,72	- 0,79	0,48
d_1	$- 3,2 \cdot 10^{-8}$	$- 1,6 \cdot 10^{-8}$	$2,5 \cdot 10^{-8}$
d_2	$1,2 \cdot 10^{-15}$	$1,3 \cdot 10^{-16}$	$1,5 \cdot 10^{-15}$

Таблиця 3.12

Значення емпіричних констант у експериментально-статистичних моделях (3.7) для елементів з оптичних керамік

Марка кераміки Константа	КО1	КО2	КО5
$u_{\infty}^{(0)}$	25,13	26,086	18,971
$u_{\infty}^{(1)}$	- 0,467	- 0,369	- 0,431
$u_{\infty}^{(2)}$	0,005	0,003	0,005

Слід зазначити, що встановлені нові закономірності впливу режимів електронно-променевої технології (густини теплової дії електронного променя F_n , швидкості його переміщення V) на експлуатаційні характеристики оптичних елементів (мікротвердість поверхні, спектральний коефіцієнт пропускання, стійкість до зовнішніх термічних та механічних ударів тощо) та експериментально-статистичні моделі для визначення на сучасних ПК в режимі діалогу та реального часу діапазонів зміни вказаних режимів, в межах яких відбувається покращення цих характеристик, дозволяють розробити науково-обґрунтований метод їх покращення, використання якого на практиці дозволяє підвищувати техніко-експлуатаційні характеристики оптико-електронних приладів.

Висновки до розділу 3

1. Вперше встановлено закономірності впливу режимів електронно-променевої обробки оптичних елементів (густини теплової дії електронного променя F_n , швидкості його переміщення V) на якість поверхневих шарів елементів, а також на їх експлуатаційні характеристики, визначено діапазони зміни режимів обробки ($F_n = 7 \cdot 10^6 \dots 8 \cdot 10^8$ Вт/м², $V = 5 \cdot 10^{-3} \dots 5 \cdot 10^{-2}$ м/с), в межах яких відбувається їх покращення:

елементи з оптичного скла

- поверхня елементів повністю очищується від дефектів, які були отримані при їх механічній поліровці (дрібні тріщини розміром 0,3...0,9 мкм, тонкі подряпини довжиною 5...7 мкм, а також пухирці розміром 1...2 мкм); при збільшенні густини теплового впливу F_n від $5 \cdot 10^6$ Вт/м² до $7 \cdot 10^7$ Вт/м² площа негативних дефектів зменшується у 1,8...2,7 рази; при цьому відбувається підвищення їх чистоти у класі P з IV та III до III та II, зменшується мікрошорсткість до 0,4...1,3 нм; спостерігається суттєва залежність форми поверхні від режимів обробки (при глибокому оплавленні (до 300...350 мкм) спостерігається чітко визначена хвилеподібна поверхня, а модифікований оплавлений шар має чітко

- орієнтовану структуру по глибині оплавлення); для збереження площинності поверхні необхідно його оплавляти на глибину, що не перевищує $h^* = 100 \dots 150$ мкм;
- збільшення густини теплової дії електронного променю від 10^7 Вт/м² до 10^8 Вт/м² та зменшення швидкості його переміщення від $5,5 \cdot 10^{-2}$ м/с до $5 \cdot 10^{-3}$ м/с призводить до зменшення величини мікрошорсткості від $4 \dots 6$ нм до $0,4 \dots 1,3$ нм;
 - глибина зони основного термовпливу або товщина оплавленого шару суттєво залежить від густини теплової дії променю F_n та швидкості його переміщення V : наприклад, збільшення F_n від $7 \cdot 10^6$ Вт/м² до $5 \cdot 10^8$ Вт/м² та зменшення V від $5 \cdot 10^{-2}$ м/с до $5 \cdot 10^{-3}$ м/с призводить до збільшення глибини оплавлення від $30 \dots 70$ мкм до $150 \dots 250$ мкм;
 - очищення поверхні оптичних елементів, зменшення на її мікрошорсткості, усунення дефектного шару шляхом поверхневого оплавлення, гомогенізація хімічного складу продуктів гідролізу (розпад K_2O та Na_2O по глибині дії електронного променю), а також орієнтована перебудова біля поверхні кремнекисневої сітки скла, яка стає наближеною до структури кварцового скла, призводять до збільшення на $4 \dots 6$ % спектрального коефіцієнта пропускання ІЧ-випромінювання елементів;
 - відбувається зростання температури поверхневих шарів елементів до $1200 \dots 1300$ К, що призводить до збільшення їх об'ємної теплоємності у $1,8 \dots 2,1$ рази, коефіцієнта теплопровідності – у $1,9 \dots 2,3$ рази та термічного коефіцієнта лінійного розширення – у $1,1 \dots 1,2$ рази.

елементи з оптичних керамік

- підвищується мікротвердість їх поверхні, впорядковується структура та зміцнюються їх поверхневі шари за рахунок формування у них стискаючих напружень, і тим самим підвищується міцність елементів до ударних теплових впливів, яким вони піддаються в умовах експлуатації;
- збільшення густин теплової дії променю від $7 \cdot 10^6$ Вт/м² до $2 \cdot 10^7$ Вт/м² призводить до збільшення мікротвердості поверхні елемента у

- 1,5...1,7 рази, а збільшення швидкості переміщення променю від $5 \cdot 10^{-3}$ м/с до $1,5 \cdot 10^{-2}$ м/с призводить до зменшення мікротвердості поверхні елемента у 1,3...1,4 рази;
- стискаючі напруження досягають $3,87 \cdot 10^3 \dots 7,15 \cdot 10^3$ МПа у зміцнених поверхневих шарах товщиною 90...210 мкм;
 - підвищення мікротвердості поверхні, впорядкування структури та формування зміцнених шарів призводять до збільшення коефіцієнта пропускання ІЧ-випромінювання на 5...7 %;
 - відбувається збільшення температури поверхневих шарів елементів до 1000...1100 К, у результаті підвищується їх об'ємна теплоємність у 2,1...2,5 рази, коефіцієнт теплопровідності – у 2,3...2,7 рази та термічний коефіцієнт лінійного розширення – у 1,1...1,2 рази.
2. Вперше встановлено наступні закономірності впливу зовнішніх термодій на оптичні елементи:
- для елементів з оптичного скла, які оброблені електронним променем, критичні значення зовнішнього теплового потоку q_n^* та часів його дії t^* перевищують їх значення для необроблених елементів у 2...2,5 рази, а вплив зовнішнього тиску послаблюється у 1,5...1,7 рази;
 - для елементів з оптичної кераміки, які оброблені електронним променем, значення критичних параметрів q_n^* та t^* перевищують їх значення для необроблених елементів у 2,7...3 рази, а вплив зовнішнього тиску послаблюється 1,9...2,3 рази;
 - критичні значення термопружних напружень у оптичних елементах при температурах нагріву 300...1200 К, які оброблені електронним променем, вище, ніж для необроблених: у 1,7...2,3 рази – для елементів з оптичного скла та у 1,8...2,7 рази – для елементів з оптичних керамік.
3. Вперше проведені випробування півсферичних обтічників з оптичних керамік в умовах їх обдуву надзвуковим потоком повітря дозволили встановити:

- для ламінарного режиму обтікання руйнування обтічників спостерігається біля їх критичних точок $\theta = 0^{\circ}$ (θ – сферична координата), а у випадку турбулентного режиму обтікання область руйнування зміщується вздовж поверхні обтічників від передньої критичної точки на відстані, що відповідають $\theta = 21 \dots 23^{\circ}$.
- 4. Вперше отримано, що електронно-променева обробка оптичних елементів призводить до зростання критичної висоти, з якої сталеві кульки діаметром $4 \cdot 10^{-3} \dots 5 \cdot 10^{-3}$ м, яка вільно падає, руйнує поверхню елементів (виникнення тріщин, відколів та ін. дефектів) з 0,21...1,17 м до 0,27...1,37 м, що дозволяє шляхом регулювання параметрів променя збільшувати на 30...40 % механічну міцність поверхневих шарів елементів.
- 5. Вперше розроблено експериментально-статистичні моделі для визначення впливу режимів електронно-променевої обробки на експлуатаційні характеристики оптичних елементів (відносна похибка 5...9 %), що дозволяє в режимі діалогу та реального часу на сучасних ПК формувати керовану базу даних по вказаним властивостям.

РОЗДІЛ 4. МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ КРИТИЧНИХ ЗНАЧЕНЬ ПАРАМЕТРІВ ЗОВНІШНІХ ТЕРМОВПЛИВІВ НА ОПТИЧНІ ЕЛЕМЕНТИ

У даному розділі представлено результати теоретичних досліджень з визначення критичних значень параметрів зовнішніх термовпливів (теплових потоків, швидкостей обдуву потоком повітря, часів їх впливу та ін.) на оптичні елементи, перевищення яких при їх експлуатації призводить до руйнування елементів (поява тріщин, відколів, напливів, хвилеподібних ділянок тощо), а також з визначення місць розташування на поверхні протяжних оптичних елементів або оптичних обтічників небезпечних ділянок, де вони піддаються максимальним впливам та подальшим руйнуванням, які необхідно попередньо обробляти електронним променем для попередження вказаних руйнувань [61, 259 – 261, 264 – 275].

Спочатку розглядається комплекс нелінійних та нестационарних математичних моделей зовнішнього нагріву елементів різної геометричної форми та розмірів (плоско-паралельні пластини, елементи прямокутної, циліндричної та сферичної форм), в яких враховуються, на відміну від існуючих моделей, температурні залежності теплофізичних властивостей оптичних матеріалів (об'ємну теплоємність C_V (Дж/м³·К), коефіцієнт теплопровідності λ (Вт/м·К)), а також різний фазовий стан поверхневих шарів (твердий, рідкий). Далі розглядається нова математична модель зовнішньої термоударної дії надзвукового потоку повітря на оптичний обтічник, в якій враховуються: форма обтічника у вигляді півсферичної оболонки; залежності розподілу зовнішнього теплового потоку вздовж його поверхні від режиму обтікання (ламінальний, турбулентний); температурні залежності теплофізичних властивостей матеріалу обтічника.

При цьому адекватність розроблених математичних моделей та методів розрахунку характеристик теплофізичних процесів зовнішніх впливів (значення температури T (К), термopужних напружень σ (Н/м²) по глибині елементів та товщини оплавлених шарів ξ (мкм)) перевіряється шляхом зіставлення з

результатами окремих експериментальних досліджень, які були проведені на устаткуванні та за методиками, зазначеними вище (див. розділ 2), а також з експериментальними даними, які наведено у інших роботах.

Усі чисельні експерименти для визначення впливу параметрів зовнішніх термовпливів на характеристики теплофізичних процесів, що розглядаються, проводились на сучасних ПК в режимі діалогу та реального часу з використанням необхідних фізико-механічних параметрів оптичних елементів та повітряного потоку [39, 62, 77, 93, 99, 123, 200, 201, 204, 205], а також сучасних обчислювальних методів, які зведені у пакети прикладних програм, що дозволяють за допомогою керуючої програми вибирати найбільш швидкодіючі та точні чисельні методи (див. додатки А – В).

4.1. Математичні моделі процесів зовнішнього нагріву оптичних елементів

Плоско-паралельна пластина. При зовнішньому тепловому впливі на поверхню пластини поступає рівномірно розподілений тепловий потік $q_n(t)$ (рис. 4.1). При цьому розглядається пластина, для якої $\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial T}{\partial y} = 0$ (одномірність розподілу тепла углиб пластини), а також враховується теплообмін на нижньому боці пластини. Також вважається, що тепловтрати за рахунок випромінювання знехтувано малі (внаслідок малих значень температури поверхні пластини (не більше 1000...1500 К [39, 62, 64])).

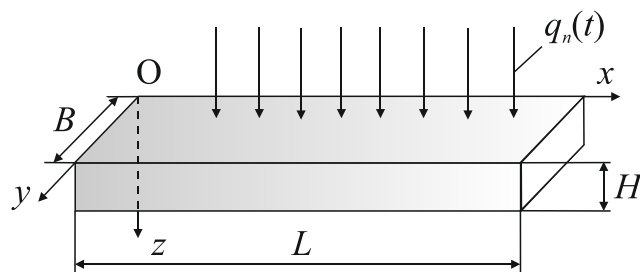


Рис. 4.1. Схема нагріву оптичної пластини при зовнішньому тепловому впливі: B , H , L – ширина, товщина та довжина пластини, м; $B < L$, $H < B$; $q_n(t)$ – зовнішній тепловий потік, Вт/м².

Таким чином, розглядається стандартна одномірна, нестационарна та нелінійна математична модель поверхневого нагріву пластини [23, 58, 122, 135]:

$$C_V(T(z,t)) \cdot \frac{\partial T(z,t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda(T(z,t)) \cdot \frac{\partial T(z,t)}{\partial z} \right), \quad 0 < z < H, \quad t > 0, \quad (4.1)$$

$$T(z,t)|_{t=0} = T_0, \quad (4.2)$$

$$\lambda(T(z,t)) \cdot \frac{\partial T(z,t)}{\partial z} \Big|_{z=H} = 0, \quad (4.3)$$

$$\lambda(T(z,t)) \cdot \frac{\partial T(z,t)}{\partial z} \Big|_{z=0} = q_n(t), \quad (4.4)$$

де $T(z,t)$ – температура в різних точках z по товщині пластини в різні моменти часу t , T_0 – початкова температура пластини, К.

Для знаходження розв'язку задачі (4.1) – (4.4) врахуємо залежності $C_V(T)$ і $\lambda(T)$ (див. розділ 2) і зробимо заміну

$$\theta(z,t) = T(z,t)^{\nu+1} - T_0^{\nu+1}. \quad (4.5)$$

Одержуємо систему рівнянь

$$\frac{\partial \theta(z,t)}{\partial t} = a_0^2 \cdot \frac{\partial^2 \theta(z,t)}{\partial z^2}, \quad (4.6)$$

$$\theta(z,t)|_{t=0} = 0, \quad (4.7)$$

$$\frac{\partial \theta(z,t)}{\partial z} \Big|_{z=H} = \bar{q}_n(t), \quad (4.8)$$

$$\frac{\partial \theta(z,t)}{\partial z} \Big|_{z=0} = 0, \quad (4.9)$$

$$\text{де} \quad \bar{q}_n = \frac{\nu+1}{\lambda_0} \cdot q_n(t), \quad a_0^2 = \frac{\lambda_0}{C_{V_0}}. \quad (4.10)$$

Для розв'язання системи рівнянь (4.6) – (4.10) використовуємо стандартне косинус-перетворення Фур'є [23, 86, 135] та, у підсумку, отримуємо для функції $\theta(z,t)$ наступний вираз:

$$\theta(z,t) = \frac{a_0^2}{H} \cdot \int_0^t \bar{q}_n(\tau) d\tau + \frac{2 \cdot a_0^2}{H} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \cdot \cos \frac{\pi \cdot n \cdot z}{H} \cdot \left(\int_0^t \bar{q}_n(\tau) \cdot e^{-\left(\frac{\pi \cdot a_0 \cdot n}{H}\right)^2 \cdot (t-\tau)} d\tau \right). \quad (4.11)$$

Оскільки виконується умова $\bar{q}_n(t) = const$, вираз (4.11) спрощується:

$$\theta(z,t) = \bar{q}_n \cdot \left[\frac{a_0^2 \cdot t}{H} + 2H \cdot \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \cdot \frac{\cos \frac{\pi \cdot n \cdot z}{H}}{\pi^2 \cdot n^2} + 2H \cdot \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1} \cdot \frac{\cos \frac{\pi \cdot n \cdot z}{H}}{\pi^2 \cdot n^2} \cdot e^{-\left(\frac{\pi \cdot a_0 \cdot n}{H}\right)^2 \cdot t} \right]. \quad (4.12)$$

Враховуючи (4.5) та $\bar{q}_n = \frac{\nu+1}{\lambda_0} \cdot q_{n0}$ ($q_{n0} = const$), остаточно, отримуємо

$$T(z,t) = \left\{ T_0^{\nu+1} + \frac{(\nu+1) \cdot \bar{q}_n}{\lambda_0} \cdot \left[\frac{a_0^2 \cdot t}{H} + \frac{3z^2 - H^2}{6H} + \frac{2H}{\pi^2} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1} \cdot \frac{\cos \frac{\pi \cdot n \cdot z}{H}}{n^2} \cdot e^{-\left(\frac{\pi \cdot a_0 \cdot n}{H}\right)^2 \cdot t} \right] \right\}^{\frac{1}{\nu+1}}. \quad (4.13)$$

Визначення термопружних напружень у поверхневих шарах пластин.
Нестаціонарне температурне поле в пластині товщиною H : $T(z,t)$, де $z \in [0, H]$, тобто температурне поле в пластині змінюється лише по її товщині. При цьому, як показано у роботах [71, 137, 139, 177], для необмеженої, вільної від поверхневих сил пластини з вільними від закріплення кінцями, компоненти тензора напружень мають вигляд:

$$\sigma_{zy} = \sigma_{zz} = \sigma_{xy} = \sigma_{xz} = 0, \quad \sigma_{yy} = \sigma_{xx} = \sigma(z,t) = \frac{\alpha_T \cdot E}{1-\nu} \cdot \left(-T(z,t) + \frac{2}{H^2} \cdot (2H-3z) \cdot \int_0^H T(z,t) dz - \frac{6}{H^3} \cdot (H-2z) \cdot \int_0^H z \cdot T(z,t) dz \right), \quad (4.14)$$

Прямокутний елемент. Розглядаються прямокутні елементи малої товщини, тобто враховуються умови теплообміну на нижньому боці ($z = H$) його поверхні, які збігаються з умовами адіабатичності (рис. 4.2).

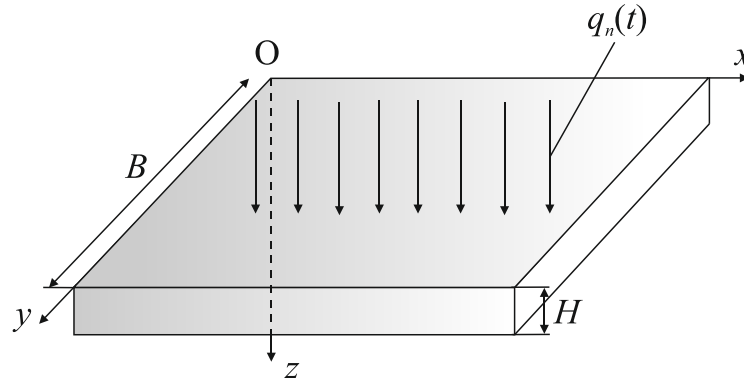


Рис. 4.2. Схема нагріву протяжного оптичного прямокутного елемента при зовнішньому тепловому впливі: B , H , L – ширина, товщина та довжина елемента, м; $B \sim L > H$; $q_n(t)$ – зовнішній тепловий потік, Вт/м².

Рівняння математичної моделі процесу нагріву зазначеного елемента мають вигляд [23, 122, 135, 139]:

$$C_V(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\lambda(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\lambda(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \right],$$

$$-\infty < x, y < +\infty, \quad 0 < z < H, \quad (4.15)$$

$$T|_{t=0} = T_0, \quad (4.16)$$

$$-\lambda(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0} = q_n(t), \quad (4.17)$$

$$\lambda(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=H} = 0, \quad (4.18)$$

$$T \rightarrow T_0, \quad \frac{\partial T}{\partial x}, \frac{\partial T}{\partial y} \rightarrow 0 \quad \text{при} \quad x \rightarrow \pm\infty, \quad y \rightarrow \pm\infty. \quad (4.19)$$

З огляду на залежності $C_V(T)$ і $\lambda(T)$ та заміну змінних (4.5), одержуємо

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = a_0^2 \cdot \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \right), \quad (4.20)$$

$$\theta|_{t=0} = 0, \quad (4.21)$$

$$-\frac{\partial \theta}{\partial z}\bigg|_{z=0} = \bar{q}_n(t), \quad (4.22)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial z}\bigg|_{z=H} = 0, \quad (4.23)$$

$$\theta \rightarrow 0, \quad \frac{\partial \theta}{\partial x}, \frac{\partial \theta}{\partial y} \rightarrow 0 \quad \text{при} \quad x \rightarrow \pm\infty, y \rightarrow \pm\infty. \quad (4.24)$$

Розв'язуючи задачу (4.20) – (4.24) за допомогою інтегральних перетворень Фур'є (по координатах x та y) і методу поділу змінних (по координаті z) [135, 139, 177], а також з врахуванням $q_n(t) = q_{n0} = const$, одержуємо:

$$T(x, y, z, t) = \left\{ T_0^{\nu+1} + \frac{(v+1) \cdot q_{n0}}{8 \cdot \pi^{\frac{3}{2}} \cdot a_0 \cdot \lambda_0} \cdot \int_0^t \left[\frac{1}{2} + \sum_{n=0}^{\infty} \cos\left(\frac{\pi \cdot n \cdot z}{H}\right) \cdot e^{-\left(\frac{\pi \cdot n \cdot a_0}{H}\right)^2 \cdot (t-\tau)} \right] \frac{1}{(t-\tau)^{\frac{3}{2}}} \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\frac{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2}{4a_0^2 \cdot (t-\tau)}} d\xi d\eta \right\}^{\frac{1}{\nu+1}}. \quad (4.25)$$

Визначення термопружних напружень в зонах максимальних зовнішніх термовпливів на прямокутні елементи. В точному приладобудуванні, наприклад, в якості підкладок оптичних інтегральних схем (ОІС), світлорозсіювальних екранів тощо, широко використовуються достатньо протяжні оптичні прямокутні елементи [39, 62, 225, 226], розміри яких значно перевищують (більш, ніж на порядок) інші оптичні елементи (наприклад, лінзи, растри, волоконно-оптичні кабелі тощо). При цьому вказані оптичні елементи при їх експлуатації часто піддаються нерівномірним зовнішнім термовпливам з утворенням так званих “небезпечних” ділянок, в яких тепловий потік q_n та температура T досягають своїх найбільших значень: $(q_n)_{max}$; $T_{max}(z, t) = T(x_{max}, y_{max}, z, t)$, де x_{max} , y_{max} – координати вказаних ділянок.

Це дозволяє відразу для всієї поверхні елемента оцінювати критичні значення параметрів зовнішніх термовпливів (величин $(q_n)_{max}^*$ та t_{max}^*), перевищення яких призводить до виникнення у вказаних ділянках на поверхні елемента гранично допустимих термопружних напружень $\sigma^*(T)$, що зумовлюють локальні руйнування його поверхневих шарів.

У випадку, що розглядається, виникнення термопружних напружень пов'язано з градієнтом температури по товщині елемента (уздовж Oz), а їх величина $\sigma_m(z, t)$ має вигляд [23, 58, 122]:

$$\sigma_m(z, t) = \frac{\alpha_V \cdot E}{1 - \nu} \cdot \left(-T_{max}(z, t) + \frac{2}{H^2} \cdot (2H - 3z) \cdot \int_0^H T_{max}(z, t) dz - \frac{6}{H^3} \cdot (H - 2z) \cdot \int_0^H z \cdot T_{max}(z, t) dz \right), \quad (4.26)$$

Температурні профілі $T_{max}(z, t)$ знаходяться з виразу (4.25) при $x = x_{max}$, $y = y_{max}$ (для спрощення виразів для $T_{max}(z, t)$ приймається $x_{max} = 0$, $y_{max} = 0$) та $q_{n0} = (q_{n0})_{max}$:

прямокутний елемент малої товщини

$$T_{max}(z, t) = \left\{ T_0^{\nu+1} + \frac{(\nu+1) \cdot a_0 \cdot (q_{n0})_{max}}{2 \cdot \sqrt{\pi} \cdot \lambda_0} \cdot \int_0^t \left[\frac{1}{2} + \sum_{n=0}^{\infty} \cos\left(\frac{\pi \cdot n \cdot z}{H}\right) \cdot e^{-\left(\frac{\pi \cdot n \cdot a_0}{H}\right)^2 \cdot (t-\tau)} \right] \cdot \frac{1}{\sqrt{t-\tau}} \cdot d\tau \right\}^{\frac{1}{\nu+1}}. \quad (4.27)$$

Суцільний циліндричний елемент. Розглядаються суцільні протяжні циліндричні елементи радіуса R ($R \ll D$ – довжина циліндричного елемента) з оптичних матеріалів (рис. 4.3). Цей елемент можна розглядати як необмежений циліндр, бокова поверхня якого нагрівається тепловим потоком $q_n(t)$.

Вважається, що здійснюється рівномірний нагрів поверхні елемента, тоді $\frac{\partial T}{\partial \varphi} = \frac{\partial T}{\partial z} \approx 0$. При цьому тепловіддача за рахунок конвекції та радіації не враховується.

Рівняння математичної моделі розповсюдження тепла у необмеженому циліндричному елементі мають вигляд [86, 122, 135]:

$$C_V(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial r} \left[\lambda(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \right] + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} [\lambda(T) \cdot T], \quad t > 0, \quad 0 < r < R, \quad (4.28)$$

$$T|_{t=0} = T_0, \quad (4.29)$$

$$\lambda(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=R} = q_n(t), \quad (4.30)$$

$$\frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0, \quad T|_{r=0} \neq \infty, \quad (4.31)$$

де $T(r, t)$ – поточна температура в залежності від радіуса та часу.

З врахуванням $C_V(T)$ та $\lambda(T)$ отримуємо

$$\frac{\partial \tilde{\theta}}{\partial t} = a_0^2 \cdot \left(\frac{\partial^2 \tilde{\theta}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \tilde{\theta}}{\partial r} \right), \quad (4.32)$$

$$\tilde{\theta} \Big|_{t=0} = 0, \quad (4.33)$$

$$\frac{\partial \tilde{\theta}}{\partial r} \Big|_{r=R} = \tilde{q}_n(t), \quad (4.34)$$

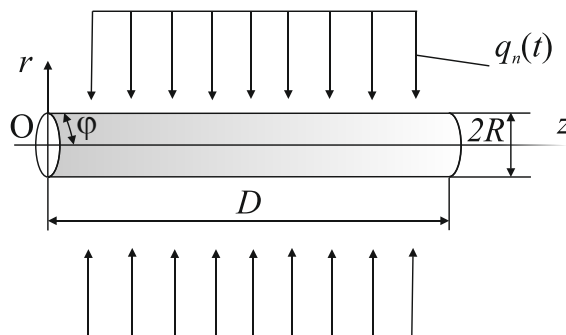


Рис. 4.3. Схема нагріву циліндричного елемента при зовнішньому тепловому впливі: R , D – радіус та довжина елемента, м; $q_n(t)$ – поверхнева густина теплового впливу, Вт/м²; r , z , φ – циліндричні координати.

$$\left. \frac{\partial \tilde{\theta}}{\partial r} \right|_{r=0} = 0, \quad \tilde{\theta}|_{r=0} \neq \infty, \quad (4.35)$$

де
$$\tilde{\theta} = T^{\nu+1} - T_0^{\nu+1}, \quad (4.36)$$

$$\tilde{q}_n(t) = \frac{q_n(t) \cdot (\nu+1)}{\lambda_0}. \quad (4.37)$$

З використанням відомих вище методів інтегральних перетворень (перетворення Лапласа по змінній r [122, 135]) та з врахуванням співвідношення $q_n(t) = q_{n0} = const$, отримуємо розв'язок системи (4.32) – (4.35) у вигляді:

$$\begin{aligned} \tilde{\theta}(r,t) = q_{n0} \cdot R \cdot & \left[\frac{2a_0^2 \cdot t}{R^2} - \frac{1}{4} \cdot \left(1 - 2 \cdot \frac{r^2}{R^2} \right) - \right. \\ & \left. - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 \cdot I_0\left(\mu_n \cdot \frac{r}{R}\right)}{\mu_n^2 \cdot I_0(\mu_n)} \cdot e^{-\left(\frac{\mu_n \cdot a_0}{R}\right)^2 \cdot t} \right], \quad (4.38) \end{aligned}$$

де μ_n – корні характеристичного рівняння $I_1(\mu) = 0$; I_0, I_1 – функції Беселя відповідно нульового та першого порядку [122, 135].

З врахуванням (4.36) та (4.37) отримуємо:

$$\begin{aligned} T(r,t) = & \left\{ T_0^{\nu+1} + \frac{(\nu+1) \cdot p_0 \cdot R}{\lambda_0} \cdot \right. \\ & \left. \cdot \left[\frac{2a_0^2 \cdot t}{R^2} - \frac{1}{4} \cdot \left(1 - 2 \cdot \frac{r^2}{R^2} \right) - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 \cdot I_0\left(\mu_n \cdot \frac{r}{R}\right)}{\mu_n^2 \cdot I_0(\mu_n)} \cdot e^{-\left(\frac{\mu_n \cdot a_0}{R}\right)^2 \cdot t} \right] \right\}^{\frac{1}{\nu+1}}, \quad (4.39) \end{aligned}$$

Ряд у виразу (4.39) достатньо швидко сходиться, тому для практичних розрахунків обмежуються декількома членами ряду (звичайно у межах 5 або 6).

Для проведення розрахунків функції Беселя $I_0(\mu_n), I_0\left(\mu_n \cdot \frac{r}{R}\right)$ з високим

ступенем точності (відносна похибка не перевищує 10^{-5} %) апроксимуються поліномами [122, 135].

Циліндричні оболонки. Розглядаються протяжні циліндричні оболонки радіусів R_1 , R_2 (R_1 , $R_2 \ll D$ – довжина оболонки) з оптичних матеріалів (рис. 4.4). Таку оболонку можна розглядати як обмежене циліндричне середовище, верхня поверхня якої нагрівається тепловим потоком, а на нижній поверхні здійснюється теплообмін, відповідний умовам адіабатичності (невисокі температури, навколишнє середовище з низьким коефіцієнтом теплопровідності). Приймається, що тепловий потік рівномірно розподілений вздовж поверхні циліндра, тобто $\frac{\partial T}{\partial \varphi} = \frac{\partial T}{\partial z} = 0$, а тепловіддача за рахунок конвекції та радіації не враховується.

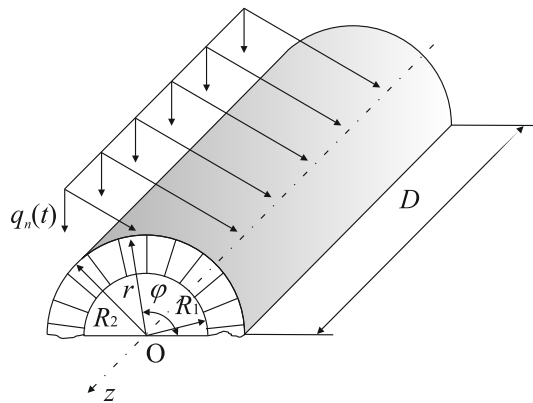


Рис. 4.4. Схема нагріву циліндричної оболонки при зовнішньому тепловому впливі: R_1 , R_2 , D – радіуси та довжина оболонки, м; $q_n(t)$ – поверхнева густина теплового впливу, Вт/м²; r , z , φ – циліндричні координати.

Рівняння математичної моделі розповсюдження тепла у необмеженій циліндричній оболонці мають вигляд [23, 58, 122, 135]:

$$C_V(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial r} \left[\lambda(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \right] + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} [\lambda(T) \cdot T], \quad t > 0, \quad R_1 < r < R_2, \quad (4.40)$$

$$T|_{t=0} = T_0, \quad (4.41)$$

$$\lambda(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=R_2} = q_n(t), \quad (4.42)$$

$$\lambda(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=R_1} = 0, \quad (4.43)$$

де $T(r, t)$ – поточна температура оболонки.

Враховуючи $C_V(T)$ та $\lambda(T)$ отримуємо

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = a_0^2 \cdot \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \theta}{\partial r} \right), \quad (4.44)$$

$$\theta|_{t=0} = 0, \quad (4.45)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial r} \Big|_{r=R_2} = \bar{q}_n(t), \quad (4.46)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial r} \Big|_{r=R_1} = 0, \quad (4.47)$$

$$\theta = T^{\nu+1} - T_0^{\nu+1}, \quad \bar{q}_n(t) = \frac{q_n(t) \cdot (\nu+1)}{\lambda_0}. \quad (4.48)$$

Використовуючи кінцеве інтегральне перетворення Ханкеля [23, 135] та враховуючи $q_n(t) = q_{n0} = const$, отримуємо розв'язок системи (4.44)

– (4.48) у вигляді:

$$\begin{aligned} \theta(r, t) = q_{n0} \cdot R_2 \cdot \left\{ \frac{R_2^2}{R_2^2 - R_1^2} \cdot \left[\frac{2a_0^2 \cdot t}{R_2} - \frac{1}{4} \cdot \left(1 - \frac{r^2}{R_2^2} \right) - \right. \right. \\ \left. \left. - \frac{R_1^2}{R_2^2} \cdot \left(\ln \frac{r}{R_1} + \frac{R_2^2}{R_2^2 - R_1^2} \cdot \ln \frac{R_1}{R_2} + \frac{3}{4} \right) \right] + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\pi}{\mu_n} \cdot \frac{I_1 \left(\mu_n \cdot \frac{R_1}{R_2} \right) \cdot I_1(\mu_n)}{I_1^2 \left(\mu_n \cdot \frac{R_1}{R_2} \right) - I_1^2(\mu_n)} \cdot \right. \\ \left. \cdot \left[I_0 \left(\mu_n \cdot \frac{r}{R_2} \right) \cdot Y_1 \left(\mu_n \cdot \frac{R_1}{R_2} \right) - Y_0 \left(\mu_n \cdot \frac{r}{R_2} \right) \cdot I_1 \left(\mu_n \cdot \frac{R_1}{R_2} \right) \right] \cdot e^{-\left(\frac{\mu_n \cdot a_0}{R_2} \right)^2 \cdot t} \right\}, \quad (4.49) \end{aligned}$$

де μ_n – корні характеристичного рівняння [122]:

$$I_1\left(\mu \cdot \frac{R_1}{R_2}\right) \cdot Y_1(\mu) = Y_1\left(\mu \cdot \frac{R_1}{R_2}\right) \cdot I_1(\mu), \quad (4.50)$$

де I_0, I_1, Y_0, Y_1 – функції Беселя [58, 135].

З врахуванням (4.48), остаточно, отримуємо наступний вираз для $T(r, t)$:

$$T(r, t) = \left\{ T_0^{\nu+1} + \frac{q_{n0} \cdot (\nu + 1) \cdot R_2}{\lambda_0} \cdot \left[\frac{R_2^2}{R_2^2 - R_1^2} \cdot \left(\frac{2a_0^2 \cdot t}{R_2^2} - \frac{1}{4} \cdot \left(1 - \frac{r^2}{R_2^2} \right) - \frac{R_1^2}{R_2^2} \cdot \left(\ln \frac{r}{R_1} + \frac{R_2^2}{R_2^2 - R_1^2} \cdot \ln \frac{R_1}{R_2} + \frac{3}{4} \right) \right) \right] + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\pi}{\mu_n} \cdot \frac{I_1\left(\mu_n \cdot \frac{R_1}{R_2}\right) \cdot I_1(\mu_n)}{I_1^2\left(\mu_n \cdot \frac{R_1}{R_2}\right) - I_1^2(\mu_n)} \cdot \left(I_0\left(\mu_n \cdot \frac{r}{R_2}\right) \cdot Y_1\left(\mu_n \cdot \frac{R_1}{R_2}\right) - Y_0\left(\mu_n \cdot \frac{r}{R_2}\right) \cdot I_1\left(\mu_n \cdot \frac{R_1}{R_2}\right) \right) \cdot e^{-\left(\frac{\mu_n \cdot a_0}{R_2}\right)^2 \cdot t} \right\}^{\frac{1}{\nu+1}}. \quad (4.51)$$

Як показали попередні розрахунки [122], ряд у виразі (4.51) швидко сходиться по μ_n . Тому у розрахунках з прийнятною для практики точністю можна обмежитися 4...5 членами ряду (4...5 коренями рівняння (4.50)).

Для проведення розрахунків функції Беселя $I_1(\mu_n)$, $I_1\left(\mu_n \cdot \frac{R_1}{R_2}\right)$, $Y_0\left(\mu_n \cdot \frac{r}{R_2}\right)$, $Y_1\left(\mu_n \cdot \frac{R_1}{R_2}\right)$ з високим ступенем точності (відносна похибка не перевищує 10^{-5} %) апроксимуються поліномами [58, 139].

Визначення термопружних напружень у поверхневих шарах циліндричних елементів. Розглянемо випадок вісесиметричного температурного поля $T(r, t)$ (наприклад, рівномірний тепловий вплив на бокову поверхню циліндричного елемента, який часто зустрічається на практиці [39, 62]); при цьому термонапружений стан елемента також буде вісесиметричним, тобто усі похідні по φ у системі рівнянь термопружності дорівнюють нулю. Крім того, за рахунок симетрії переміщення $u_\varphi = 0$. Тоді для вільного від зусиль на кінцях

порожнистого циліндра (див. рис. 4.4) температурне переміщення u_z лінійно залежить від z та виражається наступною формулою [71, 137]:

$$u_z = \frac{2\alpha_T \cdot z}{R_2^2 - R_1^2} \cdot \int_{R_1}^{R_2} r \cdot T dr \quad (4.52)$$

та від радіуса r не залежить, оскільки перетини, перпендикулярні вісі Oz залишаються плоскими.

Для визначення переміщення u_r з системи рівнянь термопружності [139, 177] маємо тільки одне рівняння:

$$\frac{d}{dr} \left(\frac{1}{r} \cdot \frac{d(r \cdot u_r)}{dr} \right) - \alpha_T \cdot \frac{1+\nu}{1-\nu} \cdot \frac{\partial T}{\partial r} = 0. \quad (4.53)$$

Розв'язуючи рівняння (4.53), знаходимо компоненти напружень:

$$\begin{aligned} \sigma_{r\varphi} = \sigma_{\varphi z} = \sigma_{zr} &= 0, \\ \sigma_{rr} &= \frac{\alpha_T \cdot E}{1-\nu} \cdot \left(\frac{r^2 - R_1^2}{(R_2^2 - R_1^2) \cdot r^2} \cdot \int_{R_1}^{R_2} r \cdot T dr - \frac{1}{r^2} \cdot \int_{R_1}^r r \cdot T dr \right), \\ \sigma_{\varphi\varphi} &= \frac{\alpha_T \cdot E}{1-\nu} \cdot \left(-T + \frac{r^2 + R_1^2}{(R_2^2 - R_1^2) \cdot r^2} \cdot \int_{R_1}^{R_2} r \cdot T dr + \frac{1}{r^2} \cdot \int_{R_1}^r r \cdot T dr \right), \\ \sigma_{zz} &= \frac{\alpha_T \cdot E}{1-\nu} \cdot \left(-T + \frac{2}{R_2^2 - R_1^2} \cdot \int_{R_1}^{R_2} r \cdot T dr \right). \end{aligned} \quad (4.54)$$

Вважаючи $R_1 = 0$ у (4.54), отримуємо вирази для напружень у довгому суцільному циліндрі.

Півсферичний елемент. Розглядаються суцільні півсферичні елементи з радіусом R_w з оптичних матеріалів (рис. 4.5), зовнішня поверхня яких нагрівається тепловим потоком $q_n(t)$. Розглядається тепловий потік, який рівномірно розподілений по зовнішній поверхні елемента ($\frac{\partial T}{\partial \varphi} = \frac{\partial T}{\partial \theta} = 0$).

В цьому випадку ми маємо симетричне відносно центра елемента температурне поле $T(r, t)$; при цьому вважається, що конвективні та радіаційні тепловтрати знехтувано малі.

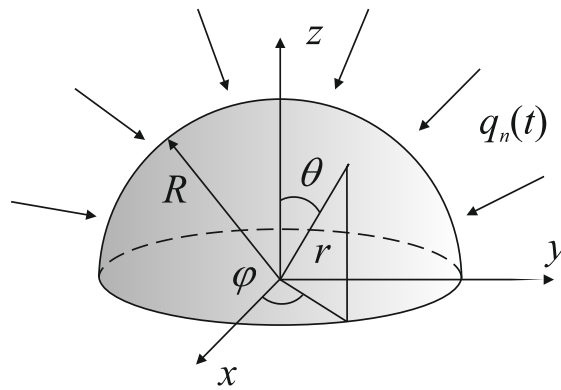


Рис. 4.5. Схема нагріву півсферичного елемента при зовнішньому тепловому впливі: R_w – радіус елемента, м; $q_n(t)$ – поверхнева густина теплового впливу, Вт/м²; r , θ , φ – сферичні координати.

Рівняння математичної моделі розповсюдження тепла у півсферичному елементі мають вигляд [23, 122, 135]:

$$C_V(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left[r^2 \cdot \lambda(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \right], \quad t > 0, \quad 0 < r < R_w, \quad (4.55)$$

$$T|_{t=0} = T_0, \quad (4.56)$$

$$\lambda(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=R_w} = q_n(t), \quad (4.57)$$

$$\frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0, \quad T|_{r=0} \neq \infty. \quad (4.58)$$

Використовуючи метод розділення змінних (метод Фур'є [135]) та враховуючи $q_n(t) = q_{n0} = \text{const}$, отримуємо:

$$T(r, t) = \left\{ T_0^{\nu+1} + \frac{(\nu+1) \cdot q_{n0} \cdot R}{\lambda_0} \cdot \left[\frac{3a_0^2 \cdot t}{10R^2} - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 \cdot R \cdot \sin\left(\mu_n \cdot \frac{r}{R}\right)}{\mu_n^3 \cdot \cos(\mu_n) \cdot R} \cdot e^{-\left(\frac{\mu_n \cdot a_0}{R}\right)^2 \cdot t} \right]^{\frac{1}{\nu+1}} \right\}, \quad (4.59)$$

де μ_n є коренем характеристичного рівняння:

$$\mu = \text{tg} \mu. \quad (4.60)$$

Наприклад, перші шість коренів рівняння (4.60) [23]: $\mu_1 = 0$; $\mu_2 = 4,4934$; $\mu_3 = 7,7253$; $\mu_4 = 10,9041$; $\mu_5 = 14,0662$; $\mu_6 = 17,2208$.

Визначення термопружних напружень у поверхневих шарах півсферичних елементів. Для одомірного температурного поля $T(r, t)$ у порожнистому елементі з внутрішнім R_1 та зовнішнім R_2 радіусами її термопружний стан не залежить від кутів θ і φ , компоненти вектору переміщення $u_\theta = u_\varphi = 0$ (рівномірний зовнішній вплив). В цьому випадку система рівнянь термопружності [71, 137] перетворюється у одне рівняння

$$\frac{d}{dr} \left(\frac{1}{r^2} \cdot \frac{d(r^2 \cdot u_r)}{dr} \right) = \alpha_T \cdot \frac{1+\nu}{1-\nu} \cdot \frac{dT}{dr}. \quad (4.61)$$

Розв'язуючи рівняння (4.61) для компонентів тензора напружень отримуємо наступні вирази:

$$\sigma_{r\theta} = \sigma_{r\varphi} = \sigma_{\theta\varphi} = 0,$$

$$\sigma_{rr} = \frac{2\alpha_T \cdot E}{(1-\nu) \cdot r^3} \cdot \left(\frac{r^3 - R_1^3}{R_2^3 - R_1^3} \cdot \int_{R_1}^{R_2} r^2 \cdot T dr - \int_{R_1}^r r^2 \cdot T dr \right), \quad (4.62)$$

$$\sigma_{\theta\theta} = \sigma_{\varphi\varphi} = \frac{\alpha_T \cdot E}{1-\nu} \cdot \left(-T + \frac{2r^3 + R_1^3}{(R_2^3 - R_1^3) \cdot r^3} \cdot \int_{R_1}^{R_2} r^2 \cdot T dr + \frac{1}{r^3} \cdot \int_{R_1}^r r^2 \cdot T dr \right). \quad (4.63)$$

Вважаючи $R_1 = 0$ у (4.63), отримуємо вирази для розрахунку напружень та переміщень у суцільному елементі.

4.1.1. Визначення критичних значень зовнішніх теплових потоків та часу їх впливу, що призводять до руйнування оптичних елементів

Отримані формули (4.13), (4.14), (4.26), (4.27), (4.39), (4.51), (4.54), (4.59), (4.60), (4.62), (4.63) дозволяють проводити розрахунки розподілів температур та термопружних напружень у поверхневих шарах широкого класу оптичних елементів різної геометричної форми та розмірів в залежності від основних параметрів зовнішніх термовпливів (величини теплового потоку q_n та часу його впливу t), а також визначати їх критичні значення.

Плоска пластина. В результаті проведених розрахунків (рис. 4.6 – 4.11) було встановлено, що по товщині плоскої пластини термічні напруження істотно нерівномірні: поблизу її поверхні мають місце стискаючі напруження ($\sigma < 0$, $|\sigma|_{max} = 4,8 \cdot 10^7 \dots 5,3 \cdot 10^7$ Н/м² – для оптичного скла та $|\sigma|_{max} = 1,7 \cdot 10^8 \dots 2,4 \cdot 10^8$ Н/м² – для оптичних керамік), а на нижньому боці напруження розтягу ($\sigma > 0$, $|\sigma|_{max} = 1,2 \cdot 10^7 \dots 1,7 \cdot 10^7$ Н/м² – для оптичного скла та $|\sigma|_{max} = 0,7 \cdot 10^8 \dots 1,5 \cdot 10^8$ Н/м² – для оптичних керамік). При цьому ступінь впливу параметрів зовнішніх термодій наступний: збільшення часу теплового впливу від $t = 2$ с до $t = 14$ с призводить до зростання $|\sigma|_{max}$ у 1,8...4,2 рази – для оптичного скла та у 1,5...3,7 рази – для оптичних керамік.

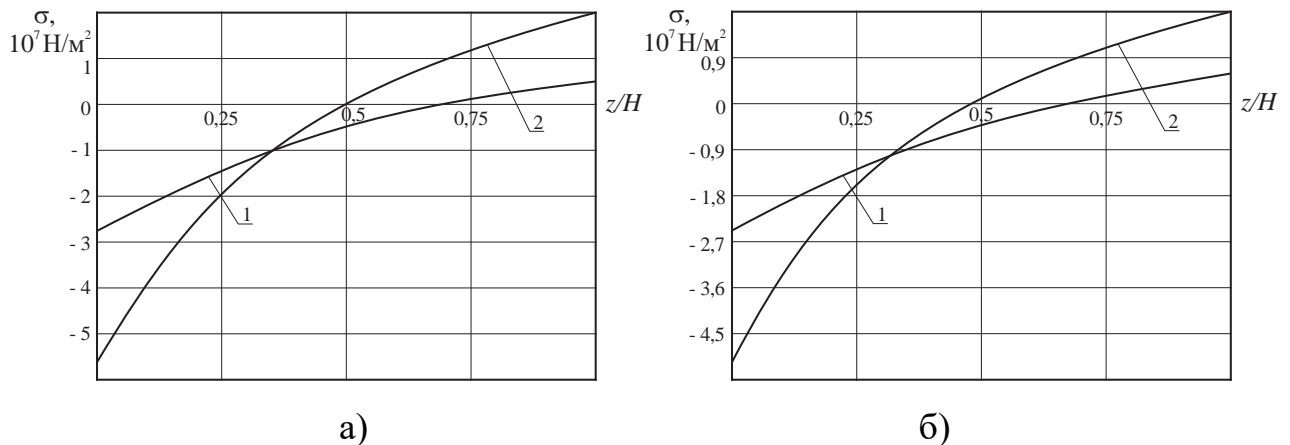


Рис. 4.6. Розподіл термічних напружень по товщині плоскої пластини з оптичного скла К8 (а) та ТФ10 (б) залежно від зовнішнього теплового потоку q_{n0} ($T_0 = 300$ К; $B = 0,01$ м; $H = 0,04$ м; $L = 0,1$ м; $t = 0,5$ с):
 1 – $q_{n0} = 1,5 \cdot 10^5$ Вт/м²; 2 – $q_{n0} = 2,3 \cdot 10^5$ Вт/м².

Прямокутний елемент. З результатів проведених розрахунків (рис. 4.12 – 4.14) випливає, що по поблизу верхнього боку прямокутного елемента мають місце стискаючі напруження ($\sigma_m < 0$, $|\sigma_m|_{max} = 3,8 \cdot 10^7 \dots 4,2 \cdot 10^7$ Н/м² – для оптичного скла К108 та $|\sigma_m|_{max} = 1,2 \cdot 10^8 \dots 1,7 \cdot 10^8$ Н/м² – для оптичної кераміки КОЗ), а на нижньому боці – напруження розтягу ($\sigma_m > 0$,

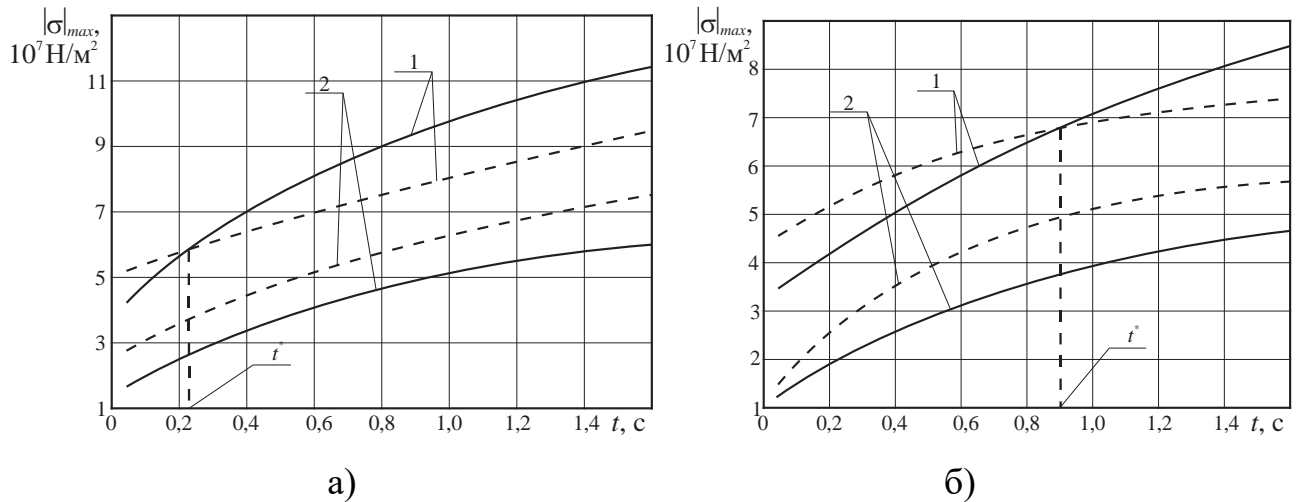


Рис. 4.7. Залежність модуля максимальних термопружних напружень $|\sigma|_{max}$ у плоскій пластині з оптичного скла К8 (а) та ТФ10 (б) від часу зовнішньої теплового впливу для різних значень зовнішнього теплового потоку ($T_0 = 300 \text{ К}$; $B = 0,01 \text{ м}$; $H = 0,04 \text{ м}$; $L = 0,1 \text{ м}$): 1 – $q_n = 2,3 \cdot 10^6 \text{ Вт/М}^2$; 2 – $q_n = 1,5 \cdot 10^5 \text{ Вт/М}^2$; t^* – критичний час дії, с; ————— – результати розрахунків; - - - - - – межа міцності оптичного матеріалу.

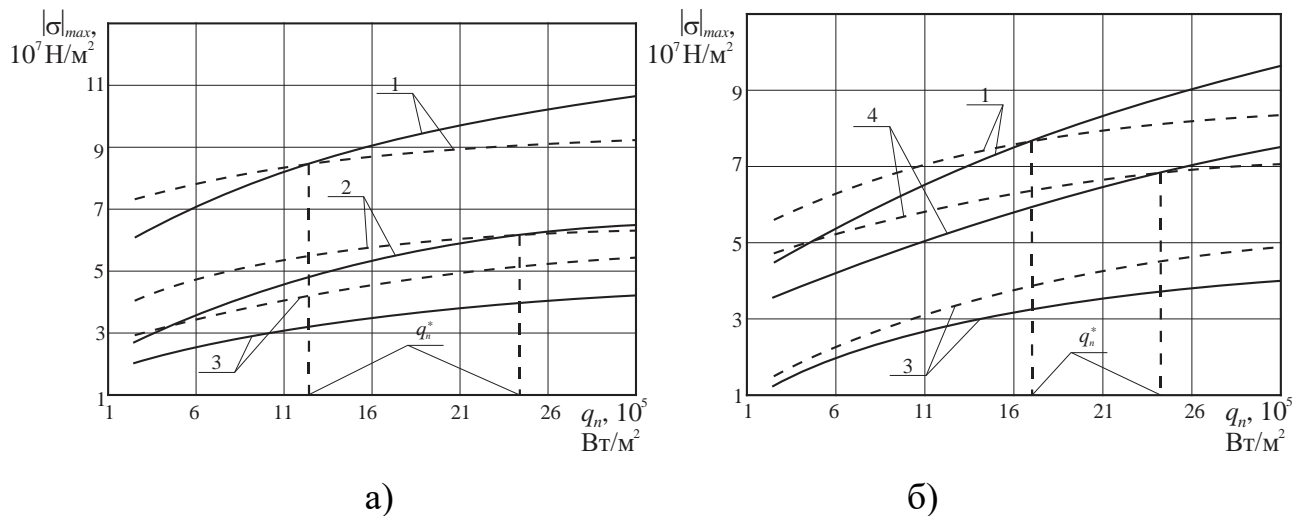


Рис. 4.8. Залежність модуля максимальних термопружних напружень $|\sigma|_{max}$ у плоскій пластині з оптичного скла К8 (а) та ТФ10 (б) від зовнішнього теплового потоку для різних часів його впливу ($T_0 = 300 \text{ К}$; $B = 0,01 \text{ м}$; $H = 0,04 \text{ м}$; $L = 0,1 \text{ м}$): 1 – $t = 1,4 \text{ с}$; 2 – $t = 0,2 \text{ с}$; 3 – $t = 0,85 \text{ с}$; 4 – $t = 0,1 \text{ с}$; q_n^* – критичні значення зовнішнього теплового потоку, Вт/М^2 ; ————— – результати розрахунків; - - - - - – межа міцності оптичного матеріалу.

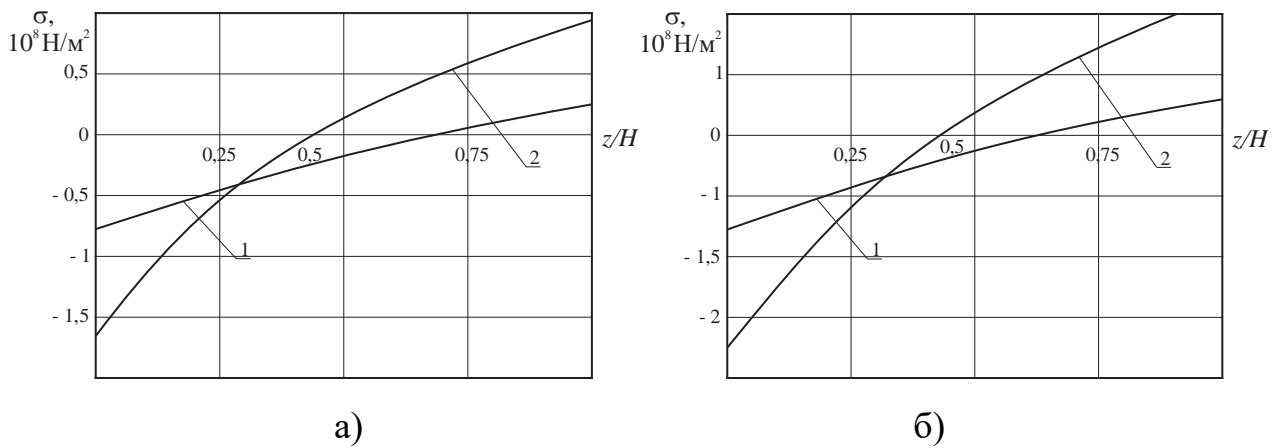


Рис. 4.9. Розподіл термічних напружень по товщині плоскої пластини з оптичних керамік КО2 (а) та КО5 (б) залежно від зовнішнього теплового потоку q_{n0} ($T_0 = 300$ К; $B = 0,01$ м, $H = 0,04$ м; $L = 0,1$ м; $t = 0,5$ с): 1 – $q_{n0} = 1,5 \cdot 10^5$ Вт/м²; 2 – $q_{n0} = 2,3 \cdot 10^5$ Вт/м².

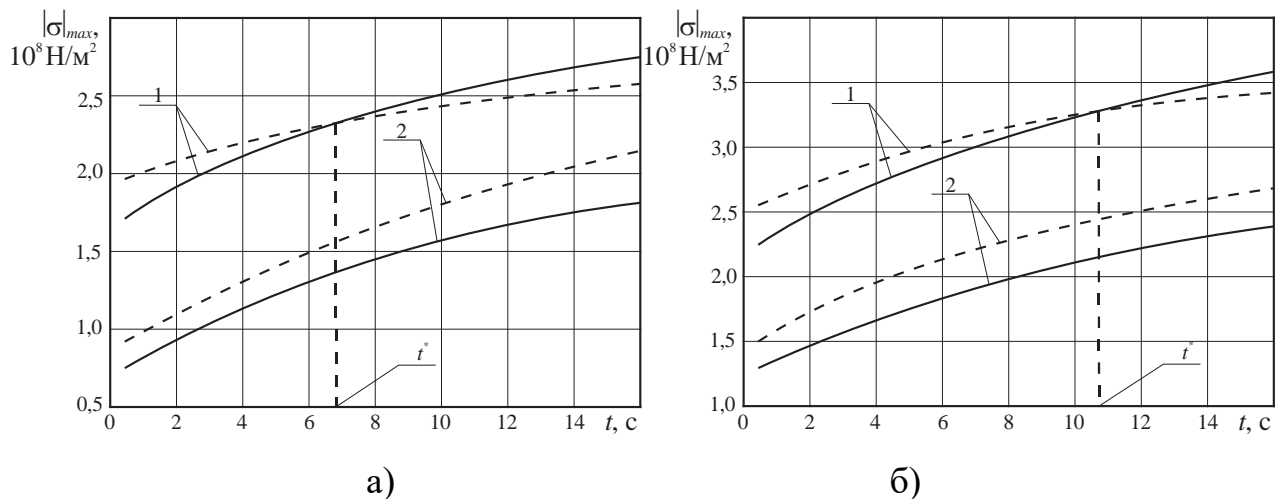


Рис. 4.10. Залежність модуля максимальних термопружних напружень $|\sigma|_{max}$ у плоскій пластині з оптичних керамік КО2 (а) та КО5 (б) від часу зовнішнього теплового впливу для різних значень зовнішнього теплового потоку ($T_0 = 300$ К; $B = 0,01$ м; $H = 0,04$ м; $L = 0,1$ м): 1 – $q_n = 2,3 \cdot 10^6$ Вт/м²; 2 – $q_n = 1,5 \cdot 10^5$ Вт/м²; t^* – критичний час впливу, с; ———— – результати розрахунків; - - - - - – межа міцності оптичного матеріалу.

$|\sigma_m|_{max} = 0,91 \cdot 10^7 \dots 1,4 \cdot 10^7$ Н/м² – для оптичного скла К108 та

$|\sigma_m|_{max} = 0,6 \cdot 10^8 \dots 1,2 \cdot 10^8$ Н/м² – для оптичної кераміки КО3).

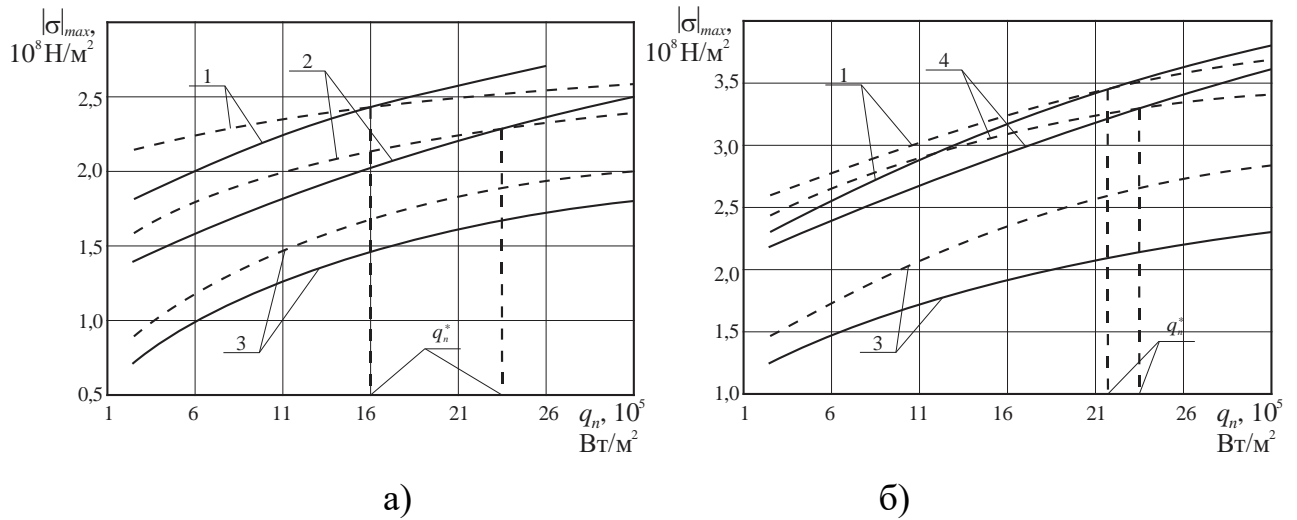


Рис. 4.11. Залежність модуля максимальних термопружних напружень $|\sigma|_{max}$ у плоскій пластині з оптичних керамік КО2 (а) та КО5 (б) від зовнішнього теплового потоку для різних часів його впливу ($T_0 = 300 \text{ К}$; $B = 0,01 \text{ м}$; $H = 0,04 \text{ м}$; $L = 0,1 \text{ м}$): 1 – $t = 14 \text{ с}$; 2 – $t = 7 \text{ с}$; 3 – $t = 0,5 \text{ с}$; 4 – $t = 11 \text{ с}$; q_n^* – критичні значення зовнішнього теплового потоку, Вт/М^2 ; ————— – результати розрахунків; - - - - - – межа міцності оптичного матеріалу.

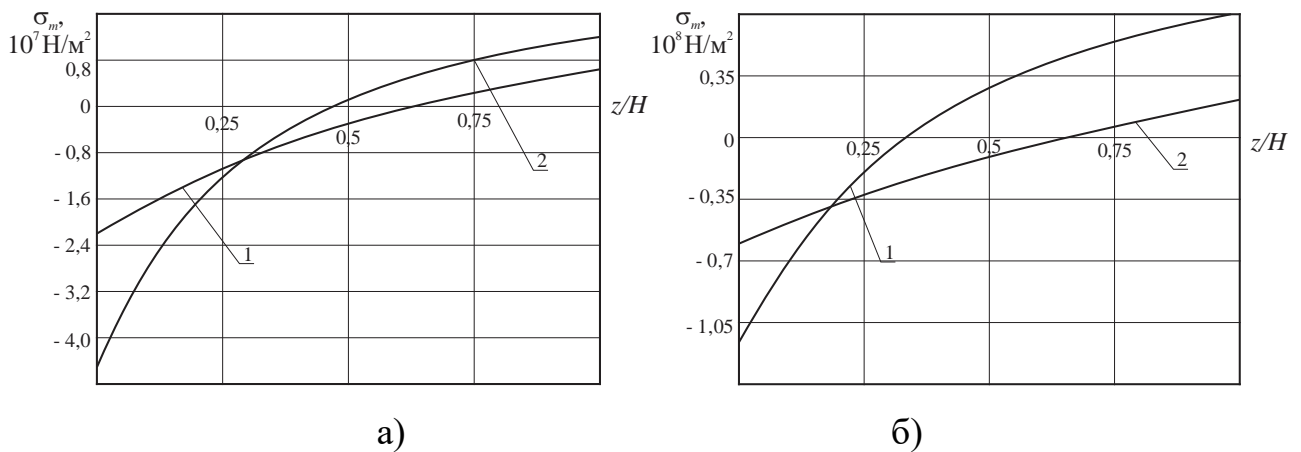


Рис. 4.12. Розподіл термічних напружень по товщині прямокутного елемента з оптичного скла БК10 (а) та кераміки КО1 (б) залежно від зовнішнього теплового потоку q_{n0} ($T_0 = 300 \text{ К}$; $B = 0,03 \text{ м}$; $H = 0,02 \text{ м}$; $L = 0,12 \text{ м}$; $t = 0,5 \text{ с}$): 1 – $q_{n0} = 1,5 \cdot 10^5 \text{ Вт/М}^2$; 2 – $q_{n0} = 2,3 \cdot 10^5 \text{ Вт/М}^2$.

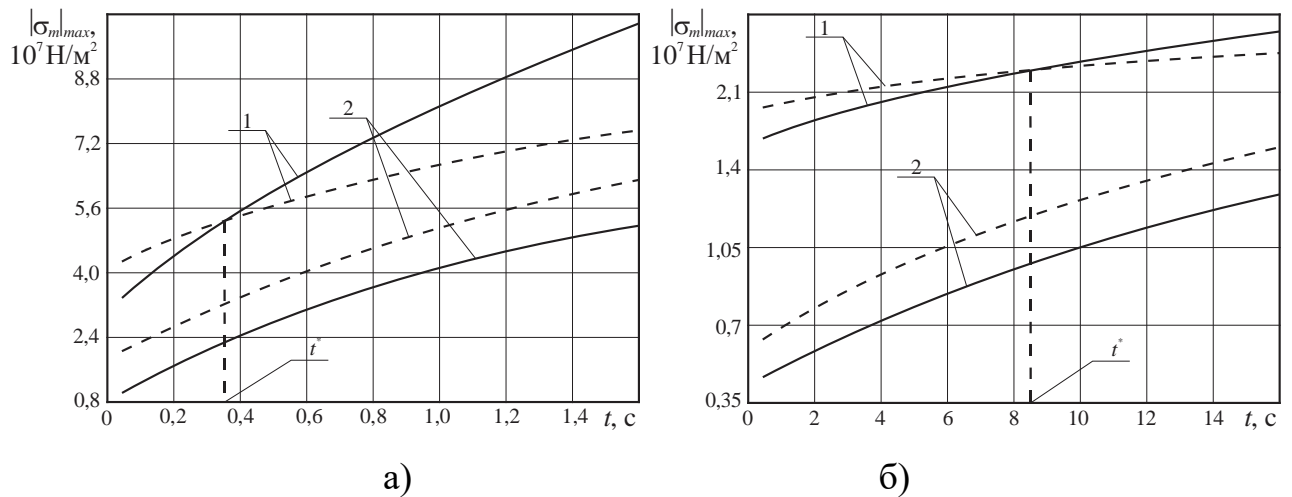


Рис. 4.13. Залежність модуля максимальних термопружних напружень $|\sigma_m|_{max}$ у прямокутному елементі з оптичного скла БК10 (а) та оптичної кераміки КО1 (б) від часу зовнішнього теплового впливу для різних значень зовнішнього теплового потоку ($T_0 = 300 \text{ К}$; $B = 0,01 \text{ м}$; $H = 0,04 \text{ м}$; $L = 0,1 \text{ м}$): 1 – $q_n = 2,3 \cdot 10^6 \text{ Вт/м}^2$; 2 – $q_n = 1,5 \cdot 10^5 \text{ Вт/м}^2$; t^* – критичний час впливу, с; ———— – результати розрахунків; - - - - - – межа міцності оптичного матеріалу.

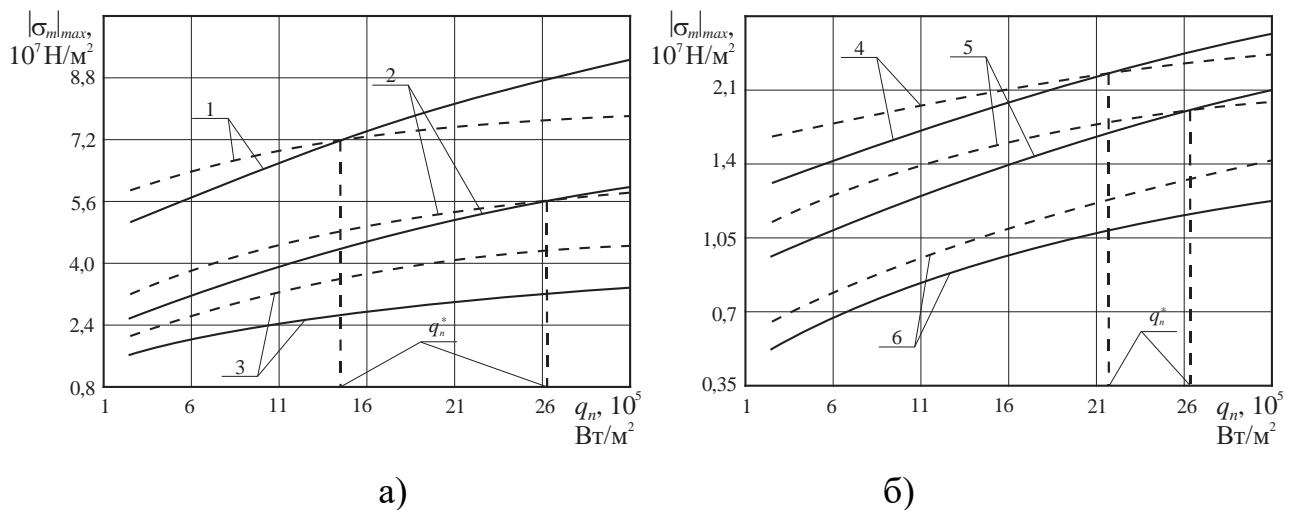


Рис. 4.14. Залежність модуля максимальних термопружних напружень $|\sigma_m|_{max}$ у прямокутному елементі з оптичного скла БК10 (а) та оптичної кераміки КО1 (б) від зовнішнього теплового потоку для різних часів його впливу ($T_0 = 300 \text{ К}$; $B = 0,07 \text{ м}$, $H = 0,06 \text{ м}$; $L = 0,015 \text{ м}$): 1 – $t = 1,4 \text{ с}$; 2 – $t = 0,35 \text{ с}$; 3 – $t = 0,1 \text{ с}$; 4 – $t = 0,1 \text{ с}$; 5 – $t = 8,3 \text{ с}$; 6 – $t = 0,5 \text{ с}$; q_n^* – критичні значення зовнішнього теплового потоку, Вт/м^2 ; ———— – результати розрахунків; - - - - - – межа міцності оптичного матеріалу.

При цьому ступінь впливу параметрів зовнішніх термовпливів наступний: збільшення часу теплової впливу від $t = 3$ с до $t = 15$ с призводить до зростання $|\sigma_m|_{max}$ у 1,9...4,3 рази – для оптичного скла К108 та у 1,6...3,8 рази – для оптичної кераміки КО3.

Циліндричний елемент. З результатів проведених розрахунків, представлених на рис. 4.15 – 4.17, випливає, що при зовнішньому нагріві елемента термічні напруження, за виключенням радіальних компонент, досягають найбільшого значення стискання з боку нагріву (при збільшенні зовнішнього теплового потоку q_{n0} від $1,5 \cdot 10^5$ Вт/м² до $2,3 \cdot 10^6$ Вт/м² значення $|\sigma_{\varphi\varphi}|_{max}$ та $|\sigma_{zz}|_{max}$ зростають у 1,3...1,5 рази для оптичного скла К8, а для оптичної кераміки КО2 – у 1,7...2,3 рази). При цьому збільшення часу зовнішнього теплового впливу t від 0,2 с до 1,4 с (для оптичного скла К8) та від 2 с до 14 с (для оптичної кераміки КО2) призводить до зростання величин $|\sigma_{\varphi\varphi}|_{max}$ та $|\sigma_{zz}|_{max}$ відповідно у 1,8...2,1 рази та у 1,4...1,7 рази.

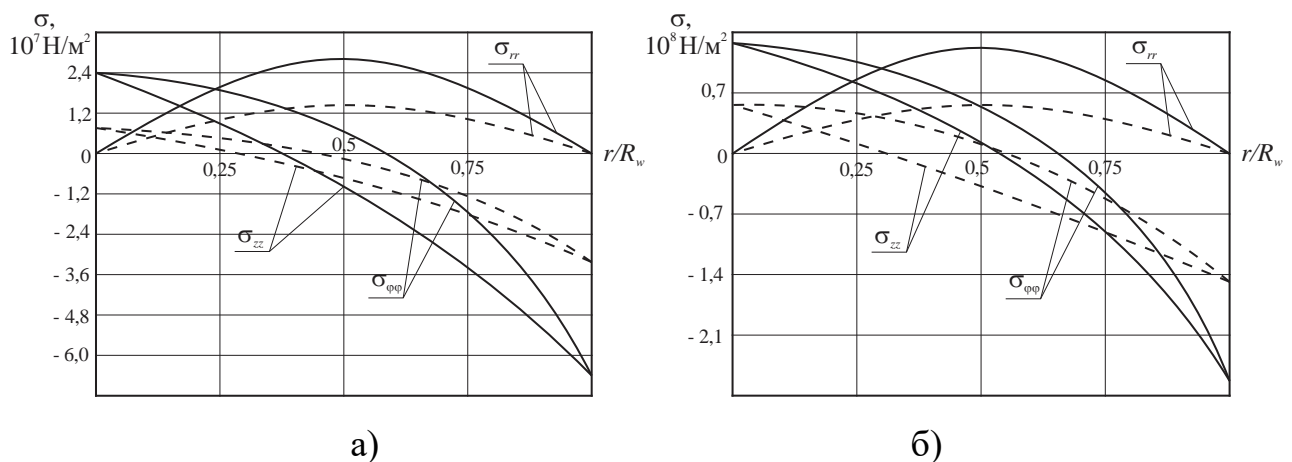


Рис. 4.15. Розподіл термопружних напружень по товщині циліндричного елемента з оптичного скла К8 (а) та оптичної кераміки КО2 (б) в залежності від величини зовнішнього теплового потоку ($T_0 = 300$ К; $R_w = 0,04$ м; $t = 0,5$ с):
 ————— — $q_{n0} = 2,3 \cdot 10^6$ Вт/м²; - - - - - — $q_{n0} = 1,5 \cdot 10^5$ Вт/м².

На нижньому боці елемента виникають максимальні термічні напруження розтягу (при збільшенні зовнішнього теплового потоку q_{n0} від

$1,5 \cdot 10^5$ Вт/м² до $2,3 \cdot 10^6$ Вт/м² значення $|\sigma_{\varphi\varphi}|_{max}$ та $|\sigma_{zz}|_{max}$ зростають у 1,7... 1,9 рази для оптичного скла К8, а для оптичної кераміки КО2 – у 2,1...2,3 рази). При цьому збільшення часу зовнішнього теплового впливу від $t = 0,2$ с до 1,4 с призводить до зростання $|\sigma_{\varphi\varphi}|_{max}$ та $|\sigma_{zz}|_{max}$ у 1,3...1,5 рази для оптичного скла К8 та оптичної кераміки КО2.

Радіальні термічні напруження σ_{rr} досягають максимальних значень всередині елемента в точках $r^*/R_w \approx 0,49...0,52$ для діапазонів зміни параметрів зовнішніх термовпливів, що розглядаються: $q_{n0} = 1,5 \cdot 10^5...2,3 \cdot 10^6$ Вт/м² та $t = 0,2...14$ с. Збільшення q_{n0} та t у вказаних вище діапазонах зміни призводить до зростання максимальних значень термопружних напружень $(\sigma_{rr})_{max}$ у 2,5...3,2 рази для оптичного скла К8 та у 2,3...3,1 рази для оптичної кераміки КО2. При цьому по всій товщині елемента радіальні термопружні напруження є розтяжними ($\sigma_{rr} > 0$).

Півсферичний елемент. З розрахунків, представлених на рис. 4.18 – 4.20, випливає, що при зовнішньому тепловому впливі на поверхню елемента максимальні термічні стискаючі напруження виникають у його поверхневих шарах з боку нагріву (при збільшенні зовнішнього теплового потоку q_{n0} від $1,5 \cdot 10^5$ Вт/м² до $2,3 \cdot 10^6$ Вт/м² значення $|\sigma_{\varphi\varphi}|_{max}$ зростають у 1,3...1,8 рази для оптичного скла БК10, та у 1,4...1,7 рази для оптичної кераміки КО1). Збільшення часу зовнішнього теплового впливу t від 0,2 с до 1,4 с (для оптичного скла БК10) та від 2 с до 14 с (для оптичної кераміки БК10) призводить до зростання величини $|\sigma_{\varphi\varphi}|_{max}$ у 1,3...1,6 рази.

На нижньому боці елемента також виникають максимальні термічні напруження розтягу (при збільшенні зовнішнього теплового потоку q_{n0} від $1,5 \cdot 10^5$ Вт/м² до $2,3 \cdot 10^6$ Вт/м² значення $|\sigma_{\varphi\varphi}|_{max}$ зростають у 1,2...1,5 рази для оптичного скла БК10, а для оптичної кераміки КО1 – у 1,3...1,6 рази). При цьому збільшення часу зовнішнього теплового впливу від $t = 0,1$ с до 16 с

призводить до зростання $|\sigma_{\varphi\varphi}|_{max}$ у 1,4...1,7 рази для оптичного скла BK10 та оптичної кераміки КО1.

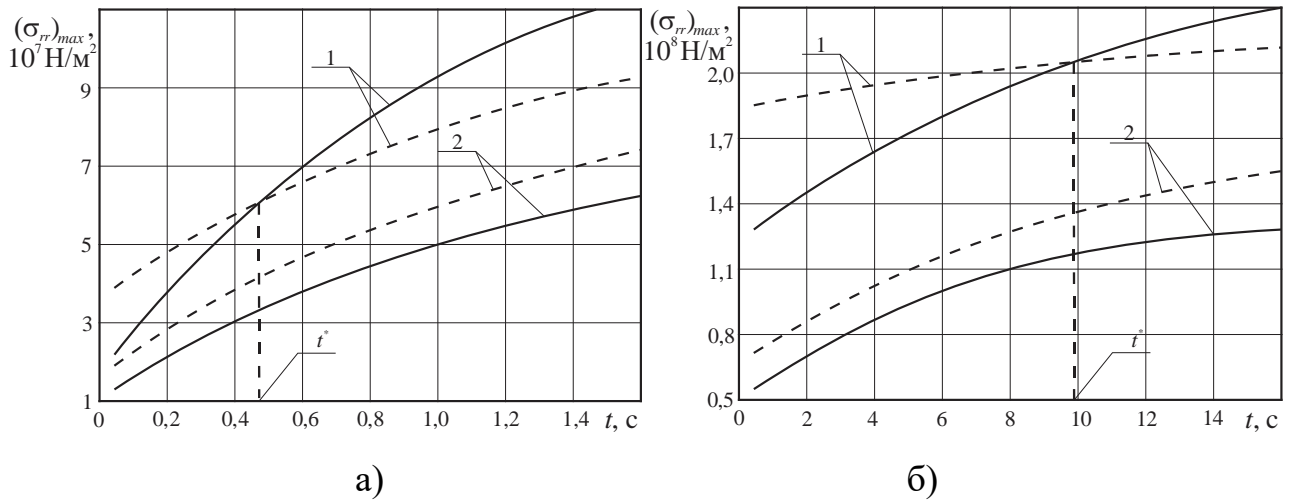


Рис. 4.16. Залежність максимальних термопружних напружень $(\sigma_{rr})_{max}$ від часу зовнішнього теплового впливу на поверхню циліндричного елемента з оптичного скла К8 (а) та оптичної кераміки КО2 (б) для різних значень зовнішнього теплового потоку ($T_0 = 300 \text{ К}$; $R_w = 0,04 \text{ м}$; $t = 0,5 \text{ с}$): 1 – $q_n = 2,3 \cdot 10^6 \text{ Вт/м}^2$; 2 – $q_n = 1,3 \cdot 10^5 \text{ Вт/м}^2$; t^* – критичні значення часу впливу; — — — — — межа міцності оптичного матеріалу.

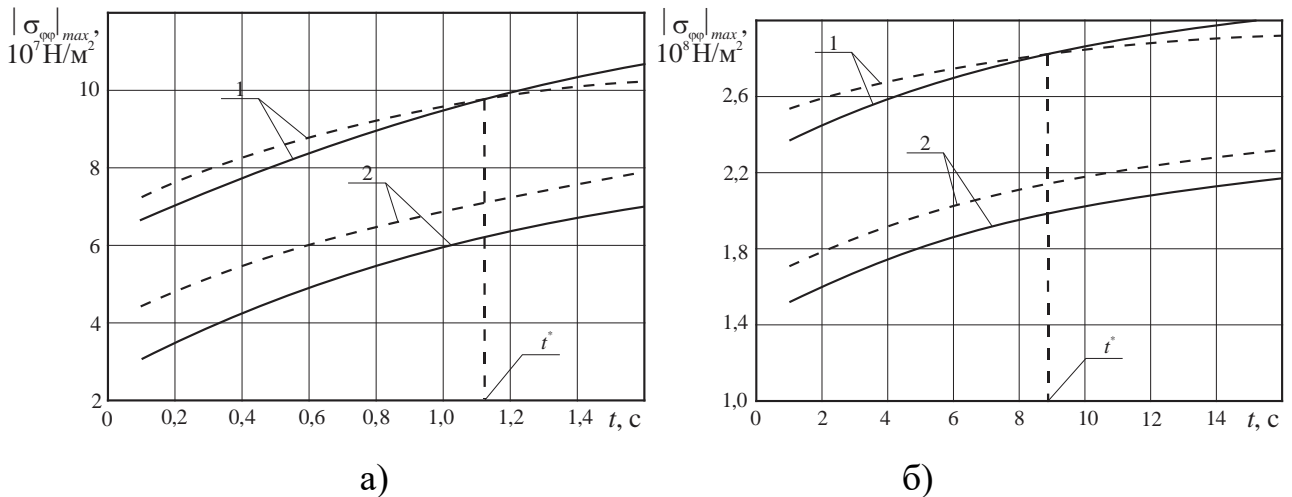


Рис. 4.17. Залежність модуля максимальних термопружних напружень $|\sigma_{\varphi\varphi}|_{max}$ від часу зовнішнього теплового впливу на поверхню циліндричного елемента з оптичного скла ТФ10 (а) та оптичної кераміки КО5 (б) для різних значень зовнішнього теплового потоку ($T_0 = 300 \text{ К}$; $t = 0,5 \text{ с}$): 1 – $q_n = 2,3 \cdot 10^6 \text{ Вт/м}^2$;

2 – $q_n = 1,5 \cdot 10^5$ Вт/м²; t^* – критичні значення часу впливу;
 - - - - - межа міцності оптичного матеріалу.

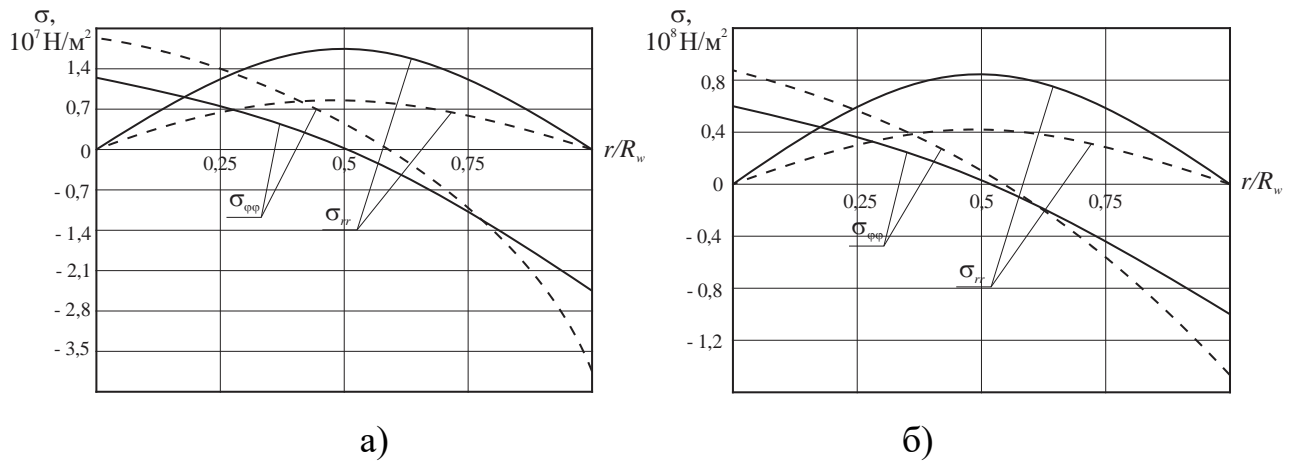


Рис. 4.18. Розподіл термопружних напружень по товщині півсферичного елемента з оптичного скла К8 (а) та оптичної кераміки КО5 (б) в залежності від величини зовнішнього теплового потоку ($T_0 = 300$ К; $R_w = 0,03$ м; $t = 0,2$ с):

————— $q_{n0} = 2,3 \cdot 10^6$ Вт/м²; - - - - - $q_{n0} = 1,5 \cdot 10^5$ Вт/м².

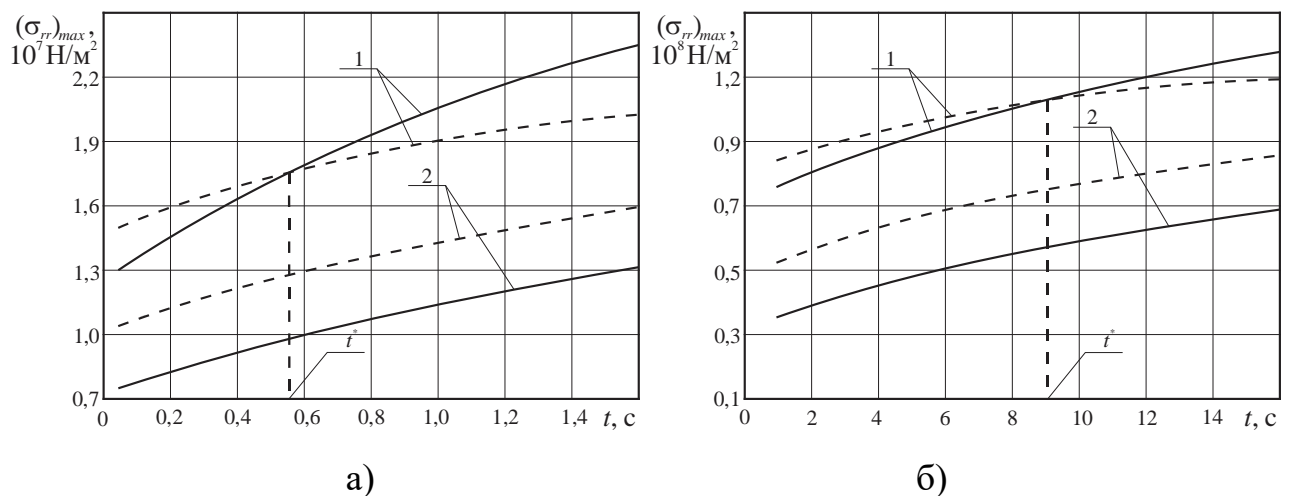


Рис. 4.19. Залежність максимальних термопружних напружень $(\sigma_{rr})_{max}$ від часу зовнішнього теплового впливу на поверхню півсферичного елемента з оптичного скла БК10 (а) та оптичної кераміки КО1 (б) для різних значень зовнішнього теплового потоку ($T_0 = 300$ К; $R_w = 0,04$ м; $t = 0,5$ с): 1 – $q_n = 2,3 \cdot 10^6$ Вт/м²; 2 – $q_n = 1,5 \cdot 10^5$ Вт/м²; t^* – критичні значення часу впливу;
 - - - - - межа міцності оптичного матеріалу.

При цьому радіальні термічні напруження σ_{rr} також досягають максимальних значень всередині елемента в точках $r^*/R_w \approx 0,50 \dots 0,52$ для $q_{n0} = 1,5 \cdot 10^5 \dots 2,3 \cdot 10^6$ Вт/м² та $t = 0,1 \dots 16$ с. Збільшення q_{n0} та t призводить до зростання максимальних значень термопружних напружень $|\sigma_{\varphi\varphi}|_{max}$ та $(\sigma_{rr})_{max}$ у 1,5...1,6 рази для оптичного скла К8 та у 1,7...2,3 рази для оптичної кераміки КО5. Крім цього по всій товщині елемента радіальні термопружні напруження є розтяжними ($\sigma_{rr} > 0$).

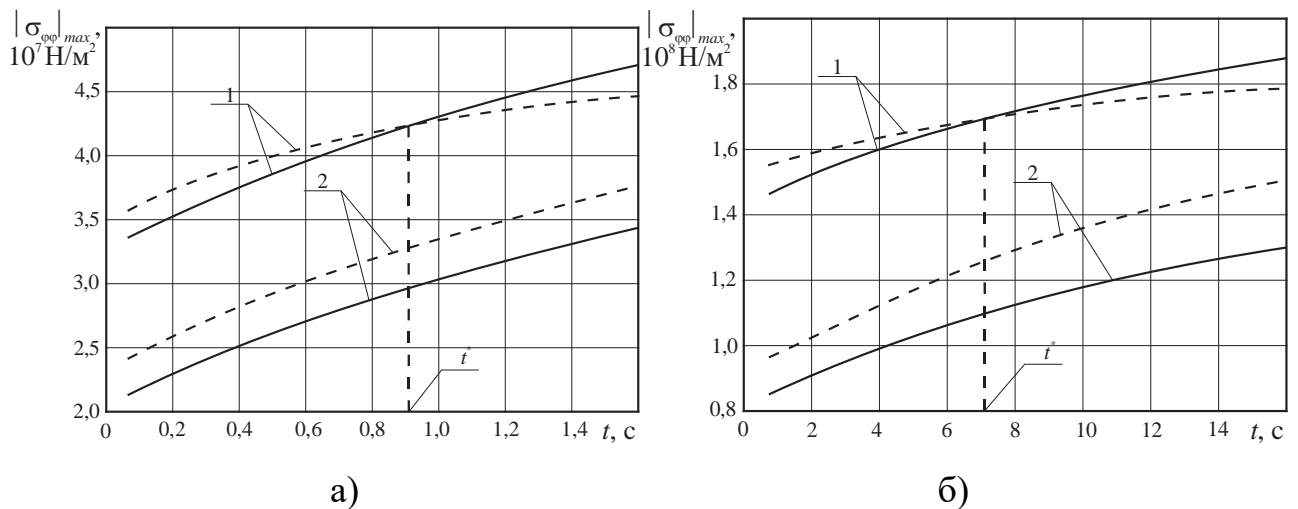


Рис. 4.20. Залежність модуля максимальних термопружних напружень $|\sigma_{\varphi\varphi}|_{max}$ від часу зовнішнього теплового впливу на поверхню півсферичного елемента з оптичного скла К8 (а) та оптичної кераміки КО5 (б) для різних значень зовнішнього теплового потоку ($T_0 = 300$ К; $t = 0,5$ с): 1 – $q_n = 2,3 \cdot 10^6$ Вт/м²; 2 – $q_n = 1,5 \cdot 10^5$ Вт/м²; t^* – критичні значення часу впливу; — — — — — межа міцності оптичного матеріалу.

4.2. Математичне моделювання процесів поверхневого оплавлення оптичних елементів

Як вказувалося вище, оптичні елементи, що розглядаються (наприклад, підкладки для оптичних інтегральних схем, світлорозсіювальні екрани у ІЧ-приладах тощо) у вигляді плоскопаралельних пластин різної товщини з оптичного скла (К8, БК10, ТФ110 тощо) при експлуатації приладів на їх основі,

або в умовах експлуатації можуть піддаватися інтенсивним зовнішнім термовпливам (рис. 4.21). При цьому при певних комбінаціях параметрів зовнішніх термовпливів (величин теплових потоків та часів їх впливу на елемент) елементи можуть, минаючи стадію руйнування поверхневих шарів в результаті перевищення граничних термопружних напружень, почати плавитися починаючи з поверхні, утворюючи розплавлений шар великої товщини [39, 62, 77], який перевищує його гранично допустимі значення, що призводить до утворення напливів, ребристості поверхні та ін. дефектів, які різко погіршують площинність оптичних елементів.

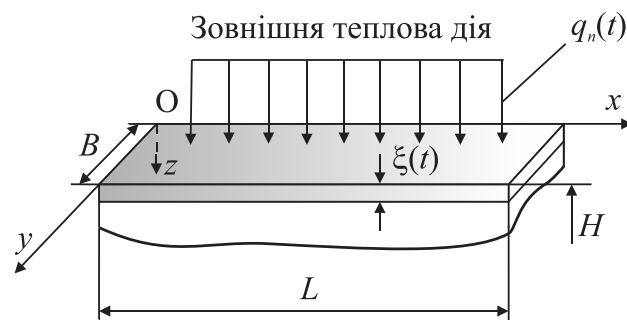


Рис. 4.21. Схема зовнішнього нагріву та глибокого оплавлення пластини: B , L , H – ширина, довжина та товщина пластини відповідно, м; $\xi(t)$ – змінна товщина оплавленого шару, м; $q_n(t)$ – густина зовнішньої теплової дії (тепловий потік), Вт/м².

Постановка задачі. При зовнішніх теплових впливах на поверхню пластини поступає рівномірно розподілений тепловий потік q_n та встановлюється температура T_n , при якій, як показують багаточисельні експериментальні дані [39, 62], починається процес поверхневого оплавлення пластини та починає формуватися оплавлений шар товщиною $\xi(t)$. При цьому вказана температура визначається з умови: $T^* = (0,9 \dots 0,95)T_n$, де T^* – температура текучості (рідкого стану) оптичного матеріалу, яка визначається з експериментально встановлених залежностей $\eta(t)$ (η – динамічна в'язкість розплаву оптичного матеріалу) [200, 201].

Таким чином, розв'язок вихідної задачі шукаємо у два етапи: на 1-му етапі сформулюється математична модель процесу поверхневого нагріву пластини до температури T_n без її оплавлення, а на 2-му етапі сформулюється математична модель глибокого оплавлення пластини та утворення розплавленого шару при температурі її поверхні, що дорівнює T_n [39, 62].

Математична модель процесу нагріву елемента. Сумарний тепловий потік передбачається рівномірно розподіленим на поверхні елемента. Передбачається, що $\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial T}{\partial y} \approx 0$ (одномірність розповсюдження тепла углиб елемента).

Рівняння математичної моделі нагріву елемента мають вигляд [23, 122, 135]:

$$C_V(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[\lambda(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \right], \quad t > 0, \quad 0 < z < +\infty, \quad (4.64)$$

$$-\lambda(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0} = q_n(t), \quad (4.65)$$

$$T|_{t=0} = T_0, \quad (4.66)$$

$$T \rightarrow T_0, \quad \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right) \rightarrow 0 \quad \text{при} \quad z \rightarrow +\infty. \quad (4.67)$$

Враховуючи $C_V(T)$ і $\lambda(T)$ та роблячи заміну

$$\theta(z, t) = T^{\nu+1} - T_0^{\nu+1}, \quad (4.68)$$

отримуємо наступну систему рівнянь:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = a_0^2 \cdot \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2}, \quad (4.69)$$

$$\theta|_{t=0} = 0, \quad (4.70)$$

$$-\frac{\partial \theta}{\partial z} \Big|_{z=0} = \bar{q}_n(t), \quad (4.71)$$

$$\theta \rightarrow 0, \quad \frac{\partial \theta}{\partial z} \rightarrow 0 \quad \text{при} \quad z \rightarrow +\infty, \quad \bar{q}_n(t) = \frac{\nu+1}{\lambda_0} \cdot q_n(t). \quad (4.72)$$

Для знаходження функції $\theta(z, t)$ використовуємо пряме косинус-перетворення Фур'є по координаті z [135]:

$$\bar{\theta}(z, t) \rightarrow F_c(\omega, t) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \cdot \int_0^{\infty} \bar{\theta}(u, t) \cdot \cos \omega u du. \quad (4.73)$$

Застосовуючи (4.73), перетворюємо систему рівнянь (4.69) – (4.72):

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} \rightarrow \frac{dF_c}{dt}, \quad a_0^2 \cdot \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \rightarrow a_0^2 \cdot \sqrt{\frac{2}{\pi}} \cdot \int_0^{\infty} \frac{\partial^2 \theta}{\partial u^2} \cdot \cos \omega u du. \quad (4.74)$$

Інтегруючи (4.74) двічі по частинам, отримуємо

$$a_0^2 \cdot \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \rightarrow -a_0^2 \cdot \omega^2 \cdot F_c + a_0^2 \cdot \sqrt{\frac{2}{\pi}} \cdot \bar{q}_n(t). \quad (4.75)$$

В результаті для знаходження функції $F_c(\omega, t)$ отримуємо наступне диференціальне рівняння:

$$\frac{dF_c}{dt} = -a_0^2 \cdot \omega^2 \cdot F_c + a_0^2 \cdot \sqrt{\frac{2}{\pi}} \cdot \bar{q}_n(t), \quad (4.76)$$

$$F_c|_{t=0} = 0. \quad (4.77)$$

Розв'язуючи диференціальне рівняння (4.76) з початковою умовою (4.77) одним з відомих методів (наприклад, методом Бернуллі [23]), отримуємо

$$F_c(\omega, t) = a_0^2 \cdot \sqrt{\frac{2}{\pi}} \cdot \int_0^t q_n(\tau) \cdot e^{-a_0^2 \cdot \omega^2 \cdot (t-\tau)} d\tau. \quad (4.78)$$

Оригінал $\theta(z, t)$, знаходимо застосовуючи зворотне косинус-перетворення Фур'є для функції $F_c(\omega, t)$:

$$F_c(\omega, t) \rightarrow \theta(z, t) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \cdot \int_0^{\infty} F_c(\omega, t) \cdot \cos \omega z d\omega. \quad (4.79)$$

Підставляючи (4.78) у (4.79), отримуємо

$$\theta(z, t) = \frac{2a_0^2}{\pi} \cdot \int_0^t q_n(\tau) d\tau \cdot \int_0^{\infty} e^{-a_0^2 \cdot \omega^2 \cdot (t-\tau)} \cos \omega z d\omega. \quad (4.80)$$

Використовуючи довідкові дані [], отримуємо

$$\int_0^{\infty} e^{-a_0^2 \cdot \omega^2 \cdot (t-\tau)} \cdot \cos \omega z d\omega = \frac{\sqrt{\pi}}{2a_0 \cdot \sqrt{t-\tau}} \cdot e^{-\frac{z^2}{4a_0^2 \cdot (t-\tau)}}. \quad (4.81)$$

Підставляючи (4.81) у (4.80) та враховуючи (4.71), а також $q_n(t) = q_{n0} = const$, знаходимо загальний розв'язок вихідної задачі

$$T(z,t) = \left[T_0^{\nu+1} + \frac{(\nu+1) \cdot a_0 \cdot q_{n0}}{\sqrt{\pi} \cdot \lambda_0} \cdot \int_0^t \frac{e^{-\frac{z^2}{4a_0^2 \cdot (t-\tau)}}}{\sqrt{t-\tau}} d\tau \right]^{\frac{1}{\nu+1}}. \quad (4.82)$$

Математична модель процесу глибокого оплавлення елемента. Вважається, що $\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial T}{\partial y} = 0$ (одномірність розповсюдження тепла углиб елемента).

Враховуючи, що теплообмін на нижній стороні пластини не впливає на температурне поле в елементі, та, нехтуючи тепловтратами за рахунок конвекції та випромінювання, рівняння математичної моделі задачі, що розглядається, являють собою нелінійне рівняння теплопровідності з граничними умовами IV роду [23, 122, 135]:

$$C_V(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \right), \quad t > 0, \quad 0 < z < \xi(t), \quad (4.83)$$

$$T|_{z=0} = T_n, \quad t \geq 0, \quad (4.84)$$

$$T|_{z=\xi(t)} = T^*, \quad t \geq 0, \quad (4.85)$$

$$-\lambda(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=\xi(t)} = \lambda_n \cdot \rho \cdot \frac{d\xi}{dt}, \quad t \geq 0, \quad (4.86)$$

де $\xi(t)$ – змінна товщина оплавленого шару ($\xi(0) = 0$); λ_n – прихована теплота фазового переходу, Дж/кг; ρ – густина розплаву оптичного матеріалу, кг/м³.

З врахуванням вказаних вище залежностей теплофізичних властивостей оптичного скла від температури ($C_V(T)$ та $\lambda(T)$), рівняння (4.83) – (4.86) перетворюються до вигляду:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = a_0^2 \cdot \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2}, \quad t > 0, \quad 0 < z < \xi(t), \quad (4.87)$$

$$\theta|_{z=0} = \varphi, \quad t \geq 0, \quad (4.88)$$

$$\theta|_{z=\xi(t)} = 0, \quad t \geq 0, \quad (4.89)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial z} \Big|_{z=\xi(t)} = A \cdot \frac{d\xi}{dt}, \quad t \geq 0, \quad (4.90)$$

$$\text{де } \theta = T^{\nu+1} - T^{*\nu+1}, \quad A = -\frac{\lambda_n \cdot \rho \cdot (\nu+1)}{\lambda_0}, \quad \varphi = T_n^{\nu+1} - T^{*\nu+1}. \quad (4.91)$$

У вказаній задачі (4.87) – (4.90) потрібно визначити закони руху фронту плавлення $(\xi(t), \frac{d\xi(t)}{dt})$ та функцію $\theta(z, t)$. Для розв'язання задачі (4.87) – (4.91) використовуємо методи теорії інтегральних перетворень у областях з межами, що рухаються [122]. Для цього введемо інтегральне перетворення

$$\tilde{\theta}(p, t) = \int_0^{\xi(t)} \theta(z, t) \cdot sh(z \cdot \sqrt{p}) dz, \quad (4.92)$$

де $p = \sigma + i\omega$ – комплексне число з $Re p \geq \beta > 0$ та $-\frac{\pi}{4} < arg \sqrt{p} < \frac{\pi}{4}$.

Помножимо обидві частини рівняння (4.87) на $sh(z \cdot \sqrt{p})$ та інтегруємо його по z від нуля до $\xi(t)$:

$$\int_0^{\xi(t)} \frac{\partial \theta}{\partial t} \cdot sh(z \cdot \sqrt{p}) dz = a_0^2 \cdot \int_0^{\xi(t)} \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \cdot sh(z \cdot \sqrt{p}) dz. \quad (4.93)$$

Інтегруючи (4.93) по частинам, отримуємо

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \int_0^{\xi(t)} \theta(z, t) \cdot sh(z \cdot \sqrt{p}) dz - \theta(\xi(t), t) \cdot sh(\xi(t) \cdot \sqrt{p}) \frac{d\xi}{dt} &= a_0^2 \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \cdot sh(z \cdot \sqrt{p}) \Big|_0^{\xi(t)} + \\ &+ a_0^2 \cdot \sqrt{p} \cdot \theta(z, t) \cdot ch(z \cdot \sqrt{p}) \Big|_0^{\xi(t)} + a_0^2 \cdot p \cdot \int_0^{\xi(t)} \theta(z, t) \cdot sh(z \cdot \sqrt{p}) dz. \end{aligned} \quad (4.94)$$

Враховуючи крайові умови (4.88) – (4.90), а також (4.92), приходимо до звичайного диференціального рівняння першого порядку з початковою умовою (задача Коши [23]):

$$\begin{cases} \frac{d\tilde{\theta}}{dt} - a_0^2 \cdot p \cdot \tilde{\theta} - a_0^2 \cdot A \cdot \frac{d\xi}{dt} \cdot sh(\xi(t) \cdot \sqrt{p}) - a_0^2 \cdot \sqrt{p} \cdot \varphi = 0, & t > 0 \\ \tilde{\theta} \Big|_{t=0} = 0. \end{cases} \quad (4.95)$$

Розв'язуючи (4.95) одним з стандартних методів (наприклад, методом Бернуллі [23]), отримуємо

$$\begin{aligned} \tilde{\theta}(p,t) = & \left(a_0^2 \cdot A / \sqrt{p} \right) \cdot e^{a_0^2 \cdot p \cdot t} \cdot \\ & \cdot \left\{ e^{-a_0^2 \cdot p \cdot t} \cdot ch(\xi(t) \cdot \sqrt{p}) - 1 + a_0^2 \cdot p \cdot \int_0^t e^{-a_0^2 \cdot p \cdot \tau} \cdot ch(\xi(\tau) \cdot \sqrt{p}) d\tau \right\} + \\ & + a_0^2 \cdot \sqrt{p} \cdot \int_0^t e^{a_0^2 \cdot p \cdot (t-\tau)} \cdot \varphi d\tau. \end{aligned} \quad (4.96)$$

Далі будемо шукати $\theta(z,t)$ у вигляд наступного ряду (типу ряду Фур'є [135]):

$$\theta(z,t) = \sum_{n=1}^{\infty} a_n(t) \cdot e^{-\left[\frac{a_0 \cdot \pi \cdot n}{\xi(t)} \right]^2 \cdot t} \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot n \cdot z}{\xi(t)} \right), \quad (4.97)$$

припускаючи, що цей ряд абсолютно та рівномірно сходиться при будь-якому $0 < z < \xi(t)$ та при будь-якому кінцевому $t > 0$. Підставляючи ряд (4.97) у (4.90) та виконуючи інтегрування, отримуємо наступне співвідношення:

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1} \cdot n \cdot a_n(t) \cdot e^{-\left[\frac{a_0 \cdot \pi \cdot n}{\xi(t)} \right]^2 \cdot t}}{p + \pi^2 \cdot n^2 / \xi^2(t)} = \frac{\xi(t) \cdot \tilde{\theta}(p,t)}{\pi \cdot sh(\xi(t) \cdot \sqrt{p})}. \quad (4.98)$$

Ліва частина виразу (4.98) регулярна, за виключенням полюсів, що розташовані на від'ємній піввіссі

$$p_n = -\pi^2 \cdot n^2 / \xi^2(t), \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (4.99)$$

Проінтегруємо обидві частини рівності (4.98) по p послідовно по контурам $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \dots, \gamma_n, \dots$. Контур γ_n складається з вертикалі $\sigma > 0$, півкола з радіусом $R_n = \left[\pi^2 / \xi^2(t) \right] \cdot (2n^2 + 2n + 1)$ (контур γ_n перетинає вісь z у середній точці між p_n та p_{n+1}) з центром у початку координат та двох горизонтальних прямих

$Y = \pm \left[\pi^2 / 2\xi^2(t) \right] \cdot (2n^2 + 2n + 1)$. Тоді коло R_n не проходить через полюси підінтегральної функції та по теоремі Коши [23] інтеграл по контуру γ_n буде дорівнювати добутку $2\pi i$ на суму відрахувань підінтегральної функції відносно її полюсів, що знаходяться всередині контура γ_n :

$$\int_{\gamma_n} f(p) dp = 2\pi i \cdot \sum_{k=1}^n \text{res}[f(p); p_k]. \quad (4.100)$$

Оскільки у (4.100) полюси p_n – прості, а підінтегральна функція $f(p)$ має вид $f_1(p)/f_2(p)$, то при обчисленні функції $f_1(p)/f_2(p)$ відносно простого полюса $p = p_k$ можна використовувати формулою [23]:

$$\text{Res}[f_1(p)/f_2(p); p_k] = [f_1(p_k)/f_2'(p)]_{p=p_k}. \quad (4.101)$$

Проводячи послідовне інтегрування (4.100) по контурам $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \dots$, слід врахувати, що якщо $f(p)$ – аналітична функція на замкненому контурі γ та у однозв'язковій області, що обмежена контуром, то $\int_{\gamma} f(p) dp = 0$ (теорема Коши [23]).

Враховуючи вказане вище, знаходимо

$$\begin{aligned} a_1(t) \cdot e^{-\left[\frac{a_0 \cdot \pi \cdot n}{\xi(t)}\right]^2 \cdot t} \cdot \int_{\gamma_1} \frac{dp}{p + \pi^2 / \xi^2(t)} + \sum_{n=2}^{\infty} (-1)^{n+1} \cdot n \cdot a_n(t) \cdot e^{-\left[\frac{a_0 \cdot \pi \cdot n}{\xi(t)}\right]^2 \cdot t} \cdot \\ \cdot \int_{\gamma_1} \frac{dp}{p + \pi^2 \cdot n^2 / \xi^2(t)} = \frac{\xi(t)}{\pi} \cdot \int_{\gamma_1} \frac{\tilde{\theta}(p, t) dp}{sh(\xi(t) \cdot \sqrt{p})}. \end{aligned} \quad (4.102)$$

Оскільки $\text{Res}\left[\left(p + \pi^2 / \xi^2(t)\right)^{-1}; -\pi^2 / \xi^2(t)\right] = 1$, а $\int_{\gamma_1} \left[p + \pi^2 \cdot n^2 / \xi^2(t)\right]^{-1} dp = 0$

($n \geq 2$), то знаходимо:

$$a_1(t) = \xi(t) \cdot e^{\left[\frac{a_0 \cdot \pi}{\xi(t)}\right]^2 \cdot t} \cdot \frac{1}{2\pi^2 \cdot i} \cdot \int_{\gamma_1} \frac{\tilde{\theta}(p, t) dp}{sh(\xi(t) \cdot \sqrt{p})}. \quad (4.103)$$

Проінтегруємо (4.98) по контуру γ_2 :

$$\begin{aligned}
& a_1(t) \cdot e^{-\left[\frac{a_0 \cdot \pi}{\xi(t)}\right]^2 \cdot t} \cdot \int_{\gamma_2} \frac{dp}{p + \pi^2 / \xi^2(t)} - 2 \cdot a_2(t) \cdot e^{-\left[\frac{2\pi a_0}{\xi(t)}\right]^2 \cdot t} \cdot \int_{\gamma_2} \frac{dp}{p + 4\pi^2 / \xi^2(t)} + \\
& \quad + \sum_{n=3}^{\infty} (-1)^{n+1} \cdot n \cdot a_n(t) \cdot e^{-\left[\frac{a_0 \cdot \pi \cdot n}{\xi(t)}\right]^2 \cdot t} \cdot \int_{\gamma_2} \frac{dp}{p + \pi^2 \cdot n^2 / \xi^2(t)} = \frac{\xi(t)}{\pi} \cdot \int_{\gamma_2} \frac{\tilde{\theta}(p, t) dp}{sh(\xi(t) \cdot \sqrt{p})}. \quad (4.104)
\end{aligned}$$

Звідси знаходимо, використовуючи (4.100) – (4.103):

$$a_2(t) = -\frac{\xi(t)}{2\pi} \cdot e^{-\left[\frac{2a_0 \cdot \pi}{\xi(t)}\right]^2 \cdot t} \cdot \left\{ \frac{1}{2\pi i} \cdot \int_{\gamma_2} \frac{\tilde{\theta}(p, t) dp}{sh(\xi(t) \cdot \sqrt{p})} - \frac{1}{2\pi i} \cdot \int_{\gamma_2} \frac{\tilde{\theta}(p, t) dp}{sh(\xi(t) \cdot \sqrt{p})} \right\}. \quad (4.105)$$

Продовжуючи розглядуваний вище процес інтегрування (4.98) по контурам $\gamma_3, \gamma_4, \dots, \gamma_n$, отримаємо наступний вираз для $a_n(t)$:

$$a_n(t) = \frac{(-1)^{n+1} \xi(t)}{\pi \cdot n} \cdot e^{-\left[\frac{\pi \cdot n \cdot a_0}{\xi(t)}\right]^2 \cdot t} \cdot \left\{ \frac{1}{2\pi i} \cdot \int_{\gamma_n} \frac{\tilde{\theta}(p, t) dp}{sh(\xi(t) \cdot \sqrt{p})} - \frac{1}{2\pi i} \cdot \int_{\gamma_{n-1}} \frac{\tilde{\theta}(p, t) dp}{sh(\xi(t) \cdot \sqrt{p})} \right\}, \quad (4.106)$$

де $\tilde{\theta}(p, t)$ представлено виразом (4.96). Враховуючи (4.96) представимо більш докладно підінтегральний вираз у (4.106):

$$\begin{aligned}
\frac{\tilde{\theta}(p, t)}{sh(\xi(t) \cdot \sqrt{p})} &= \frac{a_0^2 \cdot A \cdot ch(\xi(t) \cdot \sqrt{p})}{\sqrt{p} \cdot sh(\xi(t) \cdot \sqrt{p})} - \frac{a_0^2 \cdot A \cdot e^{a_0^2 \cdot p \cdot t}}{\sqrt{p} \cdot sh(\xi(t) \cdot \sqrt{p})} + \frac{a_0^4 \cdot A \cdot \sqrt{p}}{sh(\xi(t) \cdot \sqrt{p})} \cdot \\
& \cdot \int_0^t e^{a_0^2 \cdot p \cdot (t-\tau)} \cdot ch(\xi(t) \cdot \sqrt{p}) d\tau + \frac{a_0^2 \cdot \sqrt{p}}{sh(\xi(t) \cdot \sqrt{p})} \cdot \int_0^t e^{a_0^2 \cdot p \cdot (t-\tau)} \cdot \varphi d\tau. \quad (4.107)
\end{aligned}$$

Аналізуючи вираз (4.107), бачимо, що перші два складові регулярні усюди, за виключенням простих полюсів $p=0$ та $p=p_n$ (4.99). Якщо врахувати, що [23]

$$Res \left\{ \frac{ch(\xi(t) \cdot \sqrt{p})}{\sqrt{p} \cdot sh(\xi(t) \cdot \sqrt{p})} \right\}_{p=-\pi^2 \cdot n^2 / \xi^2(t)} = \frac{2}{\sqrt{t}} \quad (n \geq 0);$$

$$\operatorname{Res} \left\{ \frac{e^{a_0^2 \cdot p \cdot t}}{\sqrt{p} \cdot \operatorname{sh}(\xi(t) \cdot \sqrt{p})} \right\}_{p=-\pi^2 \cdot n^2 / \xi^2(t)} = (-1)^n \cdot \frac{2}{\xi(t)} \cdot e^{-\left[\frac{\pi \cdot n \cdot a_0}{\xi(t)} \right]^2 \cdot t} \quad (n \geq 0);$$

$$\begin{aligned} & \operatorname{Res} \left\{ \frac{\sqrt{p} \cdot \operatorname{ch}(\xi(t) \cdot \sqrt{p})}{\operatorname{sh}(\xi(t) \cdot \sqrt{p})} \cdot e^{a_0^2 \cdot p \cdot (t-\tau)} \right\}_{p=-\pi^2 \cdot n^2 / \xi^2(t)} = \\ & = (-1)^{n+1} \cdot \frac{2\pi^2 \cdot n^2}{\xi^2(t)} \cdot \cos \left[\frac{\pi \cdot n \cdot \xi(\tau)}{\xi(t)} \right] \cdot e^{-\left[\frac{\pi \cdot n \cdot a_0}{\xi(t)} \right]^2 \cdot (t-\tau)} \quad (n \geq 0); \end{aligned}$$

$$\frac{1}{2\pi i} \cdot \int_{\gamma_n} \frac{\tilde{\theta}(p, t) dp}{\operatorname{sh}(\xi(t) \cdot \sqrt{p})} - \frac{1}{2\pi i} \cdot \int_{\gamma_{n-1}} \frac{\tilde{\theta}(p, t) dp}{\operatorname{sh}(\xi(t) \cdot \sqrt{p})} = \operatorname{Res} \left\{ \frac{\tilde{\theta}(p, t) dp}{\operatorname{sh}(\xi(t) \cdot \sqrt{p})}; P_n \right\},$$

то після обчислення інтегралів (4.104) – (4.106) отримаємо

$$\begin{aligned} a_n(t) = & \frac{(-1)^{n+1} \cdot a_0^2 \cdot A}{\pi \cdot n} \cdot \left\{ (-1)^{n+1} + e^{\left[\frac{\pi \cdot n \cdot a_0}{\xi(t)} \right]^2 \cdot t} + \frac{2a_0^4 \cdot A \cdot \pi \cdot n}{\xi^2(t)} \cdot \right. \\ & \left. \int_0^t e^{\left[\frac{\pi \cdot n \cdot a_0}{\xi(t)} \right]^2 \cdot \tau} \cdot \cos \left[\frac{\pi \cdot n \cdot \xi(\tau)}{\xi(t)} \right] d\tau + \frac{2a_0 \cdot \pi \cdot n}{\xi^2(t)} \cdot \int_0^t e^{\left[\frac{\pi \cdot n \cdot a_0}{\xi(t)} \right]^2 \cdot \tau} \cdot \varphi d\tau \right\}, \quad n \geq 1. \quad (4.108) \end{aligned}$$

Для знаходження виразу для $\xi(t)$ скористаємося методом диференціальних рядів [23], згідно з яким функція $\theta(z, t)$ представляється у вигляді наступного загального співвідношення:

$$\theta(z, t) = -A \cdot \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{a_0^{2n} \cdot (2n+1)!} \cdot \frac{d^n}{dt^n} \left\{ [\xi(t) - z]^{2n+1} \cdot \frac{d\xi}{dt} \right\}. \quad (4.109)$$

Використовуючи для $\theta(z, t)$ граничну умову (4.88), отримаємо

$$-\frac{\varphi}{A} = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{b_0^{2n} \cdot (2n+1)!} \cdot \frac{d^n}{dt^n} \left[\xi^{2n+1}(t) \cdot \frac{d\xi}{dt} \right] = \text{const}. \quad (4.110)$$

Співвідношення (4.108) виконується, якщо

$$\begin{cases} \xi^{2n+1}(t) \cdot \frac{d\xi}{dt} = \gamma_n \cdot t^n, \\ \xi(0) = 0. \end{cases} \quad (4.111)$$

Інтегруючи (4.111), знаходимо

$$\left[\xi^2(t) \right]^{n+1} = 2 \cdot \gamma_n \cdot t^{n+1}. \quad (4.112)$$

Вважаючи, що $2 \cdot \gamma_n = \beta^{2 \cdot (n+1)}$, отримаємо наступні закони руху фронту плавлення

$$\begin{aligned} \xi(t) &= \beta \cdot \sqrt{t}, \\ \frac{d\xi}{dt} &= \frac{\beta}{2 \cdot \sqrt{t}}, \end{aligned} \quad (4.113)$$

де β – невідомий коефіцієнт, що підлягає визначенню.

Для цього підставимо (4.113) в (4.110) та проводячи підсумовування з використанням відомого співвідношення [23]

$$a_0 \cdot \sqrt{\pi} \cdot e^{\frac{\beta^2}{4a_0^2}} \cdot \operatorname{erf}\left(\frac{\beta}{2a_0}\right) = \sum_{m=0}^{\infty} \frac{\beta^{2m+1} \cdot m!}{a_0^{2m+1} \cdot (2m+1)!},$$

отримаємо наступне трансцендентне рівняння для знаходження β :

$$-\frac{\varphi}{A \cdot a_0 \cdot \sqrt{\pi}} = \beta \cdot e^{\frac{\beta^2}{4a_0^2}} \cdot \operatorname{erf}\left(\frac{\beta}{2a_0}\right). \quad (4.114)$$

Тепер, підставляючи (4.113) у (4.108), отримаємо

$$a_n(t) = a_n = \frac{2 \cdot a_0^2 \cdot A}{\pi \cdot n} \cdot \left[1 + (-1)^{n+1} \cdot e^{\frac{a_0^2 \cdot \pi^2 \cdot n^2}{\beta^2}} + a_0^2 \cdot \int_0^{\frac{\pi^2 \cdot n^2}{\beta^2}} e^{a_0 \cdot t} \cdot \cos(\beta \cdot \sqrt{t}) dt \right] +$$

$$+ \frac{2\varphi}{\pi \cdot n} \cdot \left(e^{\frac{a_0^2 \cdot \pi^2 \cdot n^2}{\beta^2}} - 1 \right) = const, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (4.115)$$

Вважаючи $t = u^2$ та застосовуючи до інтегралу у квадратних дужках формулу інтегрування по частинам [23], отримуємо після нескладних перетворень

$$a_n = \frac{2 \cdot a_0^2 \cdot \beta \cdot A}{\pi \cdot n} \cdot \int_0^{\frac{\pi \cdot n}{\beta}} e^{a_0^2 \cdot u^2} \cdot \sin(\beta \cdot u) du + \frac{2\varphi}{\pi \cdot n} \cdot \left(e^{\frac{a_0^2 \cdot \pi^2 \cdot u^2}{\beta^2}} - 1 \right), \quad n \geq 1. \quad (4.116)$$

Підставляючи (4.116) у (4.97) та враховуючи (4.91), отримаємо наступний розв'язок вихідної задачі:

$$T(z, t) = \left\{ T^{*\nu+1} - \frac{2a_0^2 \cdot \beta \cdot \lambda_n \cdot \rho \cdot (\nu + 1)}{\pi \cdot \lambda_0} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{1}{n} \cdot e^{-\left(\frac{\pi \cdot n \cdot a_0}{\beta}\right)^2} \cdot \int_0^{\frac{\pi \cdot n \cdot a_0}{\beta}} e^{a_0^2 \cdot u^2} \cdot \sin(\beta \cdot u) du + \frac{2 \cdot (T_n^{\nu+1} - T^{*\nu+1})}{\pi \cdot n} \cdot \left(1 - e^{-\left(\frac{\pi \cdot n \cdot a_0}{\beta}\right)^2} \right) \right] \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot n \cdot z}{\beta \cdot \sqrt{t}}\right) \right\}^{\frac{1}{\nu+1}},$$

$$0 < z < \beta \cdot \sqrt{t} \quad (4.117)$$

Внаслідок швидкої збіжності ряду у (4.117) [23], обмежимося його першими N членами (відносна похибка не перевищує 5...7 %) та вважаємо $T^* = 0,925 \cdot T_n$. Тоді отримаємо наступний вираз для профіля температури по глибині розплаву, що утворюється на поверхні оптичного елемента при зовнішньому тепловому впливі:

$$T(z, t) = \left\{ (1,081 \cdot T^*)^{\nu+1} - \frac{2a_0^2 \cdot \beta \cdot \lambda_n \cdot \rho \cdot (\nu + 1)}{\pi \cdot \lambda_0} \cdot \sum_{n=1}^5 \left[\frac{1}{n} \cdot e^{-\left(\frac{\pi \cdot n \cdot a_0}{\beta}\right)^2} \right] \right\}^{\frac{1}{\nu+1}}$$

$$\cdot \left. \int_0^{\frac{\pi \cdot n \cdot a_0}{\beta}} e^{a_0^2 \cdot u^2} \cdot \sin(\beta \cdot u) du + \frac{2 \cdot T^{*\nu+1} (1,081^{\nu+1} - 1)}{\pi \cdot n} \cdot \left(1 - e^{-\left(\frac{\pi \cdot n \cdot a_0}{\beta}\right)^2} \right) \right].$$

$$\cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot n \cdot z}{\beta \cdot \sqrt{t}}\right) \Bigg\}^{\frac{1}{\nu+1}},$$

$$0 < z < \beta \cdot \sqrt{t}, \quad \xi(t) = \beta \cdot \sqrt{t}, \quad \frac{d\xi}{dt} = \frac{\beta}{2\sqrt{t}}. \quad (4.118)$$

4.2.1. Визначення критичних значень зовнішніх теплових потоків та часу їх впливу, що призводять до глибокого оплавлення оптичних елементів, порушення їх площинності та геометричної форми

Розрахунки впливу параметрів зовнішніх термовпливів на нагрівання поверхні елемента. По отриманій формулі (4.117) було проведено розрахунки з впливу параметрів зовнішніх термовпливів (величини зовнішнього теплового потоку та часу його впливу) на температуру поверхні оптичного елемента аж до початку утворення розплавленого шару (рис. 4.22, 4.23).

В результаті проведених розрахунків було встановлено, що незалежно від марки скла температура поверхні оптичного елемента зростає та прямує до насичення та наближається до $T_n^{(i)}$ ($i = \overline{1,5}$), при якій утворюється рідка фаза та починає формуватися розплавлений шар. При цьому час початку утворення рідкої фази на поверхні елемента для діапазонів зміни зовнішнього теплового потоку, що реалізуються на практиці $q_n = 1,5 \cdot 10^5 \dots 2,3 \cdot 10^6$ Вт/м², складає декілька секунд. Збільшення зовнішнього теплового потоку призводить тільки до більш швидкого (у 1,5...2 рази) утворення рідкої фази на поверхні оптичного елемента. Крім цього, зіставлення проведених розрахунків з отриманими експериментальними даними, а також результатами розрахунків по існуючим математичним моделям [23, 58, 122] показало, що врахування залежностей $\lambda(T)$ та $C_V(T)$, що спостерігаються на практиці [39, 62, 77, 123], дозволяє

знизити відносну похибку результатів розрахунків до 3...5 % замість 8...10 % – у інших моделях.

Знаходження критичних режимів при глибокому оплавленні оптичних елементів в умовах зовнішніх термовпливів. По отриманим формулам (4.117) – (4.118) було проведено розрахунки товщини оплавленого шару та швидкостей руху поверхні розділу фаз в залежності від параметрів зовнішніх термовпливів (рис. 4.24). В результаті проведених розрахунків було встановлено, що оплавлений шар на поверхні оптичного елемента формується на протязі декількох секунд та далі істотно збільшується з зростанням часу зовнішнього термовпливу. Наприклад, при збільшенні t від 2 с до 14 с значення $\frac{d\xi}{dt}$ зростають у 2...3 рази. Зіставлення результатів розрахунків залежностей $\xi(t)$ з проведеними експериментальними дослідженнями показало, що між ними є повна відповідність (відносна похибка 5...9 %).

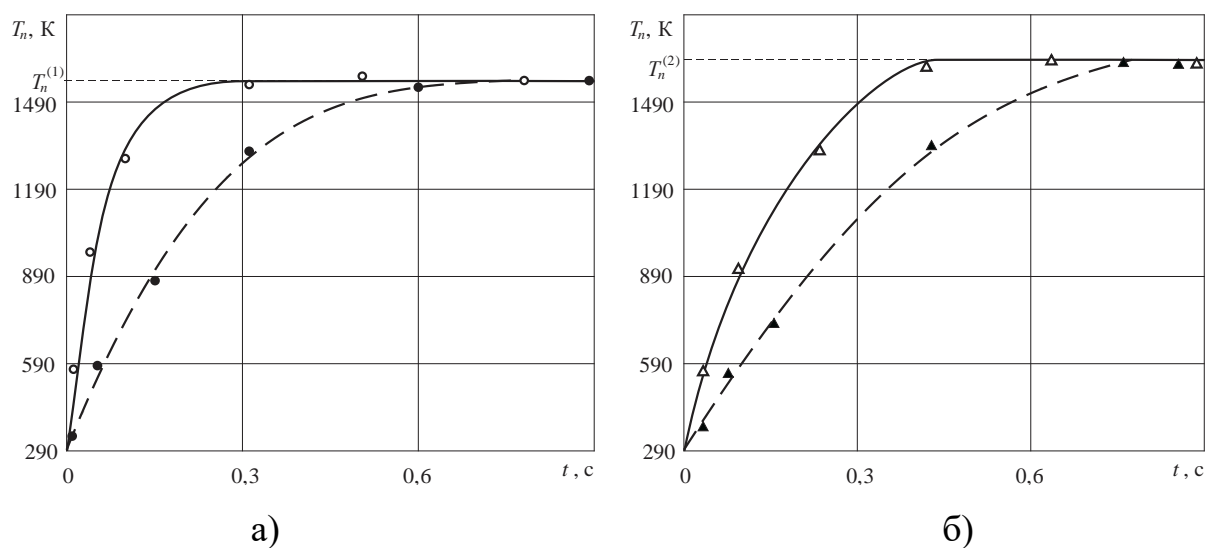


Рис. 4.22. Зміна температури поверхні оптичного елемента з скла К8 (а), БК10 (б) при зовнішньому тепловому впливі ($T_n^{(1)} = 1510$ К, $T_n^{(2)} = 1520$ К (див. розділ 2)): — — — — $q_n^{(1)} = 2,3 \cdot 10^6$ Вт/м²; - - - - - $q_n^{(2)} = 1,5 \cdot 10^5$ Вт/м²; ○, ●, Δ, ▲ – експериментальні дані.

При цьому швидкість оплавлення поверхні елемента зі збільшенням часу впливу спочатку різко зменшується (при збільшенні t від 2 с до 8 с значення $\frac{d\xi}{dt}$ зменшуються у 3...4 рази), а потім цей процес суттєво сповільнюється

(при збільшенні t від 8 с до 14 с значення $\frac{d\xi}{dt}$ зменшуються вже у 1,5...2 рази).

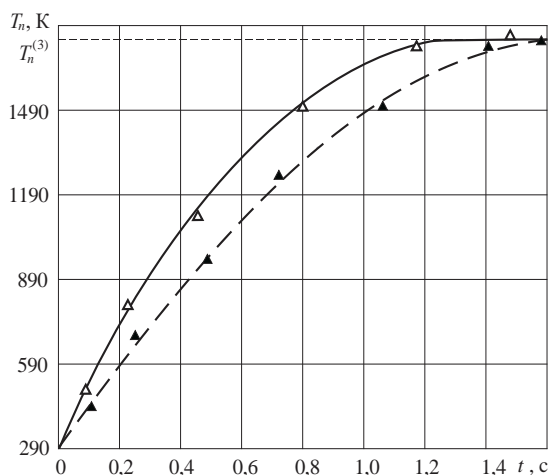


Рис. 4.23. Зміна температури поверхні оптичного елемента з скла ТФ10 при зовнішньому тепловому впливі ($T_n^{(3)} = 1570$ К, (див. розділ 2)): — — — — $q_n^{(1)} = 2,3 \cdot 10^6$ Вт/м²; - - - - $q_n^{(2)} = 1,5 \cdot 10^5$ Вт/м²; ○, ●, Δ, ▲ — експериментальні дані.

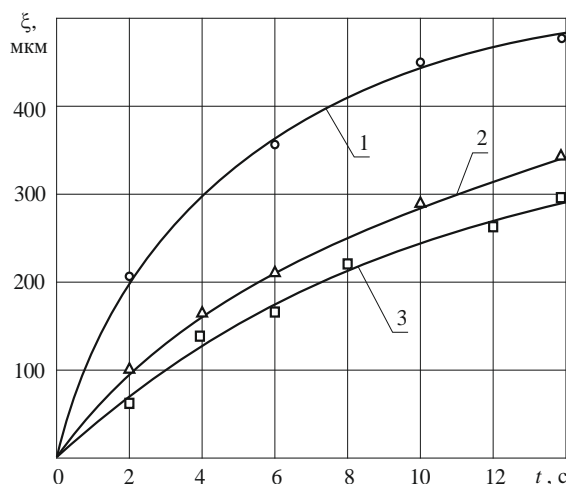


Рис. 4.24. Залежність товщини оплавленого шару від часу зовнішнього впливу на елементи з різних оптичного скла К8 (1), БК10 (2) та ТФ10 (3); б) — оптичне скло марок К108 (4), та БК10 (5); ○, Δ, □ — експериментальні дані.

Таким чином, при зовнішньому тепловому впливі на оптичні елементи (нестационарний режим) на його поверхні за короткий час ($t = 2 \dots 14$ с) утворюється розплавлений шар великої товщини (до 300...500 мкм). При цьому критичними є наступні діапазони зміни параметрів зовнішнього теплового впливу: $t^* > 2 \dots 6$ с при зовнішніх теплових потоках $q_n^* = 1,5 \cdot 10^5 \dots 2,3 \cdot 10^6$ Вт/м², оскільки в цьому випадку на поверхні оптичного елемента утворюється розплавлений шар товщиною, що перевищує його гранично допустимі значення (порядку 100...150 мкм) [39, 62].

4.3. Математична модель зовнішньої термоударної дії потоку повітря на оптичні обтічники в умовах експлуатації надзвукової техніки

Одним з критеріїв, що оцінює аеродинамічний нагрів й прогнозує зони найбільш сильного термовпливу та подальшого руйнування на поверхні півсферичного обтічника, можна розглядати розподіл теплового потоку вздовж його поверхні при нульових кутах атаки й ковзання, тобто при поздовжньому обтіканні потоком повітря із заданими швидкостями й висотами польоту, режимами обтікання й ін. [82, 169]. Крім цього, при нульових кутах атаки й ковзання, які можна реалізувати на практиці відповідними програмами польоту виробів, їхній нагрів піддається розрахунку як для ламінарного, так і для турбулентного режимів обтікання виробу газовими потоками. На практиці використовуються обтічники у вигляді півсферичної оболонки різної товщини H з оптичних керамік [62, 77]: $\delta \approx H$ – обтічник малої товщини; $\delta < H$ – обтічник великої товщини. Тут

$$H < \delta = 2 \cdot \sqrt{a^2 \cdot \tau}, \quad (4.119)$$

де δ – глибина проникнення теплової хвилі у елемент, м; a^2 – коефіцієнт температуропровідності матеріалу елемента, м²/с; τ – середній час теплового впливу на поверхню елемента, с.

Тому при розгляді процесу нагріву обтічника малої товщини необхідно враховувати умови теплообміну на його нижньому боці, а у випадку обтічника великої товщини – вказаними умовами теплообміну можна знехтувати.

Крім цього, для досліджуваних розмірів елемента при надзвуковому обдуві його зі швидкостями u_∞ ($u_\infty > 7 \cdot 10^2 \dots 10^3$ м/с) реалізується по всій його довжині, в основному, турбулентний режим обтікання, тому що значення критерію Рейнольдса в цьому випадку $Re > 10^5$ (критерій Рейнольдса $Re = \frac{2 \cdot u_\infty \cdot R_w}{\nu_\infty}$, де R_w – зовнішній радіус обтічника; ν_∞ – коефіцієнт кінематичної в'язкості потоку повітря [169]). Ламінарний режим реалізується

тільки у окремих випадках (при невеликих радіусах обтічника й помірних швидкостях обдуву), коли $Re < 10^5$.

Нині відсутня кінцева теорія турбулентного теплообміну, тому замість розв'язання класичної контактної задачі аеродинамічного нагріву виробів, що розглядаються, використовується напівемпіричний підхід, похибка якого, як показують існуючі застосування цього підходу, лежить у межах 10...15 % [82].

Згідно цього підходу, на першому етапі розв'язується зовнішня газодинамічна задача обтікання на базі експериментальних даних продувок тіл різної геометричної форми (плоскі й вісесиметричні тіла) в аеродинамічних трубах [82, 169, 38] та знаходиться тепловий потік q_n з прикордонного шару, що залежить від швидкості польоту виробу, режиму обтікання (ламінальний, турбулентний) і змінюється вздовж поверхні, що обтікається.

На другому етапі розв'язується внутрішня задача нагріву виробу товщини H при заданому зовнішньому тепловому потоці q_n (рис. 4.25).

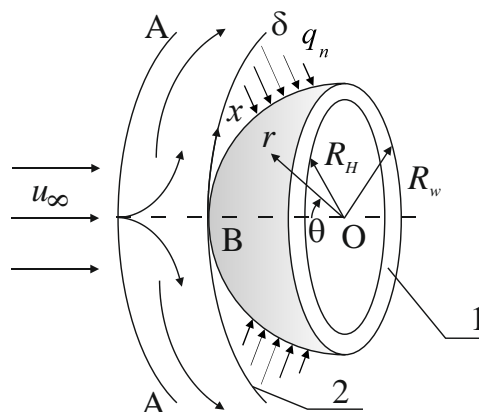


Рис. 4.25. Схема нагріву півсферичного обтічника: 1 – півсферична оболонка з оптичного матеріалу; AA – фронт ударної хвилі; B – передня критична точка (швидкість потоку рівна нулю); 2 – зовнішня межа прикордонного шару товщиною δ ; r , θ – сферичні координати; R_w , R_H – радіуси зовнішньої та внутрішньої поверхонь обтічника відповідно; індекс “ ∞ ” – значення параметрів у повітряному потоці, що набігає.

4.3.1. Визначення місць розташування на поверхні обтічника небезпечних ділянок, де вони піддаються максимальному термовпливу та руйнуванням

Тепловий вплив з прикордонного шару на поверхню обтічника. Для визначення на поверхні обтічника вказаних небезпечних зон знайдемо розподіл теплового потоку з прикордонного шару вздовж його поверхні в залежності від режиму обтікання. Для цього будемо ґрунтуватися на відомих газодинамічних законах [82, 69].

Газодинамічну задачу будемо розглядати як квазістаціонарну, що справедливо для більшості практичних випадків, за винятком імпульсних режимів [82]. Це обумовлено тим, що об'ємна теплоємність газового потоку (C_{V_2}) мала порівняно з об'ємною теплоємністю матеріалу обтічника (C_{V_0}), тобто $C_{V_2}/C_{V_0} \ll 1$ [169]. Припускаючи також, що газовий потік є нестискаючим (справедливо для $u_\infty < 2 \cdot 10^3 \dots 3 \cdot 10^3$ м/с), для теплового потоку $q_n = const$ з прикордонного шару (нульові кути атаки й ковзання) маємо такий вираз [82]:

$$q_n = \frac{f(Pr)}{\left(\frac{\rho_\delta \cdot u_\delta \cdot x}{\mu_\delta}\right)^{1/5}} \cdot \rho_\delta \cdot u_\delta \cdot C_P \cdot (T_r - T_n), \quad (4.120)$$

де $f(Pr)$ – задана функція числа Прандтля Pr , що залежить від геометричної форми тіла й режиму обтікання ($Pr = C_P \cdot \mu / \lambda_\delta$; ρ , u , μ , C_P , λ_δ – відповідно густина, швидкість уздовж координати x , коефіцієнт динамічної в'язкості, теплоємність і коефіцієнт теплопровідності газового потоку; T_n – температура поверхні обтічника; індекс “ δ ” – умови на зовнішній межі прикордонного шару; T_r – температура відновлення у прикордонному шарі, яка являє собою температуру повітря в безпосередній близькості до поверхні тіла і визначається за такою емпіричною формулою [69]:

$$T_r = T_\delta \left(1 + 0,2 \cdot \bar{r} \cdot M^2\right), \quad (4.121)$$

де \bar{r} – коефіцієнт відновлення, що характеризує частку кінетичної енергії

зовнішнього потоку повітря, яка переходить у тепломісткість при повному гальмуванні потоку (для ламінарного режиму обтікання звичайно приймають $\bar{r} = 0,85$, а для турбулентного режиму – $\bar{r} = 0,88...0,90$); M – число Маха ($M = \frac{u_\infty}{u_*}$, де u_* – швидкість розповсюдження звуку в повітрі). Далі передбачається, що для зон, близьких до критичної точки залишається справедливою рівність $u_\infty = \bar{\beta} \cdot x$, де $\bar{\beta}$ – функція тільки числа u_∞ незбуреного потоку перед ударною хвилею (для ламінарного режиму зазначене співвідношення отримане шляхом вимірювання тиску й розрахунку швидкостей). Підстановка рівності $u_\infty = \bar{\beta} \cdot x$ у (4.120) дає

$$q_n = f(Pr) \cdot \bar{\beta}^{4/5} \cdot \mu_\delta \cdot x^{3/5} \cdot C_P \cdot (T_r - T_w). \quad (4.122)$$

Підставляючи в (4.122) відомі газодинамічні співвідношення [82], одержуємо такий вираз для теплового потоку у випадку турбулентного режиму обтікання:

$$q_n = \frac{0,00042}{Pr^{2/3}} \cdot \left(\frac{\bar{\beta} \cdot R_w}{u_\infty} \right)^{4/5} \cdot \left(\frac{v_\infty}{u_\infty \cdot x_0} \right)^{1/5} \cdot \left(\frac{\rho_\delta}{\rho_\infty} \right)^{4/5} \cdot \left(\frac{\mu_\delta}{\mu_\infty} \right)^{1/5} \cdot \rho_\infty \cdot u_\infty \cdot C_P \cdot (T_r - T_w) \cdot (\sin \theta)^{3/5}, \quad (4.123)$$

Аналогічно для ламінарного режиму обтікання півсфери тепловий потік можна подати у вигляді

$$q_n = \frac{0,0083}{Pr^{2/3}} \cdot \left(\frac{\bar{\beta} \cdot R_w}{u_\infty} \right)^{1/2} \cdot \left(\frac{v_\infty}{u_\infty \cdot x_0} \right)^{1/2} \cdot \left(\frac{\rho_\delta}{\rho_\infty} \right)^{1/2} \cdot \left(\frac{\mu_\delta}{\mu_\infty} \right)^{1/2} \cdot \rho_\infty \cdot u_\infty \cdot C_P \cdot (T_r - T_w). \quad (4.124)$$

У формулах (4.123) і (4.124) вираз для $\bar{\beta}$ має вигляд [169]:

$$\bar{\beta} = \frac{u_\infty}{2 \cdot R_w} \cdot \left(\frac{8 \cdot (\gamma_\infty - 1) \cdot M^2 + 2}{(\gamma_\infty + 1) \cdot M^2} \cdot \left[1 + \frac{\gamma_\infty - 1}{2} \cdot \frac{(\gamma_\infty - 1) \cdot M^2 + 2}{2 \cdot \gamma_\infty \cdot M^2 - (\gamma_\infty - 1)} \right]^{-\frac{1}{\gamma_\infty - 1}} \right)^{1/2}. \quad (4.125)$$

Співвідношення $\frac{\rho_\delta}{\rho_\infty}$ й $\frac{\mu_\delta}{\mu_\infty}$ визначаються розрахунком тиску за методом

Ньютона й адіабатичного розширення від критичної точки уздовж поверхні обтічника (у напрямку x) [82]:

$$\frac{\rho_\delta}{\rho_\infty} = 6,35 \cdot \left(1 - \frac{1}{7 \cdot M^2}\right)^{-2,5} \cdot \left(1 + \frac{5}{M^2}\right)^{-1} \cdot \bar{P}^{-5/2}, \quad (4.126)$$

$$\frac{\mu_\delta}{\mu_\infty} = 0,447 \cdot M \cdot \left(1 + \frac{5}{M^2}\right)^{-1/2} \cdot \frac{1 + S/T_\infty}{1 + S/T_T} \cdot \bar{P}^{-3/14}, \quad (4.127)$$

де S – стала Сатерленда ($S = 110,4$ К); \bar{P} – відношення тиску на зовнішній межі прикордонного шару P_δ до тиску гальмування P_T ; T_T – температура гальмування. У роботі [82] на базі порівняння експериментальних даних отримана досить точна (відносна похибка 3...5 %) формула для визначення розподілу тиску в напрямку θ :

$$\bar{P} = 1 - (1,525 - 1,85 \cdot \bar{k}_0) \cdot (\sin\theta)^2 + (0,487 - 1,323 \cdot \bar{k}_0) \cdot (\sin\theta)^4, \quad (4.128)$$

де \bar{k}_0 – ущільнення повітря за прямим стрибком:

$$\bar{k}_0 = \frac{\gamma_\infty - 1}{\gamma_\infty + 1} + \frac{2}{(\gamma_\infty + 1) \cdot M^2}. \quad (4.129)$$

Тиск у точці гальмування визначається за формулою [82]:

$$P_T = P_\infty \cdot M^2 \cdot \frac{\gamma_\infty - 1}{2} \cdot \left[\frac{(\gamma_\infty - 1) \cdot M^2}{4 \cdot \gamma_\infty \cdot M^2 - 2 \cdot (\gamma_\infty - 1)} \right]^{\frac{1}{\gamma_\infty - 1}}. \quad (4.130)$$

Температура гальмування має вигляд:

$$T_T = T_\infty \cdot \left(1 + \frac{\gamma_\infty - 1}{2} \cdot M^2\right). \quad (4.131)$$

При розрахунках число Pr_δ для повітря можна вважати постійним і рівним 0,71, оскільки воно мало залежить від температури. Питому теплоємність повітря C_P для випадку течії ідеального газу також можна вважати постійною величиною, що дорівнює $C_P = 10^3$ Дж/кг·К.

За отриманими формулами (4.123), (4.124) були проведені розрахунки розподілів теплового потоку з прикордонного шару q_n уздовж поверхні обтічника залежно від різних умов польоту виробів (рис. 4.26 – 4.29).

З результатів розрахунків, поданих на рис. 4.26 – 4.29, випливає, що місця розташування максимальних значень теплового потоку $(q_n)_{max}$ на поверхні обтічника істотно залежать від режиму обтікання: для ламінарного режиму обтікання значення $(q_n)_{max}$ знаходяться поблизу передньої критичної точки ($\theta = 0^\circ$) обтічника; для турбулентного режиму обтікання значення $(q_n)_{max}$ уже зміщуються від $\theta = 0^\circ$ до θ_{max} .

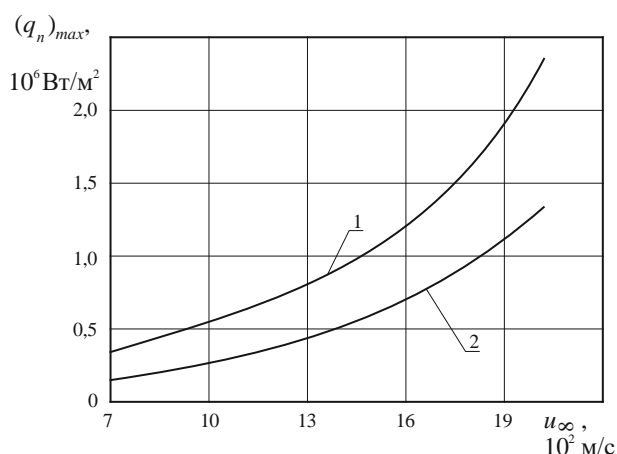
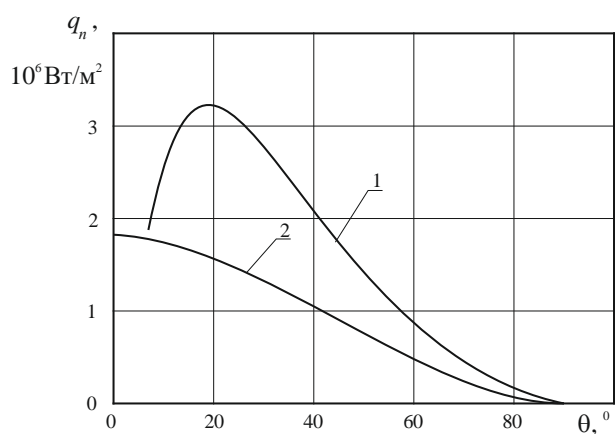


Рис. 4.26. Розподіл теплового потоку q_n уздовж поверхні обтічника при його надзвуковому обдуві потоком повітря ($T_0 = 300$ К; $R_w = 1,5 \cdot 10^{-2}$ м; $u_\infty = 2 \cdot 10^3$ м/с): 1 – турбулентний режим обтікання; 2 – ламінарний режим обтікання.

Рис. 4.27. Залежність максимальних значень теплового потоку $(q_n)_{max}$ від швидкості надзвукового обдуву потоком повітря обтічника ($T_0 = 300$ К; $R_w = 1,5 \cdot 10^{-2}$ м): 1 – турбулентний режим обтікання; 2 – ламінарний режим обтікання.

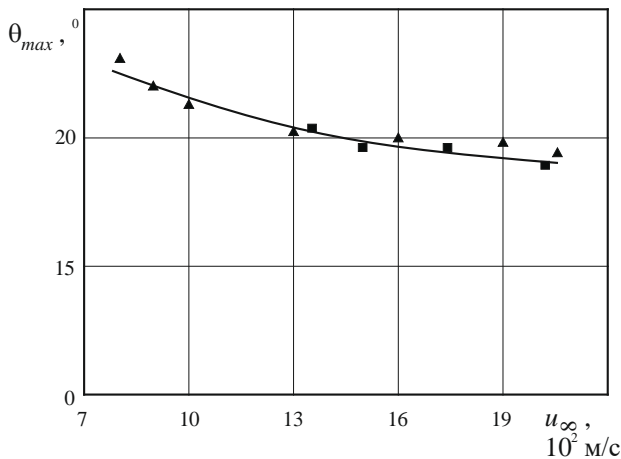


Рис. 4.28. Залежність $\theta_{max}(u_\infty)$ для різних надзвукових режимів обтікання ($T_0 = 300$ К; $R_w = 1,5 \cdot 10^{-2}$ м; турбулентний режим обтікання): \blacktriangle , \blacksquare – результати лабораторних випробувань.

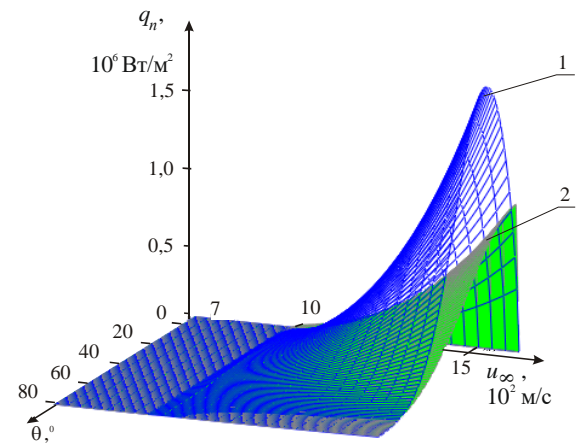


Рис. 4.29. Зображення розподілу теплового потоку $q_n(\theta, u_\infty)$ на зовнішній поверхні півсфери, яку обтікає надзвуковий потік повітря ($T_0 = 300$ К; $R_w = 1,5 \cdot 10^{-2}$ м): 1 – турбулентний режим обтікання; 2 – ламінарний режим обтікання.

При цьому зі збільшенням швидкості обдуву потоком повітря від $u_\infty = 7 \cdot 10^2$ м/с до $u_\infty = 2 \cdot 10^3$ м/с значення $(q_n)_{max}$ зростають від $0,3 \cdot 10^6$ Вт/м² до $2,3 \cdot 10^6$ Вт/м² (турбулентний режим обтікання) і від $0,2 \cdot 10^6$ Вт/м² до $1,3 \cdot 10^6$ Вт/м² (ламінарний режим обтікання). Щодо значень θ_{max} , то для ламінарного режиму обтікання $\theta_{max} = 0$ незалежно від u_∞ . При турбулентному режимі обтікання для дослідженого діапазону зміни $u_\infty = 7 \cdot 10^2 \dots 2 \cdot 10^3$ м/с значення θ_{max} лежать у межах $19 \dots 23^\circ$, тобто θ_{max} практично не змінюється, що повністю відповідає отриманим експериментальним значенням.

4.3.2. Визначення критичних значень швидкостей обдуву потоком повітря оптичних обтічників та часу їх впливу, що призводять до їх руйнування на ділянках максимальних зовнішніх термовпливів

Для визначення критичних значень швидкостей обдуву потоком повітря обтічників різної товщини для різного часу його дії необхідно розглянути

математичні моделі процесів їх нагріву в умовах надзвукового обдуву потоком повітря.

Нижче пропонуються нові математичні моделі, у яких вперше враховується вплив наступних важливих чинників: геометричної форми та розмірів обтічника; залежностей розподілів теплового потоку вздовж обтічника від режимів обтікання (ламінарного, турбулентного); температурних залежностей теплофізичних характеристик (об'ємної теплоємності, коефіцієнта теплопровідності).

Математична модель процесу нагріву обтічника малої товщини.
Приймається, що радіаційні тепловтрати з поверхні обтічника дуже малі (внаслідок малих значень температури поверхні). Таким чином, рівняння процесу нагріву півсферичного обтічника являє собою нестационарне нелінійне рівняння теплопровідності з граничними умовами 2-го роду [23, 122, 135]:

$$C_V(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}[\lambda(T) \cdot \text{grad}T], R_H < r < R_w, 0 < \theta < \pi/2, 0 < t < +\infty, \quad (4.132)$$

$$T|_{t=0} = T_0, \quad (4.133)$$

$$\lambda(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=R_w} = q_n, \quad (4.134)$$

$$\lambda(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=R_H} = 0 \text{ (умова теплоізоляції)}, \quad (4.135)$$

де div та grad – оператори теорії поля у сферичних координатах (r, θ, t) .

Враховуючи відомі вирази для вказаних операторів [58] та вводячи заміну змінних

$$\bar{T} = T^v - T_0^v, \quad (4.136)$$

вихідну систему рівнянь (4.132) – (4.135) можна звести до наступного лінеаризованого вигляду:

$$\frac{\partial \bar{T}}{\partial t} = a_0^2 \left[\frac{\partial^2 \bar{T}}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \cdot \frac{\partial \bar{T}}{\partial r} + \frac{1}{r^2 \cdot \sin \theta} \cdot \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin \theta \cdot \frac{\partial \bar{T}}{\partial \theta} \right) \right], \quad (4.137)$$

$$\bar{T}|_{t=0} = 0, \quad (4.138)$$

$$\left. \frac{\partial \bar{T}}{\partial r} \right|_{r=R_w} = \bar{q}_n, \quad (4.139)$$

$$\left. \frac{\partial \bar{T}}{\partial r} \right|_{r=R_H} = 0, \quad (4.140)$$

де

$$a_0^2 = \frac{\lambda_0}{C_{V0}}, \quad \bar{q}_n = \frac{\nu+1}{\lambda_0} q_n(\theta). \quad (4.141)$$

Розв'язок отриманої лінеаризованої задачі (4.137) – (4.140) будемо шукати у вигляді суми двох невідомих функцій

$$\bar{T}(r, \theta, t) = v(r, \theta, t) + w(r, \theta, t), \quad (4.142)$$

де функція $v(r, \theta, t)$ знаходиться з умови однорідності граничних умов (4.139), (4.140) для функції $w(r, \theta, t)$. Тому, представляючи $v(r, \theta, t)$ у вигляді

$$v(r, \theta, t) = Ar^2 + Br, \quad (4.143)$$

та враховуючи вирази (4.139), (4.140), (4.142), для знаходження коефіцієнтів A та B отримаємо наступну систему рівнянь

$$\begin{cases} 2A \cdot R_w + B = \bar{q}_n(\theta), \\ 2A \cdot R_H + B = 0. \end{cases} \quad (4.144)$$

З системи рівнянь (4.144) знаходимо

$$A = \frac{\bar{q}_n(\theta)}{2(R_w - R_H)}, \quad (4.145)$$

$$B = -\frac{2R_w \cdot \bar{q}_n(\theta)}{R_w - R_H}. \quad (4.146)$$

Підставляючи (4.145), (4.146) у (4.143), знаходимо

$$v(r, \theta, t) = \frac{\bar{q}_n(\theta) \cdot r \cdot (r - 2R_w)}{2(R_w - R_H)}. \quad (4.147)$$

Отримуємо

$$\bar{T}(r, \theta, t) = \frac{\bar{q}_n(\theta) \cdot r \cdot (r - 2R_w)}{2(R_w - R_H)} + w(r, \theta, t). \quad (4.148)$$

Враховуючи (4.137) – (4.139) та (4.148), для $w(r, \theta, t)$ отримаємо наступну систему рівнянь

$$\frac{\partial w}{\partial t} = a_0^2 \left[\frac{\partial^2 w}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \cdot \frac{\partial w}{\partial r} + \frac{1}{r^2 \cdot \sin \theta} \cdot \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin \theta \cdot \frac{\partial w}{\partial \theta} \right) \right] + F(r, \theta, t), \quad (4.149)$$

$$w|_{t=0} = f_1(r, \theta), \quad (4.150)$$

$$\left. \frac{\partial w}{\partial r} \right|_{r=R_w} = \left. \frac{\partial w}{\partial r} \right|_{r=R_H} = 0. \quad (4.151)$$

Тут

$$F(r, \theta, t) = a_0^2 \left[\frac{\partial^2 v}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \cdot \frac{\partial v}{\partial r} + \frac{1}{r^2 \cdot \sin \theta} \cdot \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin \theta \cdot \frac{\partial v}{\partial \theta} \right) \right] - \frac{\partial v}{\partial t}. \quad (4.152)$$

З врахуванням (4.147) для $F(r, \theta, t)$ отримуємо наступний вираз

$$F(r, \theta, t) = \frac{a_0^2}{r(R_w - R_H)} \left[\bar{q}_n(\theta) \cdot (3r - 2R_w) + \frac{r - 2R_w}{2 \cdot \sin \theta} \cdot \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin \theta \cdot \frac{\partial \bar{q}_n(\theta)}{\partial \theta} \right) \right]. \quad (4.153)$$

Для розв'язання отриманої лінеаризованої системи рівнянь (4.149) – (4.151) було використано стандартний метод розділення змінних Фур'є [23, 122]. В результаті, для функції $w(r, \theta, t)$ було отримано наступні формули

$$w(r, \theta, t) = \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{m=-l}^l X_{lim}(r, \theta) \cdot T_{lim}(t). \quad (4.154)$$

Тут

$$X_{lim} = \frac{2l+1}{2\pi\varepsilon} \cdot \frac{(l-m)!}{(l+m)!} \cdot E_i^{(l)}(r) \cdot E_l^{(m)}(\theta), \quad \varepsilon = \begin{cases} 1, & m \neq 0 \\ 2, & m = 0, \end{cases} \quad (4.155)$$

$$E_1^{(l)}(r) = \frac{R_1^{(l)}(r)}{\|R_1\|}, \quad E_i^{(l)}(r) = \frac{R_i^{(l)}(r) - \sum_{j=1}^{i-1} (R_i^{(l)}, E_j^{(l)}) \cdot E_j^{(l)}(r)}{\|R_i^{(l)}\|^2}, \quad i = 2, 3, \dots \quad (4.156)$$

$$\|R_i^{(l)}\|^2 = \int_{R_H}^{R_w} R_i^{(l)}(r) \cdot r^2 \cdot dr, \quad (R_i^{(l)}, E_i^{(l)}) = \int_{R_H}^{R_w} R_i^{(l)}(r) \cdot E_i^{(l)}(r) \cdot r^2 \cdot dr, \quad (4.157)$$

$$R_i^{(l)}(r) = \frac{1}{\sqrt{r}} \cdot I_{l+1/2}(\sqrt{\lambda_i} \cdot r) + \frac{\xi_i^{(l)}}{\sqrt{r}} \cdot I_{-l-1/2}(\sqrt{\lambda_i} \cdot r). \quad (4.158)$$

$$\xi_i^{(l)} = \frac{\left(\sqrt{\lambda_i} + \frac{1}{2l+1}\right) \cdot I_{-l-3/2}(\sqrt{\lambda_i} \cdot R_H) - \left(\sqrt{\lambda_i} - \frac{1}{2l+1}\right) \cdot I_{-l+1/2}(\sqrt{\lambda_i} \cdot R_H)}{\left(\sqrt{\lambda_i} - \frac{1}{2l+1}\right) \cdot I_{l-1/2}(\sqrt{\lambda_i} \cdot R_H) - \left(\sqrt{\lambda_i} + \frac{1}{2l+1}\right) \cdot I_{l+1/2}(\sqrt{\lambda_i} \cdot R_H)}, \quad (4.159)$$

де λ_i ($i = 1, 2, \dots$) знаходяться з наступного рівняння:

$$\begin{aligned} & \frac{\left(\sqrt{\lambda} + \frac{1}{2l+1}\right) \cdot I_{-l-3/2}(\sqrt{\lambda} \cdot R_w) - \left(\sqrt{\lambda} - \frac{1}{2l+1}\right) \cdot I_{-l+1/2}(\sqrt{\lambda} \cdot R_w)}{\left(\sqrt{\lambda} - \frac{1}{2l+1}\right) \cdot I_{l-1/2}(\sqrt{\lambda} \cdot R_w) - \left(\sqrt{\lambda} + \frac{1}{2l+1}\right) \cdot I_{l+1/2}(\sqrt{\lambda} \cdot R_w)} = \\ & = \frac{\left(\sqrt{\lambda} + \frac{1}{2l+1}\right) \cdot I_{-l-3/2}(\sqrt{\lambda} \cdot R_H) - \left(\sqrt{\lambda} - \frac{1}{2l+1}\right) \cdot I_{-l+1/2}(\sqrt{\lambda} \cdot R_H)}{\left(\sqrt{\lambda} - \frac{1}{2l+1}\right) \cdot I_{l-1/2}(\sqrt{\lambda} \cdot R_H) - \left(\sqrt{\lambda} + \frac{1}{2l+1}\right) \cdot I_{l+1/2}(\sqrt{\lambda} \cdot R_w)}, \quad (4.160) \end{aligned}$$

$$I_\nu(x) = \left(\frac{x}{2}\right)^\nu \cdot \sum_{j=0}^{\infty} \frac{(-1)^j}{j! \Gamma(\nu + j + 1)} \cdot \left(\frac{x}{2}\right)^{2j} - \text{функція Беселя } \nu\text{-го порядку}$$

$$(x - \text{довільна змінна}). \quad (4.161)$$

Звідси при $\nu = \pm l - 1/2$ отримуємо [135]

$$I_{l-1/2}(x) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \cdot x^{l+1/2} \cdot \left(-\frac{1}{x} \cdot \frac{d}{dx}\right)^{l+1} \cdot \cos x, \quad (4.162)$$

$$I_{-l-1/2}(x) = (-1)^{l+1} \cdot x^{l+1/2} \cdot \left(-\frac{1}{x} \cdot \frac{d}{dx}\right)^{l+1} \cdot \sin x. \quad (4.163)$$

При цьому Y_l^m – сферичні функції, які є розв'язками наступної задачі [135]:

$$\frac{1}{\sin \theta} \cdot \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin \theta \cdot \frac{\partial Y}{\partial \theta} \right) + \mu Y = 0, \quad (4.164)$$

$\mu = l(l+1)$, $l = 0, 1, 2, \dots$ (в іншому випадку розв'язки необмежені з особливостями; при цьому $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm l$). Зауважимо, що

$$Y_l^0 = P_l^0(\cos \theta) = P_l(\cos \theta), \quad Y_{\pm l}^k = P_l^k(\cos \theta), \quad (4.165)$$

$$\text{де } P_l^k(x) = (1-x^2)^{k/2} \cdot \frac{d^k}{dx^k} P_l(x), \quad 0 \leq k \leq l, \quad (4.166)$$

$$P_l(x) = \frac{1}{2^n \cdot n!} \cdot \frac{d^l}{dx^l} \left[(x^2 - 1)^n \right], \quad (4.167)$$

$$\int_{-1}^1 P_n(x) \cdot P_m(x) \cdot dx = \begin{cases} 0, & n \neq m \\ \frac{2}{2n+1}, & n = m. \end{cases} \quad (4.168)$$

Далі для функції $T_{lim}(t)$ отримуємо

$$T_{lim}(t) = a_{lim} \cdot e^{-\lambda_i^{(l)} \cdot t} + \int_0^t c_{lim}(\tau) \cdot e^{-\lambda_i^{(l)} \cdot (t-\tau)} d\tau, \quad (4.169)$$

де

$$a_{lim} = \int_{R_H}^{R_w} \int_0^\pi \bar{T}|_{t=0} \cdot X_{lim}(r, \theta) \cdot r^2 \cdot \sin \theta \cdot dr d\theta, \quad (4.170)$$

$$c_{lim} = \int_{R_H}^{R_w} \int_0^\pi F(r, \theta, t) \cdot X_{lim}(r, \theta) \cdot r^2 \cdot \sin \theta \cdot dr d\theta. \quad (4.171)$$

При цьому, враховуючи початкову умову (4.138), отримуємо, що $a_{lim} = 0$.

Остаточно, розв'язок вихідної задачі (4.132) – (4.135) отримуємо у вигляді

$$T(r, \theta, t) = \left\{ T_0^{\nu+1} + \frac{(\nu+1) \cdot q_w(\theta) \cdot r \cdot (r - 2R_w)}{2(R_w - R_H)} + \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{m=-l}^l \left[\frac{2l+1}{2\pi\varepsilon} \cdot \frac{(l-m)!}{(l+m)!} \right]^2 \cdot E_i^{(l)}(r) \cdot Y_l^m(\theta) \cdot \int_{R_H}^{R_w} \int_0^\pi F(r, \theta, t) \cdot E_i^{(l)}(r) \cdot Y_l^m(\theta) \cdot e^{-\lambda_i^{(l)}(t-\tau)} \cdot r^2 \sin \theta \cdot dr d\theta d\tau \right\}^{\frac{1}{\nu+1}}, \quad (4.172)$$

де функції $q_w(\theta)$, $E_i^{(l)}(r)$, $Y_l^m(\theta)$ та параметри $\lambda_i^{(l)}$ знаходяться на основі формул (4.123), (4.124), (4.153), (4.156) – (4.160), (4.162), (4.163), (4.165) – (4.167). При цьому при обчисленнях по формулам типу (4.167) (дво- та тривимірні теплові задачі) обмежуються у рядах з нескінченними межами 4...6 членами внаслідок їх швидкої збіжності (відносна похибка не перевищує 5...8 %) [135].

Математична модель процесу нагріву обтічника великої товщини. В даному випадку виконується вказана вище умова (4.119): $\delta > H = R_w - R_H$. Також приймається, що радіаційні тепловтрати з поверхні обтічника дуже малі.

Тоді рівняння математичної моделі нагріву півсферичного обтічника в областях, де тепловий потік q_n з прикордонного шару досягає максимальних значень $(q_n)_{max}$, мають наступний вигляд [23, 122]:

$$\frac{\partial \bar{T}(r,t)}{\partial t} = a^2 \cdot \left(\frac{\partial^2 \bar{T}(r,t)}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \cdot \frac{\partial \bar{T}(r,t)}{\partial r} \right), \quad 0 < r < R_w, \quad t > 0, \quad (4.173)$$

$$\bar{T}|_{t=0} = f(r), \quad (4.174)$$

$$\left. \frac{\partial \bar{T}}{\partial r} \right|_{r=R_w} = \frac{1}{\lambda} \cdot (q_n)_{max}, \quad (4.175)$$

$$\left. \frac{\partial \bar{T}}{\partial r} \right|_{r=0} = 0, \quad (4.176)$$

де $\bar{T} = T^{r+1}$, $f(r)$ – деякий початковий розподіл температури по товщині обтічника; $\bar{\lambda} = \frac{\lambda_0}{\lambda + 1}$.

Для розв'язання задачі (4.172) – (4.176) використовуємо наступне кінцеве інтегральне перетворення Фур'є [23, 135]:

$$r \cdot \bar{T}(r,t) \rightarrow F_p(p,t) = \int_0^{R_w} r \cdot \bar{T}(r,t) \cdot \frac{\sin(p,r)}{p} dr, \quad (4.177)$$

де значення параметра p знаходяться з рівняння:

$$\sin(p \cdot R_w) - p \cdot R_w \cdot \cos(p,r) = 0. \quad (4.178)$$

Зворотний перехід від зображення $F_p(p,t)$ до його оригіналу $\bar{T}(r,t)$ здійснюється по формулі

$$F_p(p,t) \rightarrow \bar{T}(r,t) = \frac{3}{R_w^3} \cdot F_p(0,t) + \frac{2}{R_w} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{p_n}{\sin^2(p_n \cdot R_w)} \cdot \frac{\sin(p_n \cdot r)}{r} \cdot F_s(p,t). \quad (4.179)$$

Застосуємо перетворення (4.177) до рівняння (4.173) і врахуємо умову (4.176), тоді

$$\int_0^{R_w} \left(\frac{\partial^2 \bar{T}(r,t)}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \cdot \frac{\partial \bar{T}(r,t)}{\partial r} \right) \cdot r \cdot \frac{\sin(p,r)}{p} dr = \left(\frac{\partial \bar{T}(r,t)}{\partial r} \cdot \frac{\sin(p,r)}{p} \right) \Big|_{r=R_w} -$$

$$-p^2 \cdot F_p(p,t). \quad (4.180)$$

З умови (4.175) випливає

$$\int_0^{R_w} \left(\frac{\partial^2 \bar{T}(r,t)}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \cdot \frac{\partial \bar{T}(r,t)}{\partial r} \right) \cdot r \cdot \frac{\sin(p,r)}{p} dr = \frac{(q_w)_{max}}{\lambda} \cdot R_w \cdot \frac{\sin(p \cdot R_w)}{p} - p^2 \cdot F_p(p,t). \quad (4.181)$$

Якщо тепер помножити всі члени рівняння (4.174) на $r \cdot \frac{\sin(p \cdot r)}{p}$ та

проінтегрувати по r в межах від 0 до R_w , то на підставі (4.181) отримаємо

$$\frac{dF_p(p,t)}{dt} + a_0^2 \cdot p^2 \cdot F_p(p,t) = \frac{a_0^2}{\lambda} \cdot R_w \cdot \frac{\sin(p \cdot R_w)}{p} \cdot (q_w)_{max}. \quad (4.182)$$

Розв'язок рівняння (4.182) має вигляд [23, 122, 135]

$$F_p(p,t) = e^{-a_0^2 \cdot p^2 \cdot t} \cdot \left[c(p) + \frac{a_0^2}{\lambda} \cdot R_w \cdot \frac{\sin(p \cdot R_w)}{p} \cdot \int_0^t (q_w)_{max} \cdot e^{a_0^2 \cdot p^2 \cdot \tau} d\tau \right]. \quad (4.183)$$

Для визначення $c(p)$ скористаємося початковою умовою (4.174):

$$c(p) = \int_0^{R_w} r \cdot f(r) \cdot \frac{\sin(p \cdot r)}{r} \cdot dr. \quad (4.184)$$

Тоді розв'язок (4.183) має вигляд

$$F_p(p,t) = e^{-a_0^2 \cdot p^2 \cdot t} \cdot \left[\int_0^{R_w} r \cdot f(r) \cdot \frac{\sin(p \cdot r)}{p} \cdot dr + \frac{a_0^2}{\lambda} \cdot R_w \cdot \frac{\sin(p,r)}{p} \cdot \int_0^t (q_w)_{max} \cdot e^{a_0^2 \cdot p^2 \cdot \tau} \cdot d\tau \right]. \quad (4.185)$$

Для переходу до оригіналу заздалегідь знайдемо

$$F_p(0,t) = \int_0^{R_w} r^2 \cdot f(r) \cdot dr + \frac{a_0^2}{\lambda} \cdot \int_0^t (q_w)_{max} \cdot d\tau. \quad (4.186)$$

Підставимо значення $F_p(0,t)$ та $F_p(p,t)$ у формулу (4.179), тоді отримаємо

розв'язок у вигляді

$$\begin{aligned} \bar{T}(r,t) = & \frac{3}{R_w^3} \cdot \int_0^{R_w} r^2 \cdot f(r) \cdot dr + \frac{3 \cdot a_0^2}{\lambda \cdot R_w} \cdot \int_0^t (q_w)_{max} \cdot d\tau + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{p_n}{\sin^2(p_n \cdot R_w)} \cdot \\ & \cdot \frac{\sin(p_n \cdot r)}{p_n} \cdot e^{-a_0^2 \cdot p_n^2 \cdot t} \cdot \frac{2}{R_w} \cdot \int_0^{R_w} r \cdot f(r) \cdot \frac{\sin(p_n \cdot r)}{p_n} \cdot dr + \frac{a_0^2}{\lambda} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{R_w p_n \cdot \sin(p_n \cdot R_w)}{p_n \cdot \sin^2(p_n \cdot R_w)}. \end{aligned}$$

$$\cdot \frac{\sin(p_n \cdot r)}{r} \cdot e^{-a_0^2 \cdot p_n^2 \cdot t} \cdot \frac{2}{R_w} \cdot \int_0^t (q_w)_{max} \cdot e^{a_0^2 \cdot p_n^2 \cdot \tau} \cdot d\tau. \quad (4.187)$$

Позначаючи $\mu_n = p_n \cdot R_w$ та використовуючи рівняння

$$\sin \mu = \mu \cdot \cos \mu, \quad (4.188)$$

розв'язками якого є нескінченний ряд чисел $\mu_1 = 7,7251$; $\mu_2 = 10,9037$; $\mu_3 = 14,0656$; $\mu_4 = 17,2203$ і т. д. [135], отримаємо рішення в остаточному вигляді

$$\begin{aligned} \bar{T}(r,t) = & \frac{3}{R_w^3} \cdot \int_0^{R_w} r^2 \cdot f(r) \cdot dr + \frac{3 \cdot a_0^2}{\lambda \cdot R_w} \cdot \int_0^t (q_n)_{max} \cdot d\tau + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 \cdot R_w}{\mu_n^2 \cdot \cos(\mu_n)} \cdot \\ & \cdot \frac{\mu_n \cdot \sin\left(\frac{\mu_n \cdot r}{R_w}\right)}{r} \cdot e^{-\left(\frac{\mu_n \cdot a_0}{R_w}\right)^2 \cdot t} \cdot \int_0^t (q_n)_{max} \cdot e^{-\left(\frac{\mu_n \cdot a_0}{R_w}\right)^2 \cdot \tau} \cdot d\tau. \end{aligned} \quad (4.189)$$

Для випадку (реалізованого на практиці), що розглядається нами, коли

$$T(r,0) = f(r) \equiv T_0 \quad (4.190)$$

$$(q_n)_{max} = (q_n)_{max}(M), \quad (4.191)$$

одержуємо наступний розв'язок вихідної задачі:

$$\begin{aligned} T(r,t) = & \left\{ T_0^{\nu+1} + \frac{(q_w)_{max}(M) \cdot R_w \cdot (\nu+1)}{\lambda_0} \cdot \left[\frac{3 \cdot a_0^2 \cdot t}{R_w^2} - \frac{3 \cdot R_w^2 - 5 \cdot r^2}{10 \cdot R_w^2} - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{\mu_n^2 \cdot \cos(\mu_n)} \cdot \right. \right. \\ & \left. \left. \cdot \frac{R_w \cdot \sin\left(\frac{\mu_n \cdot r}{R_w}\right)}{r \cdot \mu_n} \cdot e^{-\left(\frac{\mu_n \cdot a_0}{R_w}\right)^2 \cdot t} \right]^{\frac{1}{\nu+1}} \right\}. \end{aligned} \quad (4.192)$$

Знаходження термопружних напружень у зонах максимального термовпливу на поверхні обтічника. Як показують результати експериментальних досліджень [39, 49, 62], руйнування обтічників відбувається на ділянках їх поверхонь, де температура досягає максимального значення $(T_n)_{max}$, тобто у зонах максимального зовнішнього термовпливу. Тому, в першу чергу, важливо вміти прогнозувати значення термопружних

напружень в зонах, де $T_n = (T_n)_{max}$. Враховуючи також, що довжина ділянок поверхні обтічника, що піддаються максимальним зовнішнім термовпливам, мають малу кривизну ($\Delta\theta_{max} \approx 4^\circ$, див. рис. 4.28, 4.29), їх можна розглядати як плоскі шари товщиною $H = R_w - R_H$ (відносна похибка при заміні дуги хордою, що її стягує, при центральному куті $\Delta\theta_{max} \approx 4^\circ$ радіусах R_w та R_H складає менше 1 %), по глибині яких має місце розподіл температури

$$\bar{T}(r,t) = (T_w)_{max}(r,t) = T(r,\theta,t)|_{\theta=\bar{\theta}_{max}}, \quad (4.193)$$

де в якості $\bar{\theta}_{max}$ прийнято його середнє значення з встановленого діапазону зміни $\theta_{max} = 19^\circ \dots 23^\circ$ (див. рис. 4.28, 4.29).

Виникнення термопружних напружень у даному випадку пов'язано з градієнтом температури по товщині (вздовж r) обтічника. Тоді компоненти термопружних напружень можуть бути визначені на основі припущень, що має місце плоский термонапружений стан та плоскі перетини, перпендикулярні до поверхні обтічника, яка нагрівається, залишаються такими ж у процесі нагріву. В цьому випадку для одновимірного температурного поля $\bar{T}(r,t)$ у необмеженому, вільному від поверхневих сил плоскому шарі з незакріпленими краями термопружні напруження $\sigma(r,t)$ знаходяться з наступного рівняння сумісності [71, 137]:

$$\frac{d}{dr^2} \left[\sigma(r,t) + \frac{\alpha_T(\bar{T}) \cdot E(\bar{T})}{\bar{\nu}} \cdot \bar{T}(r,t) \right] = 0, \quad (4.194)$$

де $\alpha_T(\bar{T})$ – температурний коефіцієнт лінійного розширення (K^{-1}); $E(\bar{T})$ – модуль Юнга (H/m^2); $\bar{\nu}$ – коефіцієнт Пуасона.

Розв'язуючи рівняння (4.194), знаходимо

$$\sigma(r,t) = -\frac{\alpha_T \cdot E}{1-\bar{\nu}} \cdot \bar{T}(r,t) + C_1 + C_2. \quad (4.195)$$

Постійні C_1 та C_2 вибираються з наступних умов: для будь-якого температурного поля $\bar{T}(r,t)$ результуюча сила та результуючий момент на

одиницю довжини, які обумовлені цими напруженнями, на краях плоского шару рівні нулю, тобто

$$\int_0^H \sigma(r,t) dr = 0, \quad (4.196)$$

$$\int_0^H \sigma(r,t) \cdot r dr = 0. \quad (4.197)$$

Підставляючи (4.195) у (4.196) та (4.197), отримуємо наступну систему рівнянь для знаходження C_1 та C_2 :

$$\int_0^H \left[-\frac{\alpha_T \cdot E}{1-\nu} \cdot \bar{T}(r,t) + C_1 + C_2 r \right] dr = 0, \quad (4.198)$$

$$\int_0^H \left[-\frac{\alpha_T \cdot E}{1-\nu} \cdot \bar{T}(r,t) + C_1 + C_2 r \right] r dr = 0. \quad (4.199)$$

Обраховуючи інтеграли (4.198) та (4.199), приходимо до системи лінійних рівнянь відносно C_1 та C_2 :

$$\begin{cases} 2H \cdot C_1 + H^2 \cdot C_2 = \frac{2\alpha_T \cdot E}{1-\nu} \cdot \int_0^H \bar{T}(r,t) dr = 0, \end{cases} \quad (4.200)$$

$$\begin{cases} 3H^2 \cdot C_1 + 2H^3 \cdot C_2 = \frac{6\alpha_T \cdot E}{1-\nu} \cdot \int_0^H \bar{T}(r,t) \cdot r dr = 0. \end{cases} \quad (4.201)$$

Розв'язуючи систему рівнянь (4.200) та (4.201), знаходимо C_1 та C_2 :

$$C_1 = \frac{\alpha_T \cdot E}{1-\nu} \cdot \left[\frac{4}{H} \cdot \int_0^H \bar{T}(r,t) dr - \frac{6}{H^2} \cdot \int_0^H \bar{T}(r,t) \cdot r dr \right], \quad (4.202)$$

$$C_2 = \frac{\alpha_T \cdot E}{1-\nu} \cdot \left[-\frac{6}{H^2} \cdot \int_0^H \bar{T}(r,t) dr - \frac{12}{H^3} \cdot \int_0^H \bar{T}(r,t) \cdot r dr \right]. \quad (4.203)$$

Підставляючи C_1 та C_2 у (4.195), остаточно отримуємо

$$\sigma(r,t) = \frac{\alpha_T \cdot E}{1-\nu} \cdot \left[-\bar{T}(r,t) + \frac{2}{H^2} \cdot (2H - 3r) \cdot \int_0^H \bar{T}(r,t) dr - \frac{6}{H^3} \cdot (H - 2r) \cdot \int_0^H \bar{T}(r,t) \cdot r dr \right]. \quad (4.204)$$

Визначення критичних значень параметрів зовнішнього термовпливу на поверхню обтічників в залежності від їх товщини.

Обтічник малої товщини. З використанням відомих фізико-технічних даних (див. розділ 2) та пакетів прикладних програм (див. додатки А – Г) для оптичних керамік КО1, КО2, КО5, які широко використовуються на практиці, було проведено розрахунки розподілів температури вздовж поверхні обтічника та по його товщині для різних швидкостей обдуву потоком повітря, режимів обтікання та часів теплового впливу (рис. 4.30 – 4.34). З результатів розрахунків, представлених на рис. 4.30 – 4.34, випливає, що розподіл температури вздовж поверхні обтічника найбільш суттєво залежить від режиму обтікання: для ламінарного режиму – максимум температури знаходиться поблизу його передньої критичної точки ($\theta = 0^0$, $u_\infty = 0$), а для турбулентного режиму – цей максимум зміщений вздовж поверхні обтічника на відстань, яка відповідає $\theta_{max} = 17...21^0$, що повністю відповідає розташуванню максимуму зовнішнього теплового потоку з прикордонного шару (див. рис. 4.28, 4.29). При цьому зміна швидкості обдуву потоком повітря та часу його теплового впливу не впливають на розташування максимуму температури. Збільшення швидкості потоку повітря від $5 \cdot 10^2$ м/с до $2 \cdot 10^3$ м/с та часу його теплового впливу до 16 с призводить до зростання максимальної температури поверхні обтічника $(T_n)_{max}$ в 1,5...2,8 рази для ламінарного режиму обтікання та в 2,6...4,7 рази – для турбулентного режиму. При збільшенні відстані від поверхні обтічника до його нижнього боку максимальна температура зменшується для всіх режимів обтікання (в 1,2...1,3 рази для ламінарного режиму обтікання та в 1,4...1,5 рази для турбулентного режиму обтікання).

Таким чином, максимальна температура поверхні обтічника для всіх розглянутих оптичних керамік (аналогічно й температура нижнього боку) у випадку турбулентного режиму обтікання значно перевищує її значення для випадку ламінарного режиму обтікання (наприклад, для $u_\infty = 10^3...2 \cdot 10^3$ м/с та $t = 5...10$ с – у 2,5...3,5 рази).

Зіставлення результатів розрахунків та експериментальними даними (див. розділ 3) показує, що різниця між ними не перевищує 5...7 %.

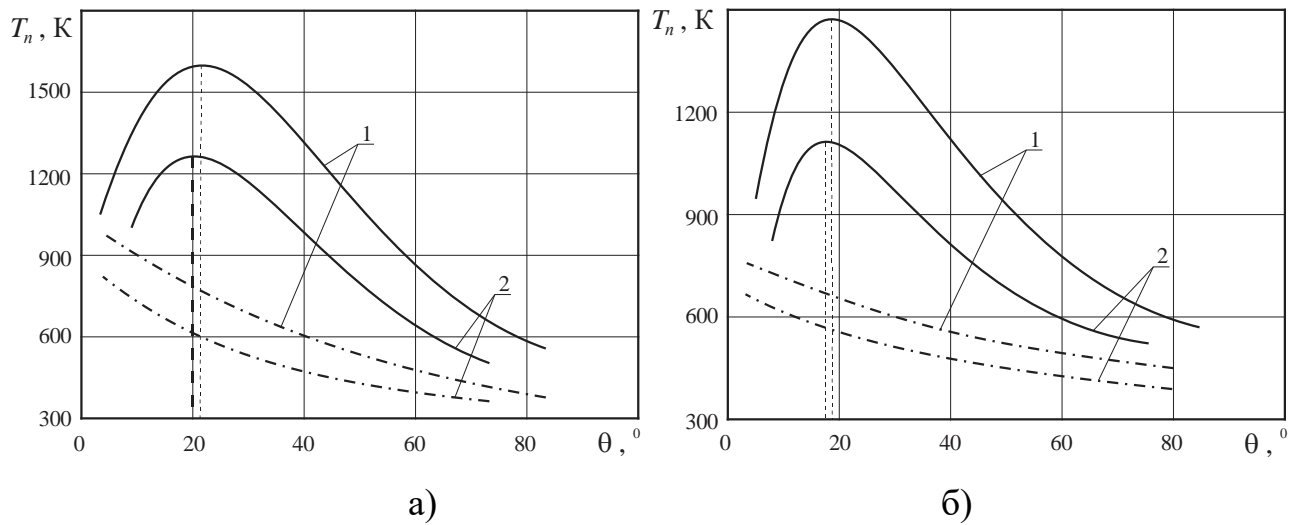


Рис. 4.30. Розподіл температури вздовж поверхні обтічника з оптичних керамік КО2 (а) та КО1 (б) для різних швидкостей обдуву потоком повітря ($T_0 = 300$ К, $R_w = 0,02$ м, $R_H = 0,015$ м, $t = 16$ с): 1 – $u_\infty = 1,5 \cdot 10^3$ м/с; 2 – $u_\infty = 10^3$ м/с; — — турбулентний режим обтікання; — · — · — · — — ламінарний режим обтікання.

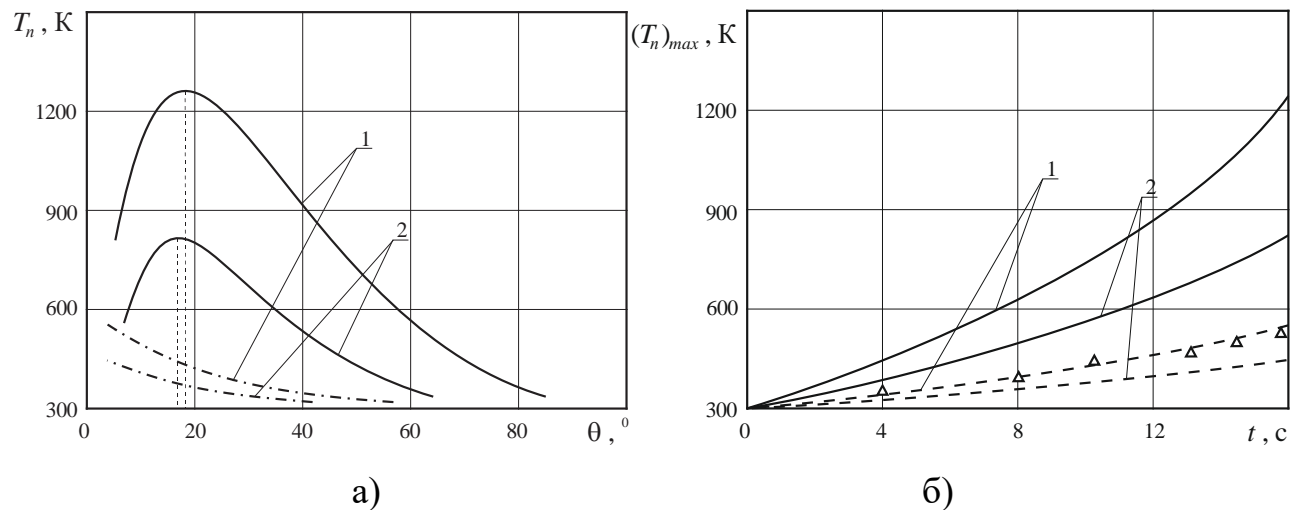


Рис. 4.31. Вплив швидкості обдуву потоком повітря та часу його термовпливу на розподіл температури вздовж поверхні обтічника з оптичної кераміки КО5 (а) та значення температури в зонах його максимального нагріву (б): Δ – експериментальні дані (решта позначень аналогічні рис. 4.30).

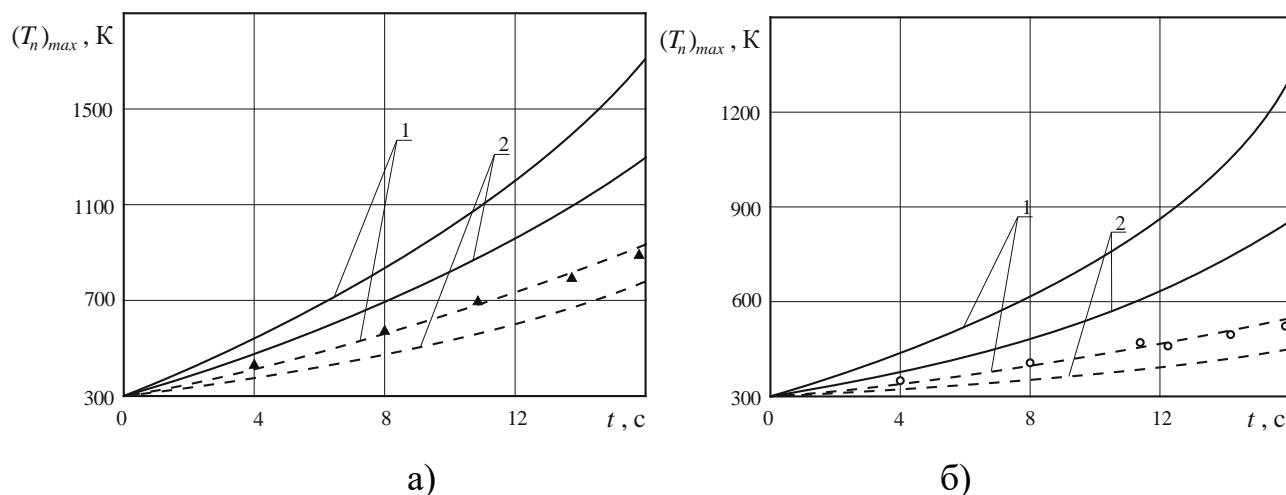


Рис. 4.32. Залежність максимальної температури на поверхні обтічника з оптичних керамік КО2 (а) та КО1 (б) від часу зовнішнього теплового впливу для різних швидкостей обдуву потоком повітря: \blacktriangle , \circ – експериментальні дані (решта позначень аналогічні рис. 4.30).

По формулі (4.204) за допомогою вказаних вище пакетів прикладних програм та необхідних фізико-технічних параметрів обтічника (див. розділ 2) було проведено розрахунки розподілів $\sigma(r,t)$ у зонах максимального термовпливу на його поверхні в залежності від швидкості обдуву потоком повітря, різних режимів обтікання та часів теплового впливу (рис. 4.35 – 4.43).

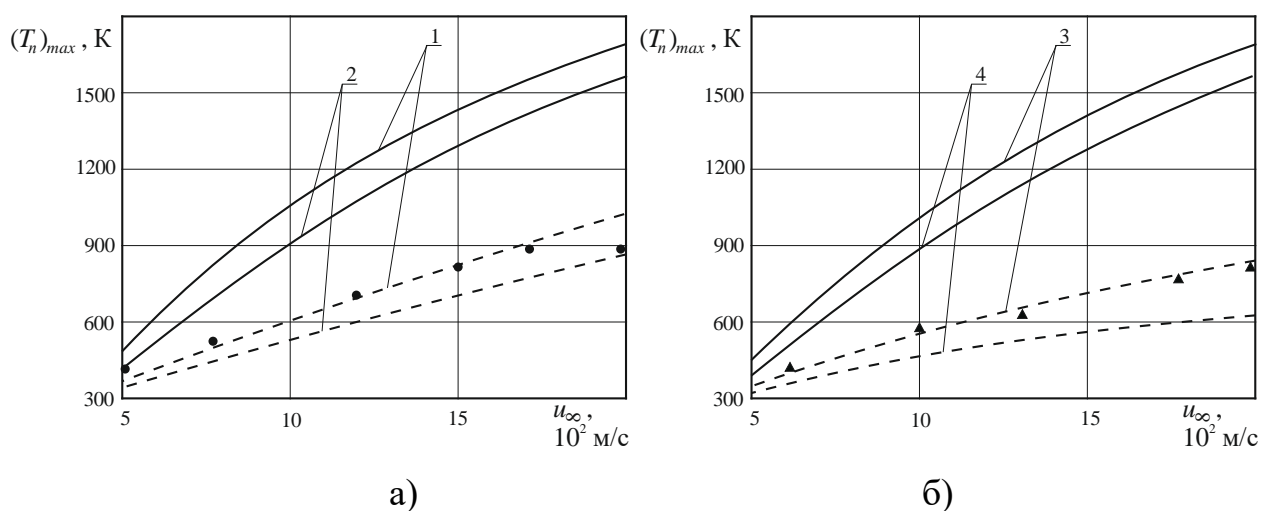


Рис. 4.33. Залежність максимальної температури на поверхні обтічника з оптичних керамік від швидкості обдуву потоком повітря: а) – КО2 (1), КО1 (2), $t = 10$ с; б) – КО1 (3), КО5 (4), $t = 16$ с; \bullet , \blacktriangle – експериментальні дані (решта позначень аналогічні 4.30).

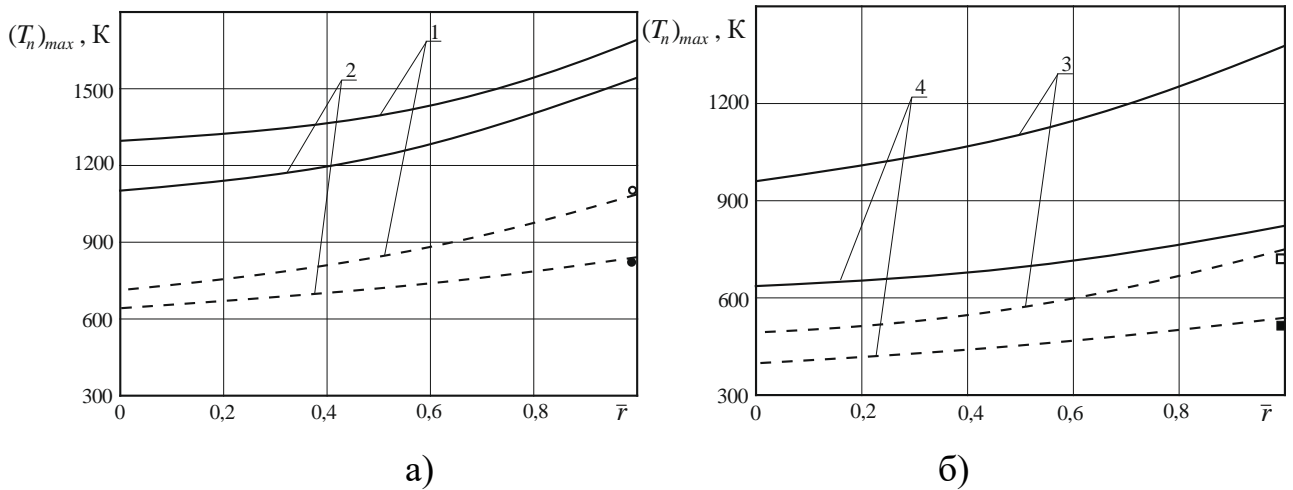


Рис. 4.34. Розподіл максимальної температури по товщині обтічника з різних оптичних керамік ($\bar{r} = \frac{r - R_H}{R_w - R_H}$, $T_0 = 300$ К, $R_w = 0,02$ м, $R_H = 0,015$ м, $t = 16$ с, $u_\infty = 2 \cdot 10^3$ м/с): а) – КО2 (1), КО1 (2); б) – КО5, 3 – $u_\infty = 1,5 \cdot 10^3$ м/с; 4 – $u_\infty = 10^3$ м/с; ●, ○, □, ■ – експериментальні дані (решта позначень аналогічні рис. 4.30).

Аналіз розрахунків, представлених на рис. 4.35 – 4.43, показує, що термопружні напруження в зонах максимального зовнішнього термовпливу розподілені по товщині обтічника з оптичних керамік наступним чином: на поверхні обтічника та у його поверхневих шарах існують стискаючі напруження ($\sigma < 0$, $|\sigma|_{max}$ досягає значень 10^8 Н/м²... $3,5 \cdot 10^8$ Н/м²), а на відстанях $r = R_w$ – напруження розтягу ($\sigma > 0$, $|\sigma|_{max}$ досягає значень $0,5 \cdot 10^8$ Н/м²... $1,5 \cdot 10^8$ Н/м²); при цьому, для турбулентного режиму обтікання $|\sigma|_{max}$ перевищує його значення для ламінарного режиму обтікання у 4...5 разів. При збільшенні швидкості обдуву потоком повітря від $5 \cdot 10^2$ м/с до $2 \cdot 10^3$ м/с величина $|\sigma|_{max}$ зростає як для ламінарного, так й для турбулентного режимів обтікання до значення $\sigma^* = |\sigma(u_\infty^*)|$ (σ^* – граничне значення термопружних напружень, при якому руйнується матеріал); u_∞^* – значення швидкості обдуву потоком повітря, при якій величина $|\sigma|_{max}$ стає рівною σ^*). При цьому, величина u_∞^* суттєво залежить як від режиму обтікання півсфери, так й від часу

зовнішнього теплового впливу t : наприклад, при збільшенні t від 5 с до 35 с значення u_∞ зменшуються у 1,4...1,5 рази (турбулентний режим обтікання); для всього дослідженого діапазону зміни u_∞ у разі ламінарного режиму обтікання значення u_∞^* відсутні.

Зіставлення розглянутих вище результатів розрахунків з результатами проведених експериментальних досліджень (див. розділ 3) показало, що вони повністю адекватні один одному (відносна похибка не перевищує 5...7 % замість 8...12 % у існуючих моделей).

Обтічник великої товщини. З використанням вказаних вище пакетів прикладних програм по формулах (4.123), (4.124) і (4.204) були проведені розрахунки температурних полів для оптичної кераміки КО5, що використовується на практиці, при різних швидкостях обдуву потоком повітря, різних режимах обтікання, часах теплового впливу і різних відстанях по товщині обтічника (рис. 4.44 – 4.48).

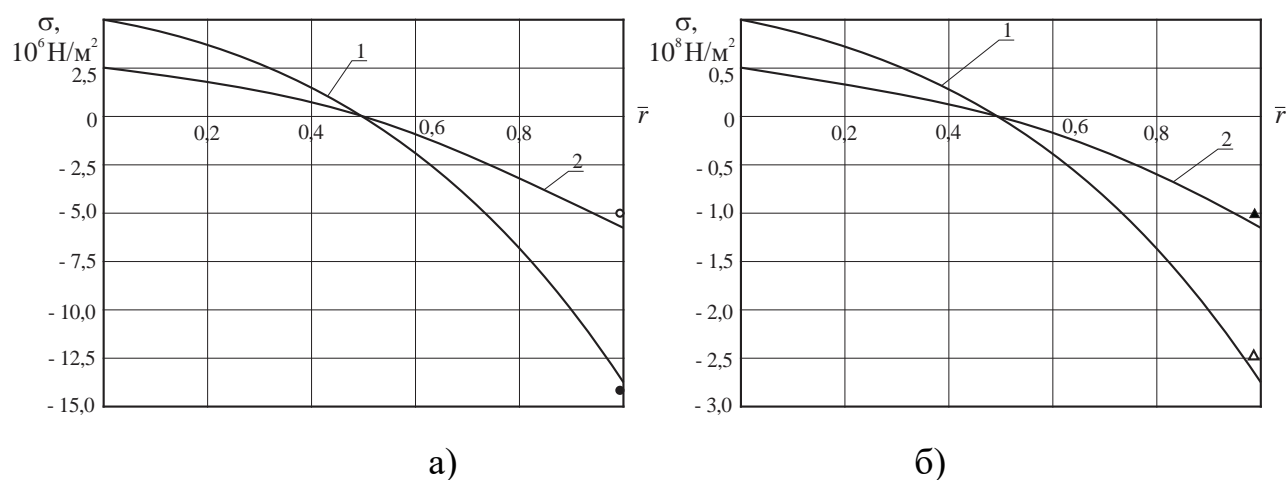


Рис. 4.35. Розподіл термопружних напружень по товщині обтічника з оптичної кераміки КО2 у зонах максимального зовнішнього термовпливу для турбулентного (а) та ламінарного (б) режимів обтікання ($T_0 = 300$ К, $R_w = 0,02$ м, $R_H = 0,015$ м, $t = 10$ с): 1 – $u_\infty = 1,5 \cdot 10^3$ м/с; 2 – $u_\infty = 10^3$ м/с; ●, ○, Δ, ▲ – експериментальні дані.

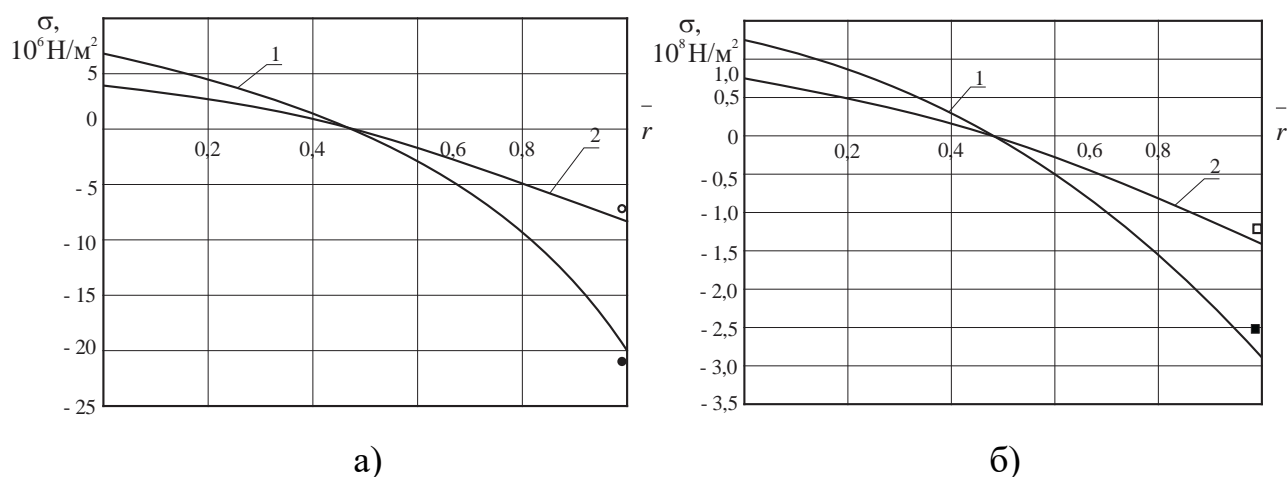


Рис. 4.36. Розподіл термопружних напружень по товщині обтічника з оптичної кераміки КО1 в зонах максимального зовнішнього термовпливу для ламінарного (а) та турбулентного (б) режимів обтікання: ●, ○, □, ■ – експериментальні дані (решта позначень аналогічні рис. 4.35).

З результатів розрахунків, представлених на рис. 4.44 – 4.48, витікає, що температура в зонах максимального зовнішнього термовпливу істотно залежить від швидкості обдуву потоком повітря і режиму обтікання: наприклад, для часів зовнішнього теплового впливу $t = 10...15$ с із збільшенням швидкості обдуву від $7 \cdot 10^2$ м/с до $2 \cdot 10^3$ м/с значення температури на поверхні обтічника зростає в 2,5...3 рази для ламінарного режиму обтікання і у 3,5...4 рази для турбулентного режиму обтікання. Окрім цього, збільшення часу зовнішнього теплового впливу призводить у всіх випадках тільки до зростання температури в будь-якій точці по товщині обтічника. При збільшенні відстані від поверхні обтічника температура знижується для всіх режимів обтікання, що розглядаються (у 1,1...1,2 рази для ламінарного режиму обтікання і у 1,3...1,4 рази для турбулентного режиму обтікання). Таким чином, температура в зонах максимального зовнішнього теплового впливу на поверхні обтічника у разі турбулентного режиму його обтікання значно перевищує температуру в цих зонах для випадку ламінарного режиму обтікання (наприклад, для $u_{\infty} = 1,5 \cdot 10^3...2 \cdot 10^3$ м/с у 1,2...1,6 рази).

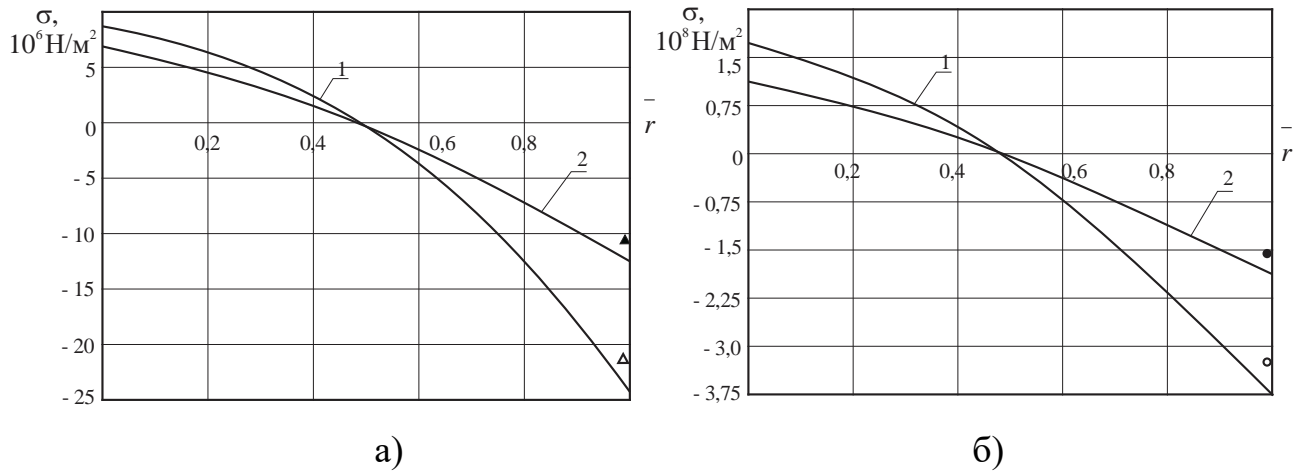


Рис. 4.37. Розподіл термопружних напружень по товщині обтічника з оптичної кераміки КО5 в зонах максимального зовнішнього термовпливу для ламінарного (а) та турбулентного (б) режимів обтікання: ●, ○, Δ, ▲ – експериментальні дані (решта позначень аналогічні рис. 4.35).

По формулі (4.204), а також за допомогою пакетів прикладних програм, були проведені розрахунки розподілів $\sigma(r,t)$ в зонах, що розглядаються, на поверхні обтічника з оптичної кераміки КО5 залежно від швидкості обдуву потоком повітря, різних режимів обтікання і часів теплового впливу (рис. 4.49 – 4.54).

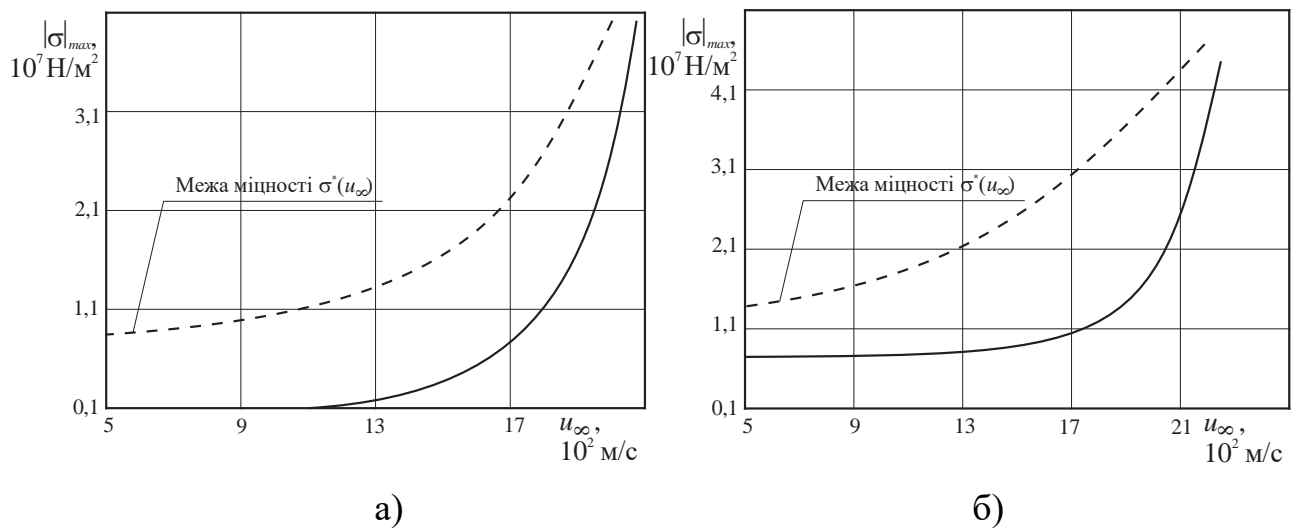


Рис. 4.38. Залежність модуля максимальних термопружних напружень $|\sigma|_{max}$ в зоні максимального термовпливу на поверхні обтічника з оптичної кераміки

КО2 (а) та КО5 (б) від швидкості обдуву потоком повітря для ламінарного режиму обтікання ($T_0 = 300$ К, $R_w = 0,02$ м, $R_H = 0,015$ м, $t = 15$ с).

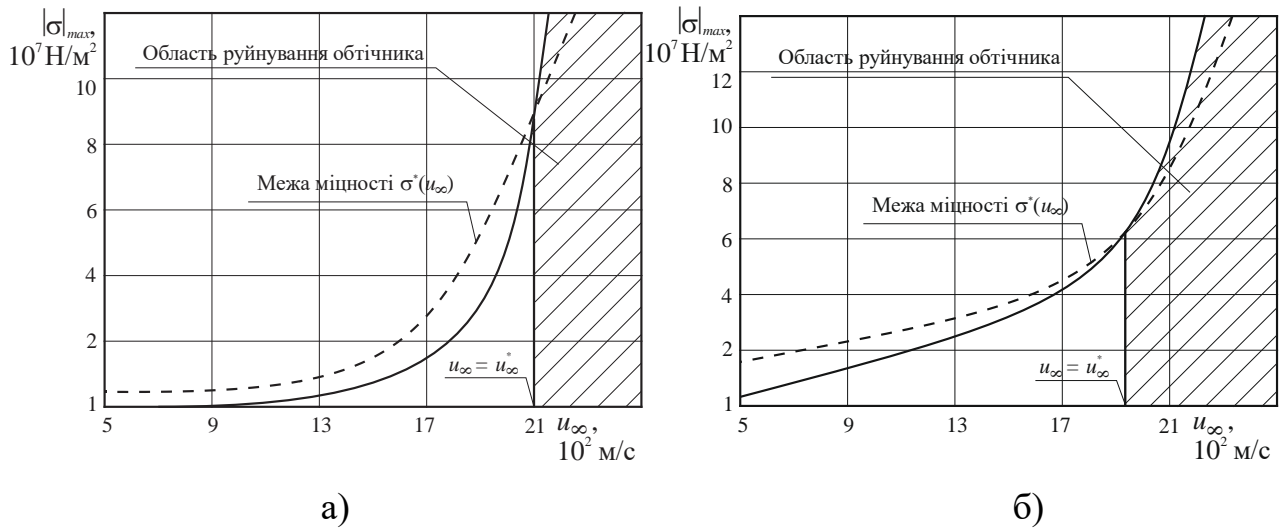


Рис. 4.39. Залежність модуля максимальних термопружних напружень $|\sigma|_{max}$ в зоні максимального термовпливу на поверхні обтічника з оптичної кераміки КО2 (а) та КО5 (б) від швидкості обдуву потоком повітря для турбулентного режиму обтікання (решта позначень аналогічні рис. 4.38).

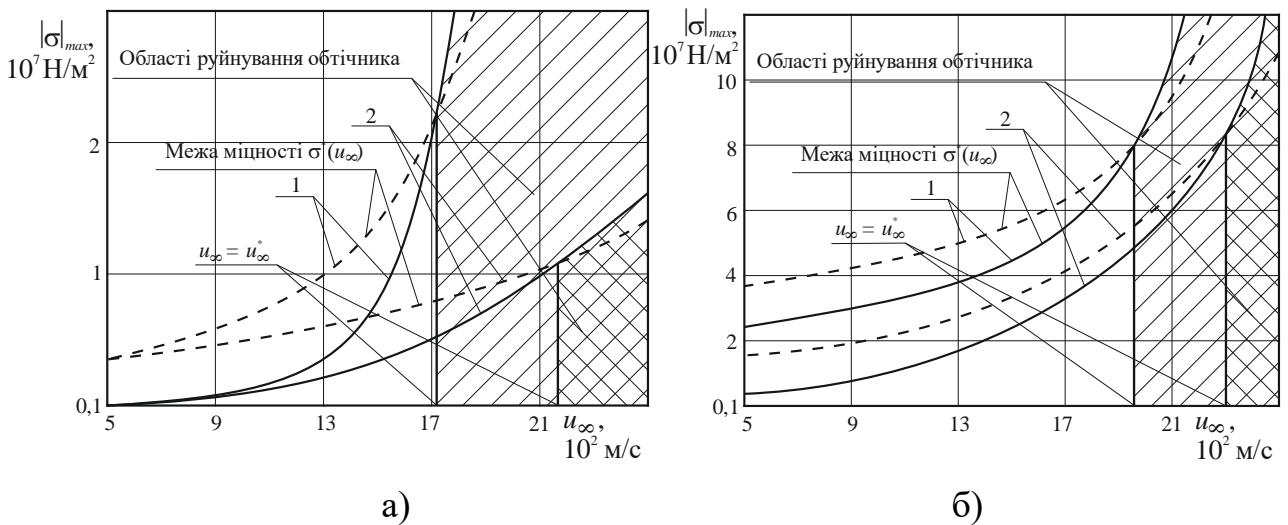


Рис. 4.40. Вплив на залежність $|\sigma|_{max}(u_\infty)$ часу зовнішньої термодії для турбулентного режиму обтікання поверхні півсферичного обтічника з оптичної кераміки КО2 (а) та КО1 (б): 1 – $t = 30$ с; 2 – $t = 15$ с (решта позначень аналогічні рис. 4.38).

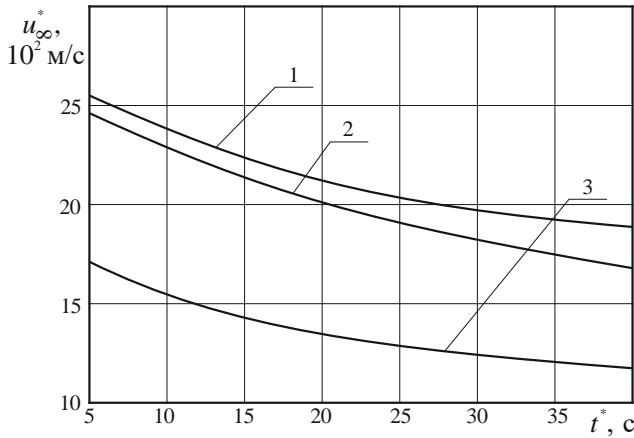


Рис. 4.41. Зв'язок між критичними значеннями швидкостей обдуву потоком повітря u_{∞}^* та часів t^* зовнішнього теплового впливу на поверхню обтічника з оптичних керамік КО1 (1), КО2 (2) та КО5 (3) (решта позначень аналогічні рис. 4.38).

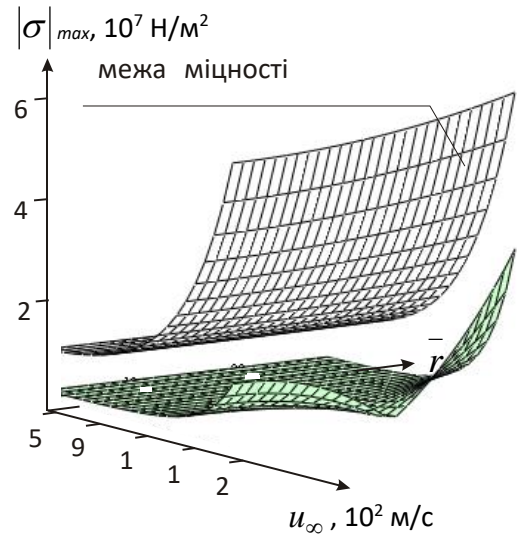


Рис. 4.42. Зображення залежностей $|\sigma|_{max}(\bar{r}, u_{\infty})$ для ламінарного режиму обтікання півсферичного обтічника з оптичної кераміки КО2.

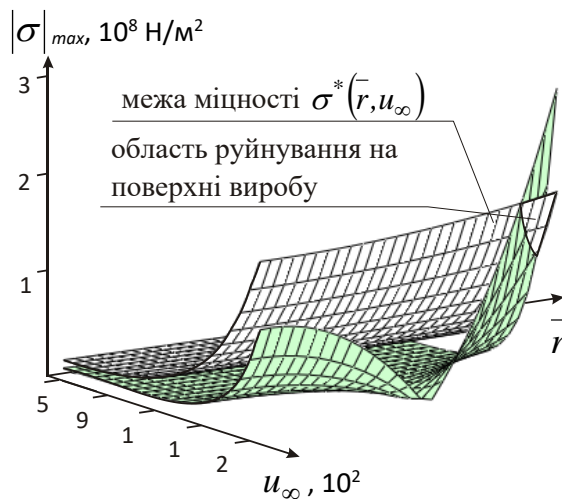


Рис. 4.43. Зображення залежностей $|\sigma|_{max}(\bar{r}, u_{\infty})$ для турбулентного режиму обтікання півсферичного обтічника з оптичної кераміки КО2 (решта позначень аналогічні рис. 4.38).

Аналіз результатів розрахунків, представлених на рис. 4.49 – 4.54, показує, що термомпружні напруження в зонах максимального зовнішнього термовпливу розподілені по товщині обтічника таким чином: на поверхні обтічника і в його поверхневих шарах мають місце стискуючі напруження ($\sigma < 0$, $|\sigma|_{max}$ досягає значень 10^8 Н/м²... $1,5 \cdot 10^8$ Н/м²), а на відстанях $r = R_w$ напруження розтягу ($\sigma > 0$, $|\sigma|_{max}$ досягає значень $0,5 \cdot 10^8$ Н/м²... 10^8 Н/м²); при цьому, для турбулентного режиму обтікання $|\sigma|_{max}$ перевищує її значення для ламінарного режиму обтікання у 4...5 разів. При збільшенні швидкості обдуву потоком повітря від $u_\infty = 7 \cdot 10^2$ м/с до $2 \cdot 10^3$ м/с величина $|\sigma|_{max}$ зростає як для ламінарного, так і турбулентного режимів обтікання до значення $\sigma^* = |\sigma(u_\infty^*)|$

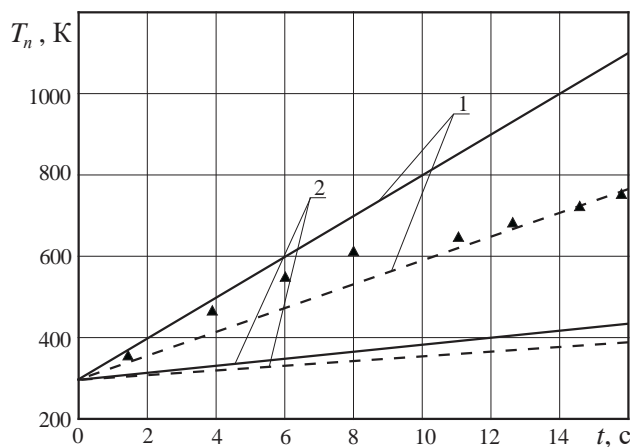


Рис. 4.44. Залежність температури поверхні обтічника від часу теплового впливу надзвукового потоку повітря ($T_0 = 300$ К; $R_w = 0,015$ м): 1 – $u_\infty = 1,5 \cdot 10^3$ м/с; 2 – $u_\infty = 10^3$ м/с; — турбулентний режим обтікання; - - - - ламінарний режим обтікання; ▲ – експериментальні дані (ламінарний режим обтікання, передня критична точка ($\theta = 0^0$)).

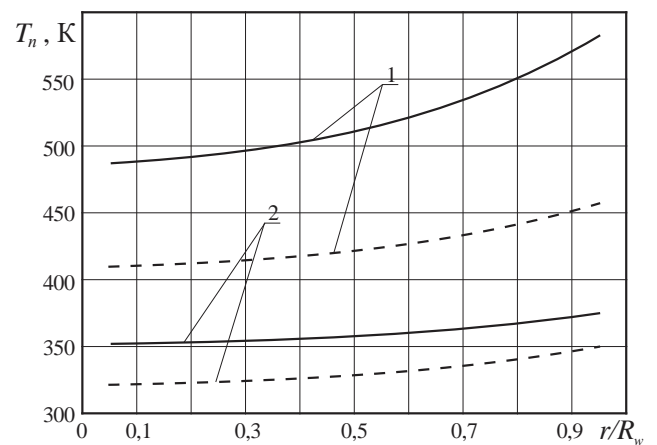


Рис. 4.45. Розподіл температури по товщині обтічника, що обдувається надзвуковим потоком повітря ($T_0 = 300$ К; $t = 3$ с; $R_w = 0,015$ м): 1 – $u_\infty = 2 \cdot 10^3$ м/с; 2 – $u_\infty = 1,2 \cdot 10^3$ м/с; — турбулентний режим обтікання; - - - - - ламінарний режим обтікання.

(σ^* – граничне значення термопружних напружень, при якому настає руйнування матеріалу; u_∞^* – значення швидкості обдуву потоком повітря, при якій величина $|\sigma|_{max}$ стає рівною σ^*). При цьому, величина u_∞^* істотно залежить як від режиму обтікання півсфери, так й від часу зовнішньої теплової дії t^* : наприклад, при збільшенні t^* від 0,05 с до 0,4 с значення u_∞^* зменшуються від $2,13 \cdot 10^3$ м/с до $1,62 \cdot 10^3$ м/с (турбулентний режим обтікання); для усього дослідженого діапазону зміни u_∞ у разі ламінарного режиму обтікання значення u_∞^* відсутні.

Проведене зіставлення розглянутих вище результатів розрахунків з результатами окремих лабораторних та натурних випробувань (див. розділ 3) показало, що вони повністю адекватні (відносна похибка 8...12 %).

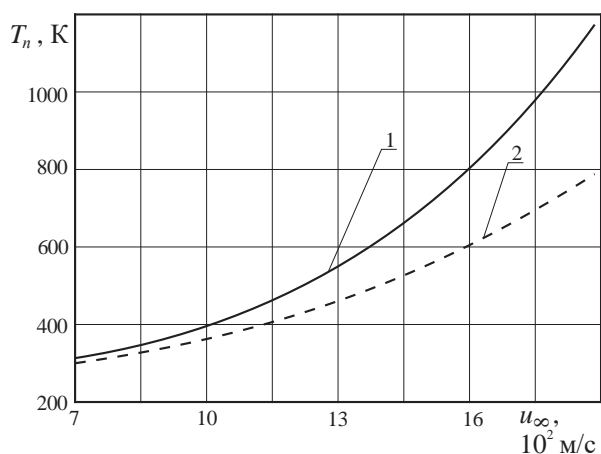


Рис. 4.46. Залежність температури поверхні обтічника від швидкості надзвукового потоку повітря ($T_0 = 300$ К; $R_w = 0,015$ м; $t = 10$ с):
1 – турбулентний режим обтікання;
2 – ламінарний режим обтікання.

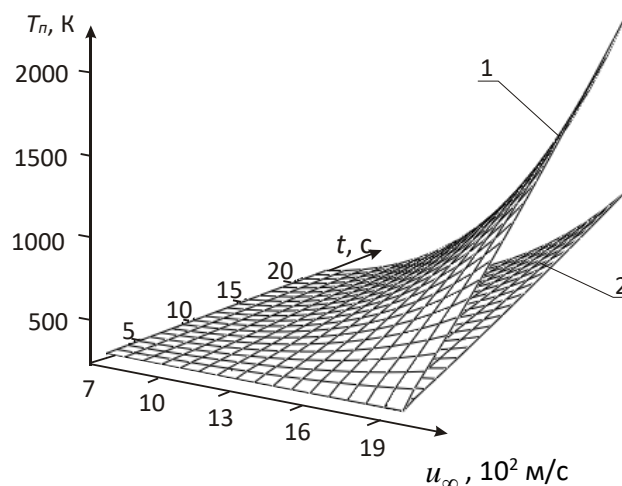


Рис. 4.47. Залежність температури на поверхні обтічника від швидкості надзвукового потоку повітря і часу ($T_0 = 300$ К; $R_w = 0,015$ м):
1 – турбулентний режим обтікання;
2 – ламінарний режим обтікання.

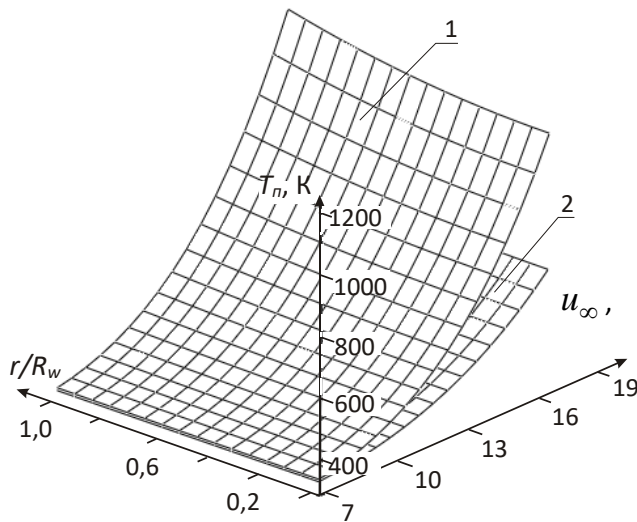


Рис. 4.48. Залежність розподілу температури по товщині обтічника від швидкості надзвукового потоку повітря ($T_0 = 300$ К; $R_w = 0,015$ м; $t = 10$ с): 1 – турбулентний режим обтікання; 2 – ламінарний режим обтікання.

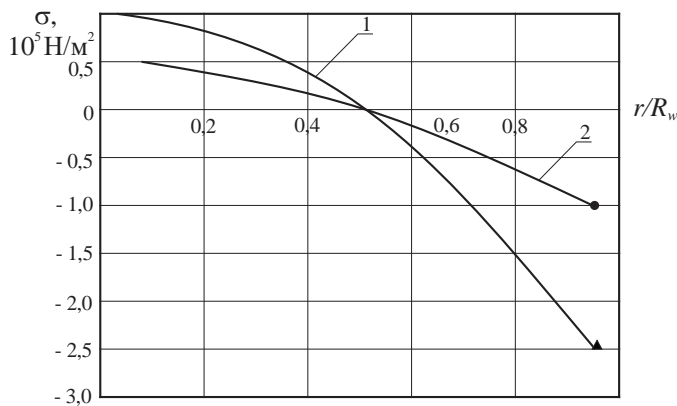


Рис. 4.50. Розподіл термопружних напружень по товщині обтічника в зоні максимального зовнішнього термовпливу для турбулентного режиму обтікання ($T_0 = 300$ К; $R_w = 0,015$ м; $t = 10$ с): 1 – $u_\infty = 1,2 \cdot 10^3$ м/с; 2 – $u_\infty = 10^3$ м/с; ▲, ● – результати експериментальних досліджень відповідно.

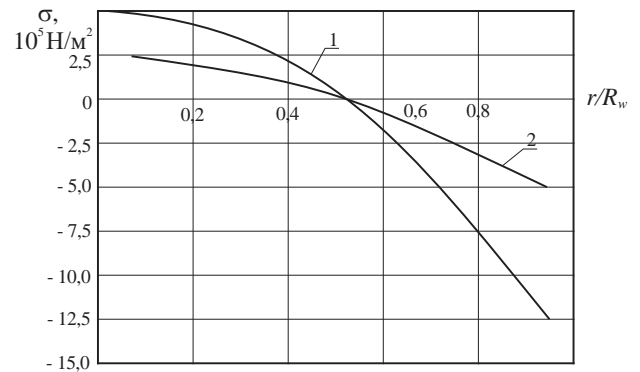


Рис. 4.49. Розподіл термопружних напружень по товщині обтічника в зоні максимального зовнішнього термовпливу для ламінарного режиму обтікання ($T_0 = 300$ К; $R_w = 0,015$ м; $t = 10$ с): 1 – $u_\infty = 1,2 \cdot 10^3$ м/с; 2 – $u_\infty = 10^3$ м/с.

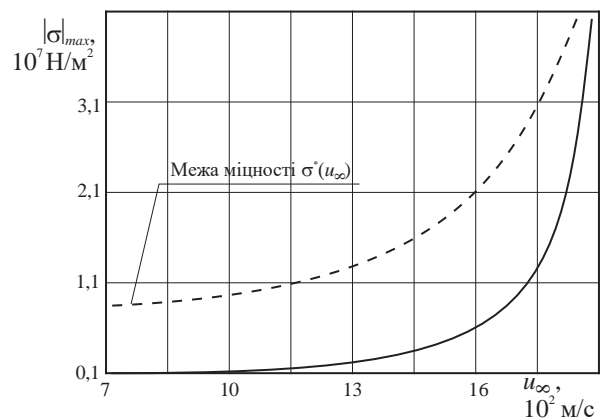


Рис. 4.51. Залежність модуля максимальних термопружних напружень $|\sigma|_{max}$ в зоні максимального термовпливу на поверхні обтічника від u_∞ для ламінарного режиму обтікання ($T_0 = 300$ К; $R_w = 0,015$ м; $t = 10$ с).

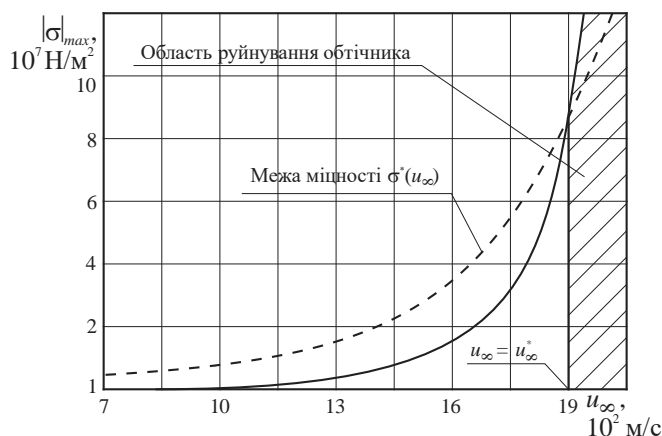


Рис. 4.52. Залежність модуля максимальних термопружних напружень $|\sigma|_{max}$ в зоні максимального термовпливу на поверхні обтічника від u_∞ для турбулентного режиму обтікання ($T_0 = 300 \text{ K}$; $R_w = 0,015 \text{ м}$; $t = 15 \text{ с}$).

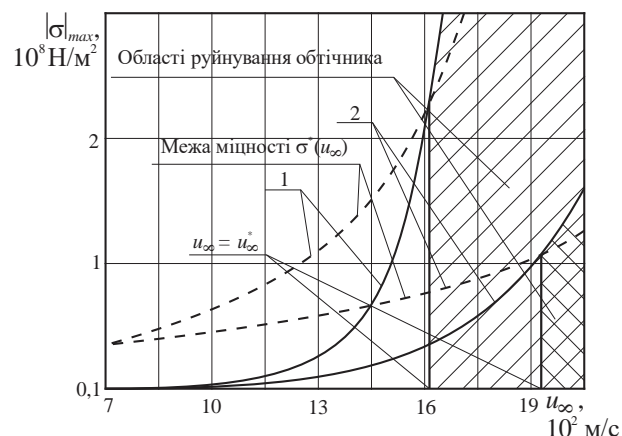


Рис. 4.53. Вплив на залежність $|\sigma|_{max}(u_\infty)$ часу зовнішнього термовпливу для турбулентного режиму обтікання поверхні півсфери: 1 – $t = 30 \text{ с}$; 2 – $t = 15 \text{ с}$ ($T_0 = 300 \text{ K}$; $R_w = 0,015 \text{ м}$).

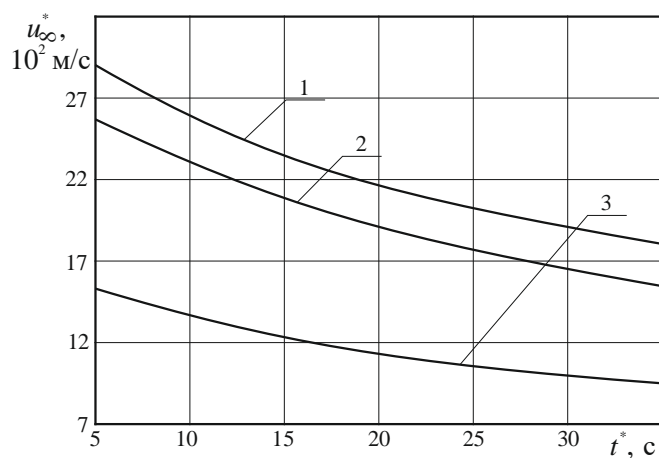


Рис. 4.54. Залежність критичних значень u_∞^* від часу зовнішнього теплового впливу t^* на поверхню обтічника з оптичних керамік КО1 (1), КО2 (2) та КО5 (3) ($T_0 = 300 \text{ K}$; $R_w = 0,015 \text{ м}$; турбулентний режим обтікання).

Таким чином, при зміні параметрів зовнішніх термовпливів (величин зовнішніх теплових потоків q_n , швидкостей надзвукового обдуву потоком повітря u_∞ та часів їх впливу t) на оптичні елементи вони можуть досягати

критичних значень (q_n^* , t^* , u_∞^*), перевищення яких призводять до появи різних негативних дефектів на їх поверхнях (тріщин, відколів, напливів, хвилеподібних поверхонь тощо) та відмові приладів. При цьому у випадку оптичних обтічників руйнування їх поверхонь спостерігається у зонах, які піддаються максимальним ударним термовпливам та руйнуванням надзвуковим повітряним потоком.

Тому важливе значення має попередня електронно-променева обробка небезпечних ділянок на поверхні обтічників, яка підвищує їх стійкість до зовнішніх термовпливів, а також контроль діапазонів зміни їх критичних параметрів, що сприяє безвідмовній роботі приладів при їх експлуатації.

Висновки до розділу 4

1. Розроблено удосконалені математичні моделі зовнішнього нагріву оптичних елементів різної геометричної форми та розмірів (пластини, прямокутні елементи, циліндричні та сферичні елементи), які враховують температурні залежності теплофізичних властивостей матеріалів (об'ємної теплоємності, коефіцієнта теплопровідності). Це дозволяє підвищити точність знаходження розподілів температури та термопружних напружень у елементах з оптичного скла та керамік (відносну похибку знижено до 8...10 % замість 12...15 % у існуючих моделей).
2. Встановлено, що при зовнішніх теплових впливах на оптичні елементи у їх поверхневих шарах виникають стискаючі термопружні напруження з боку нагріву та термопружні напруження розтягу – на протилежному боці. Виключення складають радіальні компоненти термопружних напружень у циліндричних та сферичних елементах: вони досягають максимальних значень всередині елемента, положення яких визначаються умовами зовнішнього нагріву.
3. Вперше встановлено наступний вплив параметрів зовнішніх термодій (теплого потоку q_n та часу його впливу t) на величину максимальних

- термопружних напружень у оптичних елементах, що розглядаються: збільшення q_n від $1,5 \cdot 10^5$ Вт/м² до $2,3 \cdot 10^6$ Вт/м² та t від 0,2 с до 1,5 с призводить до зростання максимальних термопружних напружень у 1,8...4,3 рази для оптичного скла (К8, БК10, ТФ110) та у 1,5...3,8 рази – для оптичних керамік (КО1, КО2, КО5).
4. Уточнено математичні моделі глибокого оплавлення оптичних елементів приладів в умовах зовнішніх термовпливів при їх функціонуванні шляхом врахування температурних залежностей їх теплофізичних характеристик та встановлено нові закономірності: при зміні зовнішнього теплового потоку в діапазоні $1,5 \cdot 10^5 \dots 2,3 \cdot 10^6$ Вт/м² час утворення розплаву на поверхні оптичних елементів складає 1...3 с; при збільшенні часу зовнішнього теплового впливу від 2 с до 14 с товщина оплавленого шару зростає у 2...3 рази та може досягати 300...500 мкм; швидкість оплавлення поверхні елемента спочатку різко зменшується (у 3...4 рази при $t = 2 \dots 8$ с), потім її зменшення сповільнюється (у 1,5...2 рази при $t = 8 \dots 14$ с).
 5. Вперше встановлено існування критичних значень зовнішніх теплових потоків q_n^* та часів їх дії t^* на оптичні елементи різної геометричної форми та розмірів, контролюючи діапазони зміни яких можна попереджати їх руйнування та, тим самим, зменшувати кількість відмов приладів при експлуатації.
 6. Вперше встановлено, що місця розташування максимальних значень теплового потоку $(q_n)_{max}$ на поверхні обтічника, де відбуваються його руйнування, залежать від режиму обтікання: для ламінарного режиму обтікання значення $(q_n)_{max}$ знаходяться поблизу передньої критичної точки ($\theta = 0^0$) обтічника; для турбулентного режиму обтікання значення $(q_n)_{max}$ вже зміщуються від $\theta = 0^0$ до $\theta_{max} = 19 \dots 23^0$.
 7. Вперше отримано, що тепловий потік в зонах максимального зовнішнього теплового впливу на поверхню обтічника суттєво залежить від швидкості обдуву потоком повітря та режиму обтікання: для $u_\infty = 7 \cdot 10^2 \dots 2 \cdot 10^3$ м/с

- значення $(q_n)_{max}$ зростають від $0,3 \cdot 10^6$ Вт/м² до $2,3 \cdot 10^6$ Вт/м² (турбулентний режим обтікання) та від $0,2 \cdot 10^6$ Вт/м² до $1,3 \cdot 10^6$ Вт/м² (ламінальний режим обтікання).
8. Вперше розроблено математичну модель нагріву півсферичної оболонки різної товщини надзвуковим потоком повітря, що враховують температурні залежності теплофізичних властивостей оптичного матеріалу (об'ємної теплоємності, коефіцієнта теплопровідності) та теплові потоки з прикордонного шару, які дозволяють визначати критичні значення швидкостей обдуву потоком повітря та часу його впливу, контроль яких дозволяє підвищити працездатність приладів в умовах експлуатації надзвукової техніки.
 9. Вперше встановлено, що розподіл температури вздовж поверхні обтічника найбільш суттєво залежить від режиму обтікання: для ламінального режиму – максимум температури знаходиться поблизу його передньої критичної точки, а для турбулентного режиму – вказаний максимум зміщений вздовж поверхні обтічника на відстані, що відповідають $\theta_{max} = 17 \dots 21^\circ$.
 10. Вперше встановлено, що температура в зонах максимального зовнішнього теплового впливу на поверхні обтічника суттєво залежить від швидкості обдуву потоком повітря та часу його впливу: для $u_\infty = 5 \cdot 10^2 \dots 2 \cdot 10^3$ м/с та $t = 4 \dots 16$ с значення температури на поверхні обтічника (аналогічно для нижнього боку) зростають у $1,5 \dots 2,8$ рази для ламінального режиму обтікання та у $2,6 \dots 4,7$ рази – для турбулентного режиму.
 11. Отримано нові дані про розподіл термопружних напружень в зонах максимальних зовнішніх термовпливів по товщині обтічника: на поверхні обтічника та у його поверхневих шарах мають місце стискаючі напруження ($\sigma < 0, |\sigma|_{max}$ досягає значень 10^8 Н/м²... $3,5 \cdot 10^8$ Н/м²), а на нижньому боці обтічника та у його прилеглих шарах – напруження розтягу ($\sigma > 0, |\sigma|_{max}$ досягає значень $0,5 \cdot 10^8$ Н/м²... $1,5 \cdot 10^8$ Н/м²); при

цьому, для турбулентного режиму обтікання $|\sigma|_{max}$ перевищує його значення для ламінарного режиму у 4...5 рази.

12. Вперше встановлено існування критичних значень швидкостей обдуву потоком повітря u_{∞}^* та часу його впливу t^* , контролюючи діапазони зміни яких, можна виключати ділянки з максимальним зовнішнім термовпливом на поверхні обтічника та попереджати їх руйнування.

РОЗДІЛ 5. ПРАКТИЧНЕ ВИКОРИСТАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ РОБОТИ

В даному розділі на базі проведених експериментальних та теоретичних досліджень представлено розроблені нові методи покращення експлуатаційних характеристик оптичних елементів за допомогою електронно-променевої технології, визначення та контролю критичних значень параметрів зовнішніх термічних та механічних впливів на елементи, які дозволяють підвищувати техніко-експлуатаційні характеристики оптико-електронних приладів [276 – 279, 319, 321 – 323, 326].

Розглянуто питання практичного використання та впровадження розроблених методів на підприємствах України та Республіки Білорусь у вигляді технологічних рекомендацій при модифікації приладів, які випускаються, та розробці нових приладів, а також представлено результати роботи, які впроваджено у навчальний процес ВНЗ України (додаток Е).

На завершення розглянуто перспективи подальшого застосування електронно-променевої технології для підвищення якості обробки криволінійних поверхонь оптичних елементів та створення на них функціональних мікропрофілей, а також для покращення експлуатаційних характеристик інших елементів, які широко використовуються у точному приладобудуванні (наприклад, елементів з п'єзокераміки, оптичних елементів з плівками з оксидів металів) [10, 11, 30 – 35, 63, 65, 142, 144, 145, 220, 263].

5.1. Розробка методу покращення експлуатаційних характеристик оптичних елементів за допомогою електронно-променевої технології

В основу методу покладено експериментально-статистичні моделі (розділ 3) та спеціалізоване програмне забезпечення у вигляді ППП1, ППП2 (додаток А) [58, 62, 64], які дозволяють в режимі діалогу та реального часу визначати режими електронно-променевої технології (густина теплового впливу електронного променя F_n , швидкості його переміщення V), в межах яких покращуються основні характеристики оптичних елементів (мікροшорсткість

поверхні h , максимальну товщину оплавлених шарів h_m , мікротвердість поверхні H_v , товщину зміцнених шарів Δ , висоту, з якої вільно падає сталева кулька на поверхню елемента $H_{кр}$), а також впливати на значення параметрів зовнішніх термовпливів (величини теплового потоку q_n та часу його впливу), що не перевищують їх допустимі значення [49, 59, 60, 62, 91, 97, 99, 197 – 199, 291 – 294] ($h^*, h_m^*, H_v^*, H_{кр}^*, q_n^*, t^*$), які відповідають вимогам до оптичних елементів точного приладобудування.

Алгоритм практичного використання методу. Згідно з розробленим алгоритмом (рис. 5.1) на першому етапі формується вихідна база даних, яку створюють керовані режими електронно-променевої технології (густини теплового впливу F_n , швидкості переміщення V) при термічному впливі на робочі поверхні оптичного елемента, а також отримано комплекс експериментально-статистичних моделей та пакети прикладних програм ППП1, ППП2 для розрахунків в режимах діалогу та реального часу на комп'ютері. На другому етапі здійснюється вибір мети термічної дії електронного променю на оптичні елементи, введення необхідних значень параметрів, що характеризують експлуатаційні характеристики елементів (h – мікрошорсткість поверхні, h_m – максимальна товщина оплавленого шару; H_v – мікротвердість поверхні; Δ – товщина зміцнених шарів; $H_{кр}$ – висота, з якої вільно падає сталева кулька на поверхню елемента), а також введення параметрів зовнішніх термовпливів (q_n, t), що характеризують їх термостійкість, та нормативні значення ($h^*, h_m^*, H_v^*, \Delta^*, H_{кр}^*, q_n^*, t^*$). Після цього вибираються експериментально-статистичні моделі для визначення впливу керованих режимів електронно-променевої технології (F_n, V) на параметри $h, h_m, H_v, \Delta, H_{кр}, q_n, t$, потім величини параметрів обробки зіставляються з їх нормативними значеннями, тобто перевіряються виконання умов: $h < h^*$, $h_m < h_m^*$ (не більше, ніж h^* та h_m^* відповідно); $H_v > H_v^*$, $\Delta > \Delta^*$, $H_{кр} > H_{кр}^*$ (не менше, ніж H_v^* , Δ^* , $H_{кр}^*$ відповідно); $q_n < q_n^*$, $t < t^*$.

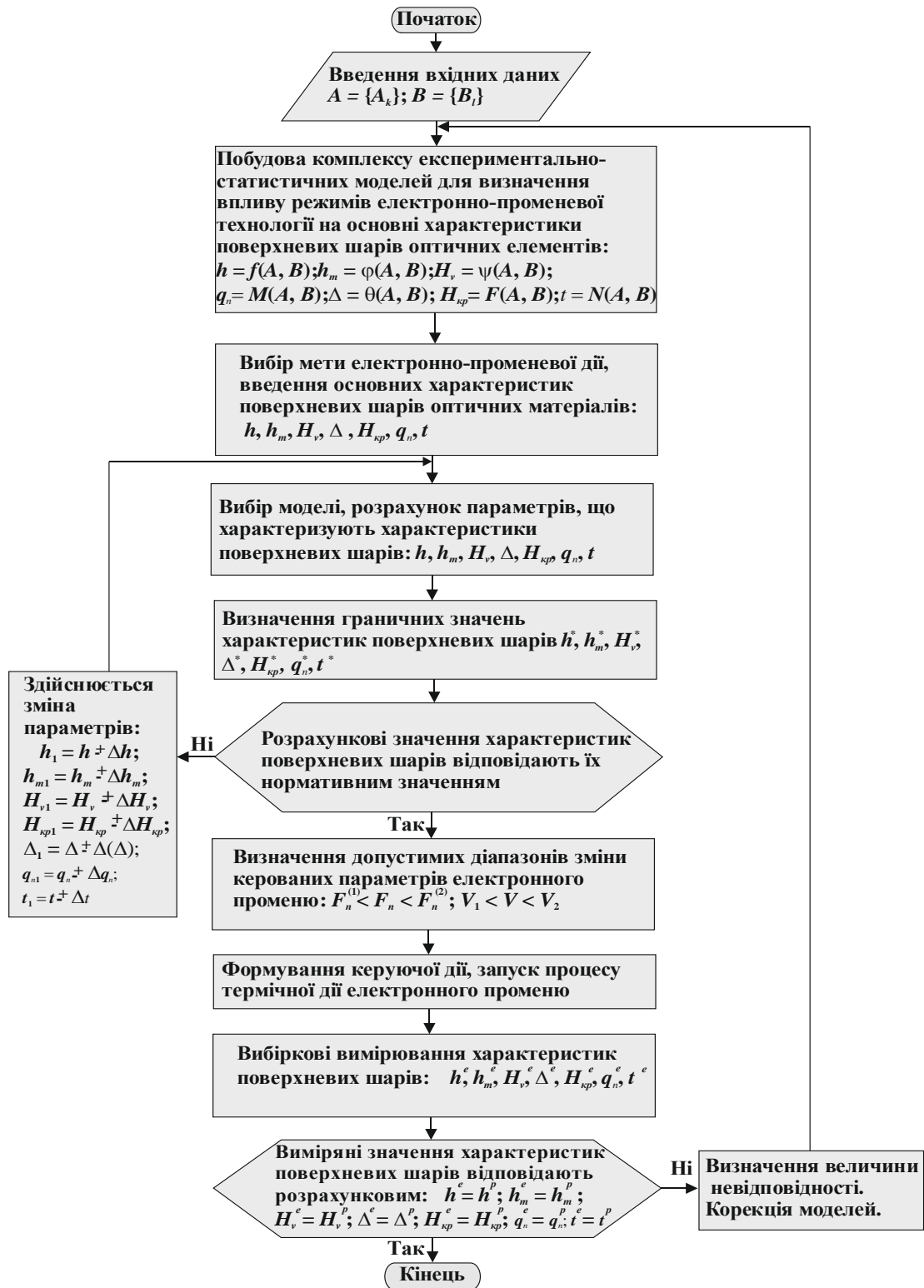


Рис. 5.1. Структурна схема алгоритму методу покращення експлуатаційних характеристик елементів за допомогою електронно-променевої технології: A – керовані режими електронно-променевої технології; B – розроблені експериментально-статистичні моделі та спеціалізований програмний комплекс у вигляді пакетів прикладних програм ППП1 та ППП2.

При невиконанні зазначених умов здійснюється коректування значень керованих режимів електронно-променевої технології для знаходження їх діапазонів зміни: $F_n^{(1)} < F_n < F_n^{(2)}$ та $V_1 < V < V_2$, які не призводять до руйнування елементів. Далі формується керуюча дія і запуск процесу термічної дії електронного променя на оптичний елемент. Потім виконуються вибіркові вимірювання мікрошорсткості h , максимальної товщини оплавленого шару h_m , мікротвердості поверхні елемента H_v , товщини зміцненого шару Δ , висоти падіння кульки $H_{кр}$ та параметрів q_n , t , які зіставляються з розрахунками, визначаються похибки розрахункових методів знаходження діапазонів зміни керованих режимів електронно-променевої технології. При наявності значних розбіжностей між результатами розрахунків й експериментальними даними (більше 10...15 %) виконується корекція моделей.

5.1.1. Застосування методу для покращення експлуатаційних характеристик оптичних елементів

Елементи з оптичного скла. Встановлено, що при дії електронного променя на поверхню оптичного елемента відбувається її помітне очищення від різних домішок, усуваються різні мікродфекти, що залишаються на ній після стандартних методів обробки (механічних, хімічних тощо), а також суттєво зменшується її мікрошорсткість. Наглядне представлення останніх закономірностей для режимів електронно-променевої технології дають тривимірні зображення залежностей $h(F_n, V)$ (рис. 5.2).

З даних, представлених на рис. 5.2, випливає, що навіть при глибокій механічній шліфовці-поліровці оптичних елементів залишкові мікрошорсткості залишаються значними та можуть перевищувати більше, ніж у 5...6 разів їх значення у випадку впливу електронного променя. При цьому необхідно контролювати режими електронно-променевої технології (густина теплової дії променя F_n та швидкість його переміщення V). Це обумовлено тим, що товщина розплавленого шару $h_m(F_n, V)$ (розділ 3), що утворюється на поверхні

елемента, яка згладжує мікросорсткості, при деяких критичних значеннях параметрів F_n^* та V^* може перевищувати нормативні значення h_m^* , при яких починається утворення хвилеподібних поверхонь, що призводить до втрати початкової форми оптичного елемента (рис. 5.3).

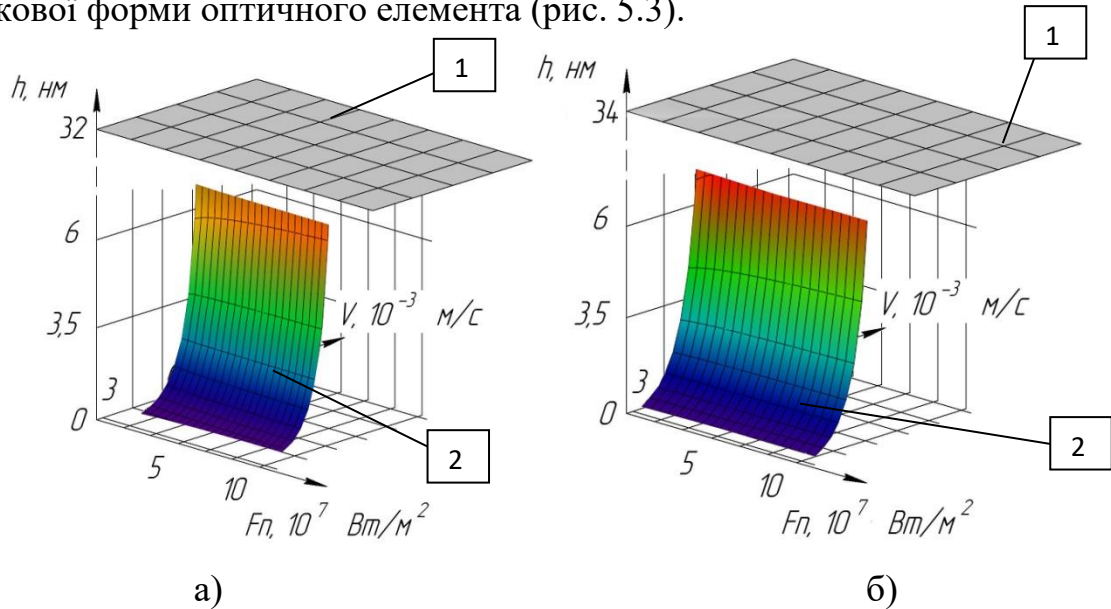


Рис. 5.2. Залежності $h(F_n, V)$ для елементів з оптичного скла К8 (а) та БК10 (б): 1 – необроблені електронним променем елементи; 2 – оброблені електронним променем елементи.

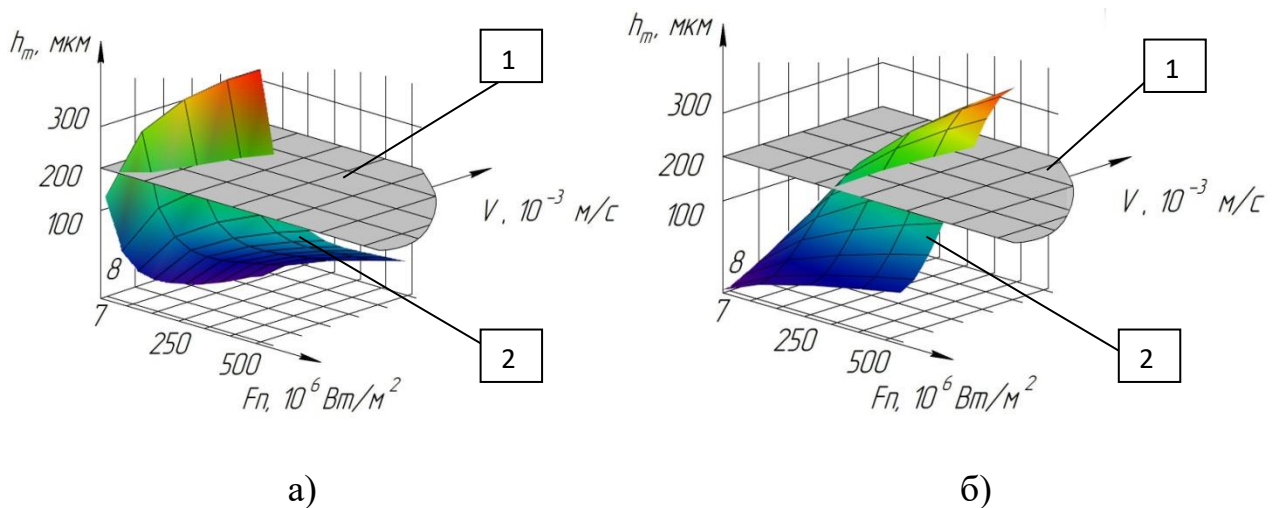


Рис. 5.3. Залежності $h_m(F_n, V)$ для елементів з оптичного скла К8 (а) та БК10 (б): 1 – гранично допустимі значення h_m^* ; 2 – значення h_m , які отримано при обробці електронним променем.

При проведенні досліджень було встановлено, що при обробці електронним променем елементів з оптичного скла, їх поверхневі шари

змінюють свою структуру, яка стає близькою до кварцу, тобто відбувається так зване “утворення кварцу” на обробленій поверхні. В результаті оптичні елементи стають більш стійкими до зовнішніх впливів. Це підтверджують експериментальні дослідження залежностей критичних значень зовнішніх теплових потоків від часу їх впливу, перевищення яких призводить до руйнування елементів. При цьому встановлено, що поверхневі шари елементів, які оброблені електронним променем, піддаються руйнуванням при критичних значеннях зовнішніх теплових потоків, які у 1,3...1,5 рази перевищують їх значення до обробки (рис. 5.4) (розділ 3).

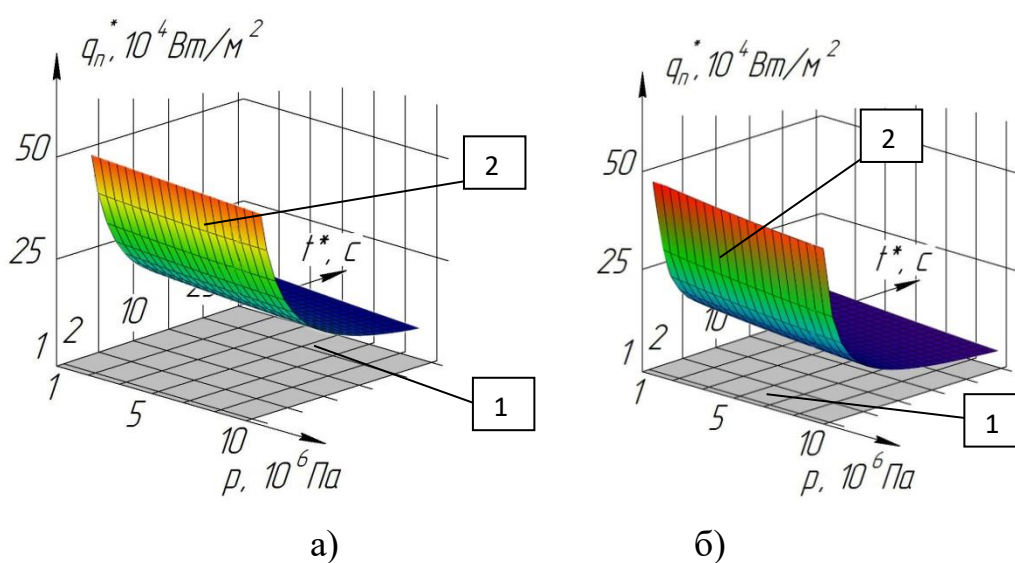


Рис. 5.4. Залежності $q_n^*(P, t^*)$ для елементів з оптичного скла К8 (а) та БК10 (б): 1 – необроблені електронним променем елементи; 2 – оброблені електронним променем елементи.

Прилади з елементами з оптичних керамік. Встановлено, що при дії електронного променя на поверхню елементів з оптичних керамік відбувається значне збільшення мікротвердості їх поверхні у 1,3...1,7 рази та утворення зміцнених шарів товщиною 90...210 мкм (рис. 5.5) (розділ 3). Це робить оптичні елементи більш стійкими до ударних зовнішніх теплових та механічних навантажень, що підтверджується спеціально проведеними експериментальними дослідженнями по знаходженню критичних значень зовнішніх теплових потоків та часів їх впливу, а також критичних значень висоти падіння сталеної кульки на поверхню елемента (рис. 5.6, 5.7) (розділ 3).

Встановлено, що поверхня елемента, яку оброблено електронним променем, потребує для свого руйнування вже у 1,3...1,7 рази більших теплових потоків та висот падіння кульки.

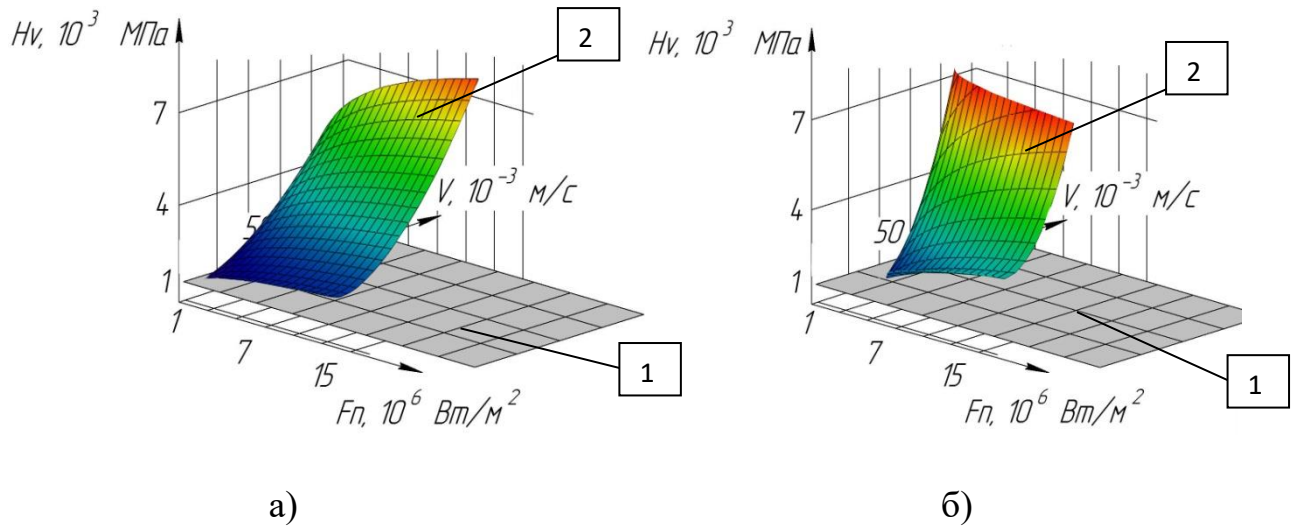


Рис. 5.5. Залежності $H_v(F_n, V)$ для елементів з оптичної кераміки КО1 (а) та КО2 (б): 1 – необроблені електронним променем елементи; 2 – оброблені електронним променем елементи.

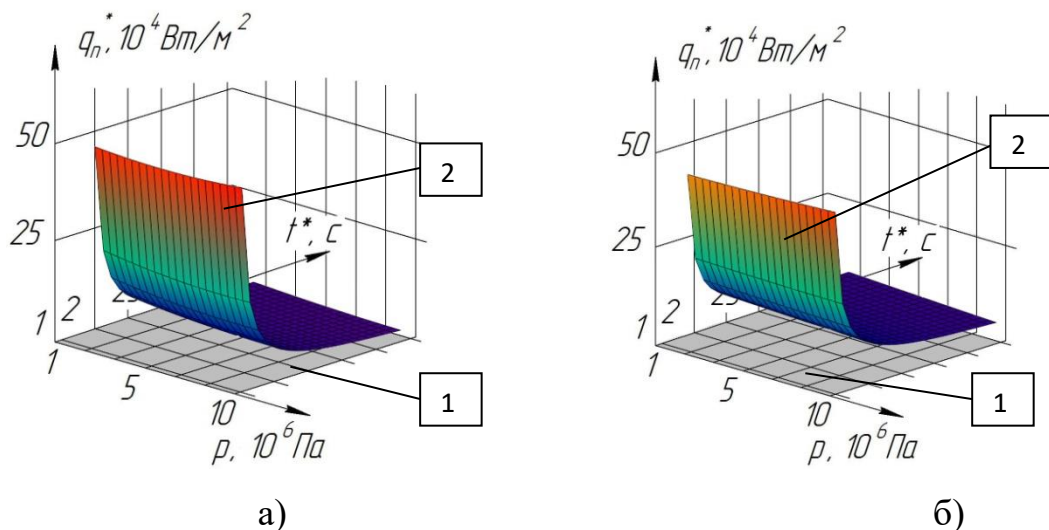


Рис. 5.6. Залежності $q_n^*(P, t^*)$ для елементів з оптичної кераміки КО1 (а) та КО2 (б): 1 – необроблені електронним променем елементи; 2 – оброблені електронним променем елементи.

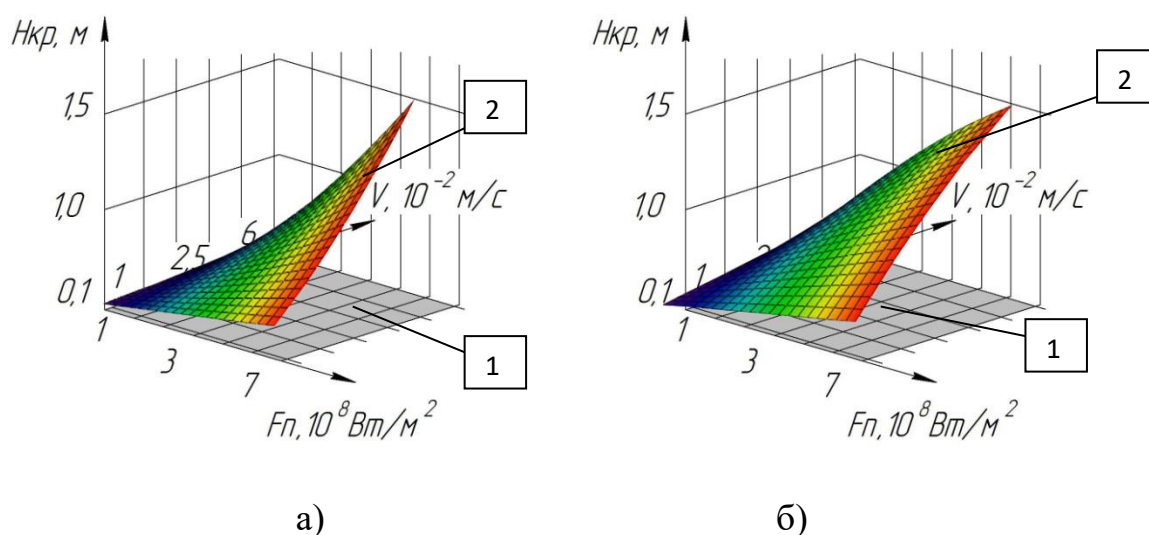


Рис. 5.7. Залежності $H_{кр}(F_n, V)$ для елементів з оптичної кераміки КО1 (а) та КО2 (б): 1 – необроблені електронним променем елементи; 2 – оброблені електронним променем елементи.

Таким чином, на стадії виготовлення оптичних елементів приладів додаткова електронно-променева обробка їх робочих поверхонь призводить до покращення основних експлуатаційних характеристик приладів.

5.2. Метод визначення та контролю критичних значень параметрів зовнішніх термовпливів, який дозволяє попереджати погіршення експлуатаційних характеристик оптичних елементів

При експлуатації приладів з врахуванням впливу підвищених температур нагріву, зовнішніх тисків та умов експлуатації надзвукової техніки тощо, експериментально встановлено [49, 58, 62, 77, 89, 102, 161 – 163, 166, 168, 190 – 193], що при деяких критичних значеннях параметрів зовнішніх термовпливів (зовнішніх теплових потоків, швидкостей обдуву потоком повітря, часів їх впливу тощо), відбувається погіршення експлуатаційних характеристик елементів аж до їх руйнування, що є основною причиною різкого зниження працездатності приладів аж до їх відмови. Тому велике практичне значення на стадії проектування та розробки приладів має визначення діапазонів зміни критичних значень вказаних параметрів впливів з тим, щоб шляхом внесення відповідних змін у нормативних документах (наприклад, у технічних умовах на

експлуатацію приладів тощо) попереджати руйнування оптичних елементів та вихід з ладу приладів.

В основу методу покладено математичні моделі (розділ 4) та спеціалізоване програмне забезпечення (див. додатки А – Г) [58, 62, 64], які дозволяють в режимах діалогу та реального часу визначати критичні значення параметрів зовнішніх термовпливів (величини теплових потоків та часів їх впливу, швидкості надзвукового обдуву потоком повітря та режими обтікання (ламінарний, турбулентний)) на оптичні елементи.

Комплекс математичних моделей. На рис. 5.8 представлено комплекс розроблених математичних моделей для визначення критичних значень параметрів зовнішніх термовпливів.

Спеціалізований програмний комплекс. Для підвищення ефективності розрахунків по вказаним вище моделям використовувався спеціалізований програмний комплекс СПК (рис. 5.9), що містить чотири пакети прикладних програм ППП1 – ППП4 (див. додатки А – Г) [58, 62, 64]. В комплекс входять 160 індивідуальних програмних модулів за сучасними чисельними методами розв’язання обчислюваних задач, а також методами чисельного розв’язання теплових, дифузійних, газодинамічних задач.

У ППП включено основні з сучасних методів розв’язання одиничних та систем звичайних диференціальних рівнянь 1-го та 2-го порядку, диференціальних рівнянь у часткових похідних 2-го порядку, крайових задач для звичайних та диференціальних рівнянь у часткових похідних 2-го порядку, інтегральних рівнянь Вольтера 2-родку, а також методів чисельного інтегрування функцій, регресійного аналізу, інтерполяції, методів оптимізації [126, 136, 178, 227].

Для функціонування ППП необхідний комп’ютер з об’ємом ОЗУ не менше 128 кбайт. Для роботи ППП необхідна присутність на активному дисководі файлів ППП.ТХТ та ППП.АТ, в яких знаходяться відповідно тексти формул та вихідні параметри формул (сталі та змінні), та виконуючого файлу ППП.ЕХЕ. Запуск ППП здійснюється набором імені ППП.ЕХЕ у відповідь на

запрошення. Після запуску ППП у нижній строчці на екрані висвітлюється допоміжне меню, яке дозволяє користувачу обирати відповідні варіанти для подальшого функціонування ППП. Вихід із ППП здійснюється натисканням клавіші F10 (або ESC). Усі файли виконані у вигляді вихідних текстів програм, які написані на достатньо зручних для чисельних розрахунків алгоритмічних мовах [69, 117, 136].



Рис. 5.8. Структура комплексу математичних моделей.

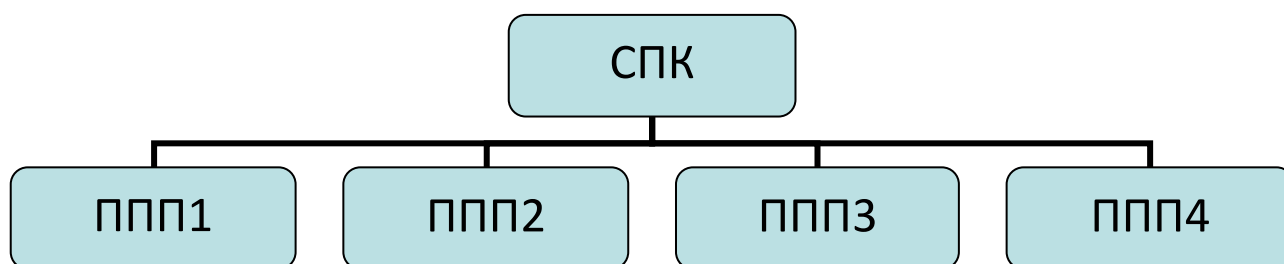


Рис. 5.9. Склад спеціалізованого програмного комплексу (СПК).

Ефективність вказаного СПК було встановлено в результаті проведення широких чисельних експериментів, в діалоговому режимі було вирішено більше 400 інженерно-фізичних задач по даній тематиці [58, 62]. При цьому час розрахунків за тестовими прикладами знаходиться в режимах від декількох секунд до декількох хвилин.

ППП1 – пакет прикладних програм по методами регресії та інтерполяції, виконаний у вигляді завантажувального програмного модуля. Використовуються наступні види регресії та інтерполяції [20, 72]: лінійна регресія; параболічна регресія; поліноміальна регресія; гіперболічна регресія; степенева регресія; показникова регресія; експоненціальна регресія; логарифмічна регресія; квадратична регресія; універсальний метод регресії для 16 типів рівнянь; інтерполяція по Лагранжу; інтерполяція поліномом Ньютона (рис. 5.10). Роздруківку ППП1 представлено у додатку А.

ППП2 – пакет прикладних програм по методам чисельного інтегрування функцій. Файл виконаний у вигляді завантажувального програмного модуля. Використовуються наступні методи обчислення визначених інтегралів [72, 130]: метод Сімсона (по числу інтервалів інтегрування); метод Боде; метод Уеддля; метод Ньютона-Котеса; метод Чебишева; метод Гауса (по числу інтервалів інтегрування); метод Гауса (з заданою точністю); метод Гауса (за формулою Лежандра). Використовуються наступні методи обчислення визначених інтегралів спеціального вигляду: метод Симпсона (із заданою точністю та особливостями підінтегральної функції); метод Гауса (при одній з меж інтегрування, яка прямує до нескінченності). Використовуються наступні методи обчислення подвійних інтегралів: по формулі Симпсона; по простій формулі Гауса; по складній формулі Гауса (рис. 5.11). Роздруківку ППП2 представлено у додатку Б.

ППП3 – пакет прикладних програм по методам чисельного розв'язування диференціальних рівнянь. Файл виконано у вигляді завантажувального програмного модуля. Використовуються наступні методи для розв'язування диференціальних рівнянь 1-го порядку [178, 227]: метод Рунге-Кутта; метод Ейлера-Коші з ітераціями. Використовуються наступні методи для розв'язування диференціальних рівнянь 2-го порядку: метод Рунге-Кутта; метод Мілна; метод прогону (з крайовими умовами); різницевий метод (з крайовими умовами). Використовуються наступні методи для розв'язування

систем диференціальних рівнянь 1-го порядку: метод трапецій; метод Рунге-Кутта (рис. 5.12). Роздруківку ПППЗ представлено у додатку В.

ППП4 – пакет прикладних програм по методам чисельної оптимізації технологічних режимів електронно-променевої обробки. Файл виконано у вигляді завантажувального програмного модуля. Використовуються наступні

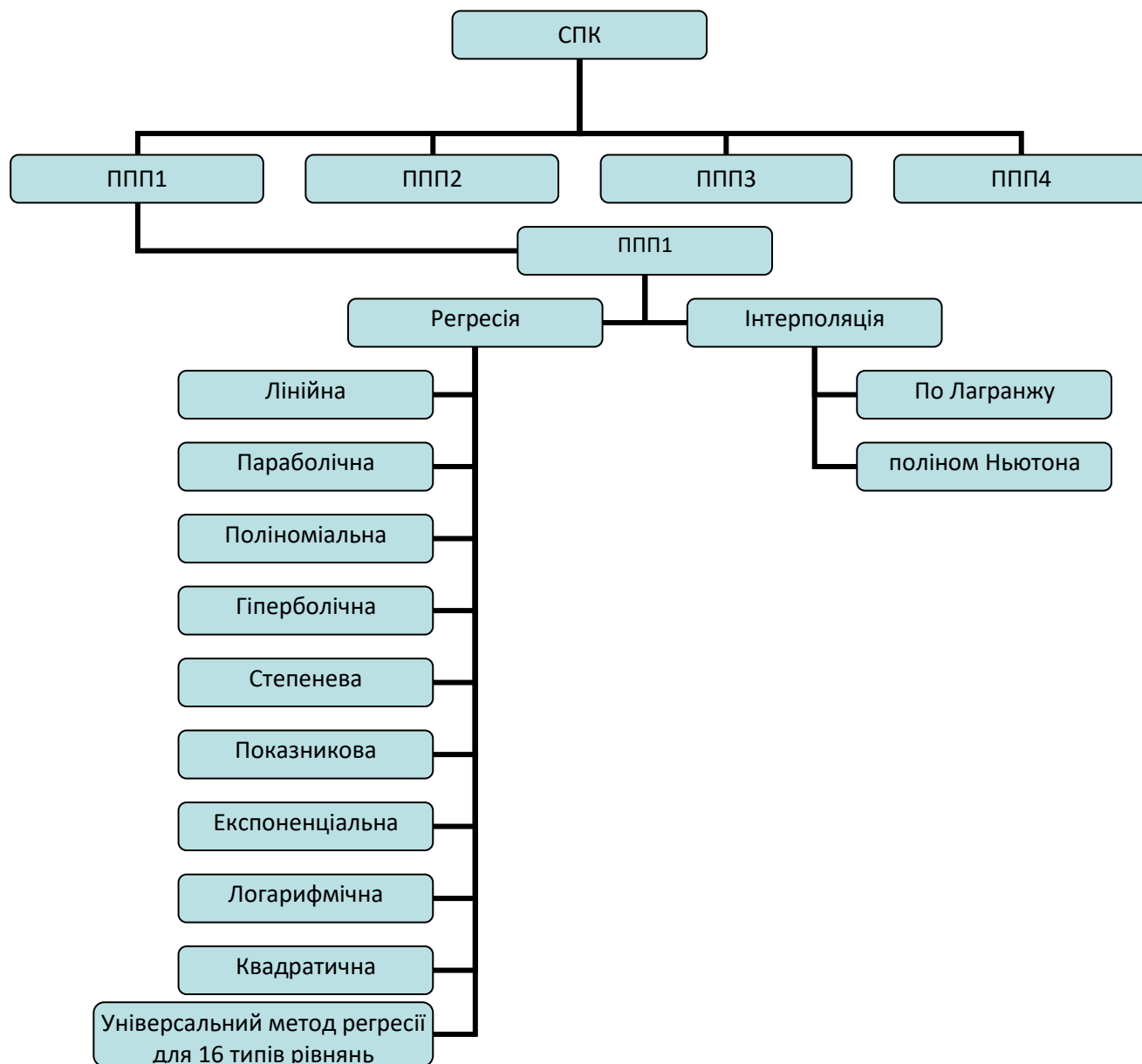


Рис. 5.10. Блок-схема пакету прикладних програм ППП1.

методи оптимізації функцій багатьох змінних без обмежень та з обмеженнями на них [20, 72, 178, 227]: метод Хука-Дживса (без обмежень); метод Нелдера-Мида (без обмежень); модифікований метод Хука-Дживса (з обмеженнями); комплексний метод (з обмеженнями); симплексний метод для лінійної та

дрібно-раціональної функції (з обмеженнями); метод випадкового пошуку (рис. 5.13). Роздруківка ППП4 представлено у додатку Г.

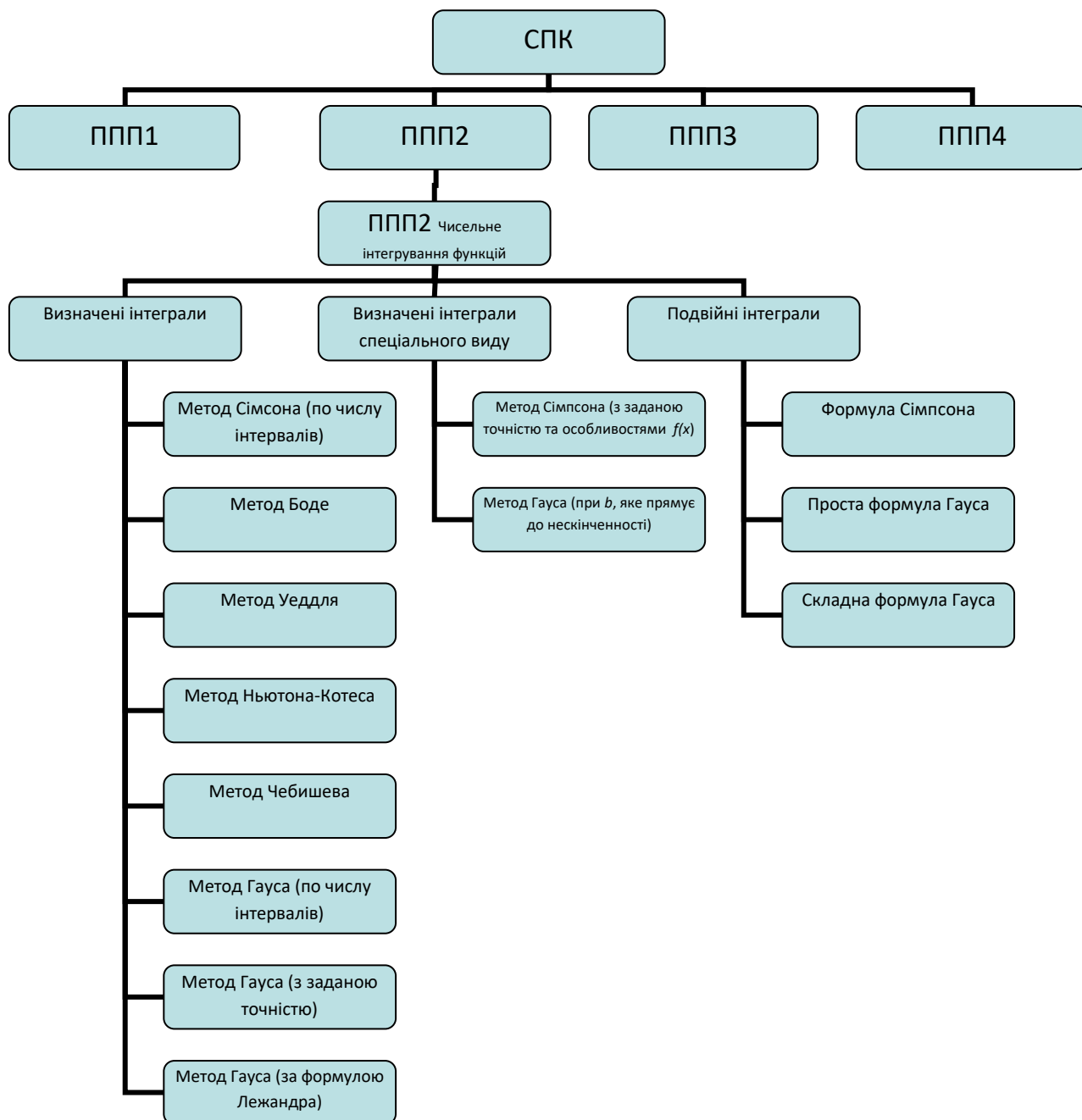


Рис. 5.11. Блок-схема пакету прикладних програм загального призначення ППП2.

Алгоритм практичного використання методу. Згідно з розробленим алгоритмом (рис. 5.14) на першому етапі формується вихідна база даних, яку створюють параметри зовнішніх термовпливів (зовнішній тепловий потік q_n , час його впливу t , швидкість обдуву потоком повітря u_∞ , час його дії τ ,

критерій Рейнольдса Re , що характеризує режим обтікання (ламінарний, турбулентний), геометрична форма та розміри оптичного елемента).

До вказаної бази даних відносяться теплофізичні та фізико-механічні властивості оптичних матеріалів (об'ємна теплоємність, коефіцієнт теплопровідності, густина, модуль пружності Юнга, коефіцієнт Пуасона тощо), отримано комплекс математичних моделей, а також пакети прикладних програм ППП1 – ППП4.

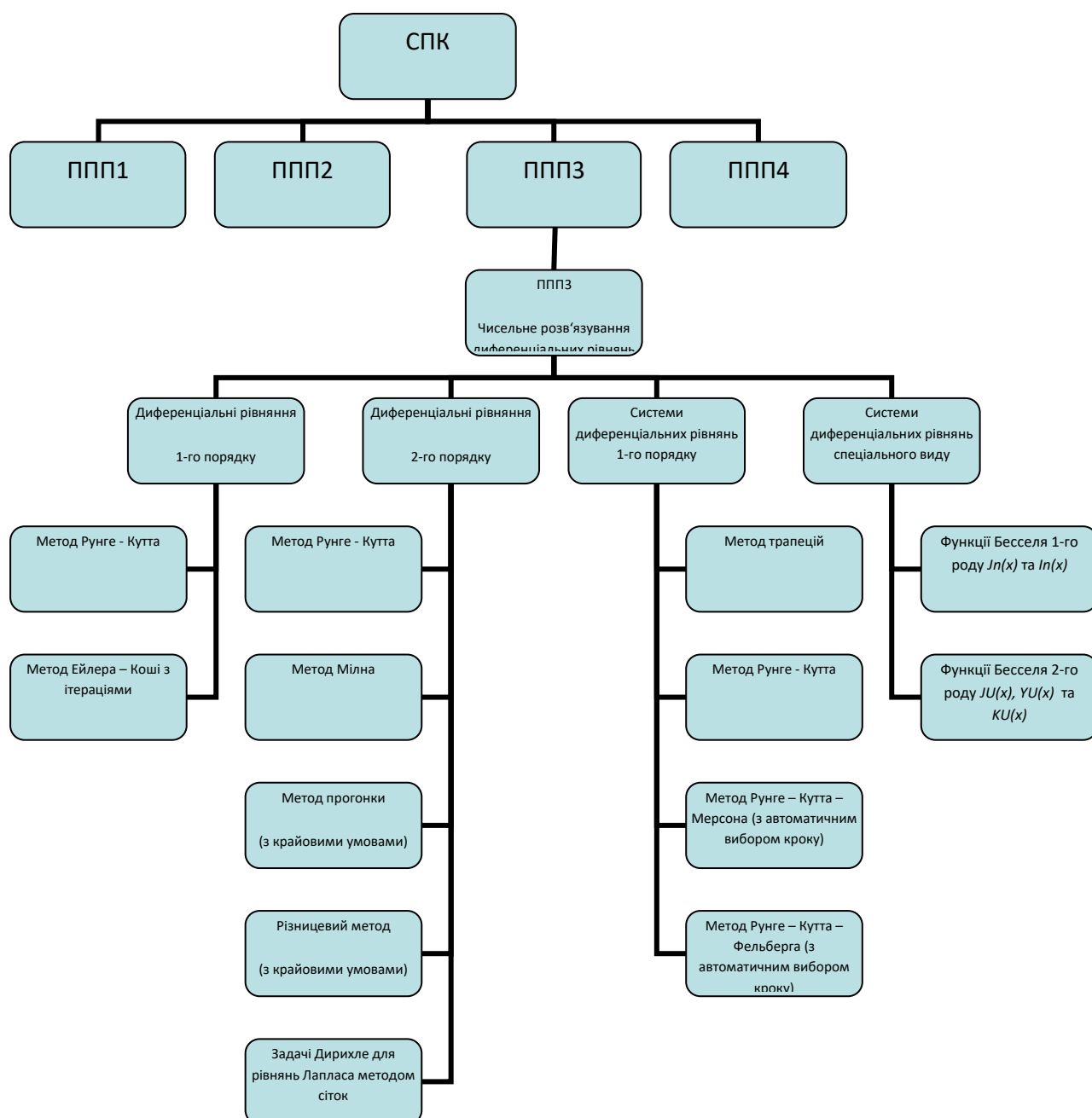


Рис. 5.12. Блок-схема пакету прикладних програм загального призначення ППП3.

На другому етапі вводяться значення модуля термопружних напружень $|\sigma|_{max}$, що виникають в зонах максимальних зовнішніх термовпливів (небезпечних зонах), а також товщини $h_{n,l}$ оплавленого шару на поверхні елементів, а також їх граничні значення σ^* та h_m^* , при перевищенні яких ($|\sigma|_{max} > \sigma^*$ – відповідає критичним значенням $q_n > q_n^*$, $t > t^*$, $h_{n,l} > h_m^*$, $u_\infty > u_\infty^*$, $Re > Re^*$ (в умовах експлуатації оптичних елементів)) відбувається або руйнування поверхневих шарів оптичних елементів, або їх глибоке оплавлення, що призводить до виходу з ладу приладів.

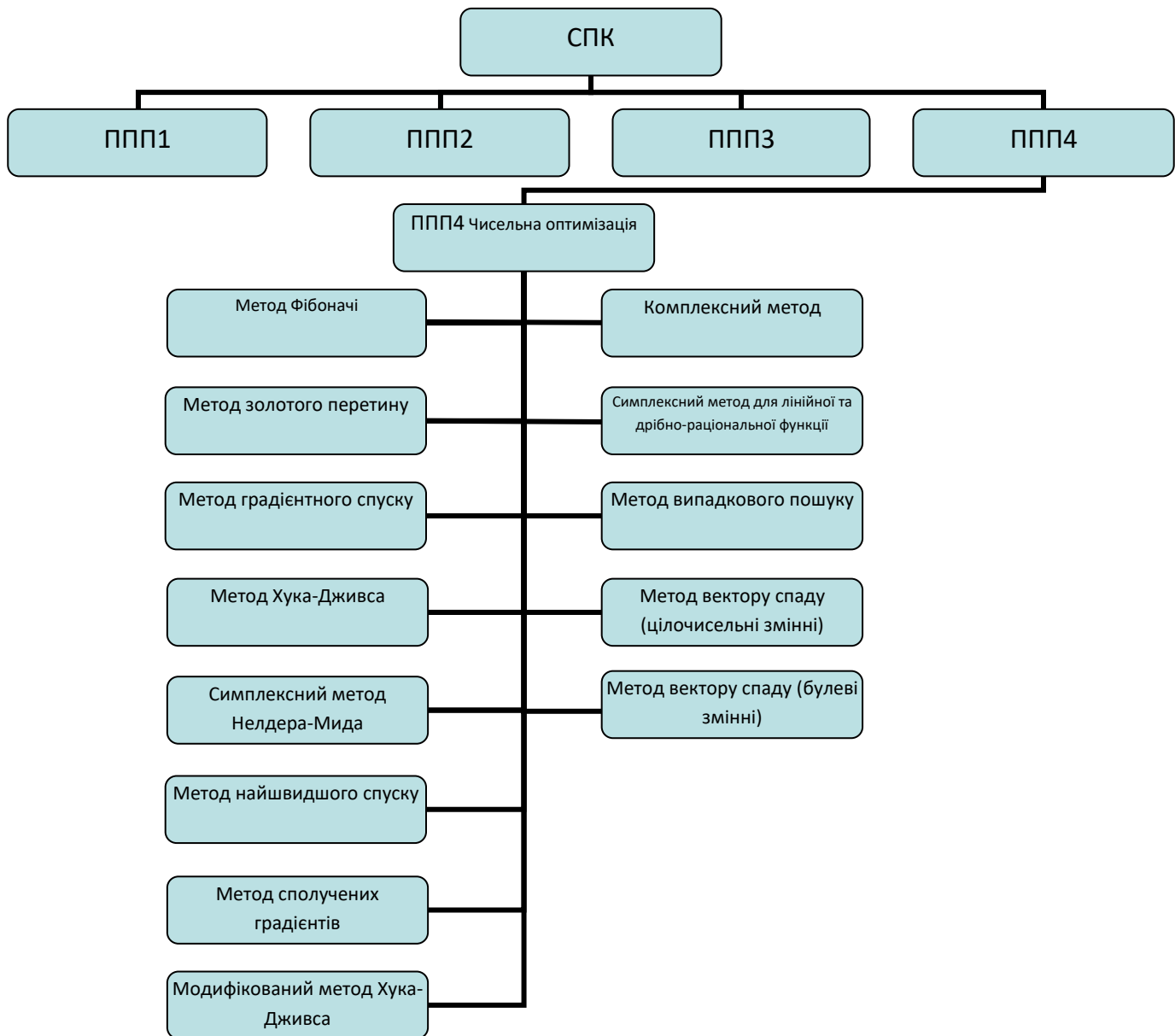


Рис. 5.13. Блок-схема пакету прикладних програм ППП4.

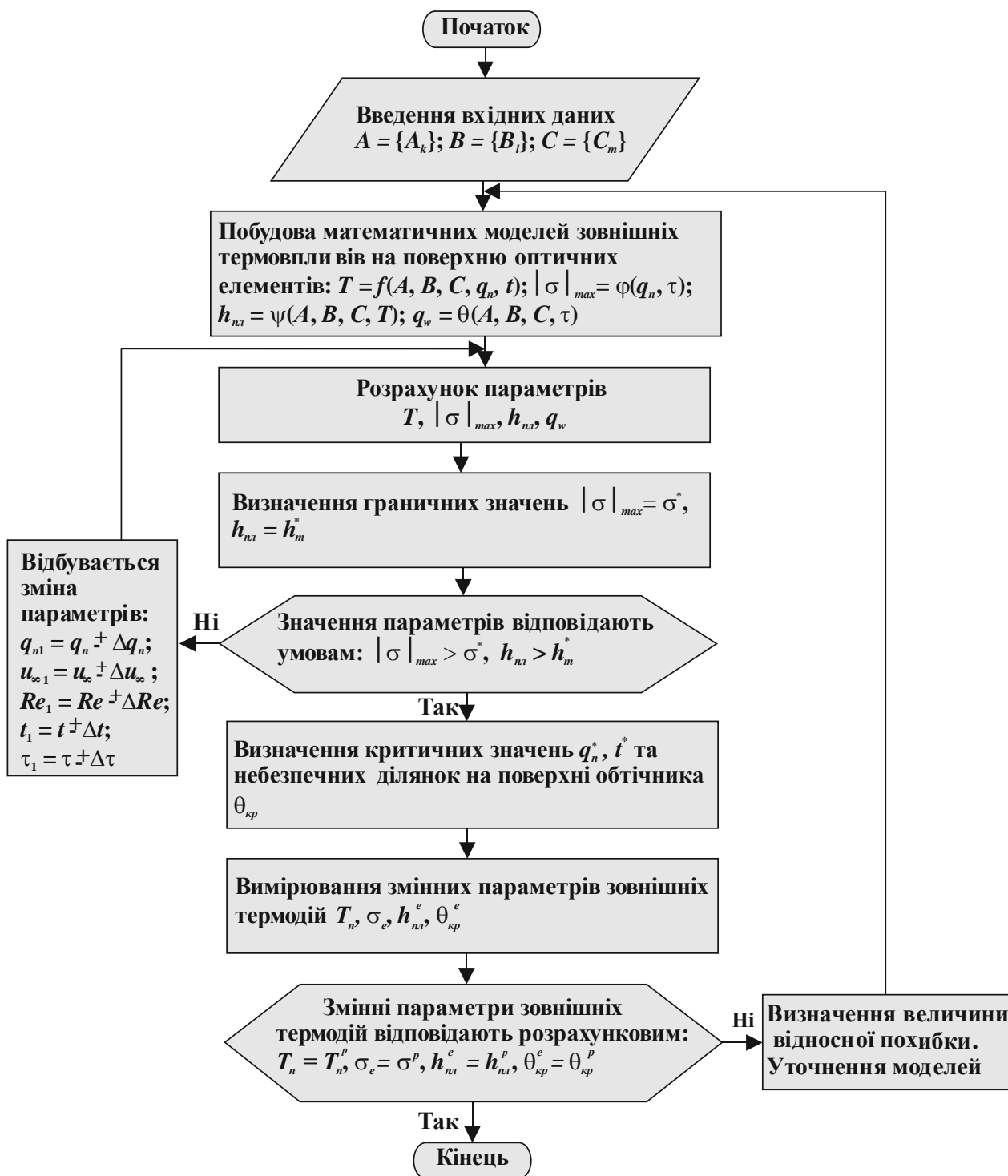


Рис. 5.14. Структурна схема алгоритму методу попереднього визначення критичних значень параметрів зовнішніх термовпливів: A – відомі фізико-хімічні властивості зовнішніх джерел теплової дії; B – механічні та теплофізичні характеристики оптичних елементів; C – розроблені математичні моделі та спеціалізований програмний комплекс у вигляді ППП1 – ППП4.

Далі вибираються моделі зовнішніх термовпливів на поверхню оптичних елементів та за допомогою пакетів прикладних програм виконуються розрахунки значень параметрів $|\sigma|_{max}$ та h_{nl} , потім вони порівнюються з їх гранично допустимими значеннями (σ^* та h_m^*), а також знаходяться місця розташування на поверхні елементів небезпечних зон, що визначаються координатами $\theta_{кр}(u_{\infty}^*, Re^*)$, які можуть зазнавати руйнувань в умовах експлуатації. Крім цього, здійснюються виміри в окремих елементах температури поверхні T_n , величини термопружних напружень σ та координат зазначених вище небезпечних ділянок $\theta_{кр}$, які зіставляються з результатами розрахунків і визначаються похибки розрахункових методів знаходження критичних значень параметрів зовнішніх термовпливів. При виявленні істотних розбіжностей між розрахунковими та експериментальними даними (більше 15...20 %) здійснюється корекція моделей.

5.2.1. Застосування методу для визначення критичних значень параметрів зовнішніх термовпливів на оптичні елементи

Розроблений метод було апробовано на різних оптичних елементах оптико-електронних приладів. При цьому враховувалась можливість нагріву оптичних елементів та їх руйнування до початку оплавлення, а також можливість глибокого оплавлення елементів.

Плоска пластина. Проведені розрахунки показали, що при зміні параметрів зовнішніх термовпливів величина $|\sigma|_{max}$ може досягати критичних значень $\sigma^*(q_n^*, t^*)$ (q_n^* , t^* – значення параметрів зовнішніх термовпливів, при яких виконується умова $|\sigma|_{max} = \sigma^*$), перевищення яких призводить до руйнування верхнього боку пластини (для всіх досліджуваних діапазонів зміни параметрів руйнування її нижнього боку не виникає).

Встановлено взаємно однозначна відповідність між параметрами q_n^* та t^* : для оптичного скла – збільшення значень t^* від 0,25 с до 1,4 с призводить до зменшення значень q_n^* від $2,3 \cdot 10^6$ Вт/м² до $1,4 \cdot 10^6$ Вт/м², а для оптичних керамік – збільшення значень t^* від 0,5 с до 1,4 с призводить до зменшення значень q_n^* від $2,3 \cdot 10^6$ Вт/м² до $2,1 \cdot 10^6$ Вт/м².

Зіставлення результатів розрахунків з отриманими експериментальними даними показало їх повну відповідність (відносна похибка не перевищувала 8...10 %).

Прямокутний елемент. В результаті проведених розрахунків (рис. 5.15) встановлено, що збільшення t^* від 0,35 с до 1,5 с призводить до зменшення значень q_n^* від $2,45 \cdot 10^6$ Вт/м² до $1,54 \cdot 10^6$ Вт/м² для оптичного скла К8, а збільшення t^* від 6 с до 14 с – до зменшення значень q_n^* від $2,6 \cdot 10^6$ Вт/м² до $2,15 \cdot 10^6$ Вт/м² для оптичної кераміки КО2. Зіставлення результатів розрахунків з експериментальним даними показало, що розходження між ними не перевищують 7...9 %.

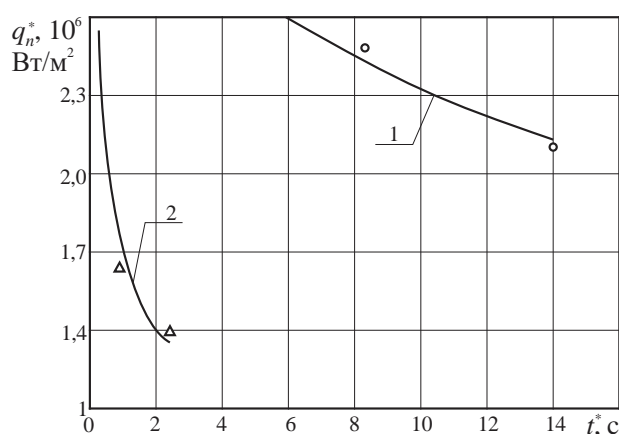


Рис. 5.15. Взаємозв'язок критичних значень зовнішнього теплового потоку q_n^* та часу його впливу t^* на прямокутний елемент з оптичної кераміки КО1 (1) та оптичного скла К8 (2) ($T_0 = 300$ К; $B = 0,03$ м, $H = 0,02$ м; $L = 0,12$ м): о, Δ – експериментальні дані.

Циліндричний елемент. З результатів проведених розрахунків встановлено, що при збільшенні параметрів зовнішніх термовпливів вони можуть досягати своїх критичних значень q_n^* та t^* , при яких термічні напруження задовільняють наступним умовам:

$$|\sigma_{zz}|_{max}, |\sigma_{\varphi\varphi}|_{max} \text{ та } (\sigma_{rr})_{max} > \sigma^*. \quad (5.1)$$

Умова (5.1) визначає параметри q_n^* та t^* . Так, наприклад, для оптичних матеріалів, що розглядаються, вказані параметри мають наступні значення: оптичне скло К8 при $q_n = 2,3 \cdot 10^6$ Вт/м², $t^* > 0,5$ с; оптичне скло К108 при $q_n = 2,3 \cdot 10^6$ Вт/м², $t^* > 1,3$ с; оптична кераміка КО2 при $q_n = 2,3 \cdot 10^6$ Вт/м², $t^* > 10$ с; оптична кераміка КО5 при $q_n = 2,3 \cdot 10^6$ Вт/м², $t^* > 8,7$ с.

Півсферичний елемент. Встановлено, що також, як й у випадку циліндричних елементів, для півсферичних елементів, що розглядаються, існують критичні значення q_n^* та t^* , які задовільняють умовам (5.1).

При цьому для оптичних матеріалів, які використовували, вказані параметри мають наступні значення: оптичне скло К8 при $q_n = 2,3 \cdot 10^6$ Вт/м², $t^* > 9,3$ с; оптичне скло БК10 при $q_n = 2,3 \cdot 10^6$ Вт/м², $t^* > 0,7$ с; оптична кераміка КО1 при $q_n = 2,3 \cdot 10^6$ Вт/м², $t^* > 8,6$ с; оптична кераміка КО3 при $q_n = 2,3 \cdot 10^6$ Вт/м², $t^* > 7,5$ с.

Зіставлення результатів розрахунків з окремими експериментальними даними показує їх повну якісну відповідність, кількісна ж відмінність між ними не перевищує 8...10 %.

Визначення критичних значень параметрів зовнішніх термовпливів при глибокому оплавленні оптичних елементів. В результаті проведених розрахунків, що при зовнішньому тепловому впливі на оптичні елементи (нестационарний режим) на його поверхні за короткий час ($t = 2...14$ с) утворюється розплавлений шар великої товщини $h_{n,l}$ (до 300...500 мкм), що

значно перевищує його гранично допустимі значення h_m^* (порядку 100... 150 мкм). Перевищення цих значень, як показують експериментальні дослідження з впливу на оптичні елементи зовнішніх термодій, призводить до порушення площинності поверхні елементів, утворення напливів тощо і, у кінцевому підсумку, до порушення їх геометричної форми та виходу з ладу приладів.

З умови $h_{nл} > h_m^*$ знаходяться наступні діапазони зміни критичних значень параметрів зовнішніх термовпливів на елементи з оптичного скла: $q_n^* = 1,5 \cdot 10^5 \dots 2,3 \cdot 10^6 \text{ Вт/м}^2$; $t^* = 2 \dots 8 \text{ с}$.

Таким чином, отримані за допомогою розробленого методу розрахункові дані з впливу зовнішніх термодій на поверхню оптичних елементів вказують на те, що як на початковій стадії впливу (в межах десятих часток секунди), так й на більш пізній стадії (в межах від декількох секунд до десятків секунд) при певних критичних сукупностях параметрів впливів (зовнішніх теплових потоків, часів їх впливу на оптичний елемент) спостерігається поверхневе руйнування елемента (поява тріщин, відколів та інших дефектів), що відповідає отриманим експериментальним даним.

Визначення критичних значень параметрів зовнішніх термовпливів на півсферичні обтічники в умовах пострілу та польоту. В результаті проведених розрахунків для півсферичних обтічників було встановлено, що при збільшенні швидкості обдуву потоком повітря від $7 \cdot 10^2 \text{ м/с}$ до $2 \cdot 10^3 \text{ м/с}$ величина $|\sigma|_{max}$ зростає як для ламінарного, так й для турбулентного режимів обтікання до значення $\sigma^* = |\sigma(u_\infty^*)|$ (σ^* – граничне значення термопружних напружень, при якому руйнується матеріал); u_∞^* – значення швидкості обдуву потоком повітря, при якій величина $|\sigma|_{max}$ стає рівною σ^*). При цьому, величина u_∞^* суттєво залежить як від режиму обтікання півсфери, так й від часу зовнішнього теплового впливу t : наприклад, при збільшенні t від 5 с до 35 с значення u_∞^*

зменшуються у 1,4...1,5 рази (турбулентний режим обтікання); для всього дослідженого діапазону зміни u_∞ у разі ламінарного режиму обтікання значення u_∞^* відсутні.

Таким чином, в зонах максимального зовнішнього термовпливу на поверхню обтічників різної товщини процес руйнування його матеріалу найбільш істотно залежить від режиму обтікання: для турбулентного режиму обтікання руйнування матеріалу обтічника відбувається у поверхневих шарах обтічника; для ламінарного режиму обтікання руйнування матеріалу обтічника вже не спостерігається.

Отримані результати апробації розробленого методу показують, що він може бути використаний на стадії проектування та розробки приладів для попередньої оцінки діапазонів зміни критичних значень параметрів зовнішніх термовпливів, та дозволяє шляхом регулювання умов функціонування виробів з приладами, що розглядаються, (наприклад, швидкістю нагріву, швидкістю та напрямком пострілу виробу тощо) значно скорочувати вказані діапазони і, тим самим, підвищувати вірогідність безвідмовної роботи приладів в умовах експлуатації.

5.3. Застосування розроблених методів для покращення техніко-експлуатаційних характеристик оптико-електронних приладів

Розроблені вище методи на практиці були використані для покращення техніко-експлуатаційних характеристик наступних оптико-електронних приладів [276 – 279, 319, 321 – 323, 326]:

- імпульсних лазерних далекомірів прицільних комплексів;
- лазерних медичних приладів з волоконно-оптичними світловодами;
- ІЧ-приладів з оптичними обтічниками.

5.3.1. Підвищення точності та розширення діапазонів вимірювання дальності імпульсними лазерними далекомірами прицільних комплексів шляхом електронно-променевої обробки робочих поверхонь їх оптичних вікон

Підвищення точності вимірювання дальності. Для експериментальних досліджень використовували прилад прицільного комплексу з робочою довжиною хвилі лазерного випромінювання $\lambda = 1,06$ мкм. Передавальний та приймальний канали імпульсного лазерного далекоміра оснащені вихідними та вхідними вікнами, виготовленими з оптичного скла К8 та БК10 діаметром $d_1, d_2 = 3 \cdot 10^{-2} \dots 5 \cdot 10^{-2}$ м та товщиною $H_1, H_2 = 4 \cdot 10^{-3} \dots 6 \cdot 10^{-3}$ м відповідно [83, 84, 89].

На рис. 5.16 а показано загальний вигляд приладу прицільного комплексу (а) та імпульсного лазерного далекоміра, який складається з оптичної головки з лазерним далекоміром (1); оптико-механічного блоку (2); окуляру приладу (3); пульта керування тепловізійною камерою навідника (4); вихідного оптичного вікна передавального каналу далекоміру (5).

На спрощених схемах передавального (рис. 5.16 б) та приймального каналів (рис. 5.16 в) схематично показано: потік ІЧ-випромінювання, направлений на об'єкт; вхідне оптичне вікно приймального каналу далекоміру; потік ІЧ-випромінювання, який розсіяний об'єктом та попадає у вхідне вікно; фотоприймальний пристрій (ФПП); блок формування сигналу (БФС).

В результаті проведення досліджень з вимірювання дальності до рухомих та нерухомих об'єктів (цілей) за допомогою імпульсного лазерного випромінювання (довжина хвилі $\lambda = 1,06$ мкм, робоча частота імпульсів, які генеруються $\nu = 2 \cdot 10^7$ Гц) [83, 84] було встановлено, що шляхом електронно-променевої обробки поверхонь оптичних вікон передавального та приймального каналів імпульсного лазерного далекоміра в результаті збільшення спектрального коефіцієнта пропускання точність її вимірювання при $F_n = 8 \cdot 10^8$ Вт/м² та $V = 5 \cdot 10^{-3}$ м/с можна збільшити на 7...15 % (рис. 5.17, де

$\bar{\Delta L} = \frac{\Delta L^{обр}}{\Delta L_0}$; $\Delta L_0, \Delta L^{обр}$ – значення похибки вимірювання дальності до та після електронно-променевої обробки вікон відповідно; $\Delta L_0 = 10$ м на відстані $L = 10^3$ м).

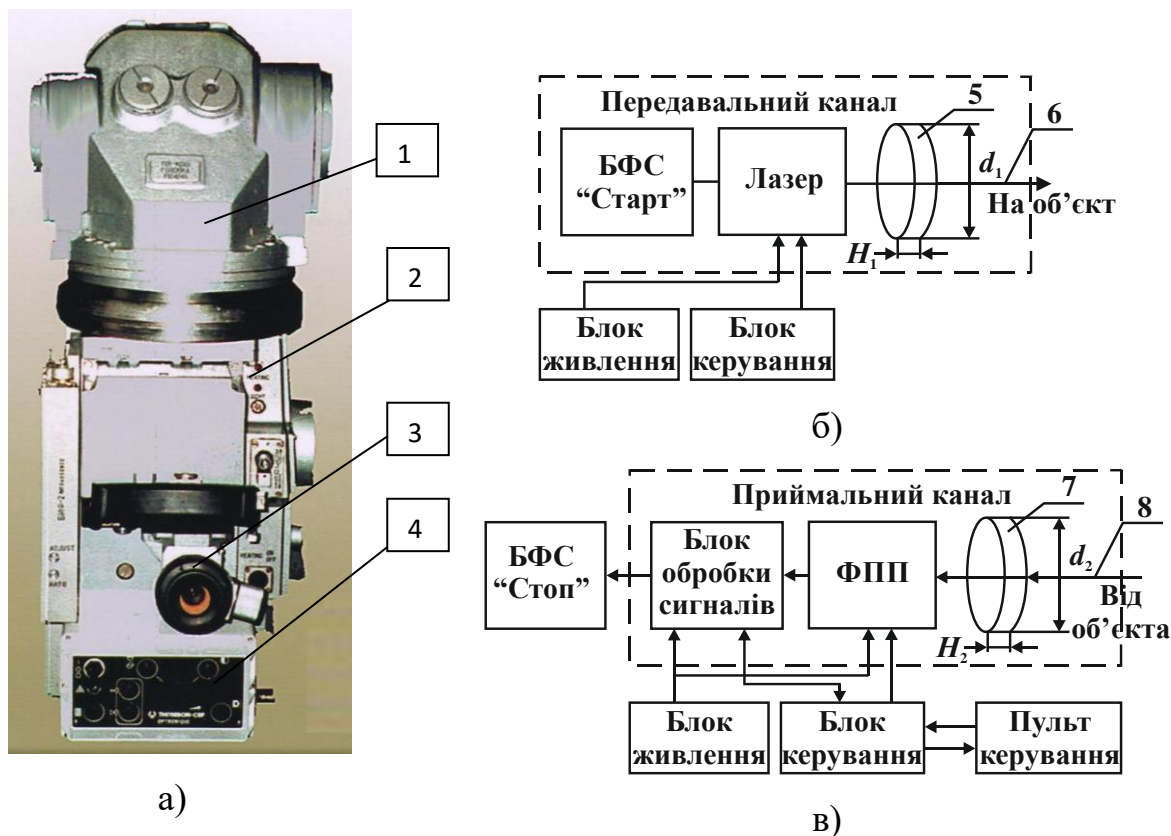


Рис. 5.16. Загальний вигляд приладу прицільного комплексу (а) та спрощені схеми передавального (б) та приймального (в) каналів імпульсного лазерного далекоміра: потік ІЧ-випромінювання, направлений на об'єкт (6); вхідне оптичне вікно приймального каналу далекоміру (7); потік ІЧ-випромінювання, який розсіяний об'єктом та попадає у вхідне вікно (8); фотоприймальний пристрій (ФПП); блок формування сигналу (БФС).

Розширення діапазонів вимірювання дальності. Для визначення впливу коефіцієнта k_λ на величину максимальної дальності використовувалось наступне трансцендентне рівняння [83, 84]:

$$\bar{L}^2 = k_\lambda \cdot e^{-2 \cdot \alpha_a \cdot L_0 \cdot (\bar{L} - 1)}, \quad (5.2)$$

де $\bar{L} = \frac{L^{обр}}{L_0}$ (L_0 – початкова дальність; $L^{обр}$ – значення дальності після

електронно-променевої обробки оптичних вікон (збільшення k_λ)); $\bar{k}_\lambda = \frac{k^{обр}}{k_0}$

($k_0, k^{обр}$ – значення коефіцієнта пропускання ІЧ-випромінювання до та після електронно-променевої обробки вікон відповідно); α_a – коефіцієнт затухання лазерного випромінювання у атмосфері, m^{-1} .

Розрахунки імпульсного лазерного далекоміра прицільного комплексу, який оснащений вихідними та вхідними вікнами з оптичного скла К8 та БК10, діаметром $d = 3 \cdot 10^{-2}$ м та товщиною $H = 4 \cdot 10^{-3}$ м за рівнянням (5.2) проводились для необроблених та оброблених електронним променем оптичних вікон (густина теплової дії променю $F_n = 2,5 \cdot 10^7$ Вт/м² та швидкості його руху $V = 5 \cdot 10^{-2}$ м/с). При цьому для випадку метеорологічної дальності видимості $S_m > 10 \cdot L_0$ (повітряна димка на об'єкті відсутня та чітко сприймається сам об'єкт та його деталі ($L_0 = 10^3$ м, $S_m = 2 \cdot 10^4$ м, $\alpha_a = 0,082$)) [83] результати розрахунків представлено на рис. 5.18. Аналіз даних, представлених на рис. 5.18, показує, що при збільшенні коефіцієнта пропускання ІЧ-випромінювання k_λ величина L зростає на 7...10 %.

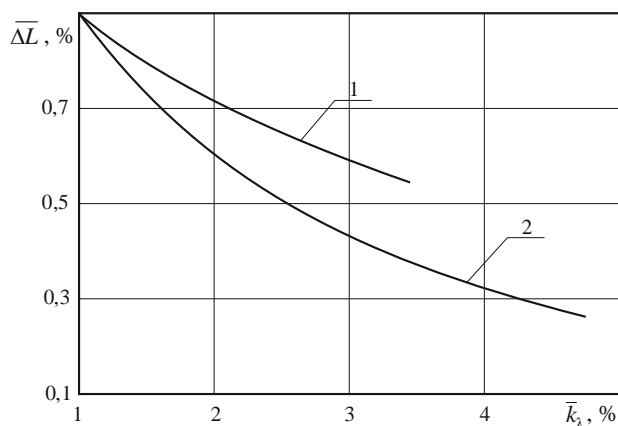


Рис. 5.17. Залежність відносної похибки вимірювання дальності від відносного коефіцієнта пропускання ІЧ-випромінювання оптичними вікнами з оптичного скла К8 (1) та БК10 (2).

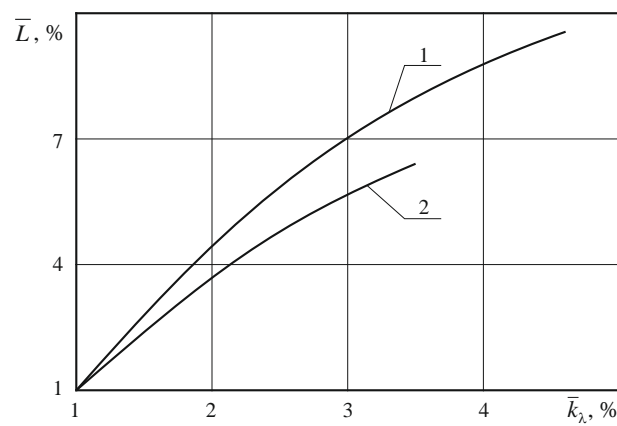
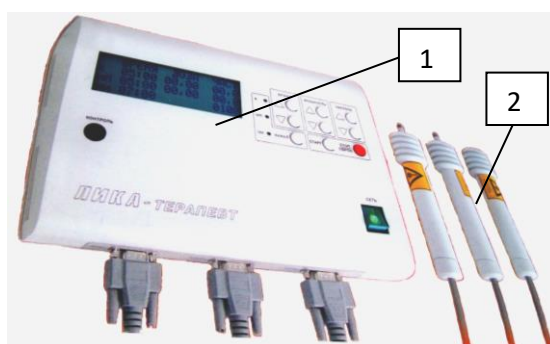


Рис. 5.18. Залежність відносної дальності імпульсного лазерного далекоміру від відносного коефіцієнта пропускання ІЧ-випромінювання оптичними вікнами з оптичного скла БК10 (1) та К8 (2).

5.3.2. Підвищення ймовірності безвідмовної роботи волоконно-оптичних світловодів лазерних медичних приладів при їх експлуатації

При використанні потужних лазерних випромінювачів (густина теплової дії більше $10^7 \dots 10^8$ Вт/м²) в медичних приладах, торцеві поверхні їх світловодів, через які вводиться випромінювання, піддаються інтенсивним термічним впливам. Це призводить до утворення на цих поверхнях негативних дефектів (тріщин, відколів та ін.), які призводять до зменшення (більш, ніж у 2...3 рази) коефіцієнта k_λ , а також до руйнування світловодів, що, у кінцевому підсумку, призводить до відмови медичних приладів при їх експлуатації [163, 164].

Для проведення експериментальних досліджень використовували лазерний медичний прилад (рис. 5.19), який складається з блоку керування (1); виносного лазерного випромінювача (2).



а)

Рис. 5.19. Загальний вигляд лазерного медичного приладу: 1 – блок керування лазерним медичним приладом; 2 – виносний лазерний випромінювач.

Проведені випробування по нагріву торцевих поверхонь світловодів лазерних медичних приладів на спеціалізованому обладнанні, що моделює зовнішній нагрів поверхні оптичних елементів, якому піддаються прилади при їх експлуатації, показали, що у випадку оброблених електронним променем торцевих поверхонь в результаті підвищення їх стійкості до зовнішніх теплових

впливів менше їх руйнувань, ніж для необроблених торцевих поверхонь світловодів (табл. 5.1).

Таблиця 5.1

Результати впливу електронно-променевої обробки торцевих поверхонь світловодів лазерних медичних приладів на кількість їх руйнувань \bar{k}^* (%) в залежності від швидкості зовнішнього нагріву V_1 (К/с)

Торцева поверхня світловоду $V_1, \text{К/с}$	$\bar{k}, \%$	
	До електронно- променевої обробки	Після електронно- променевої обробки
100...200	40...50	30...40
200...300	50...60	40...45
300...400	60...70	45...60

**)Примітка.* Світловод з оптичного скла К8; $\bar{k} = \frac{k}{k_0}$, де k_0, k – загальна кількість

випробуваних світловодів та кількість світловодів, яка піддалась руйнуванню відповідно.

Коефіцієнт надійності як критерій працездатності світловодів лазерних медичних приладів при різних швидкостях зовнішнього нагріву визначався згідно стандартних методів оцінки показників надійності за експериментальними даними [106].

Результати проведених досліджень дозволили встановити, що збільшення швидкостей нагріву торцевих поверхонь світловодів медичних приладів (від 100 К/с до 400 К/с) призводить у випадку фінішної електронно-променевої обробки цих поверхонь (при $F_n = 3 \cdot 10^8 \text{ Вт/м}^2$ та $V = 8 \cdot 10^{-3} \text{ м/с}$, які забезпечують кварцування поверхні оптичних елементів, що підвищує їх стійкість до зовнішніх теплових навантажень) до збільшення ймовірності їх безвідмовної роботи на 10...15 % (рис. 5.20).

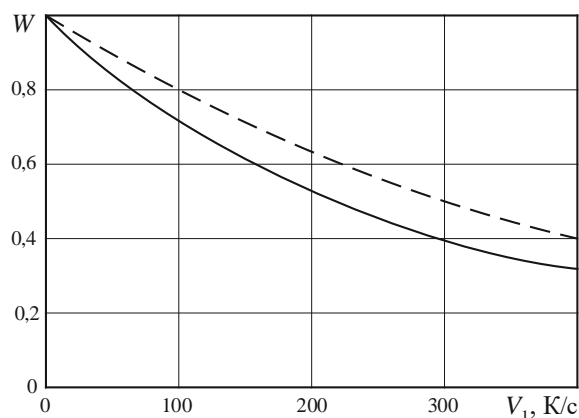


Рис. 5.20. Залежність ймовірності безвідмовної роботи лазерних медичних приладів від швидкості зовнішнього нагріву торцевих поверхонь світловодів з оптичного скла К8 ($W(V_1) = 1 - \frac{N(V_1)}{N_0}$, $W(V_1)$ - ймовірність безвідмовної роботи медичних приладів в умовах зовнішніх термовпливів; $N(V_1)$ - кількість приладів, які відмовили при заданих швидкостях нагріву (руйнування торцевих поверхонь світловодів медичних приладів приймалось за відмову приладів в цілому); N_0 - загальна кількість світловодів, які піддані випробуванням): торцеві поверхні, не оброблені електронним променем (—); торцеві поверхні, які оброблені електронним променем (---).

5.3.3. Підвищення ймовірності безвідмовної роботи оптичних обтічників ІЧ-приладів при експлуатації

Схема типового ІЧ-приладу з оптичним обтічником, який піддається руйнуванню в умовах експлуатації (центральний кут обтічника, де відбувається його руйнування $\Delta\theta_{max} \cong 4^{\circ}$ ($\theta_{max} \cong 19...23^{\circ}$); радіус зовнішньої поверхні обтічника $R_w = 2 \cdot 10^{-2}$ м; товщина плоского шару півсферичного обтічника $H = 4 \cdot 10^{-3}$ м; максимальна густина зовнішнього теплового впливу $(q_w)_{max} = 3 \cdot 10^5 \dots 2,5 \cdot 10^6$ Вт/м²), представлено на рис. 5.21.

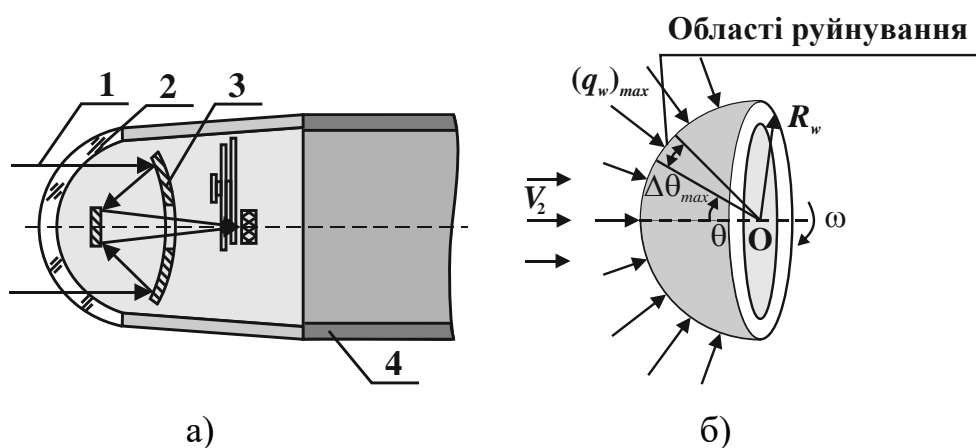


Рис. 5.21. Схема типового ІЧ-приладу (а) з оптичним обтічником (б): 1 – вхідне ІЧ-випромінювання від спостережуваного об'єкта; 2 – обтічник з оптичної кераміки; 3 – функціональна схема ІЧ-приладу; 4 – загальний вигляд виробу, що містить ІЧ-прилад.

Проведені випробування півсферичних обтічників ІЧ-приладів на спеціалізованій установці (розділ 2), що моделює надзвуковий обдув потоком повітря обтічників зі швидкістю V_2 до $2 \cdot 10^3$ м/с та їх вісесиметричне обертання з кутовою швидкістю ω до $4 \cdot 10^3$ рад/с, яким піддаються ІЧ-прилади в умовах експлуатації надзвукової техніки, показали, що у випадку оброблених електронним променем обтічників в зонах максимальних зовнішніх термовпливів (найбільш небезпечних зонах на їх поверхнях, де обтічники піддаються руйнуванням), в результаті підвищення їх стійкості до зовнішніх теплових та механічних ударів, спостерігається вже менше їх руйнувань, ніж для необроблених обтічників (табл. 5.2).

Коефіцієнт надійності як критерій працездатності оптичних обтічників ІЧ-приладів при надзвуковому обдуві потоком повітря визначався згідно стандартного методу оцінки показників надійності за експериментальними даними [106]. Результати проведених досліджень дозволили встановити, що збільшення швидкості обдуву потоком повітря обтічників ІЧ-приладів (від $7 \cdot 10^2$ м/с до $2 \cdot 10^3$ м/с) призводить у випадку електронно-променевої обробки їх поверхонь (при $F_n = 5 \cdot 10^8$ Вт/м² та $V = 5 \cdot 10^{-3}$ м/с, які забезпечують підвищення мікротвердості поверхні оптичних елементів (до 5...6 ГПа) та утворення

зміцнених шарів товщини до 90...210 мкм, що суттєво підвищує стійкість оптичних елементів до зовнішніх термоударних впливів та механічних навантажень) до збільшення ймовірності їх безвідмовної роботи на 15...20 % (рис. 5.22).

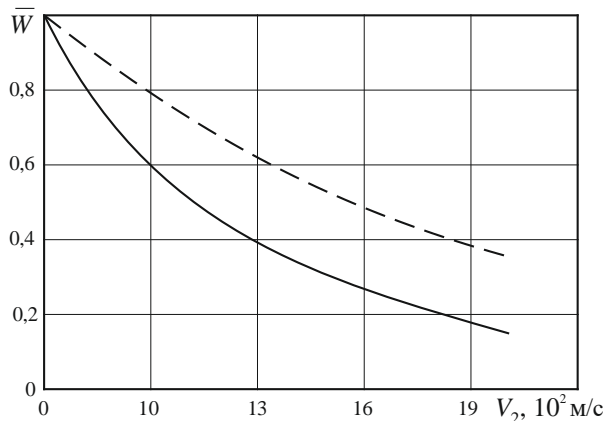


Рис. 5.22. Залежність ймовірності безвідмовної роботи ПЧ-приладів в умовах пострілу та польоту від швидкості надзвукового обдуву потоком повітря їх півсферичних обтічників з оптичної кераміки КО2: обтічники, не оброблені електронним променем (—); обтічники, оброблені електронним променем (---).

Таблиця 5.2

Результати впливу електронно-променевої обробки півсферичних обтічників ПЧ-приладів самонаведення та спостереження на кількість їх руйнувань \bar{n}^* (%) в залежності від швидкості надзвукового обдуву потоком повітря V_2 (м/с)

Обтічник $V_2, \text{ м/с}$	$\bar{n}, \%$	
	До електронно-променевої обробки	Після електронно-променевої обробки
$5 \cdot 10^2 \dots 10^3$	30...40	15...25
$10^3 \dots 1,5 \cdot 10^3$	40...50	25...35
$1,5 \cdot 10^3 \dots 2 \cdot 10^3$	50...60	35...40

^{*)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 вісесиметричного обертання обтічників у діапазоні зміни (до $4 \cdot 10^3$ рад/с) не впливає помітно на кількість їх руйнувань.

Таким чином, електронно-променева обробка робочих поверхонь оптичних вікон лазерних далекомірів, торцевих поверхонь світловодів лазерних медичних приладів, а також ділянок на поверхнях оптичних обтічників ІЧ-приладів, де вони піддаються максимальним зовнішнім термовпливам, шляхом збільшення спектрального коефіцієнта пропускання ІЧ-випромінювання, підвищення стійкості їх поверхневих шарів до зовнішніх теплових та механічних ударів призводить до покращення експлуатаційних характеристик приладів в умовах інтенсивних зовнішніх термовпливів.

5.3.4. Використання розроблених методів на підприємствах оптичного приладобудування, а також окремих результатів роботи у навчальному процесі ВНЗ України

Слід відмітити, що результати теоретичних та експериментальних досліджень, а також розроблені методи знайшли практичне використання та впровадження (підтверджено актами впровадження, див. додаток Е) на підприємствах України (КП СПБ "Арсенал" (м. Київ), Інститут фізики напівпровідників ім. Лашкарьова (м. Київ), ПраТ "Авікос" (м. Львів), ДПНВК "Фотоприлад" (м. Черкаси), ПМПП "Фотоника Плюс" (м. Черкаси)) та за кордоном (ДНВО "Центр" НАНБ (м. Мінськ, Білорусь), ІТМП НАНБ ім. А. В. Ликова (м. Мінськ, Білорусь), ТДВ "Мікротестмашини" (м. Гомель, Білорусь)).

При цьому впровадження методичних рекомендацій "Прогнозування критичних значень небезпечних чинників для попередження руйнувань оптичних елементів точного приладобудування на об'єктах їх виробництва, зберігання, транспортування та застосування" (затверджено державним підприємством ДПНВК "Фотоприлад" (м. Черкаси, 2016 р.)), а також засобів контролю дозволило: підвищити точність та розширити діапазони вимірювання дальності імпульсних лазерних далекомірів на 7...15 %; збільшити ймовірність безвідмовної роботи оптичних обтічників ІЧ-приладів та волоконно-оптичних

світловодів лазерних медичних приладів в умовах екстремальних зовнішніх термовпливів на 10...20 %; отримати економічний ефект 360 тис. грн.

Крім цього, окремі результати дисертації (результати експериментальних досліджень та експериментально-статистичні моделі впливу зовнішніх термовпливів на поверхню оптичних елементів різної геометричної форми та розмірів, підручник та навчальний посібник з грифом МОН України (2012 р.) [9, 64]) використовуються у навчальному процесі при читанні лекцій, проведенні лабораторних робіт та практичних занять, виконанні курсових та дипломних проєктів з дисциплін: “Лазерні технології в медичному приладобудуванні”, “Оптичні та медичні прилади”, “Нанотехнології в медичному приладобудуванні”, “Матеріалознавство” (Національний технічний університет України “КПІ” ім. Ігоря Сікорського); “Фізика”, “Теоретичні основи теплотехніки”, “Теоретичні основи електротехніки”, “Технологія приладобудування”, “Лазерні технології та обладнання у виробництві приладів”, “Проектування оптико-електронних приладів”, “Нанотехнології у медичному приладобудуванні”, “Методи обробки поверхонь”, “Фізико-хімічні основи обробки матеріалів КПЕ” (Черкаський державний технологічний університет) (див. додаток Е).

Нині видано 1 монографію (2011 р.) [62], яка широко використовуються в якості довідникового посібника з фізико-механічних, теплофізичних та термоміцнісних властивостей оптичних елементів точного приладобудування різної геометричної форми та розмірів, включаючи фізико-технічні процеси модифікації поверхневих шарів вказаних елементів електронно-променевим методом у ряді ВНЗ України (Національний технічний університет України “КПІ” ім. Ігоря Сікорського (м. Київ), Черкаський державний технологічний університет) (див. додаток Е).

5.4. Перспективи подальшого практичного використання електронно-променевої технології в точному приладобудуванні

Розглянуто наступні напрямки подальшого використання електронно-променевої технології у точному приладобудуванні, у організації яких та

отриманні перших позитивних результатів автор приймала безпосередню участь [30 – 32, 35, 61 - 63].

5.4.1. Обробка криволінійних поверхонь оптичних елементів та створення на них функціональних мікропрофілей різної геометричної форми за допомогою системи нерухомих одиничних електронних променів

Для обробки оптичних елементів необхідно створювати розподілені теплові впливи вздовж їх поверхні [44, 45].

На практиці закон розподілу густини теплового впливу $q_n(x)$ реалізується за допомогою переміщення локального джерела енергії. Тому виникає задача визначення параметрів закону руху джерела, при яких забезпечується розподілений вплив $q_n(x)$. Ця задача відома як задача реалізації заданого теплового впливу $q_n(x)$ за допомогою рухомого джерела енергії (електронного променя), або просто – задача реалізації [249, 250]. При розв’язанні задачі реалізації неминуче постає питання про формальне представлення джерела рухомого теплового впливу. При цьому у задачах реалізації, що зустрічаються на практиці [62, 249], в основному, використовується представлення рухомих джерел у наступному вигляді (одномірний випадок):

$$F(x,t) = u(t) \cdot \psi[x - s(t), k(t)], \quad (5.3)$$

де $F(x,t)$ – функція, що описує вплив рухомого джерела (керування); x – координата в напрямку руху джерела; t – час; $u(t)$ – інтенсивність впливу; ψ – нормирована функція, що описує форму джерела; $s(t)$, $k(t)$ – відповідно, закон переміщення центру впливу та закон зміни його форми (коефіцієнт зосередженості).

Слід зазначити, що рухоме керування у формі (5.3) надає на практиці великі можливості [45, 250], оскільки одночасно може здійснюватися декількома каналами: шляхом зміни траєкторії переміщення джерела, його інтенсивності та форми. При цьому в ряді випадків, виходячи з отриманого розв’язку задачі оптимального керування [249], або з технологічних міркувань,

більш переважним виявляється керування інтенсивністю при фіксованій швидкості руху. В той же час в окремих випадках представляє інтерес для досягнення поставленої мети керування рухом джерела при його сталій інтенсивності [250].

Постановка задачі реалізації, яка прийнята в теперішній час, полягає в наступному [45, 249, 250]. Потрібно відшукати параметри $u(t)$, $s(t)$ та $k(t)$ джерела заданої форми, що переміщується по об'єкту, з інтегрального рівняння

$$q_n(x) = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) \cdot \psi[x - s(t), k(t)] dt \quad (5.4)$$

при наявності певних обмежень на вказані параметри (\bar{T} – час обробки (період при багатоцикловому русі джерела)).

Фізичний зміст задачі реалізації (5.4) полягає у забезпеченні однакових “внесків” тепла від заданого розподіленого джерела та від рухомого джерела в будь-яку точку оброблюваного об'єкта.

Аналітичний розв'язок інтегрального рівняння (5.4), що відноситься до рівнянь Фредгольма I-го роду [249], викликає значні і поки непереборні труднощі. Основні з них пов'язані з нелінійністю цього рівняння відносно шуканих функцій $s(t)$ та $k(t)$, а також з наявністю обмежень на ці функції. При цьому методів аналітичного розв'язку інтегральних рівнянь Фредгольма I-го роду при довільних ψ з обмеженнями на шуканий розв'язок в теперішній час не існує. Таким чином, в теперішній час задача реалізації в загальному випадку не має розв'язку. Тому для розв'язання практичних задач реалізації використовують чисельні методи [250]: наприклад, метод розв'язання задачі реалізації в середньому, який призводить до чисельного ітеративного розв'язку варіаційної задачі. Також використовується метод розв'язання задачі реалізації, розроблений з врахуванням кусково-лінійної форми оптимального розподіленого впливу $q_n(x)$ (заданого), який вважається вихідним моментом при постановці задачі реалізації. При цьому приймається, що інтенсивність джерела в процесі керування приймає деяке постійне значення $u(t) = u_0$, а мета

керування досягається вибором u_0 та законом переміщення $s(t)$. Ця умовність пояснюється наступними властивостями рухомого керування, що виникають на практиці. Як вказувалося вище, керуючими параметрами рухомого впливу є його інтенсивність $u(t)$, коефіцієнт форми $k(t)$ та закон переміщення центру $s(t)$. Однак при розгляданні конкретних задач керування рухомим джерелом у процесах обробки [39, 62] слід зазначити, що керування в цих випадках частіше всього здійснюється за рахунок переміщення джерела по поверхні об'єкта. Це пояснюється, з одного боку, труднощами технічного характеру, що виникають при реалізації керування фокусуванням та потужністю електронного променя внаслідок великої інерційності каналів керування параметрами, а також внаслідок необхідності введення гальванічної розв'язки ланцюгів високої напруги та керуючих схем, а з іншого боку – тим, що при однакових можливостях керування потужністю джерела та його переміщенням, наприклад, в задачах швидкодії оптимальним є керування законом руху при постійному рівні потужності. Таким чином, у практичних задачах керування при електронно-променевої обробці намагаються, в першу чергу, більш повно використовувати можливості рухомого керування шляхом оптимізації закону його переміщення по поверхні (s – керування).

Розв'язок задачі реалізації за допомогою оптимізації керування одиничним рухомим електронним променем. Особливості математичного опису методу електронної обробки (як зазначалося вище) дозволяють віднести його до особливого класу систем керування – систем з розподіленими параметрами (СРП) [44, 45]. При цьому системи, які відносяться до класу СРП з рухомим впливом об'єднує те, що до рівняння зв'язку, яке описує об'єкт, вводиться закон, що характеризує зміну в часі просторових характеристик керуючого впливу. Ця особливість СРП з рухомим впливом призводить до істотного ускладнення задач керування, оскільки закон переміщення джерела входить у математичні рівняння нелінійно. Як вказувалося вище, вирішення таких задач в загальному вигляді в даний час невідомо [249, 250].

Задача рухомого оптимального керування в загальному вигляді полягає в наступному [249]: визначити таке допустиме керування $F^*(x,t)$, яке задає траєкторію переміщення стану об'єкта з початкового положення в задане і при цьому доставляє екстремум функціоналу J , з урахуванням обмежень на допустимі стани і на керування. Формальний запис поставленої задачі виглядає наступним чином

$$F^*(x,t) \rightarrow \min \{ J / T(x,t) \in \Omega_0 \}, \quad (5.5)$$

де Ω_0 – задана область допустимих станів.

В якості керуючого впливу вибирається $s(t)$, тоді задача оптимізації формулюється у вигляді

$$s^*(t) \rightarrow \min \{ J / T(x,t) \in \Omega_0, s(t) \in \Omega_s \}. \quad (5.6)$$

Експериментальні дані (розділ 3) свідчать про залежність параметрів якості оптичного елемента від розподілу температури на його поверхні. Для отримання оптично однорідної поверхні з мінімальною кількістю домішок найбільше значення має рівномірний нагрів поверхні до певної температури, тобто задача рівномірного нагріву поверхні. Сформулюємо конкретну задачу керування, у тому числі і задачу оптимального керування.

Вектор експлуатаційних вихідних параметрів може бути замінено проміжною ланкою, якою є стан об'єкту. Основним показником стану об'єкту під час електронно-променевої обробки є його температура, тому вихідною величиною моделі є розподіл температури в об'ємі оптичного елемента – $T(x,y,z,t)$. Оскільки в модельованому процесі використовується стрічковий електронний потік, для спрощення задачі перейдемо до двовимірного температурного поля – $T(x,z,t)$. Вхідним параметром моделі є розподілений електронний вплив – $F_n(x,t)$.

На основі експериментальних досліджень [39, 62] встановлено, що для отримання оптично однорідної поверхні з мінімальною кількістю дефектів та мікрошорсткістю найсуттєвіше значення має рівномірний нагрів поверхні до

певної температури за визначеним законом, тобто постає необхідність у вирішенні задачі рівномірного нагріву поверхні.

Для розподіленого об'єкту, стан якого $T(x, z, t)$ визначений в області Ω_x , необхідно визначити допустиме керування у вигляді інтенсивності джерела P_n^* і закону його переміщення $s^*(t)$ ($P_n^* \leq P_{max}, s^* \in \Omega_s$) (метод s -керування) таке, що виконується умова оптимальності [249, 250]

$$P_n^*, s^*(t) \rightarrow \min \left\{ J_T / P_n \in \Omega_{P_n}, s(t) \in \Omega_s \right\}, \quad (5.7)$$

де $J_T = \max_{x \in \Omega_s} |T(x, 0, t_k) - T^*(x, 0, t_k)| \leq \varepsilon$ – максимальне відхилення стану від заданого з точністю ε ; $T^*(x, 0, t_k) = const$ – задана температура на поверхні елемента після проходження електронного променя – в момент часу t_k ; $T(x, 0, t_k)$ – отримана температура поверхні в момент часу t_k ; t_k – момент часу сходження електронного променя з поверхні елемента; P_{max} – максимальна можлива потужність електронного променя; Ω_{P_n} – діапазон регулювання потужності електронного променя; Ω_s – можлива зона дії електронного променя (визначається параметрами механізму переміщення).

Результатом розрахунку є оптимальне керування у вигляді [249]

$$F^*(x, t) = P_n^* \cdot k[x - s^*(t)], \quad (5.8)$$

де $P_n^* = I_n \cdot U_{np}$ – потужність електронного променя, Вт; $k(x)$ – розподіл енергії електронного променя відносно його центру; $s^*(t) = V(x) \cdot t$ – закон руху оброблюваного елемента у вигляді функції з відрізків на яких швидкість $V(x)$ змінюється лінійно, м.

Така задача відноситься до задач J -оптимального керування [250]. Вирішення даної задачі ускладнюється тим фактом, що при її постановці ми враховуємо реальний розподіл електронного променя. Така постановка

практично унеможлиблює вирішення задачі аналітичними методами. Однак в той же час задача може бути вирішена за допомогою чисельних методів.

Необхідною умовою при такому підході є наявність чисельного вирішення прямої теплової задачі. Пряму теплову задачу нагріву оптичного елемента у вигляді пластини (наприклад, підкладки оптичних інтегральних схем) розглянуто вище (розділ 4).

Розробка цифрової моделі досліджуваного елемента [62, 224]. Як було показано вище задача оптимального керування електронним потоком може бути вирішена лише на базі чисельних методів.

При цьому вирішення поставленої задачі розбивається на наступні етапи: побудова цифрової моделі вирішення прямої задачі теплопровідності для досліджуваного елемента, вибір методу пошуку та розробка алгоритму пошуку оптимального закону руху джерела розподіленого теплового впливу та реалізація пошукового алгоритму на ПК.

Перший етап вирішується за допомогою пакета моделювання фізичних процесів COMSOL Multiphysics 3.2. [224] (вирішення диференціальних рівнянь в цьому пакеті здійснюється методом кінцевих елементів). В даному пакеті було побудовано модель з використанням постановки задачі теплопровідності описаної в розділі 4.

Побудова фізичної моделі в COMSOL складається з наступних етапів.

1. Вибір у вікні навігатора моделей розділу в якому буде вирішуватись задача (було обрано розділ Heat transfer conductive, для нестационарних моделей – Transient analysis) (рис. 5.23).
2. Прорисовка геометрії моделі (геометричні розміри відповідають зображенням у розділі 4) (рис. 5.24).
3. Встановлення граничних умов задачі (рис. 5.25). Граничні умови задачі встановлені відповідно до розділу 4. Для оптичного елемента було введено фізичні властивості оптичного скла К8, для оправки – фізичні властивості міді. Слід зазначити, що за умовами задачі (див. розділ 4) коефіцієнт теплопровідності λ та питома теплоємність C_V залежать від температури.

В реальному матеріалі ця залежність нелінійна і її врахування значно збільшить час вирішення задачі. Тому в межах температур, при яких відбувається електронно-променева обробка (800 – 1400 К) залежність цих величин була лінеаризована [224]. А саме: $\lambda(T) = 0,51 + T \cdot 0,00121$; $C_v(T) = 992 + T \cdot 0,178$ (рис. 5.26).

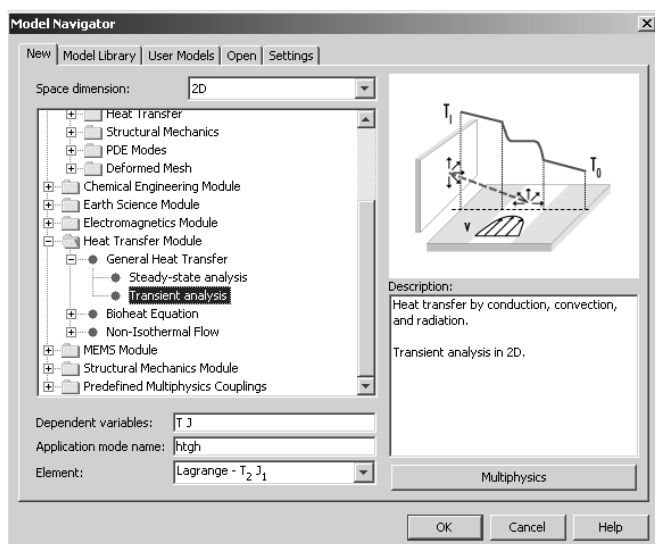


Рис. 5.23. Навігатор моделей COMSOL.

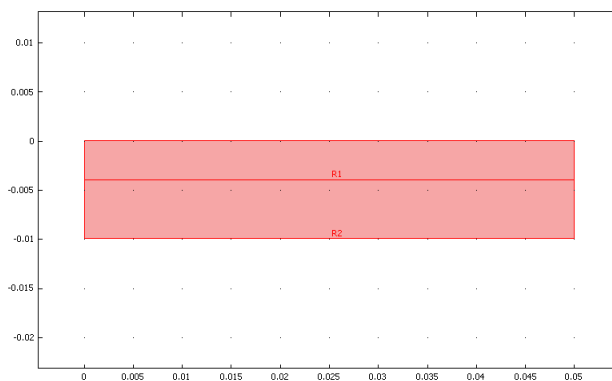
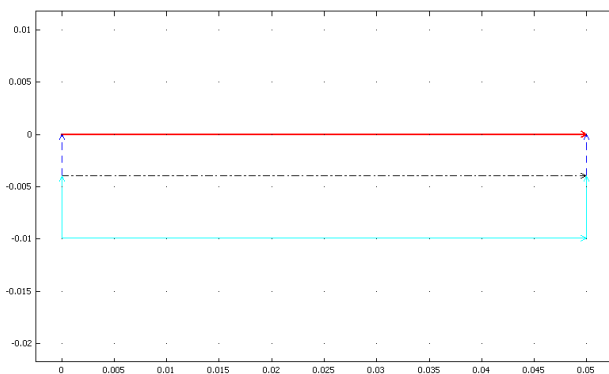
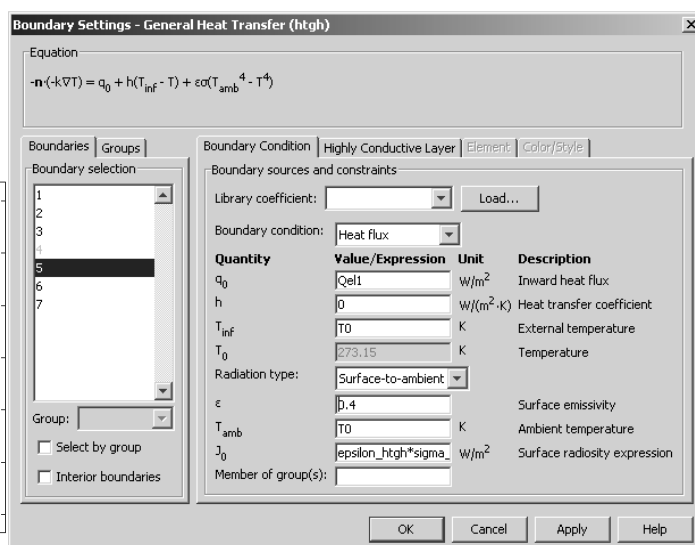


Рис. 5.24. Побудова геометрії моделі в пакеті COMSOL: R1 – шар з скла К8, R2 – шар з міді.



а)



б)

Рис. 5.25. Встановлення граничних умов: а) виділення груп границь з однаковими властивостями на побудованій геометрії; б) вікно встановлення параметрів для кожної групи.

4. Розбиття об'єкта на кінцеві елементи. Пакет COMSOL дозволяє автоматично розбивати об'єкти на елементи. Обираючи початкові параметри сітки розбиття користувач може керувати цим процесом відповідно до необхідної точності розрахунку. Для даної моделі було обрано наступні параметри: кінцеві елементи мають форму трикутників (обрано закладку Lagrange-Quadratic), автоматично будується сітка з параметром Coarser (груба), де максимальний розмір кінцевих елементів $10^{-5} \dots 5 \cdot 10^{-4}$ м (оскільки саме на границі можливі найбільші градієнти температури від дії електронного променя).

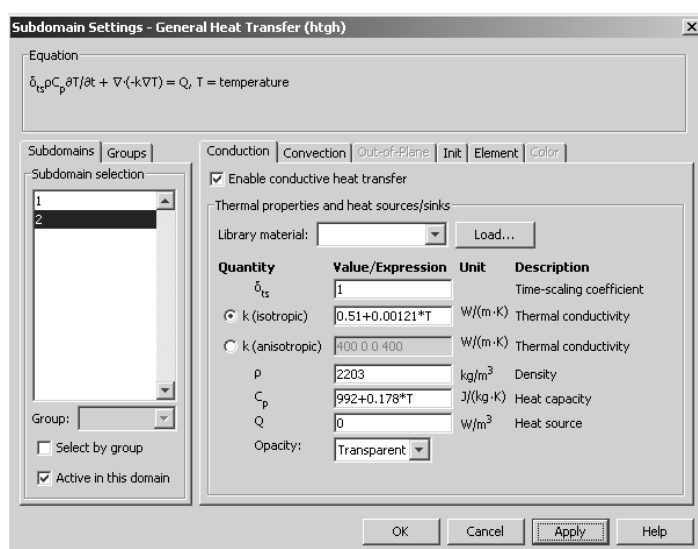


Рис. 5.26. Вікно фізичних властивостей (скло K8).

5. Перед запуском вирішення задачі задаються параметри вирішення та вибирається один з виконавчих пристроїв реалізованих в пакеті COMSOL. Враховуючи час проходження електронного променя по елементу обрано часовий діапазон вирішення від 0 до 2 секунд з кроком 0,1 секунди. Задається відносна точність вирішення задачі 1 %, та абсолютна точність 0,1 К. Отримані результати розрахунків представляються у вигляді розподілів температури вздовж поверхні пластини та по її глибині.

6. Обробка отриманих даних. Пакет COMSOL має досить потужний набір можливостей по візуалізації результатів розв'язання фізичних задач. Результати

можуть бути представлені у вигляді: двовимірного кольорового графіку, тривимірної поверхні, контурного графіку, графіку потоку. Також є можливість відображення не тільки температури, а й розподілу теплових потоків, градієнту температури, а також окремо відображення проєкцій цих векторів на вісі Ox та Oy . Окрім поверхневого відображення, можливо отримувати розподіл вище зазначених фізичних величин вздовж будь-якої визначеної користувачем лінії. В досліджуваному випадку нас цікавить розподіл температури вздовж поверхні елемента. З точки зору оптимізації параметрів електронно-променевої обробки, корисним є режим паралельної роботи пакету фізичного моделювання COMSOL, та пакету матричних обчислень MATLAB. В цьому режимі існує можливість отримання параметрів розподілу джерела тепла та закону його переміщення від зовнішньої змінної MATLAB та передачі отриманого в результаті розв'язання розподілу температури у зовнішню змінну MATLAB.

Вибір методу пошуку рішення оптимізаційної задачі та реалізація пошукового алгоритму на ПК [62, 224]. У вказаній вище постановці задачі оптимального керування оброблюваним елементом за допомогою ПК досягнення заданого стану здійснюється знаходженням інтенсивності джерела P_n^* та закону його переміщення $s^*(t)$.

Для знаходження рішення даної задачі використовувалися чисельні методи. Для досягнення оптимального рішення необхідно здійснити вибір ефективного пошукового алгоритму, який в поєднанні з розробленою цифровою моделлю забезпечить збіжність рішення з якнайменшими затратами машинного часу.

Важливим є питання керованості оброблюваним елементом. Оскільки оптимальні параметри можуть бути знайдені лише шляхом багаторазового розрахунку прямої задачі, це може привести до некоректної постановки зворотної задачі. Однак у вихідній постановці задачі обумовлюється досягнення заданого стану з точністю ε , чим некоректність постановки задачі частково усувається.

Також успішне вирішення поставленої задачі багато в чому залежить від максимального використання експериментально отриманої інформації про форму поверхні функції $J_T(P_n, s(t))$. Наприклад, виходячи з відомих режимів керування при виконанні алгоритму пошуку оптимальних параметрів задається початкова точка. В якості початкової точки обирається переміщення джерела інтенсивністю P_0 з постійною швидкістю V_0 при яких параметри стану поверхні елемента найбільш близькі до оптимальних, завдяки чому значно зменшується імовірність існування в околиці початкової точки декількох мінімумів функції $J_T(P_n, s(t))$.

Враховуючи вище зазначене, для вирішення задачі оптимального керування обрано метод градієнтного спуску (для нашого випадку це метод знаходження локального мінімуму функції за допомогою руху вздовж антиградієнта), як найбільш поширений при вирішенні задач параметричної оптимізації [20, 130, 178].

Показано [224], що для знаходження локального мінімуму функції $J_T(P_n, s(t))$ пошук параметрів P_n^* і $s^*(t)$ необхідно проводити на основі багаторазового розрахунку прямої задачі шляхом підбору їх значень за алгоритмом методу градієнтного спуску. Однак, слід зазначити, що пошук закону $s^*(t)$ у вигляді довільної неперервної кривої неможливий. Одним з відомих методів, які дозволяють вирішити цю проблему є пошук рішення у певному класі функцій або розбиваючи функцію на декілька лінійних відрізків. Перевагою останнього методу є можливість знаходження більш точного рішення у випадку наявності областей зі значними градієнтами шуканої функції, що в нашому випадку має місце по краях оброблюваного елемента. Недоліком такого представлення закону $s^*(t)$ є значно більші затрати машинного часу. Таким чином, $s^*(t)$ представляється у вигляді n -мірного вектора, який представляє собою послідовність миттєвих швидкостей переміщення об'єкту в рівновіддалених точках на відрізку керування, де $(n - 1)$ – кількість відрізків, на які поділена область керування.

Однак прями́й розв’язок задачі методом градієнтного спуску у такій постановці стає практично неможливим, оскільки наприклад уже при $n = 8$, необхідно шукати рішення у 9-ти вимірному просторі. Тому запропоновано проводити пошук поступово збільшуючи розмірність вектора $s^*(t)$, що підтверджується результатами робіт [130, 227].

Перший крок алгоритму – це пошук оптимальних значень P_n^* і V_0 при постійній швидкості на всій довжині об’єкта обробки. Наступний крок – пошук оптимальних параметрів при $n = 2$, де миттєві значення швидкостей вказані на краях елемента, з початковими умовами розрахованими на попередньому кроці. На цьому кроці відбувається пошук локального мінімуму функції $J_T(V_1, V_2)$, значення P_n^* залишається постійним. На наступному кроці алгоритму розмірність вектору $s^*(t)$ становить $n = 3$ з додатковою точкою по центру елемента. Цей крок складається з двох етапів: пошук локального мінімуму функції $J_T(V_1, V_2)$ при постійних V_3 і P_n^* та пошук мінімуму функції $J_T(V_2, V_3)$ при постійних V_1 та P_n^* . Пошук локального мінімуму припиняється при досягненні мінімального кроку керування швидкістю переміщення. Аналогічно виконуються наступні кроки, поки не буде досягнута необхідна точність ε .

Для реалізації пошукового алгоритму використовувалась інтеграція програмних пакетів COMSOL та MATLAB [224]. Безпосередньо алгоритм реалізовано в системі візуального моделювання Simulink (яка є складовою MATLAB).

Однак чисельний розв’язок по вказаному вище алгоритму задач реалізації різних розподілених впливів за допомогою одиничного електронного променя, який переміщується, виявив суттєві обмеження у його використанні, особливо при обробці оптичних елементів, що мають як велику протяжність у окремих напрямках, так й складну геометричну форму. По-перше, для протяжних об’єктів складної форми реалізація заданої розподіленої потужності у межах широких ділянок шляхом багатоциклового руху (сканування) джерела технічно

складно реалізується. По-друге, на кінцевих ділянках обробки спостерігаються суттєві похибки у розрахунках (так, наприклад, для рівномірного та параболічного розподілів потужності джерела теплового впливу чисельні процеси погано сходяться [62, 249]).

Розв'язок задачі реалізації заданих теплових впливів вздовж оброблюваної поверхні оптичного елемента за допомогою системи одиничних нерухомих електронних променів. Таким чином, використання при обробці криволінійних поверхонь оптичних елементів (увігнутих, випуклих, циліндричних, сферичних, ділянок подвійної кривизни та ін.) рухомого одиничного електронного променя нині натикається на непереборні труднощі [50, 51, 249]. Це обумовлено тим, що для якісної обробки криволінійних поверхонь необхідно знати закони зміни режимів електронно-променевої обробки (густина теплового впливу F_n , коефіцієнта збереженості k (гострота теплового імпульсу) та швидкості переміщення V), що забезпечують в процесі обробки рівномірний тепловий вплив вздовж всієї оброблюваної поверхні, оскільки у іншому випадку обов'язково будуть утворюватися перегріті ділянки на поверхні, що призводять до виникнення тріщин, відколів або зон інтенсивного випаровування. При цьому на периферійних ділянках внаслідок більш низької температури (інтенсивний теплообмін з зовнішнім середовищем) будуть виникати випуклі ділянки (так звані “напливи”) та хвилеподібні поверхні. Це, у кінцевому підсумку, буде призводити до порушення геометричної форми оптичних елементів та подальшого їх руйнування.

На даний момент вказана оптимальна задача реалізації заданого теплового впливу за допомогою рухомого джерела тепла у повному обсязі ще не вирішена [44, 45, 250]. В першу чергу, це стосується знаходження оптимального закону вимірювання швидкості руху електронного променя в процесі обробки. Це обумовлено тим, що така задача відноситься до числа складних нелінійних задач оптимального керування рухомим впливом, теоретичне вирішення якої нині відсутнє, а є тільки декілька достатньо наближених чисельних оцінок

оптимальних законів зміни швидкостей руку теплових впливів [249, 250].

Ще більш складною задачею є створення як на плоских, так й криволінійних поверхнях оптичних елементів функціональних мікропрофілей складної геометричної форми за допомогою одиничного рухомого електронного променя. В даному випадку необхідно створювати за допомогою одиничного електронного променя вже не рівномірне, а складний розподілений тепловий вплив вздовж поверхні елементів. Дослідження по даному напрямку нині відсутні.

Тому нижче пропонується новий метод вирішення вказаних технологічних задач за допомогою системи дискретно розташованих нерухомих електронних променів (рис. 5.27, 5.28) [62].

Згідно розробленого метода задача реалізації вирішувалась за допомогою дискретно розташованих нерухомих джерел теплового впливу гаусівського типу (рис. 5.29) з різними амплітудами (максимальні значення густини теплового впливу електронних променів F_{nj} , $j = \overline{1, N}$) та коефіцієнтами зосередженості k_j ($j = \overline{1, N}$), що діють на оброблювані поверхні оптичних елементів. При цьому керування впливом таких джерел здійснюється автоматично з використанням мікропроцесорної техніки.

Постановка задачі. Даний підхід, що розглядається, потребує переходу у розв'язанні задач реалізації від безперервного до дискретного розподілу потужності відносно оброблюваної поверхні, тобто визначення числа N дискретно розподілених джерел енергії, потужності кожного джерела, а також місць розташування джерел.

Вказану задачу реалізації будемо розв'язувати при наступних припущеннях.

1. Одномірна постановка задачі.

2. Розподіл потужності по координаті x вздовж оброблюваної поверхні для кожного j -го дискретного джерела теплового впливу (електронного променя) описується законом Гауса [249]:

$$\varphi_j(x) = \frac{1}{(2\pi)^{1/2} \cdot \sigma_j} \cdot e^{-\frac{(x-s_j)^2}{2\sigma_j^2}}, \quad (5.9)$$

де $\sigma_j^2 = \frac{1}{2k_j}$ – дисперсія.

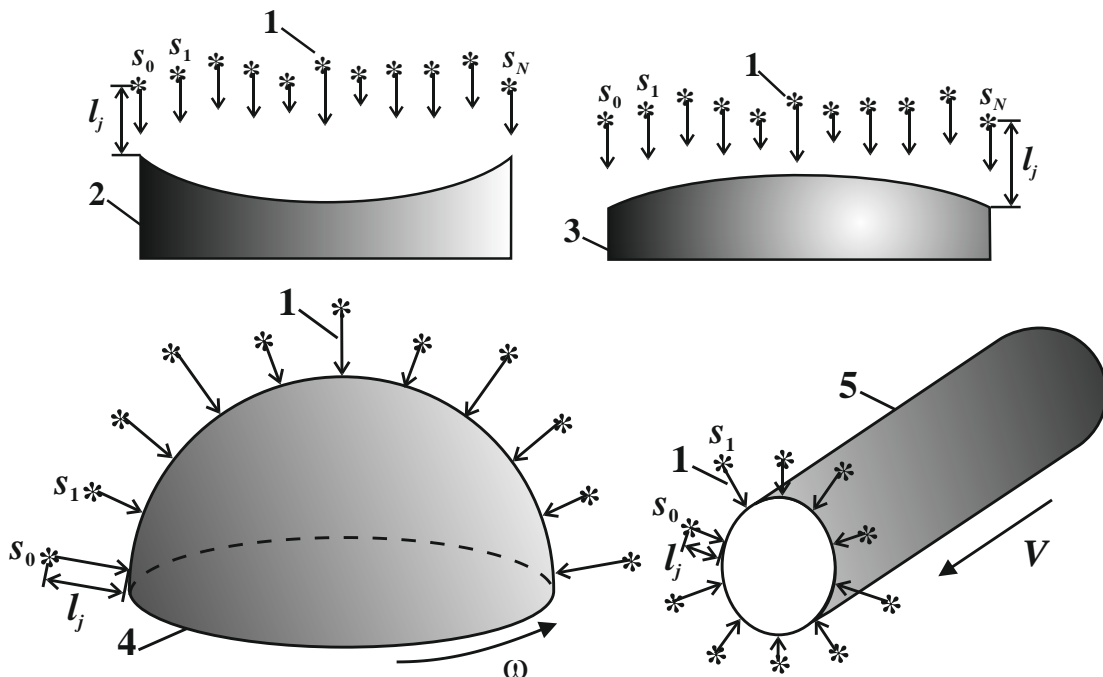


Рис. 5.27. Схема методу обробки криволінійних поверхонь оптичних елементів за допомогою системи дискретно розташованих нерухомих електронних променів (1): ввігнутих (2) та випуклих (3) поверхонь; півсферичних (4) та циліндричних (5) поверхонь; s_0, s_1, \dots – система одиничних електронних променів, які розташовані на різних відстанях l_j ($j = 0, 1, \dots$) від оброблюваної поверхні; ω, V – кутова швидкість обертання півсферичного елемента та швидкість подачі циліндричного елемента у зону обробки, що забезпечують задані розподілені термічні впливи на їх поверхнях.

Тоді сумарна густина потужності у фіксованій j -й точці відрізка x_j буде представляти собою суму $\varphi_j(x)$ по всім N джерелам:

$$\Phi(x) = \sum_{j=1}^N \varphi_j(x) = \frac{1}{(2\pi)^{1/2}} \sum_{j=1}^N \frac{e^{-\frac{(x-s_j)^2}{2\sigma_j^2}}}{\sigma_j}. \quad (5.10)$$

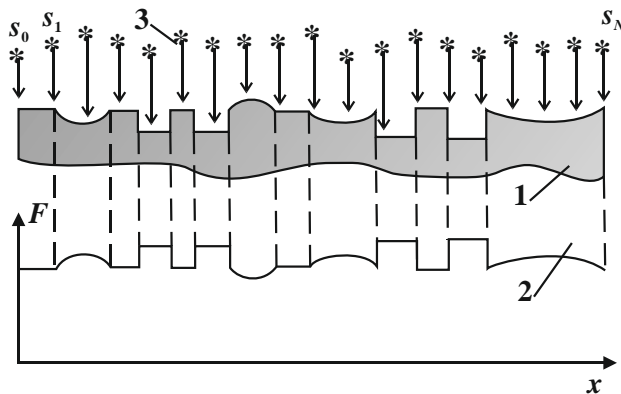


Рис. 5.28. Схема методу створення функціональних мікропрофільей на поверхні оптичних елементів складної геометричної форми за допомогою системи дискретно розташованих нерухомих електронних променів: 1 – заданий мікропрофіль на поверхні елемента, який потрібно отримати шляхом її обробки системою одиничних електронних променів s_0, s_1, \dots, s_n з різними параметрами; 2 – складно розподілений тепловий вплив вздовж поверхні елемента $F(x)$, який потрібно реалізувати шляхом оптимізації параметрів променів та їх кількості.

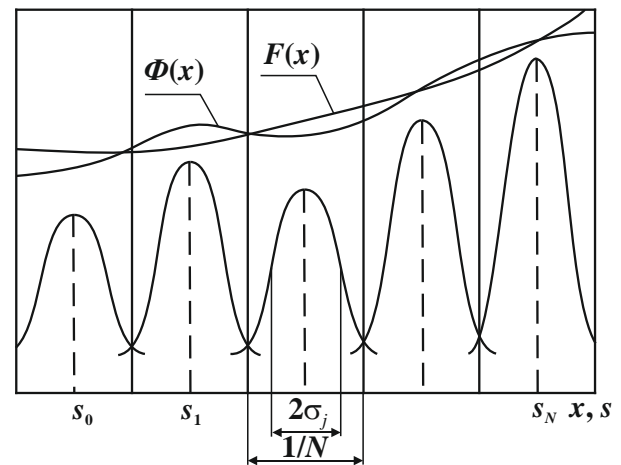


Рис. 5.29. Схематичне зображення наближення до заданого розподіленого теплового впливу $F(x)$ вздовж поверхні оптичного елемента сукупністю дискретно розташованих нерухомих джерел s_j ($j = \overline{1, N}$) теплового впливу гаусівського типу $\Phi(x)$.

3. Будемо розглядувати нормовані значення розподіленої потужності, які необхідно реалізувати (загальний сумарний енергетичний внесок однаковий для різних видів розподіленої потужності), а координату довжини – у безрозмірному вигляді:

$$\int_0^1 F(x) dx = 1. \quad (5.11)$$

4. Розподіл дискретних джерел на всій довжині відрізка рівномірний, тобто відстань від максимуму j -го імпульсу до максимуму $j+1$ імпульсу стала та дорівнює $1/N$.

Таким чином, задача полягає у визначенні числа дискретних джерел N та визначенні для кожного з них параметра $\sigma_j (j = \overline{1, N})$, щоб наближення $F(x)$ функцією $\Phi(x)$ було найкращим у деякій нормі

$$I = \|\Phi(x) - F(x)\| \rightarrow \min, \quad (5.12)$$

що у загальноприйнятому формалізованому вигляді [] стосовно до розглядуваної задачі має вигляд:

$$s = \sum_{i=1}^M \left[\frac{1}{(2\pi)^{1/2}} \sum_{j=1}^N \frac{e^{-\frac{(x_i - s_j)^2}{2\sigma_j^2}}}{\sigma_j} - F(x_i) \right]^2 \rightarrow \min_{N, \sigma_j}. \quad (5.13)$$

Значення N визначається двома факторами. По-перше, достатньою точністю наближення функції $\Phi(x)$ (веде до підвищення N), а, по-друге, можливістю технічної реалізації дискретного джерела. Оскільки N може бути достатньо великим (декілька десятків), сформульована задача (5.8) є багатовимірною. Для подолання обчислювальних труднощів, пов'язаних з розмірністю задачі, скористаємося стандартним методом оптимізації [20, 64, 72], який добре себе зарекомендував для задач великої розмірності. Суть методу полягає в тому, що в якості розв'язку шукається функція, яка апроксимує його по просторовій координаті. Якщо про вигляд функції розв'язку нічого невідомо, то її апроксимацію шукають в класі поліномів,

послідовно підвищуючи ступінь до тих пір, доки падає величина s суми квадратів нев'язок. При такому підході варійованими змінними будуть виступати параметри функції (коефіцієнти поліному), яких завжди набагато менше, ніж кількість вихідних незалежних змінних. Якщо ж на апроксимовану функцію накладені які-небудь обмеження (типу рівностей), то число незалежних змінних ще можна зменшити на число зв'язків. В нашому конкретному випадку будемо шукати не $\sigma_j (j = \overline{1, N})$, а коефіцієнти поліному

$$\sigma_j = x(1) + x(2)j + x(3)j^2 + \dots + x(n)j^{n-1}, \quad (5.14)$$

який описує розподіл σ_j по ступеням номеру джерела (по імпульсам).

Тепер задача полягає не у пошуку декількох десятків значень σ_j , що мінімізують суму квадратів ухилень заданої та апроксимуючої функції при фіксованому N , а у визначенні 2...5 коефіцієнтів поліному (5.8), що розв'язують ту ж задачу з достатньою точністю.

Для пошуку оптимальних значень коефіцієнтів апроксимуючого поліному (5.8) необхідно використовувати стандартний пошуковий метод нелінійної оптимізації [130, 178]. Це обумовлено тим, що обчислення градієнта мінімізованої функції, а тим більше матриці Гессе (других похідних) достатньо громіздко і, крім того, при використаному вигляді апроксимуючої функції не виключена наявність у неї так званих “ярів” – все це потребує вибору найбільш ефективних методів чисельної оптимізації функції декількох змінних розглядуваного типу. З цією метою було використано спеціалізований пакет прикладних програм [58, 62], в якому зібрані найбільш ефективні методи чисельної оптимізації різних функцій та які дозволяють у діалоговому режимі, варіюючи вхідні дані, вибирати найбільш прийнятний метод оптимізації (додаток Г).

При вказаному підході загальна схема алгоритму розв'язку задачі полягає у наступному.

В ролі основної програми виступає програма чисельного метода оптимізації (в основному, це методи типу метода Розенброка [130, 178],

додаток Д). При цьому за допомогою клавіатури встановлюється значення числа варійованих змінних $N1$, значення координат стартової точки $X(1)$, $X(2)$, ..., $X(N1)$ у основній програмі PROGRO та підпрограмі PROGR1 (додатки Г, Д), що обчислює цільову функцію, а також задаються значення числа одиничних джерел N та кількість вузлів дискретизації $M1$ координати довжини. Оператор CALL (рядок 15) викликає підпрограму PROGR1 для підрахування цільової функції Φ_1 у стартовій точці, після повернення у основну програму формуються значення координат наступної точки та знову відбувається перехід на підпрограму PROGR1 для підрахунку цільової функції Φ у сформованій точці (рядок 30). Результат порівняння Φ_1 та Φ визначає подальший рух до оптимуму у відповідності з вибраним чисельним методом.

Слід зазначити, що основна програма PROGRO виконана як стандартна та може бути використана у інших задачах. Частиною вказаної програми, що змінюється, є підпрограма PROGR1, причому X – вектор варійованих параметрів, $ETA1$ – значення цільової функції, що обраховується (суми

Аналіз результатів розрахунків (додаток Д) показує, що для рівномірно розподіленої потужності джерела теплового впливу по оброблюваній поверхні виробу отримані наступні розв'язки при двох одиничних джерелах гуасівського типу, що реалізують заданий розподілений тепловий вплив: $X(1) = 0,7161$, $X(2) = -0,04943$, $X(3) = -1,8461 \cdot 10^{-3}$, $s = 0,0732$; при п'яти одиничних джерелах: $X(1) = 1,2205$, $X(2) = 0,39$, $X(3) = 0,362$, $s = 0,0216$; при восьми одиничних джерелах: $X(1) = -0,015$, $X(2) = 3,06$, $X(3) = -1,5 \cdot 10^{-3}$, $s = 0,01137$; при десяти одиничних джерелах: $X(1) = 3,9707$, $X(2) = -0,015$, $X(3) = -1,5 \cdot 10^{-3}$, $s = 9,5 \cdot 10^{-5}$. При цьому подальше збільшення числа одиничних джерел не проводилося, тому що досягнута точність наближення $s \cong 10^{-4}$ цілком достатня для практичних розрахунків (відповідає середній квадратичній похибці наближення $\cong 0,11$ %).

Результати розрахунків для інших більш складних розподілів потужності теплового впливу по оброблюваній поверхні виробу показують, що вказана точність також може бути досягнута за прийнятне число кроків, але при

Таблиця 5.3

Результати розрахунків для нормованої рівномірно розподіленої потужності у випадку двох джерел впливу ($F(x) = 1$, $N = 2$, $n = 2$)

$M1$	ETA1	$X(1)$	$X(2)$	$X(3)$
1	27,5570	0,1	0	0
2	2,0549	0,4	0	0
3	1,8898	1,3	0	0
4	7,067	4,0	0	0
5	1,9733	1,3	0,03	0
6	1,8478	1,3	-0,015	0
7	1,9732	1,3	0,03	$3 \cdot 10^{-3}$
8	1,8541	1,3	-0,015	$-1,5 \cdot 10^{-3}$
9	1,8447	1,3	-0,015	$3 \cdot 10^{-3}$
10	1,8541	1,3	-0,015	$3 \cdot 10^{-3}$
11	10,446	31,3	-0,015	$3 \cdot 10^{-3}$
12	12,3	013,7	-0,015	$3 \cdot 10^{-3}$
13	14,0	-6,19	-0,15	$3 \cdot 10^{-3}$
14	19,0	-2,0	-0,15	$3 \cdot 10^{-3}$
15	49,0	-0,57	-0,15	$3 \cdot 10^{-3}$
16	2,97	0,3629	-0,15	$-1,5 \cdot 10^{-3}$
17	0,2137	0,8315	-0,15	$-1,5 \cdot 10^{-3}$
18	4,6	2,24	-0,15	$-1,5 \cdot 10^{-3}$
19	0,161	0,831	-0,04961	$-1,5 \cdot 10^{-3}$
20	0,1623	0,831	-0,0484	$-1,5 \cdot 10^{-3}$
21	0,160311	0,831	-0,0496	$-1,846 \cdot 10^{-3}$
22	0,160313	0,831468	-0,049613075	$-1,84493197 \cdot 10^{-3}$
23	10,46	30,77	-0,049613075	$-1,84493197 \cdot 10^{-3}$
24	12,0	-14,0	-0,049613075	$-1,84493197 \cdot 10^{-3}$
25	13,78	-6,0	-0,049613075	$-1,84493197 \cdot 10^{-3}$
26	17,0	-2,89	-0,049613075	$-1,84493197 \cdot 10^{-3}$
27	31,78	-1,0	-0,049613075	$-1,84493197 \cdot 10^{-3}$
28	93,0	-0,096	-0,049613075	$-1,84493197 \cdot 10^{-3}$
29	3,41	0,3685	-0,049613075	$-1,84493197 \cdot 10^{-3}$
30	0,38175	0,6004	-0,049613075	$-1,84493197 \cdot 10^{-3}$
31	0,0732	0,71614018189407	-0,049613075	$-1,84493197 \cdot 10^{-3}$
32	0,845	1,06	-0,049613075	$-1,84493197 \cdot 10^{-3}$
33	0,48	0,71614018189407	-0,2283	$-1,84493197 \cdot 10^{-3}$

Продовження табл. 5.3

<i>M1</i>	ETA1	X(1)	X(2)	X(3)
34	0,7595	0,71614	-0,054934	-1,84493197·10 ⁻³
35	0,07321	0,71614018189399	-0,049454586886794	-1,84493197·10 ⁻³
36	0,07320	0,71614018189399	-0,049454586886794	-1,84493197·10 ⁻³
37	0,073203	0,71614018189399	-0,049454586886794	-1,84493197·10 ⁻³
38	0,0734303	0,71614018189399	-0,049454586886794	-1,84493197·10 ⁻³
39	0,07320	0,71614018189399	-0,049454586886794	-1,84493197·10 ⁻³
40	0,07320	0,71614018189399	-0,049420266636031	-1,846129220263·10 ⁻³
41	0,07320	0,71614018189399	-0,049420266636031	-1,846129220263·10 ⁻³
42	0,07320	0,71614018189399	-0,049420266636031	-1,846129220263·10 ⁻³
43	10,43	30,0	-0,049420266636031	-1,846129220263·10 ⁻³
44	12,0	-14,0	-0,049420266636031	-1,846129220263·10 ⁻³
45	13,67	-6,7	-0,049420266636031	-1,846129220263·10 ⁻³
46	17,47	-2,99	-0,049420266636031	-1,846129220263·10 ⁻³
47	29,65	-1,13	-0,049420266636031	-1,846129220263·10 ⁻³
48	76,73	-0,2	-0,049420266636031	-1,846129220263·10 ⁻³
49	6,55	-0,255	-0,049420266636031	-1,846129220263·10 ⁻³
50	1,36	0,486	-0,049420266636031	-1,846129220263·10 ⁻³
51	0,37576	0,601	-0,49	-1,846·10 ⁻³
52	0,16	0,6589	-0,49	-1,846·10 ⁻³
53	0,103	0,6876	-0,49	-1,846·10 ⁻³
54	0,08482	0,7019	-0,49	-1,846·10 ⁻³
55	0,0782	0,7090	-0,49	-1,846·10 ⁻³
56	0,0755	0,7126	-0,49	-1,846·10 ⁻³
57	0,0743	0,714	-0,49	-1,846·10 ⁻³
58	0,0737	0,716	-0,49	-1,846·10 ⁻³
59	0,0735	0,716	-0,49	-1,846·10 ⁻³
60	0,0733	0,716	-0,49	-1,846·10 ⁻³
61	0,07323	0,716	-0,49	-1,846·10 ⁻³
62	0,07322	0,716	-0,49	-1,846·10 ⁻³
63	0,07322	0,716	-0,49	-1,846·10 ⁻³
64	0,07321	0,716	-0,49	-1,846·10 ⁻³
65	0,07321	0,716	-0,49	-1,846·10 ⁻³
66	0,0732049	0,7161368	-0,49	-1,846·10 ⁻³
67	0,0732026	0,716138	-0,49	-1,846·10 ⁻³
68	0,0732021	0,716139	-0,49	-1,846·10 ⁻³
69	0,07320186	0,7161397	-0,49	-1,846·10 ⁻³
70	0,07320173	0,7161399	-0,49	-1,846·10 ⁻³
71	0,073201668	0,7161411	-0,49	-1,846·10 ⁻³
...
127	0,07320160559	0,716140181893	-0,049426266636	-1,846129218308·10 ⁻³

Примітка. На 123 кроці обчислення цільової функції обчислювальний процес був припинений, тому що практично розв'язок знайдено: $X(1) = 0,716140181893$, $X(2) = -0,049426266636$, $X(3) = -1,846129218308 \cdot 10^{-3}$.

набагато більшій кількості використаних одиничних джерел: при гіперболічно розподіленій потужності – порядку 40...50 джерел, а при широкому гаусівському розподілі потужності – порядку 50...70 джерел.

Таблиця 5.4

Результати розрахунків для нормованої рівномірно розподіленої потужності у випадку п'яти джерел впливу ($F(x) = 1$, $N = 5$, $n = 2$)

M1	ETA1	X(1)	X(2)	X(3)
1	139,96	0,1	0	0
2	63,0	0,4	0	0
3	2,317	1,3	0	0
4	2,795	4,0	0	0
5	2,05	1,3	0,03	0
6	1,4007	1,3	0,12	0
7	0,3208	1,3	0,39	0
8	0,377	1,3	1,2	0
9	31,48	1,3	0,39	$3 \cdot 10^{-3}$
10	0,29719	1,3	0,39	0,012
11	0,2481	1,3	0,39	0,012
12	0,132255	1,3	0,39	0,16
13	1,4686	1,3	0,39	1,063
14	0,55286	1,3	0,39	0,362
15	9,61	30	0,39	0,362
16	15,06	-12,4	0,39	0,362
17	22,0	-5,3	0,39	0,362
18	71,7	-1,85	0,39	0,362
19	556,0	-0,2	0,39	0,362
20	3,246	0,576	0,39	0,362
21	0,47	0,953	0,39	0,362
22	0,0923	1,13396284116	0,39	0,362
23	0,0216	1,2204826224682	0,39	0,362

Примітка. Поліпшення розв'язку, отриманого на 23 кроці ($X(1) = 1,2204826224682$, $X(2) = 0,39$, $X(3) = 0,362$), не було отримано.

Таблиця 5.5

Результати розрахунків для нормованої рівномірно розподіленої потужності у випадку восьми джерел впливу ($F(x) = 1$, $N = 8$, $n = 2$)

$M1$	ETA1	$X(1)$	$X(2)$	$X(3)$
1	423,1	0,1	0	0
2	211,5	0,4	0	0
3	19,5	1,3	0	0
4	0,47	0	0	0
5	5,965	12,1	0	0
6	0,485	4,0	0,03	0
7	0,46	4,0	-0,015	0
8	0,485	4,0	0,03	$3 \cdot 10^{-3}$
9	0,463	4,0	-0,015	$-1,5 \cdot 10^{-3}$
10	0,462	4,0	-0,015	$3 \cdot 10^{-3}$
11	0,463	4,0	-0,015	$-1,5 \cdot 10^{-3}$
12	9,03	33,9999	-0,015	$-1,5 \cdot 10^{-3}$
13	18,29	-10,99979	-0,015	$-1,5 \cdot 10^{-3}$
14	39,8	-3,4998	-0,015	$-1,5 \cdot 10^{-3}$
15	317,9	0,25	-0,015	$-1,5 \cdot 10^{-3}$
16	2,5	2,125	-0,015	$-1,5 \cdot 10^{-3}$
17	0,0137	3,0625395496688	-0,015	$-1,5 \cdot 10^{-3}$
18	2,3	5,87	-0,015	$-1,5 \cdot 10^{-3}$
19	0,015381	3,06	-0,02624991551454	$-1,5 \cdot 10^{-3}$
20	0,0137	3,06	-0,015021	$-1,5 \cdot 10^{-3}$
21	0,0137	3,06	-0,01499996045	$-1,5 \cdot 10^{-3}$

Примітка. Подальший пошук не призвів до поліпшення суми квадратів нев'язок. Тому $X(1) = -0,01499996045$, $X(2) = 3,06$, $X(3) = -1,5 \cdot 10^{-3}$.

Таблиця 5.6

Результати розрахунків для нормованої рівномірно розподіленої потужності у випадку десяти джерел впливу ($F(x) = 1$, $N = 10$, $n = 2$)

$M1$	ETA1	$X(1)$	$X(2)$	$X(3)$
1	705,23	0,1	0	0
2	362,675	0,4	0	0
3	40,3	1,3	0	0
4	8,38	4	0	0
5	4,95	12,1	0	0
6	1,65	4,0	0,03	0
7	5,40	4,0	-0,015	0
8	1,65	4,0	0,03	0
9	5,75	4,0	-0,015	$3 \cdot 10^{-3}$
10	5,22	4,0	-0,015	$-1,5 \cdot 10^{-3}$
11	5,75	4,0	-0,015	$-1,5 \cdot 10^{-3}$
12	8,56	4,0	-0,015	$-1,5 \cdot 10^{-3}$
13	20,04	4,0	-0,015	$-1,5 \cdot 10^{-3}$
14	49,85	-3,5	-0,015	$-1,5 \cdot 10^{-3}$
15	535,0	0,25	-0,015	$-1,5 \cdot 10^{-3}$
16	7,89	2,12	-0,015	$-1,5 \cdot 10^{-3}$
17	0,947	2,12	-0,015	$-1,5 \cdot 10^{-3}$
18	0,169	2,12	-0,015	$-1,5 \cdot 10^{-3}$
19	0,0332	2,12	-0,015	$-1,5 \cdot 10^{-3}$
20	$6,1 \cdot 10^{-3}$	3,8828199154847	-0,015	$-1,5 \cdot 10^{-3}$
21	$8,5 \cdot 10^{-4}$	3,8828199154847	-0,015	$-1,5 \cdot 10^{-3}$
22	$9,5 \cdot 10^{-5}$	3,9707053908266	-0,015	$-1,5 \cdot 10^{-3}$

Примітка. Подальший пошук не призвів до поліпшення розв'язку, таким чином, в якості розв'язку на 22 кроці було прийнято: $X(1) = 3,9707053908266$, $X(2) = -0,015$, $X(3) = -1,5 \cdot 10^{-3}$.

Слід зазначити, що для кожного j -го джерела теплового впливу коефіцієнт зосередженості $k_j = \frac{1}{2\sigma_j}$ (гострота імпульсу впливу) та амплітуда (густина теплового впливу у центрі $F_n = \varphi_{jmax} = \frac{1}{(2\pi)^{1/2} \cdot \sigma_j}$) обчислюються на основі нескладних формул (5.13) та (5.14).

Таким чином, збільшуючи кількість електронних променів (до 50...70) можна отримати високу точність (відносна похибка до $10^{-4} \dots 10^{-5}$) відповідності заданим складним розподіленням тепловим впливам вздовж оброблюваних як плоских, так й криволінійних оптичних елементів, необхідних для створення функціональних мікропрофільей на їх поверхнях заданої геометричної форми.

Слід відмітити, що нині внаслідок технічних труднощів, які виникають, неможливо здійснювати ефективне керування великою кількістю променів (більше 10...15) [58, 62, 64]. Однак, зменшуючи їх кількість (наприклад, до 5...7), можна реалізовувати вказані розподілені теплові впливи з прийнятною на практиці точністю (відносна похибка не перевищує 3...5 %).

Для технічної реалізації розробленого методу необхідно зв'язати знайдені оптимальні значення параметрів φ_{jmax} та k_j ($j = \overline{1, N}$) з керованими технологічними параметрами електронно-променевої установки (струмами променів I_{lj} , прискорюючими напругами V_{yj} та відстанями до оброблюваних поверхонь l_j), які знаходяться за результатами зондування променів (розділ 2):

$$\varphi_{jmax} = \frac{I_{lj} \cdot V_{yj}}{\sqrt{\pi} \cdot \operatorname{erf}(a_{ij})} \cdot \sqrt{k_j(I_{lj}, l_j)}, \quad (5.15)$$

$$k(I_{lj}, l_j) = a_{0j} + a_{1j} \cdot l_j + a_{2j} \cdot I_{lj} + a_{3j} \cdot I_{lj} \cdot l_j, \quad j = \overline{1, N}, \quad (5.16)$$

де a_{ij} ($i = \overline{0, 4}$) – емпіричні константи.

Таблиця 5.7

Результати розрахунків для нормованої гіперболічно розподіленої потужності

при різній кількості джерел впливу ($F(x) = \frac{1}{2 \cdot x^{1/2}}$, $n = 2$, $i = \overline{1,1000}$)

N	ETA1	X(1)	X(2)	X(3)	DEL
10	0,005531214	0,514121162791	-0,07632122167	$-0,963211312304 \cdot 10^{-3}$	54
20	0,000343215	2,4163815213521	1,516	0,979	52
30	0,000006766	-0,98687460326	4,237	$-4,698 \cdot 10^{-3}$	51
40	0,000004132	4,871804291824	-1,234	$-5,263 \cdot 10^{-3}$	30
50	0,000001043	-1,234386285412	3,654	$-2,591 \cdot 10^{-3}$	24

Таблиця 5.8

Результати розрахунків для нормованої широко-гаусівської розподіленої

потужності при різній кількості джерел впливу ($F(x) = \frac{1}{(2\pi)^{1/2} \cdot \sigma} \cdot e^{-\frac{(x-0,5)^2}{2\sigma^2}}$,

$\sigma, x \in [0,1]$, $n = 2$, $i = \overline{1,1000}$)

N	ETA1	X(1)	X(2)	X(3)	DEL
10	0,000431251	0,823421143694	-0,09214353589	$-1,312436387405 \cdot 10^{-3}$	68
20	0,000110112	3,7213856374825	2,823	1,234	64
30	0,000071685	-1,21189270534	5,938	$-6,789 \cdot 10^{-3}$	62
40	0,000031452	5,894908324907	-2,746	$-7,685 \cdot 10^{-3}$	41
50	0,000006774	-2,874486389637	4,847	$-3,799 \cdot 10^{-3}$	32

Примітка. DEL – кількість обчислень ETA1.

Далі, використовуючи отримані залежності (5.9) та (5.10) можна технічно реалізувати розроблений метод у вигляді автоматизованої системи керування технологічним процесом (АСКТП) електронно-променевої обробки поверхонь оптичних елементів різної геометричної форми та створення на них функціональних профілів за допомогою системи нерухомих дискретно розподілених електронних променів, які можуть бути використані у якості

елементної бази у мікрооптиці, інтегральній та волоконній оптиці та інших галузях оптико-електронного приладобудування.

5.4.2. Покращення фізико-механічних властивостей поверхонь елементів з п'єзокераміки за допомогою електронно-променевої технології

Сучасні технології виробництва продукції п'єзоелектрики базуються на відомих методах механічної, хімічної та хіміко-механічної обробки поверхонь п'єзоелектричних матеріалів, зокрема керамік.

Головним недоліком цих методів є неможливість отримання високих електромеханічних та міцнісних характеристик виробів з п'єзоелектричних керамік, що вимагає додаткової обробки цих виробів. Таким чином, недосконалість поверхонь та наявність мікро- та нанодфектів у п'єзокераміках накладає обмеження на ефективність всієї елементної бази п'єзоелектричних елементів мікротехніки. Для виключення вказаних негативних дефектів на поверхні елементів з п'єзоелектричної кераміки була використана електронно-променева технологія, яка розглядалася вище.

В результаті проведених досліджень на зразках з п'єзоелектричної кераміки марки ЦТС-19 (диски діаметром $3,5 \cdot 10^{-3}$ м, товщиною 10^{-3} м) було встановлено, що при електронно-променевій обробці середня висота залишкових мікрошорсткостей зменшується від 120...160 нм (рис. 5.30 а, б) до 95...105 нм (рис. 5.31 а, б).

Встановлено, що після електронно-променевої обробки спостерігається зменшення поруватості поверхні п'єзокерамічного елемента (рис. 5.32).

Отримано, що середній розмір пор вихідного елемента становить 15...20 мкм, а після електронно-променевої обробки зменшується до 5...8 мкм. При цьому відбувається усунення окремих мікро- та нанодфектів на поверхні елементів (до 5...10 % мікротріщин шириною до 5...7 мкм та до 50...60 % пір), її мікротвердість збільшується на 0,5...0,8 МПа.

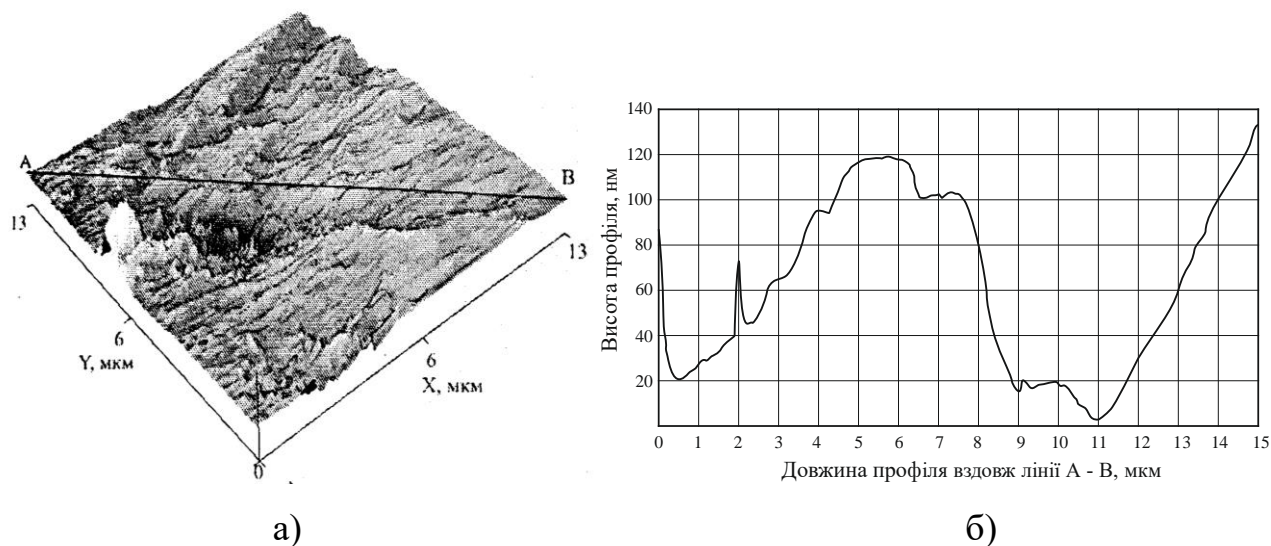


Рис. 5.30. Топограма (а) та профіль вздовж лінії А – В відсканованої ділянки (13×13 мкм) (б) поверхні п'єзокерамічного елемента, який необроблений електронним променем.

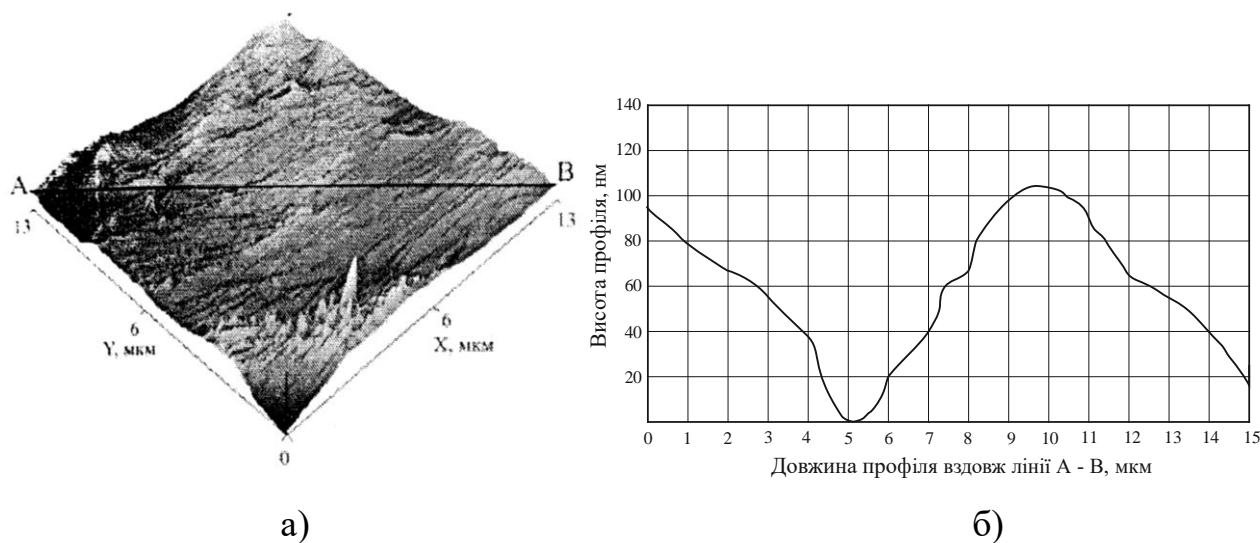


Рис. 5.31. Топограма (а) та профіль вздовж лінії А – В відсканованої ділянки (13×13 мкм) (б) поверхні п'єзокерамічного елемента, який оброблений електронним променем.

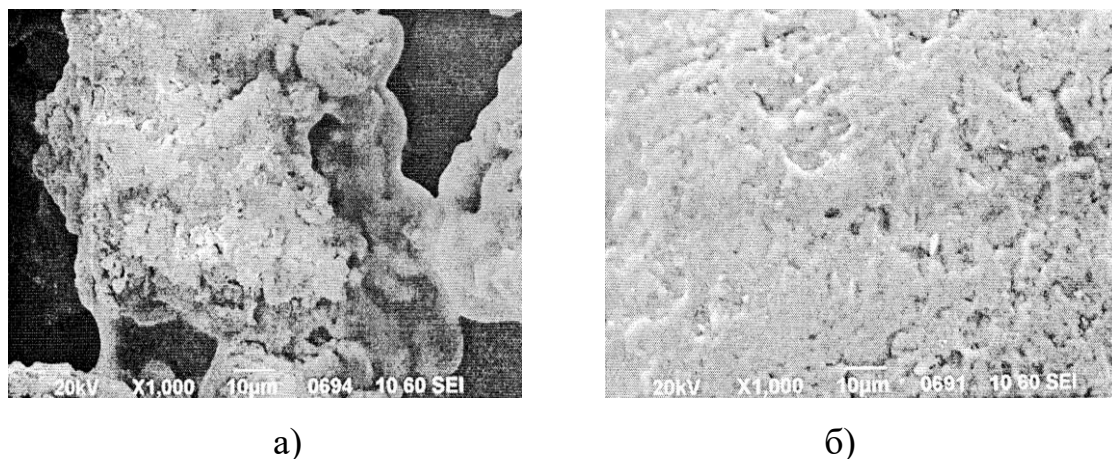


Рис. 5.32. Поверхня п'єзокерамічного елемента до (а) та після (б) електронно-променевої обробки.

Це призводить, у кінцевому підсумку, до підвищення строку їх експлуатації, збільшення коефіцієнта електромеханічного зв'язку, підвищення п'єзомодуля та ін. експлуатаційних характеристик.

5.4.3. Підвищення якості теплоізоляційних та зносостійких нанорозмірних оксидних покриттів на поверхнях оптичних елементів за допомогою електронно-променевої технології

Для підвищення зносостійкості, теплоізоляційних властивостей та ін. експлуатаційних характеристик елементів точного приладобудування наносяться нанорозмірні оксидні покриття, що являють собою композиції оксидів SnO_2 , Bi_2O_3 , TiO_2 , ZnO , SiO_2 , Al_2O_3 .

Одним з методів отримання таких покриттів, що широко використовується, є метод термовакuumного осадження матеріалів, який дозволяє отримати нанорозмірні (< 100 нм) покриття у вигляді окремих шарів. При цьому отримані покриття є неоднорідними, містять приховані мікродфекти (тріщини, відколи та ін.), поверхня містить значні мікросорсткості та низьку мікротвердість та ін. Все це призводить до зниження функціональних характеристик цих покриттів: зменшується їх зносостійкість; скорочуються строки їх експлуатації та ін.

Для усунення вказаних недоліків та підвищення якості даних покриттів було використано їх фінішну електронно-променеву обробку.

В результаті проведених досліджень на зразках з оптичного скла К8 (використовувались пластини довжиною $6 \cdot 10^{-2}$ м, шириною $3 \cdot 10^{-2}$ м та товщиною $4 \cdot 10^{-3}$ м) було встановлено, що після електронно-променевої обробки оксидних покриттів не спостерігаються негативні мікрodefекти, а мікросорсткості зменшуються з 30...35 нм до 9...15 нм (рис. 5.33, 5.34).

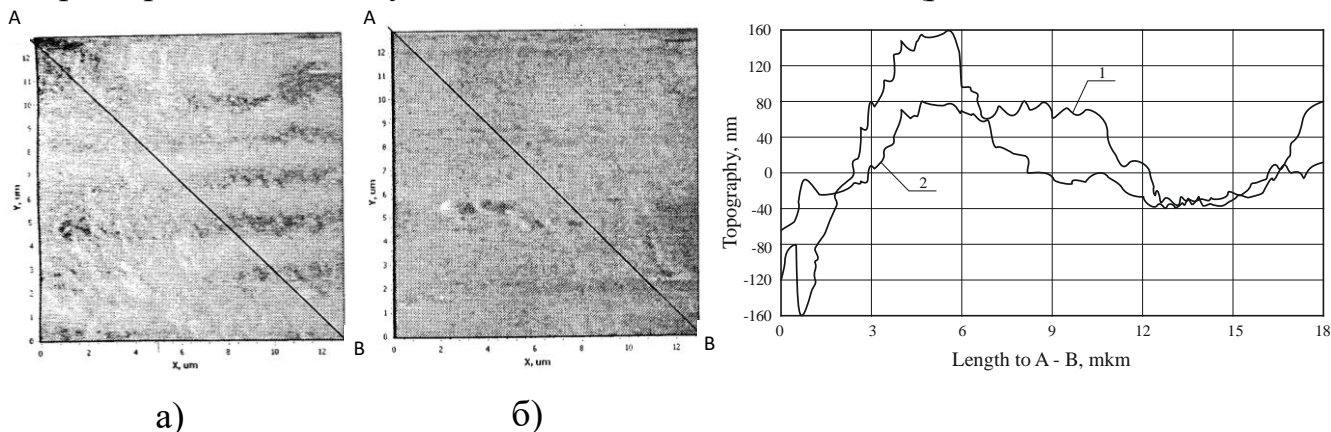


Рис. 5.33. Топограма ділянки поверхні (13×13 мкм) оптичного елемента з покриттям TiO_2 до (а) та після (б) електронно-променевої обробки.

Рис. 5.34. Топограма вздовж лінії А – В ділянки поверхні (13×13 мкм) оптичного елемента з покриттям TiO_2 до (1) та після (2) електронно-променевої обробки.

Проведені дослідження мікротвердості поверхні оптичних елементів з оксидними покриттями показали її збільшення після електронно-променевої обробки: від 21,5...17,5 ГПа до 24,9...23,7 ГПа для покриття Al_2O_3 ; від 13,1...9,3 ГПа до 15,9...14,7 ГПа для покриття ZnO_2 ; від 3,5...2,3 ГПа до 7,1...6,3 ГПа для покриття TiO_2 (рис. 5.35). При цьому для покриттів, які оброблені електронним променем, вплив їх товщини на величину мікротвердості поверхні послаблюється на 30...40 %.

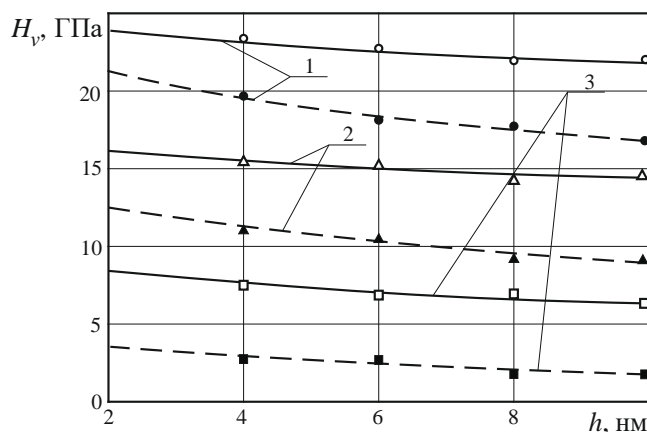


Рис. 5.35. Залежності мікротвердості поверхні оптичних елементів з оксидними покриттями Al_2O_3 (1), ZrO_2 (2) та TiO_2 (3) від їх товщини: ———— — після електронно-променевої обробки; - - - - до електронно-променевої обробки; Δ , \circ , \square , \blacktriangle , \blacksquare , \bullet – експериментальні дані.

Встановлено також, що після електронно-променевої обробки оксидних покриттів на оптичних елементах строк їх експлуатації збільшується на 20...30 %. При цьому зменшується на 5...10 % пористість поверхні та підвищується на 7...12 % їх зносостійкість.

Таким чином, отримані попередні результати досліджень з покращення фізико-механічних властивостей виробів з п'єзоелектричних керамік та функціональних характеристик нанорозмірних оксидних покриттів на оптичних елементах показали необхідність подальшого розвитку електронно-променевої технології у точному приладобудуванні за вказаними напрямками.

В результаті проведених експериментальних досліджень [61, 65] було встановлено, що при критичних значеннях технологічних параметрів електронно-променевої установки (струму електронного променя I_e , прискорюючої напруги V_y та відстані до оброблюваної поверхні покриття l) (розділ 2) відбуваються як по товщині оптичної пластини, так й на межі оксидне покриття – основний матеріал пластини (оптичне скло К8, БК10 та ін.).

Тому попереднє визначення та контроль діапазонів зміни критичних значень вказаних параметрів дозволяє попереджати можливі руйнування оптичних елементів та підвищувати вірогідність їх безвідмовної роботи при експлуатації.

Розглянемо нагрів оптичної пластини тонким оксидним покриттям скануючим електронним променем з густиною теплового впливу $F_n(I_n, V_y, l)$ (див. формули (2.12) – (2.14), розділ 2) (рис. 5.36).

Математична модель процесу нагріву двошарової пластини. Розглядається пластина, що складається з двох шарів різнорідних матеріалів (один з оптичного матеріалу, а інший – з оксиду або іншого матеріалу (алюмінію, титану та ін.)). Між шарами спостерігається ідеальний тепловий контакт, радіаційні та конвективні тепловтрати, у першому наближенні, не враховуються, а додаються умови (див. розділ 4): $\delta_1 = 2 \cdot (a_{01}^2 \cdot \tau)^{1/2} \sim H_1$ та $\delta_2 = 2 \cdot (a_{02}^2 \cdot \tau)^{1/2} \ll H_2$, тобто пластина розглядається як півграничне середовище, на нижньому боці якої не враховуються умови теплообміну.

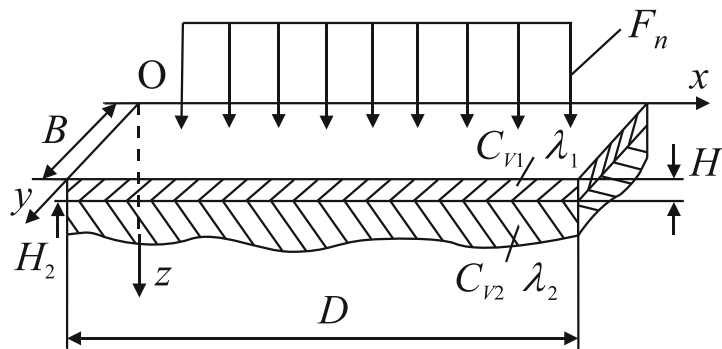


Рис. 5.36. Схема нагріву оптичної пластини з оксидним покриттям електронним променем з густиною теплового впливу F_n : B , D – ширина та довжина пластини, м; C_{V1} , λ_1 , H_1 , C_{V2} , λ_2 , H_2 – об'ємна теплоємність (Дж/м³·К), коефіцієнт теплопровідності (Вт/м·К) та товщина (м) відповідно оксидного покриття (1) та оптичного матеріалу пластини (2).

Рівняння математичної моделі нагріву двошарової пластини мають вигляд [23, 122, 135]:

$$C_{V1}(T_1) \cdot \frac{\partial T_1}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[\lambda_1(T_1) \cdot \frac{\partial T_1}{\partial z} \right], \quad t > 0, \quad 0 < z < H_1, \quad (5.18)$$

$$C_{V2}(T_2) \cdot \frac{\partial T_2}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[\lambda_2(T_2) \cdot \frac{\partial T_2}{\partial z} \right], \quad t > 0, \quad H_1 < z < +\infty, \quad (5.19)$$

$$T_1|_{t=0} = T_2|_{t=0} = T_0, \quad (5.20)$$

$$-\lambda_1(T_1) \cdot \frac{\partial T_1}{\partial z} \Big|_{z=0} = F_n, \quad (5.21)$$

$$T_1|_{z=H_1} = T_2|_{z=H_1}, \quad (5.22)$$

$$\lambda_1(T_1) \cdot \frac{\partial T_1}{\partial z} \Big|_{z=H_1} = \lambda_2(T_2) \cdot \frac{\partial T_2}{\partial z} \Big|_{z=H_1}, \quad (5.23)$$

$$T_2 \rightarrow T_0, \quad \left(\frac{\partial T_2}{\partial z} \right) \rightarrow 0 \text{ при } z \rightarrow +\infty. \quad (5.24)$$

З врахуванням залежностей (розділ 2)

$$C_{Vi} = C_{Vi0} \cdot T_i^\nu, \quad \lambda_i = \lambda_{i0} \cdot T_i^\nu \quad (i=1,2) \quad (5.25)$$

та заміни змінних

$$\theta_i(z,t) = T_i^{\nu+1} - T_0^{\nu+1}, \quad (5.26)$$

отримуємо систему рівнянь:

$$\frac{\partial \theta_1}{\partial t} = a_{01}^2 \cdot \frac{\partial^2 \theta_1}{\partial z^2}, \quad (5.27)$$

$$\frac{\partial \theta_2}{\partial t} = a_{02}^2 \cdot \frac{\partial^2 \theta_2}{\partial z^2}, \quad (5.28)$$

$$\theta_1|_{t=0} = \theta_2|_{t=0}, \quad (5.29)$$

$$-\frac{\partial \theta_1}{\partial z} \Big|_{z=0} = \bar{q}_{n0}, \quad (5.30)$$

$$\theta_1|_{z=H_1} = \theta_2|_{z=H_1}, \quad (5.31)$$

$$\lambda_{01} \cdot \frac{\partial \theta_1}{\partial z} \Big|_{z=H_1} = \lambda_{02} \cdot \frac{\partial \theta_2}{\partial z} \Big|_{z=H_1}, \quad (5.32)$$

$$\theta_2 \rightarrow 0, \quad \frac{\partial \theta_2}{\partial z} \rightarrow 0 \text{ при } z \rightarrow +\infty, \quad (5.33)$$

де

$$a_{0i}^2 = \frac{\lambda_{0i}}{C_{V0i}}, \quad \bar{q}_{n0} = \frac{\nu+1}{\lambda_{01}} \cdot F_n. \quad (5.34)$$

Розв'язок задачі шукаємо у класі функцій, для яких може бути застосоване перетворення Лапласа по змінній t [122, 135]. Вважаємо

$$\bar{\theta}_i(z, p) = \int_0^{\infty} e^{-pt} \cdot \theta_i(z, t) dt \quad (5.35)$$

та переходимо у (5.22) – (5.33) у просторі зображень:

$$\frac{d^2 \bar{\theta}_1}{dz^2} - \frac{p}{a_{10}^2} \cdot \bar{\theta}_1 = 0, \quad 0 < z < H_1, \quad (5.36)$$

$$\frac{d^2 \bar{\theta}_2}{dz^2} - \frac{p}{a_{20}^2} \cdot \bar{\theta}_2 = 0, \quad H_1 < z < +\infty, \quad (5.37)$$

$$\bar{\theta}_1(H_1, p) = \bar{\theta}_2(H_1, p), \quad (5.38)$$

$$-\left. \frac{d\bar{\theta}_1}{dz} \right|_{z=0} = \frac{\bar{q}_{n0}}{p}, \quad (5.39)$$

$$\lambda_{10} \cdot \left. \frac{d\bar{\theta}_1}{dz} \right|_{z=H_1} = \lambda_{20} \cdot \left. \frac{d\bar{\theta}_2}{dz} \right|_{z=H_1}, \quad (5.40)$$

$$\bar{\theta}_2(z, p) \rightarrow 0, \quad \text{при } z \rightarrow +\infty. \quad (5.41)$$

Загальні розв'язки рівнянь (5.36), (5.37) мають вигляд [122, 135]:

$$\bar{\theta}_1(z, p) = \bar{A}_1 \cdot sh\left(z \cdot \frac{\sqrt{p}}{a_{10}}\right) + \bar{B}_1 \cdot ch\left(z \cdot \frac{\sqrt{p}}{a_{20}}\right), \quad (5.42)$$

$$\bar{\theta}_2(z, p) = \bar{A}_2 \cdot e^{z \cdot \frac{\sqrt{p}}{a_{10}}} + \bar{B}_2 \cdot e^{-z \cdot \frac{\sqrt{p}}{a_{20}}}, \quad (5.43)$$

Стала інтегрування $\bar{A}_2 = 0$, оскільки згідно граничній умові (5.41), функція $\bar{\theta}_2(z, p) \rightarrow 0$ при $z \rightarrow +\infty$. Сталі інтегрування \bar{A}_1 , \bar{B}_1 , \bar{B}_2 знаходимо з граничних умов (5.38) – (5.40). Це дає операційний розв'язок задачі у наступному вигляді:

$$\bar{\theta}_1(z, p) = \frac{\bar{q}_{n0} \cdot \left[ch\left(\frac{H_1 - z}{a_{10}} \cdot \sqrt{p}\right) + d_0 \cdot sh\left(\frac{H_1 - z}{a_{10}} \cdot \sqrt{p}\right) \right]}{p \cdot \sqrt{p} \cdot \left[\frac{\lambda_{10}}{a_{10}} \cdot sh\left(\frac{H_1 \cdot \sqrt{p}}{a_{10}}\right) + \frac{\lambda_{20}}{a_{20}} \cdot ch\left(\frac{H_1 \cdot \sqrt{p}}{a_{10}}\right) \right]}, \quad (5.44)$$

$$\bar{\theta}_2(z, p) = \frac{\bar{q}_{n0} \cdot e^{-\frac{(z-H_1) \cdot \sqrt{p}}{a_{20}}}}{p \cdot \sqrt{p} \cdot \left[\frac{\lambda_{10}}{a_{10}} \cdot sh\left(\frac{H_1 \cdot \sqrt{p}}{a_{10}}\right) + \frac{\lambda_{20}}{a_{20}} \cdot ch\left(\frac{H_1 \cdot \sqrt{p}}{a_{10}}\right) \right]}, \quad (5.45)$$

де
$$d_0 = \frac{a_{10} \cdot \lambda_{20}}{a_{20} \cdot \lambda_{10}}. \quad (5.46)$$

Використовуючи відомі вирази для гіперболічних функцій (shu , chu) [23, 58], знаменник у виразах (5.44) та (5.45) приведемо до вигляду:

$$\begin{aligned} & \frac{\lambda_{10}}{a_{10}} \cdot sh\left(\frac{H_1 \cdot \sqrt{p}}{a_{10}}\right) + \frac{\lambda_{20}}{a_{20}} \cdot ch\left(\frac{H_1 \cdot \sqrt{p}}{a_{10}}\right) = \\ & = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{\lambda_{10}}{a_{10}} + \frac{\lambda_{20}}{a_{20}} \right) \cdot \left(1 - b \cdot e^{-\frac{2H_1 \cdot \sqrt{p}}{a_{10}}} \right) \cdot e^{\frac{H_1 \cdot \sqrt{p}}{a_{10}}}, \end{aligned} \quad (5.47)$$

де
$$b = \frac{a_{10} \cdot \lambda_{20} - a_{20} \cdot \lambda_{10}}{a_{10} \cdot \lambda_{20} + a_{20} \cdot \lambda_{10}}. \quad (5.48)$$

З врахуванням наступних розкладень у ряд [64, 58]

$$\frac{1}{1 - b \cdot e^{-\frac{2H_1 \cdot \sqrt{p}}{a_{10}}}} = \begin{cases} \sum_{n=0}^{\infty} b^n \cdot e^{-\frac{2H_1 \cdot n \cdot \sqrt{p}}{a_{10}}} & \text{при } b > 0 \\ \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \cdot |b|^n \cdot e^{-\frac{2H_1 \cdot n \cdot \sqrt{p}}{a_{10}}} & \text{при } b < 0, \end{cases} \quad (5.49)$$

а також рівності

$$\frac{a_{20} \cdot \lambda_{10} - a_{10} \cdot \lambda_{20}}{2a_{10} \cdot a_{20}} = \frac{\lambda_{10} \cdot (1 + d_0)}{2a_{10}}, \quad (5.50)$$

отримуємо

$$\bar{\theta}_1(z, p) = \bar{q}_{n0} \cdot a_{10} \cdot \left[\sum_{n=0}^{\infty} b^n \cdot \frac{1}{p \cdot \sqrt{p}} \cdot e^{-\frac{z+2H_1n}{a_{10}} \sqrt{p}} - \sum_{n=0}^{\infty} b^n \cdot \frac{1}{p \cdot \sqrt{p}} \cdot e^{-\frac{2H_1n-z}{a_{10}} \sqrt{p}} \right], \quad (5.51)$$

$$\bar{\theta}_2(z, p) = \frac{2\bar{q}_{n0} \cdot a_{10}}{1 + d_0} \cdot \sum_{n=0}^{\infty} b^n \cdot \frac{1}{p \cdot \sqrt{p}} \cdot e^{\left(\frac{z}{a_{20}} - \frac{2H_1 n}{a_{10}}\right) \cdot \sqrt{p}}, \quad (5.52)$$

За таблицями операційного обчислення [64] знаходимо шукані оригінали

$$\bar{\theta}_1(z, t) = 2\bar{q}_{n0} \cdot a_{10} \cdot \sqrt{t} \cdot \left[\sum_{n=0}^{\infty} b^n \cdot i \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{2H_1 n + z}{2a_{10} \cdot \sqrt{t}}\right) - \sum_{n=0}^{\infty} b^n \cdot i \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{2H_1 n - z}{2a_{10} \cdot \sqrt{t}}\right) \right], \quad (5.53)$$

$$\bar{\theta}_2(z, t) = \frac{4\bar{q}_{n0} \cdot a_{10} \cdot \sqrt{t}}{1 + d_0} \cdot \sum_{n=0}^{\infty} b^n \cdot i \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{H_1 n}{a_{10} \cdot \sqrt{t}} + \frac{z}{2a_{20} \cdot \sqrt{t}}\right), \quad (5.54)$$

де
$$i \cdot \operatorname{erfc} u = \int_u^{\infty} \operatorname{erfc} \xi d\xi = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \cdot e^{-u^2} - u \cdot \operatorname{erfc} u \quad (5.55)$$

та
$$\operatorname{erfc} u = 1 - \operatorname{erf} u, \quad (5.56)$$

$$\operatorname{erf} u = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^u e^{-\xi^2} d\xi \quad (5.57)$$

спеціальні функції [58].

З врахуванням (5.26) та (5.34) отримуємо розв'язок вихідної задачі:

$$T_1(z, t) = \left\{ T_0^{\nu+1} + \frac{2(\nu+1) \cdot 2q_{n0} \cdot a_{10} \cdot \sqrt{t}}{\lambda_{10}} \cdot \left[\sum_{n=0}^{\infty} b^n \cdot i \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{2H_1 n + z}{2a_{10} \cdot \sqrt{t}}\right) - \sum_{n=0}^{\infty} b^n \cdot i \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{2H_1 n - z}{2a_{10} \cdot \sqrt{t}}\right) \right] \right\}^{\frac{1}{\nu+1}}, \quad (5.58)$$

$$T_2(z, t) = \left\{ T_0^{\nu+1} + \frac{4(\nu+1) \cdot q_{n0} \cdot a_{10} \cdot \sqrt{t}}{\lambda_{10} \cdot (1 + d_0)} \cdot \sum_{n=0}^{\infty} b^n \cdot i \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{H_1 n}{a_{10} \cdot \sqrt{t}} + \frac{z}{2a_{20} \cdot \sqrt{t}}\right) \right\}^{\frac{1}{\nu+1}}. \quad (5.59)$$

Визначення термопружних напружень у двошаровій пластині при дії електронного променя. Для знаходження термопружних напружень у розглядуваній пластині $\sigma_i(z, t)$ ($i = 1, 2$ – номери покриття та пластини

відповідно) застосуємо отримані вище співвідношення для розрахунку напружень у одношаровій пластині (розділ 4) [71, 137].

В результаті для обчислення напруження σ_i отримуємо наступне співвідношення [71, 139]:

$$\sigma_i(z,t) = \frac{\alpha_{T_i} \cdot E_i}{1-\nu_i} \cdot \left[-T_i(z,t) + \frac{2}{H_1^2} \cdot (2H_1 - 3z) \int_0^{H_1} T_i(z,t) dz - \frac{6}{H_1^3} \cdot (H_1 - 2z) \cdot \int_0^{H_1} T_i(z,t) \cdot z dz \right]. \quad (5.60)$$

Результати розрахунків термопружних напружень $\sigma_1(z,t)$ по товщині оксидного покриття з використанням відомих фізико-механічних властивостей скла К8 та оксиду Al_2O_3 [62, 77, 93, 123, 200, 201, 204], а також стандартного програмного забезпечення (додатки А, Б) представлено на рис. 5.37.

З результатів розрахунків випливає, що максимальних значень термопружні напруження досягають поблизу поверхні пластини, тобто у оксидному покритті. Встановлено, що вони істотно залежать від технологічних параметрів електронно-променевої установки: збільшення струму від 200 мА до 300 мА та прискорюючої напруги від 6 кВ до 8 кВ, а також зменшення відстані від оброблюваної поверхні від $8 \cdot 10^{-2}$ м до $4 \cdot 10^{-2}$ м призводять до зростання термопружних напружень у 1,5...2,1 разу; при цьому їх максимум змінюється від $0,7 \cdot 10^8$ Н/м² до $1,5 \cdot 10^8$ Н/м² та досягається всередині покриття.

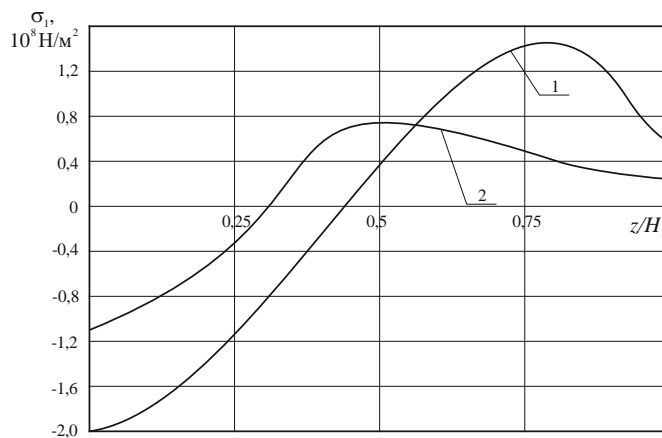


Рис. 5.37. Розподіл термопружних напружень по товщині пластин з оптичного скла К8 з оксидним покриттям Al_2O_3 при дії електронного променя для різних

часів його впливу ($T_0 = 300$ К, $H_1 = 10$ мкм): 1 – $I_n = 300$ мА, $V_y = 8$ кВ, $l = 4 \cdot 10^{-2}$ м, $t = 10^{-1}$ с; 2 – $I_n = 200$ мА, $V_y = 6$ кВ, $l = 8 \cdot 10^{-2}$ м, $t = 10^{-1}$ с.

Крім цього, порівнюючи отримані значення $|\sigma_1|_{max}$ з критичними значеннями σ_1^* (також, як й у випадку одиничної пластини (розділ 4)) можна визначати критичні значення керованих параметрів I_n^* , V_y^* та l^* , перевищення яких призводить до руйнування оброблених електронним променем оксидних покриттів.

У світлі сучасних новітніх технологій, що використовуються у оптико-електронному приладобудуванні, електронно-променева обробка елементів з оптичного скла та керамік, елементів з п'єзокерамік, а також оптичних елементів з нанорозмірними покриттями з оксидів металів визначається як потенційно спроможна для якісної обробки плоских та криволінійних елементів, одержання на їх поверхнях функціональних мікропрофілей за допомогою електронних променів, які можуть бути використані у якості елементної бази у мікрооптиці, інтегральній та волоконній оптиці, оптоелектроніці, функціональній електроніці та інших галузях точного приладобудування. Крім цього, незаперечними перевагами електронно-променевої технології є її екологічна чистота та спроможність одержання на загальній платі з оптичного матеріалу у єдиному технологічному циклі мікроелементів з покращеними експлуатаційними характеристиками, використання яких у оптичних деталях оптико-електронних приладів сприяє їх безвідмовній роботі при експлуатації.

Висновки до розділу 5

1. Для практичного використання результатів роботи вперше розроблено наступні науково обґрунтовані методи:
 - метод покращення експлуатаційних характеристик оптичних елементів за допомогою електронно-променевої технології;

- метод визначення та контролю критичних значень параметрів зовнішніх термовпливів, який дозволяє попереджати погіршення експлуатаційних характеристик оптичних елементів.
2. Основні результати роботи знайшли практичне використання та впровадження (підтверджено актами впровадження) на підприємствах України та Республіки Білорусь, що дозволило: підвищити точність та розширити діапазони вимірювання дальності імпульсних лазерних далекомірів на 7...15 %; збільшити ймовірність безвідмовної роботи лазерних медичних приладів з волоконно-оптичними світловодами та ІЧ-приладів з оптичними обтічниками в умовах зовнішніх термодій на 10...20 %; отримати економічний ефект 360 тис. грн. Окремі результати роботи (електронно-променевого обладнання, результати експериментальних досліджень) використовуються у навчальному процесі при читанні лекцій, проведенні лабораторних робіт, практичних занять, виконанні курсових та дипломних проектів (Національний технічний університет України “КПІ ім. Ігоря Сікорського”; Черкаський державний технологічний університет).
3. Отримано наступні результати досліджень у області подальшого застосування електронно-променевої технології у точному приладобудуванні:
- розроблено новий науково-обґрунтований метод електронно-променевої обробки криволінійних поверхонь оптичних елементів та формування на них функціональних мікропрофілів різної геометричної форми за допомогою системи нерухомих дискретно розташованих електронних променів шляхом оптимізації технологічних параметрів установки (кількості променів, їх струмів, прискорюючих напруг та відстаней до оброблюваних поверхонь), що дозволяє створювати різні мікрооптичні деталі для оптико-електронних приладів;
 - встановлено покращення фізико-механічних властивостей та експлуатаційних характеристик елементів з п’єзокерамік та оптичних елементів з зносостійкими та теплоізоляційними нанорозмірними

(< 100 нм) покриттями з оксидів металів (SnO_2 , Bi_2O_3 , TiO_2 , ZnO , SiO_2 , Al_2O_3 та ін.) за допомогою електронно-променевої технології.

ОСНОВНІ ВИСНОВКИ ТА РЕЗУЛЬТАТИ РОБОТИ

У дисертаційній роботі вирішена нова науково-технічна проблема покращення експлуатаційних характеристик оптичних елементів оптико-електронних приладів на основі встановлених закономірностей впливу на них режимів електронно-променевої технології, розроблених математичних моделей, спеціалізованого програмного забезпечення, що в цілому представляють собою технологічні основи керування якісними характеристиками поверхні і поверхневих шарів елементів, та яка має важливе народно-господарське значення для підвищення техніко-експлуатаційних характеристик приладів з наступним їх впровадженням у виробництво, що повністю відповідає поставленій меті.

При виконанні дисертаційної роботи були отримані наступні наукові результати:

1. Вперше на базі сформульованих теоретичних положень, розроблених моделях отриманих закономірностей, підтверджених експериментальними дослідженнями, розроблено наукові основи реалізації процесів поверхневої електронно-променевої обробки оптичних елементів, які забезпечують відтворюваність результатів обробки, отримання гарантованого підвищення якості поверхневих шарів, покращення експлуатаційних характеристик елементів та техніко-експлуатаційних характеристик оптико-електронних приладів.
2. Розроблено уточнені математичні моделі зовнішнього термічного впливу на оптичні елементи різної геометричної форми та розмірів, що враховують температурні залежності теплофізичних властивостей оптичного матеріалу (об'ємну теплоємність, коефіцієнт теплопровідності) та дозволяють більш точно визначати критичні значення зовнішніх теплових потоків та часів їх впливу, попереджаючи їх можливі руйнування при експлуатації.
3. Запропоновано нову математичну модель зовнішніх термоударних впливів на оптичний обтічник, що враховує геометричну форму обтічника, режим обтікання потоком повітря, температурні залежності теплофізичних

характеристик оптичного матеріалу, яка дозволяє визначати критичні значення швидкостей потоку повітря та тривалості його дії, а також місця розташування небезпечних ділянок на поверхні обтічника, які піддаються максимальному нагріву, що дозволяє шляхом попередньої електронно-променевої обробки вказаних ділянок попереджати погіршення їх експлуатаційних характеристик та руйнування при експлуатації.

4. Вперше встановлені закономірності впливу режимів електронно-променевої обробки на кількісні показники якості поверхневих шарів елементів з оптичного скла та кераміки:

- поверхня елементів з оптичного скла повністю очищується від дефектів, які були отримані при їх механічній поліровці (тріщин, подряпин та ін.); при цьому відбувається підвищення класу чистоти, зменшення мікросорсткості до 0,4...1,3 нм;

- у елементах з оптичного скла відбувається поверхнєве оплавлення на глибину до 130...220 мкм, не порушуючи площинності, при цьому відбувається гомогенізація хімічного складу продуктів гідролізу, а також орієнтовна перебудова біля поверхні кремнекисневої сітки скла, яка стає наближеною до структури кварцового скла;

- у елементах з оптичної кераміки виникають стискаючі напруження до 30...70 МПа у зміцнених поверхневих шарах товщиною 90...210 мкм.

5. Вперше знайдено режими електронно-променевої технології (густини теплового впливу $F_n = 7 \cdot 10^6 \dots 8 \cdot 10^8$ Вт/м², швидкості переміщення електронного променя $V = 5 \cdot 10^{-3} \dots 5 \cdot 10^{-2}$ м/с), в межах яких спостерігається покращення експлуатаційних характеристик оптичних елементів:

- збільшення мікротвердості поверхні елементів з оптичної кераміки до $4,84 \cdot 10^3 \dots 7,15 \cdot 10^3$ МПа та підвищення спектрального коефіцієнта пропускання ІЧ-випромінювання на 4...6 % для елементів з оптичного скла та на 5...7 % – для елементів з оптичної кераміки;

- відбувається збільшення критичних значень зовнішнього теплового потоку, який призводить до руйнування елементів, в 1,5...2 рази, при цьому

збільшення зовнішнього тиску до 10^7 Па зменшує вказані критичні значення у 1,3...1,5 рази; критичні значення термопружних напружень у оптичних елементах при температурах нагріву 300...1200 К зростають в 1,5...2,5 рази, що вказує на підвищення стійкості до термічних впливів та підвищених зовнішніх тисків оптичних елементів, які оброблені електронним променем;

– значення критичних висот падіння сталеві кульки на їх поверхню, що призводять до руйнування елементів, збільшуються з 0,18...1,1 м до 0,37...1,35 м, тобто підвищується їх стійкість до механічних ударів.

6. Запропоновано новий метод обробки складних криволінійних поверхонь оптичних елементів та створення на них функціональних мікропрофілів різної геометричної форми на базі системи нерухомих дискретно розташованих електронних променів, що дозволяє шляхом оптимального керування технологічними параметрами установки (кількістю променів, їх струмами, прискорюючими напругами та відстанями до оброблюваних поверхонь) створювати мікрооптичні деталі для оптико-електронних приладів.

7. Розроблено та захищено патентами України (патенти України № 4177, № 91523) технологічне електронно-променеве обладнання, що має спеціалізовану програмно керовану оснастку для автоматизованого вимірювання та контролю температури оброблюваної поверхні, а також для зондування електронного променя, що дозволяє зробити весь процес обробки поверхні оптичних елементів більш керованим та ефективним.

8. Впроваджено нові методи підвищення експлуатаційних характеристик оптичних елементів оптико-електронних приладів за допомогою електронно-променевої технології, які знайшли практичне застосування на підприємствах України та Республіки Білорусь (підтверджено актами впровадження), що дозволило: підвищити точність та розширити діапазони вимірювань дальності імпульсними далекомірами приладів прицільних комплексів на 7...15 %; збільшити ймовірність безвідмовної роботи оптичних обтічників ІЧ-приладів та волоконно-оптичних світловодів лазерних медичних приладів при експлуатації на 10...20 %; отримати економічний ефект 360 тис. грн.

ПОСИЛАННЯ

- [1] И.А. Аброян, А.Н. Андронов и А.И. Титов, *Физические основы электронной и ионной технологии* (Высшая школа, Москва, 1984), 255 с.
- [2] Р.А. Абубеков, Д.И. Котельников, Ю.М. Федорук и Ю.Е. Шамарин, в: Волоконно-оптические линии связи и системы передачи информации – 94: Тезисы докладов 5-й Международной научно-технической конференции (Запорожье, 1994), с. 56-57.
- [3] О.В. Акастелова, Ю.Р. Эбич и В.А. Шевченко, “Механическая полировка хрустальных элементов для бытовых светильников”, *Стекло и керамика*. **6**, 8-9 (1984).
- [4] К.С. Акопьянц, О.К. Назаренко, В.В. Гумовский и В.П. Чернякин, “Система диагностики электронного луча в установках для электронно-лучевой сварки”, *Автоматическая сварка*. **10**, 30-33 (2002).
- [5] О.Л. Альтах и П.Д. Саркисов, *Шлифование и полирование стекла и стеклоизделий* (Высшая школа, Москва, 1983), 207 с.
- [6] А.М. Андрушко, В.А. Вознесенский и И.П. Панфилов, “Современное состояние и перспективы развития оптических интегральных схем”, *Зарубежная радиоэлектроника*. **11**, 23-28 (1983).
- [7] Л.М. Андрушко, В.А. Вознесенский, В.Б. Коток и др., *Справочник по волоконно-оптическим линиям связи* (Техніка, Киев, 1988), 239 с.
- [8] В.И. Аникин, А.И. Гудзенко и В.Ф. Теричев, “Интегральная оптика среднего ИК-диапазона”, *Зарубежная радиоэлектроника*. **2** (1979).
- [9] В.С. Антонюк, М.О. Бондаренко, В.А. Ващенко, Г.В. Канашевич, Г.С. Тимчик та І.В. Яценко, *Біофізика і біомеханіка. Підручник* (НТУУ “КПІ”, Київ, 2012), 344 с.
- [10] В.С. Антонюк, С.А. Билоконь, М.А. Бондаренко, Ю.Ю. Бондаренко и И.В. Яценко, в: Качество, стандартизация, контроль: теория и практика: Материалы 12-й Международной научно-практической конференции (Ялта, 2012), с. 13-15.

- [11] В.С. Антонюк, Ю.И. Коваленко, М.А. Бондаренко и И.В. Яценко, "Модифицирование металлизированных поверхностей ленточным электронным потоком", в: Инженерия поверхности и реновация изделий: Материалы 13-й Международной научно-технической конференции (Ялта, 2013), с. 15-19.
- [12] В.С. Антонюк, С.А. Билоконь, М.А. Бондаренко, Ю.Ю. Бондаренко, О.В. Кириченко и И.В. Яценко, "Особенности измерения микротвердости диэлектрических поверхностей кремниевым зондом атомно-силового микроскопа", Ежемесячный научно-технический и производственный журнал "Наноинженерия", **3** (33), 13-16 (2014).
- [13] В.С. Антонюк, Г.С. Тимчик, та О.В. Верцанова, *Мікроскопія у нанотехнологіях* (НТУУ "КПІ", Київ, 2014), 260 с.
- [14] В.С. Антонюк, І.В. Яценко, О.В. Кириченко та В.А. Ващенко, "Підвищення фізико-механічних параметрів елементів з оптичних керамік фінішною електронно-променевою обробкою", Сучасні технології в машинобудуванні: Зб. наук. пр. НТУ "ХПІ". Харків. **11**, 74-86 (2016).
- [15] М.И. Апенко, И.П. Араев, В.А. Афанасьев и др. *Оптические приборы в машиностроении. Справочник* (Машиностроение, Москва, 1974), 238 с.
- [16] А.А. Бабилова, В.С. Евстишенков, С.А. Клепиков и Ю.А. Медведев, А. с. СССР № 973492 (15 листопада, 1982).
- [17] Б.В. Барабанов, Н.Г. Блинов, А.М. Дроднов и С.В. Дудова, "Аппаратура плазменной технологии высоких энергий – "холодные" системы для генерации плазм проводящих твердых тел", Физика и химия обработки материалов. **1**, 44-51 (1987).
- [18] А.Н. Бардин, *Сборка и юстировка оптических приборов* (Высшая школа, Москва, 2005), 325 с.
- [19] В.А. Батыров, *Рентгеноспектральный и электронно-зондовый микроанализ* (Металлургия, Москва, 1982), 152 с.
- [20] Н.С. Бахвалов, Н.П. Жидков и Г.М. Кобелько, *Численные методы* (Наука, Москва, 1987), 598 с.

- [21] В.В. Башенко, *Электронно-лучевые установки* (Энергия, Москва, 1972), 168 с.
- [22] А.Т. Белый, М.М. Юркевич и Ю.Я. Кумыш, А. с. СССР № 814910 (23 березня, 1981).
- [23] Н.М. Беляев и А.А. Рядно, *Методы теории теплопроводности* (Высшая школа, Москва, 1982), 328 с.
- [24] В.С. Бессмертный, “Плазменная обработка стекол”, *Стекло и керамика*. **4**, 6-8 (2001).
- [25] Э.Ю. Бессонова, З.И. Кангиев, А.В. Клепикова и др., “Волоконные элементы для электронно-оптического приборостроения”, *Оптический журнал*. **4**, 37-41 (1992).
- [26] С.О. Білокінь, В.С. Антонюк, Ю.І. Коваленко, М.О. Бондаренко, І.В. Яценко та П.О. Фіалковський, Патент України № 91523 (10 липня, 2014).
- [27] А.А. Бобкова, “Полировка свинецсодержащего стекла инфракрасным излучением”, *Стекло и керамика*. **4**, 10-11 (1981).
- [28] А.П. Богданов и И.Г. Бунин, “Доводка формы оптической поверхности ионным пучком малого сечения, управляемым программированным перемещением”, *Оптико-механическая промышленность*. **2**, 39-42 (1988).
- [29] М.А. Бондаренко, Ю.Б. Шевченко, В.П. Бойко, Ю.И. Коваленко, И.В. Яценко, Г.В. Канашевич и В.А. Ващенко, “Исследование микрогеометрии поверхности оптических стекол после электронной и после лазерной обработки методом атомно-силовой микроскопии”, в: *Методологические аспекты сканирующей зондовой микроскопии: Материалы VII Международного семинара* (г. Минск, Беларусь 2006), с. 139-142.
- [30] М.О. Бондаренко, Ю.Ю. Бондаренко, Г.В. Канашевич, И.В. Яценко, В.А. Ващенко и Л.И. Конопальцева, “Исследование поверхностей пьезокерамических элементов, модифицированных электронным потоком методом атомно-силовой микроскопии”, в: *Методологические аспекты сканирующей зондовой микроскопии “БелСЗМ-8”*: Материалы VIII Международного семинара (г. Минск, Беларусь, 2008), с. 23-26.

- [31] М.А. Бондаренко, В.А. Ващенко, И.А. Рева, Ю.Ю. Бондаренко, Г.В. Канашевич и И.В. Яценко, “Методика измерения толщины тонких несплошных покрытий на диэлектрических поверхностях методом атомно-силовой микроскопии”, в: Современные методы и средства неразрушающего контроля и технической диагностики: Материалы XVIII Ежегодной международной конференции и выставки (УИЦ “Наука. Техника. Технология”, Ялта-Киев, 2010), с. 209-212.
- [32] М.О. Бондаренко, В.А. Ващенко, С.О. Білокінь, Ю.Ю. Бондаренко, І.В. Яценко та І.А. Рева, “Вивчення умов утворення наноструктур на поверхнях п’єзоелектричних керамік під дією стрічкового електронного потоку”, Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля. **8** (162), с. 30-34 (2011).
- [33] М.О. Бондаренко, В.А. Ващенко, С.О. Шелестовська, Ю.Ю. Бондаренко та І.В. Яценко, в: Актуальные проблемы прикладной физики 2011: IV Всеукраинская научно-практическая конференция (Севастополь, 2011).
- [34] М.А. Бондаренко, И.В. Яценко, П.В. Петлеваный, Ю.И. Коваленко и В.А. Ващенко, ”Применение метода атомно-силовой микроскопии в изучении доменно-диссипативных структур, сформированных в пьезокерамике электронно-лучевым методом”, в: Методологические аспекты сканирующей зондовой микроскопии: Сборник докладов X Международной конференции (Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАНБ, г. Минск, Беларусь, 2012), с. 48-52.
- [35] М.А. Бондаренко, Ю.И. Коваленко, Ю.Ю. Бондаренко, С.А. Билоконь и И.В. Яценко, “Изучение механизма формирования ультра тонких функциональных покрытий на оптическом стекле при комбинированной электронно-лучевой микрообработке”, в: Современные проблемы физики конденсированного состояния, нанотехнологий и наноматериалов: Сборник трудов III международной научной конференции (г. Алматы, Казахстан, 2014), с. 64-65.

- [36] Н.А. Борисов, Г.В. Дудко и В.Н. Лисоченко и др., *Разработка теоретических основ электронно-лучевой технологии микроэлектроники и полупроводникового приборостроения*” (Отчет по НИР Таганрогского радиотехнического института, Таганрог, 1979), 123 с.
- [37] М. Борн и Э. Вольф, *Основы оптики* (Наука, Москва, 1970).
- [38] А.И. Бородин и С.В. Пейжн, “Гиперзвуковой пространственный вязкий ударный слой на затупленных телах, обтекаемых под углами атаки и скольжения”, *Теплофизика высоких температур*. **26**(4), 751 (1988).
- [39] М.П. Бочок, Н.П. Будко, В.А. Ващенко, Г.В. Канашевич та Д.І. Котельников, *Спеціальні методи обробки оптичного скла. Навчальний посібник* (Чернігівський державний технологічний університет, Чернігів, 2001), 215 с.
- [40] И.А. Брагинец, А.Г. Кононенко, Ю.Г. Масюренко и А.Д. Ниженский, “Повышение точности импульсных лазерных светодаальномеров”, *Техн. электродинамика*. **6**, 64-70 (2003).
- [41] В.М. Брюзгин, В.С. Щукин, А.И. Гранек и В.И. Фомин, А. с. СССР № 1010025 (07 квітня, 1983).
- [42] С.И. Булычев и В.П. Алехин, *Испытание материалов непрерывным вдавливанием индентора* (Машиностроение, Москва, 1990), 224 с.
- [43] А.В. Бурак, В.И. Гордиенко, А.Ю. Денисенко и др., “Модернизация ночных танковых прицелов”, *Механіка та машинобудування*. **2**, 210-213 (2002).
- [44] А.Г. Бутковский, В.А. Кубушкин и Е.П. Чубаров, “Реализация распределенных управлений при помощи подвижных источников воздействия”, *Автоматика и телемеханика*. **4**, 5-12 (1983).
- [45] А.Г. Бутковский и Л.М. Пустыльников, *Теория подвижного управления системами с распределенными параметрами* (Наука, Москва, 1980), 384 с.
- [46] В.Н. Быченко, М.А. Иродов и В.В. Кононенко, в: *Применение лазеров в медицине и биологии: Тезисы XXVII Международной научно-практической конференции* (Харьков, 2007), с. 138-140.

- [47] В.А. Васин, “Современное воздействие СВЧ-поля и сфокусированного лазерного излучения на диэлектрики”, *Стекло и керамика*. **10**, 23-26 (2000).
- [48] В.А. Ващенко, Л.Л. Соколенко, А.М. Пистун и др., *Изучение перспективных материалов и освоение технологии изготовления элементов интегральной оптики* (Отчет по НИР НИИ “Аккорд”, Черкассы, 1985), 186 с.
- [49] В.А. Ващенко, Н.И. Кривенко, Г.В. Канашевич и др. *Разработка электронно-лучевой технологии и оборудования для упрочнения менисков* (Отчет по НИР Черкасского филиала КПИ, Черкассы, 1988), 136 с.
- [50] В.А. Ващенко, В.И. Глущенко и В.Н. Лисоченко, в: Тезисы докладов научно-технической конференции (Черкасский филиал КПИ, Черкассы, 1989), с. 49-50.
- [51] В.А. Ващенко, “Наукові основи оптимізації процесів електронно-променевої обробки оптичних матеріалів”, *Вісник Черкаського державного університету. Серія “Фізико-математичні науки”*. **9**, 131-141 (1999).
- [52] В.А. Ващенко, Г.Н. Дубровская, Г.В. Канашевич и С.В. Поздеев, в: *Вакуумные технологии и оборудование: Материалы 3-го Международного симпозиума* (Харьков, 1999), с. 115-118.
- [53] В.А. Ващенко, Д.М. Краснов, Г.В. Канашевич и П.П. Дмитренко, “Математическое моделирование и расчет оплавления оптических материалов, обрабатываемых подвижным ленточным электронным лучом”, *Вісник Черкаського інженерно-технологічного інституту*. **1**, 83-88 (2000).
- [54] В.А. Ващенко, Г.В. Канашевич и И.В. Дробот, “Методика использования математических моделей для расчета теплового воздействия электронного луча на оптические материалы”, *Збірник наукових праць Інституту проблем моделювання в енергетиці НАН України*. **11**, 99-108 (2001).
- [55] В.А. Ващенко, Г.В. Канашевич та П.П. Дмитренко, “Вплив режимів електронно-променевої обробки на властивості поверхневих шарів оптичних керамік”, *Вісник Сумського державного університету*. **9-10**, 154-161 (2001).
- [56] В.А. Ващенко, Г.В. Канашевич, В.М. Лукашенко, М.А. Бондаренко и И.В. Яценко, “Оптоэлектроника и микрооптика – перспективные отрасли науки

и техники”, Вісник Черкаського державного технологічного університету. **2**, 52-62 (2002).

[57] В.А. Ващенко, Г.В. Канашевич и П.П. Дмитренко, “Влияние режимов электронно-лучевой обработки на свойства поверхностных слоев оптических стекол”, Вісник Сумського державного університету. **5-6**, 99-106 (2002).

[58] В.А. Ващенко, Д.И. Котельников, Ю.Г. Лега, Д.М. Краснов, И.В. Яценко и О.В. Кириченко, *Тепловые процессы при электронной обработке оптических материалов и эксплуатации изделий на их основе. Монография* (Наукова думка, Київ, 2006), 368 с.

[59] В.А. Ващенко, Г.В. Канашевич, І.В. Яценко та ін., *Діагностика функціональних шарів у виробках мікрооптики і наноелектроніки, отриманих електронними технологіями* (Звіт з НДР Черкаського державного технологічного університету, Черкаси, 2007), 137 с.

[60] В.А. Ващенко, Г.В. Канашевич, І.В. Яценко та ін., *Технологічні основи електронної нанобробки поверхонь виробів з п'єзоелектричних керамік* (Звіт з НДР Черкаського державного технологічного університету, Черкаси, 2010), 125 с.

[61] В.А. Ващенко, Г.В. Канашевич, І.В. Яценко та ін., *Отримання зносостійких покриттів на поверхнях оптичних виробів спеціального призначення комбінованим методом термічного випаровування* (Звіт з НДР Черкаського державного технологічного університету, Черкаси, 2011), 93 с.

[62] В.А. Ващенко, І.В. Яценко, Ю.Г. Лега та О.В. Кириченко, *Основи електронної обробки виробів з оптичних матеріалів. Монографія* (Наукова думка, Київ, 2011), 562 с.

[63] В.А. Ващенко, И.В. Яценко, Ю.И. Коваленко, И.А. Рева и В.П. Бойко, “Особенности определения микрогеометрических характеристик наноразмерных оксидных покрытий на поверхностях оптических диэлектриков методом атомно-силовой микроскопии”, в: *Современные методы и средства неразрушающего контроля и технической диагностики: Материалы девятнадцатой международной конференции* (г. Гурзуф, 2011), с. 193-195.

- [64] В.А. Ващенко, В.С. Антонюк, Г.С. Тимчик, І.В. Яценко, М.О. Бондаренко, О.В. Кириченко та М.П. Рудь, *Основи теплоперенесення в елементах оптичного приладобудування. Навчальний посібник* (НТУУ “КПІ”, Київ, 2012), 412 с.
- [65] В.А. Ващенко, Г.В. Канашевич, І.В. Яценко та ін., *Технологічні основи створення теплоізоляційних нанорозмірних покриттів на поверхнях оптичних діелектриків комбінованим термовакuumним осадженням* (Звіт з НДР Черкаського державного технологічного університету, Черкаси, 2013), 143 с.
- [66] А.А. Веденов и Г.Г. Гладуш, *Физические процессы при лазерной обработке материалов* (Энергоатомиздат, Москва, 1985), 208 с.
- [67] В.П. Ведерников и С.Н. Кононов, в: *Волоконно-оптические линии связи и системы передачи информации – 94: Тезисы докладов 5-й Международной научно-технической конференции* (Запорожье, 1994), с. 14-17.
- [68] В.П. Вейко, *Лазерная обработка пленочных элементов* (Машиностроение, Ленинград, 1986), 248 с.
- [69] А.Ф. Верлань, Н.В. Апатова и В.И. Донской, *Языки персональных компьютеров* (Наукова думка, Київ, 1989), 240 с.
- [70] А.Ф. Верлань, С.А. Положаенко и Н.Г. Сербов, *Математическое моделирование аномальных диффузионных процессов* (Наукова думка, Київ, 2011), 211 с.
- [71] В.М. Вигак, *Управление температурными напряжениями и перемещениями* (Наукова думка, Київ, 1988), 312 с.
- [72] С.Я. Виленкин, *Статистическая обработка результатов исследования случайных величин* (Энергия, Москва, 1979), 320 с.
- [73] С.С. Вильчинская и В.М. Лисицын, *Оптические материалы а технологии* (Издательство Томского политехнического университета, 2011), 107 с.
- [74] В.М. Винокуров, *Исследование процесса полировки стекла* (Машиностроение, Москва, 1967), 196 с.

- [75] Е.Б. Володин и К.К. Свидзинский, “Перспективы применения элементов интегральной оптики в микроэлектронной аппаратуре”, *Электронная промышленность*. 6 (1977).
- [76] В.И. Вольман и Н.Д. Козырев, “Многофункциональные элементы интегральной оптики”, *Радиотехника*. **8**, 36-39 (1984).
- [77] Е.М. Воронцова, Б.Н. Гречушникова, Г.И. Дистлер и др., *Оптические материалы для инфракрасной техники* (Наука, Москва, 1965), 335 с.
- [78] А.П. Гавриш, *Финишная обработка оптических материалов* (Машиностроение, Москва, 1989), 123 с.
- [79] Б.А. Галанов, О.Н. Григорьев, Ю.В. Мильман и др., “Определение твердости и модуля Юнга по глубине внедрения пирамидального индентора”, *Проблемы прочности*. **11**, 93-96 (1983).
- [80] И. Гейтц, *Шлифовка и полировка стекла* (Стройиздат, Ленинград, 1967), 280 с.
- [81] О.А. Геращенко, А.Н. Гордов, А.К. Еремина и др., *Температурные измерения. Справочник* (Наукова думка, Київ, 1989), 704 с.
- [82] И.П. Гинзбург, *Аэрогазодинамика* (Высшая школа, Москва, 1966), 404 с.
- [83] А.Р. Глущенко, В.И. Гордиенко, А.В. Бурак и А.Ю. Денисенко, *Танковые ночные системы и приборы наблюдения* (Фотоприбор, Черкассы, 2007), 441 с.
- [84] А.Р. Глущенко, В.И. Гордиенко, А.А. Бурковский и др., *Лазерные системы танковых прицелов* (Маклаут, Черкассы, 2009), 600 с.
- [85] Л.Ф. Головки, В.В. Роман та Валид Нусіраф, “Підвищення ефективності лазерної обробки керуванням розподілу потужності випромінювання на поверхні фокусування”, *Експрес-Новини. Наука, техніка, виробництво*. **5-6**, 15-17 (1999).
- [86] Л.Ф. Головки та С.О. Лук'яненко, редактори, *Лазерні технології та комп'ютерне моделювання* (Вістка, Київ, 2009), 296 с.
- [87] М.С. Гомельский, *Тонкий отжиг оптического стекла* (Машиностроение, Москва, 1975), 145 с.

- [88] А.М. Гончаренко и В.П. Радько, *Введение в интегральную оптику* (Наука и техника, Минск, 1975), 148 с.
- [89] В.І. Гордієнко, О.Г. Голуб, В.І. Остапюк та С.В. Дядя, в: Спеціальне приладобудування: стан та перспективи: Збірник тез доповідей 2-ї Української науково-технічної конференції (КП СПБ “Арсенал”, Київ, 2016), с. 73-74.
- [90] А.П. Горобец, В.Н. Малыш, А.А. Мирошин и А.Н. Осовицкий, А. с. СССР № 1467038 (23. 03. 89).
- [91] ГОСТ 2789-73. Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики.
- [92] ГОСТ 1807-75. Радиусы сферических поверхностей оптических деталей. Ряды числовых значений.
- [93] ГОСТ 13659-78. Стекло оптическое, бесцветное. Физико-химические характеристики. Основные параметры.
- [94] ГОСТ 13240-78. Заготовки из оптического стекла. Технические условия.
- [95] ГОСТ 8.229-81. Спектрофотометры инфракрасные. Методы и средства поверки.
- [96] ГОСТ 2786-82. Стекла пробные для проверки радиусов и формы сферических оптических поверхностей. Технические условия.
- [97] ГОСТ 11141-84. Детали оптические. Классы чистоты поверхностей. Методы контроля.
- [98] ГОСТ 3520-92. Материалы оптические. Методы определения показателей ослабления.
- [99] ГОСТ 23136-93. Материалы оптические. Параметры.
- [100] Дж. Гоулстейн, Д. Ньюбери, П. Эчлин, Д. Джой, И. Фиори и Э. Лифшиц, *Растровая электронная микроскопия и рентгеновский микроанализ. В 2-х книгах. Книга 1. Пер. с англ.* (Мир, М, 1984), 303 с.
- [101] А.Г. Григорьянц и А.Н. Сафонов, *Методы поверхностной лазерной обработки* (Высшая школа, Москва, 1987), 191 с.
- [102] Т.И. Гураль, В.М. Тягур, Н.И. Лихолит, Н.И. Овчар и Н.Е. Кирилюк, в: Спеціальне приладобудування: стан та перспективи: Збірник тез доповідей 2-ї

Української науково-технічної конференції (КП СПБ “Арсенал”, Київ, 2016), с. 63-65.

[103] А.М. Дальский, А.Г. Косилова и Р.К. Мещеряков, редактора, *Справочник технолога-машиностроителя в 2-х частях* (Машиностроение, Москва, 2001), 423 с.

[104] А.П. Довгань, Б.М. Копко, В.Г. Гайдучок, І.М. Сенько та Ю.Д. Сугак, в: Спеціальне приладобудування: стан та перспективи: Збірник тез доповідей 2-ї Української науково-технічної конференції (КП СПБ “Арсенал”, Київ, 2016), с. 39-41.

[105] Г.В. Дорожинський, В.П. Маслов та Ю.В. Ушенін, *Сенсорні прилади на основі поверхневого плазмового резонансу* (НТУУ “КПІ”, Київ, 2016), 264 с.

[106] ДСТУ 3004-95. Надійність техніки. Методи оцінки показників надійності за експериментальними даними.

[107] ДСТУ ІЕС 60793-1-2001 (ІЕС 60793-1-1:1999, ІДТ) Волокна оптичні. Частина 1-1. Загальні технічні умови. Основі положення.

[108] Г.Н. Дубровская и Г.В. Канашевич, в: Тезисы докладов XIII Российского симпозиума по растровой электронной микроскопии и аналитическим методам исследования твердых тел (Черноголовка, 2003), с.129.

[109] Г.М. Дубровська, Г.В. Канашевич та М.О. Бондаренко, Патент України № 67516А (15 червня, 2004).

[110] Г.М. Дубровська, Г.В. Канашевич та Н.І. Божко, *Прилади застосування фізичних методів дослідження структури поверхні* (Шобуж Біпоні, Удоун Офсет Принтерс, Сільхет, 2007), 248 с.

[111] Г.В. Дудко и В.Н. Лисоченко, в: Материалы краткосрочного семинара (Ленинград, 1985), с. 13-16.

[112] Г.В. Дудко, А.А. Кравченко и Д.И. Чередниченко, “О получении особо гладких поверхностей диэлектрических подложек микросхем”, *Электронная техника*. **5**, 241 (1986).

- [113] Г.В. Дудко, А.А. Кравченко и Д.И. Чередниченко, “Формирование предельно гладких поверхностей оптических стекол”, *Физика и химия стекла*. **13** (5), 740-746 (1987).
- [114] Г.В. Дудко, А.А. Кравченко, Д.И. Чередниченко, Ю.А. Розе, Н.Г. Максимова и С.К. Кулов, “Электронно-лучевая обработка фотокатодных стекол”, *Электронная техника*. **1** (294), 60-63 (1989).
- [115] Г.В. Дудко, С.К. Кулов, Ю.А. Розе и Н.Г. Максимова, “Исследование электронно-лучевых процессов в создании базовых технологий ЭЛЭФП”, *Электронная промышленность*. **1**, 41-45 (1991).
- [116] Г.В. Дудко, А.А. Кравченко, Л.Г. Магаев и Ю.А. Розе, МПК С03В37/00 (30 листопада, 1994).
- [117] В.П. Дьяконов, *Справочник по алгоритмам и программам на языке Бейсик для персональных ЭВМ. Справочник* (Наука, Москва, 1987), 240 с.
- [118] В.В. Еремеев и Ю.А. Гуляян, А. с. СССР № 1108080 (15 серпня, 1984).
- [119] В.А. Жабрев, В.Г. Конаков, М.М. Шульц, редактора, *Стекло и керамика – XXI. Перспективы развития* (Янус, Санкт-Петербург, 2001), 303 с.
- [120] Н.І. Заболотна та С.В. Павлов, Метрологічні характеристики розподілів похибок вимірювання в системі мюллер-матричного картографування шарів біологічних тканин, *Фотобіологія та фотомедицина*. **1**, 88-95 (2015).
- [121] Н.П. Заказнов, редактор, *Оптические приборы в машиностроении. Справочник* (Машиностроение, Москва, 1974), 238 с.
- [122] В.С. Зарубин, *Инженерные методы решения задач теплопроводности* (Энергоатомиздат, Москва, 1983), 328 с.
- [123] В.А. Зверев, Е.В. Кривоустова и Т.В. Точилина, *Оптические материалы. Учебное пособие для конструкторов оптических систем и приборов* (Издательство СП НИУИТМО, Санкт-Петербург, 2009), 243 с.
- [124] И.В. Зуев и А.А. Углов, “Об измерении диаметра электронного луча методом вращающегося зонда”, *Физика и химия обработки материалов*. **5**, 110-112 (1967).

- [125] А.Б. Иванов, *Волоконная оптика: компоненты, системы передачи, измерения* (Москва, 1990), 664 с.
- [126] Т.П. Иванова и Г.В. Пухова, *Вычислительная математика и программирование* (Просвещение, Москва, 1978), 319 с.
- [127] Г.Ф. Ивановский и В.И. Петров, *Ионно-плазменная обработка материалов* (Машиностроение, Москва, 1986), 185 с.
- [128] В.Д. Казаков, *Повышение прочности стеклянной тары* (ЦНИИТЭИ, Москва, 1973), с. 10-11.
- [129] В.А. Казаринов, редактор, *Радиотехнические системы* (Высшая школа, Москва, 1990), 496 с.
- [130] Н.Н. Калиткин, *Численные методы* (Физматгиз, Москва, 1978), 512 с.
- [131] Г.В. Канашевич, В.А. Ващенко та М.О. Бондаренко, “Перспективи використання електронного променю в технології інтегральної оптики”, Вісник Черкаського інженерно-технологічного інституту. **2**, 189-193 (2000).
- [132] Г.В. Канашевич, Ю.І. Коваленко, М.О. Бондаренко, В.А. Ващенко, В.П. Бойко, М.П. Рудь та І.В. Яценко, Патент України № 4177 (17 Січень, 2005).
- [133] Г.В. Канашевич, М.О. Бондаренко, М.П. Рудь, В.П. Бойко, Ю.І. Коваленко, І.В. Яценко та В.А. Ващенко, “Впровадження комп’ютеризованої системи керування у процес електронної обробки оптичних матеріалів”, в: Эффективность реализации научного, ресурсного и промышленного потенциала в современных условиях: Материали VII щорічної міжнародної промислової конференції (п. Славское, Карпати, 2007), с. 460.
- [134] Г.В. Канашевич, М.О. Бондаренко, Ю.Ю. Бондаренко, І.В. Яценко та В.А. Ващенко, “Вивчення впливу високих температур на мікрогеометрію поверхні оптичного скла та п’єзоелектричних керамік”, в: Природничі науки та їх застосування в діяльності служби цивільного захисту: Материали II міжнародної науково-практичної конференції (АПБ ім. Героїв Чорнобиля МНС України, Черкаси, 2008), с. 132-134.

- [135] Э.М. Карташов, *Аналитические методы в теплопроводности твердых тел* (Высшая школа, Москва, 1985), 324 с.
- [136] Ю.Л. Катков, *Диалог на языке Бейсик для мини- и микро-ЭВМ* (Наука, Москва, 1988), 352 с.
- [137] А.Д. Коваленко, *Основы термоупругости* (Наукова думка, Київ, 1970), 307 с.
- [138] В.С. Коваленко, *Технология и оборудование для электрофизических и электрохимических методов обработки* (Вища школа, Київ, 1983), 176 с.
- [139] Н.Д. Коваленко, А.А. Шмукин, М.И. Гужва и др., *Нестационарные тепловые процессы в энергетических установках летательных аппаратов* (Наукова думка, Київ, 1988), 234 с.
- [140] В.С. Коваленко, “Высокоэффективные технологии – основа интенсификации современного машиностроения”, *Технология и организация производства*. **2**, 1-4 (1989).
- [141] В.С. Коваленко, в: *Эффективность реализации научного, ресурсного и промышленного потенциала в современных условиях: Материалы Четвертой ежегодной Промышленной конференции с международным участием* (УИЦ “Наука. Техника. Технология”, Славское, Киев, 2004), с. 123-128.
- [142] Ю.И. Коваленко, Г.В. Канашевич, В.П. Бойко, В.А. Ващенко, М.П. Рудь и И.В. Яценко, ”Применение АСМ в исследовании стойкости к морской воде металлизированных поверхностей оптических стекол, модифицированных электронным потоком”, в: *Методологические аспекты сканирующей зондовой микроскопии: Сборник докладов IX Международной конференции* (Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАНБ, г. Минск, Беларусь, 2010), с. 50-56.
- [143] Ю.І. Коваленко, М.О. Бондаренко, І.В. Яценко, М.П. Рудь та Г.В. Канашевич, “Модифікація нанорельєфу на оптичному склі електронно-променевою мікрообробкою”, *Вісник Черкаського державного технологічного університету*. **4**, 159-165 (2010).

- [144] Ю.И. Коваленко, М.П. Рудь, И.В. Яценко, А.В. Котляр, В.П. Бойко и В.А. Ващенко, “Изучение упорядоченных структур, сформированных на металлизированных поверхностях диэлектриков комбинированной электронной технологией”, в: РКЄМ-2012: Материалы XXIV Российской конференции по электронной микроскопии (г. Черноголовка, 2012), с. 97.
- [145] Ю.И. Коваленко, И.А. Рева, В.А. Андриенко, И.В. Яценко, Ю.Ю. Бондаренко, М.А. Бондаренко и Е.В. Скорина, ”Особенности строения оксидных покрытий на оптических диэлектриках после их электронно-лучевой обработки”, в: Тезисы докладов XVIII Российского симпозиума по растровой электронной микроскопии и аналитическим методам исследования твердых тел (РАН, 2013), с. 298-299.
- [146] А. Козанне, Ж. Флере, Г. Мэтр и М. Руссо, *Оптика и связь: оптическая передача и обработка информации. Пер. с фр.* (Мир, Москва, 1984), 504 с.
- [147] В.Г. Колобродов, Н. Шустер, *Тепловізійні системи (Фізичні основи, методи проектування і контролю, застосування). Підручник* (Київ, 1999), 340 с.
- [148] В.Г. Колобродов и Н.И. Лихолит, “К вопросу об определении максимальной дальности обнаружения и распознавания цели тепловизионной системой БТТ”, Артиллерийское и стрелковое вооружение. Международный научно-технический сборник. **6**, 10-14 (2002).
- [149] В.Г. Колобродов, Н.И. Лихолит и В.С. Овечкин, “К выбору критерия распознавания тепловизионных изображений”, Артиллерийское и стрелковое вооружение. Международный научно-технический сборник. **2**, 30-34 (2004).
- [150] В.Г. Колобродов и В.И. Гордиенко, “Оценка эффективности танкового прицельного комплекса”, Артиллерийское и стрелковое вооружение. Международный научно-технический сборник. **1**, 32 (2010).
- [151] В.Г. Колобродов, В.І. Гордієнко, В.І. Микитенко та С.І. Черняк, “Проектування об’єктива тепловізійної системи за критерієм максимальної дальності спостереження”, Наукові вісті НТУУ “КПІ”. **6**, 66-72 (2015).

- [152] В.Г. Колобродов, В.М. Тягур та Б.Ю. Пінчук, в: Спеціальне приладобудування: стан та перспективи: Збірник тез доповідей 2-ї Української науково-технічної конференції (КП СПБ “Арсенал”, Київ, 2016), с. 69-72.
- [153] Л.И. Конопальцева, В.А. Ващенко, М.И. Жученко и др., “Исследование и разработка синтезированных голограмм элементов ввода-вывода излучения, математического аппарата расчета, основ технологии изготовления для оптических интегральных схем”, Отчет по НИР ПО “Завод Арсенал”. 1-63 (1990).
- [154] Л.И. Конопальцева, В.А. Ващенко, Г.В. Канашевич и др., в: Эффективность реализации научного, ресурсного и промышленного потенциала в современных условиях: Материалы Второй международной промышленной научно-технической конференции (Славское, 2002), с. 100.
- [155] Д.И. Котельников и Ю.М. Федорук, в: ВОЛССПИ-94: Доклады V Международной научно-технической конференции-выставки (НПО “Хартрон”, Запорожье, 1994).
- [156] Д.И. Котельников, Д.Н. Петрига, “Системные проблемы ЭОМ микрооптики”, *Электронная обработка материалов*. 3, 3-8 (2002).
- [157] И.М. Котелянский, “Химико-механическое полирование пластины ниобата лития”, *Электронная техника*. 6 (12), 17-18 (1981).
- [158] А.А. Кравченко, в: Применение электронно-ионной технологии в народном хозяйстве: Тезисы докладов IV Всесоюзной конференции (Москва, 1991), с. 179-181.
- [159] Л.З. Криксунов и Г.А. Падалко, *Тепловизоры. Справочник* (Техніка, Київ, 1987), 166 с.
- [160] З.И. Крупенкова, Л.В. Лукьянчик и Т.П. Шушканова, “Полировальные композиции на основе аминоксодержащей смолы, применяемые при массовом производстве оптических деталей”, *ОМП*. 2, 31-32 (1981).
- [161] Л.П. Лазарев, *Инфракрасные приборы самонаведения летательных аппаратов* (Машиностроение, Москва, 1970), 231 с.

- [162] А.И. Лазарев, П.А. Захаров, А.И. Герасимов и др., *Обтекатели и защитные окна* (ЦНИИ информации, Москва, 1982), 312 с.
- [163] Лазерная хирургия, в: Лазерная хирургия: Материалы научно-практической конференции (Вертикаль, Черкассы, 2012), 268 с.
- [164] Лазерная хирургия, в: Внедрение современных инновационных технологий при малоинвазивных лазерных вмешательствах: клинические, экономические и технические аспекты: Материалы научно-практической конференции (Вертикаль, Черкассы, 2014), 312 с.
- [165] К.А. Ланда и Г.Т. Петровский, *Аморфные планарные волноводы* (Издательство Красноярского университета, Красноярск, 1978), 196 с.
- [166] Н.В. Левитин, *Инфракрасная техника* (Энергия, Ленинград, 1973), 240 с.
- [167] В. Литвиненко, “Танковые прицелы”, *Зарубежное военное обозрение*. **4**, 27-34 (1991).
- [168] М.І. Лихоліт, в: Спеціальне приладобудування: стан та перспективи: Збірник тез доповідей 2-ї Української науково-технічної конференції (КП СПБ “Арсенал”, Київ, 2016), с. 11-15.
- [169] Л.Г. Лойцянский, *Механика жидкости и газа* (Наука, Москва, 1987), 840 с.
- [170] М.М. Луцюк, В.Г. Колобродов та В.М. Тягур, в: Спеціальне приладобудування: стан та перспективи: Збірник тез доповідей 2-ї Української науково-технічної конференції (КП СПБ “Арсенал”, Київ, 2016), с. 65-66.
- [171] С.М. Маевский, В.Г. Баженов, Е.К. Батуревич и Ю.В. Куц, *Применение методов фазометрии для прецизионного измерения расстояний* (Вища школа, Київ, 1983), 84 с.
- [172] О.В. Мазурин, М.В. Стрельцина и Т. Швайко-Швайковская, *Свойства стекол и стеклообразующих расплавов. Справочник* (Ленинград, 1973), 444 с.
- [173] И.А. Майстренко, А. с. СССР № 292910 (15 січня, 1971).
- [174] О.В. Макаренко, В.А. Одарич, Л.В. Поперенко та А.В. Якунов, *Прикладна оптика* (2013), 256 с.

- [175] А.Н. Малов и В.Н. Законников, *Обработка деталей оптических приборов* (Машиностроение, Москва, 2006), 304 с.
- [176] М.Д. Мальцев и Г.А. Каракулина, *Прикладная оптика и оптические измерения* (Машиностроение, Москва, 1968), 471 с.
- [177] В.М. Марченко, *Температурные поля и напряжения в конструкции летательных аппаратов* (Машиностроение, Москва, 1965).
- [178] Г.И. Марчук, *Методы вычислительной математики* (Наука, Москва, 1977), 456 с.
- [179] В.П. Маслов та М.М. Чумачкова, “Фізична модель формування порушеного механічною обробкою поверхневого шару матеріалів оптико-електронних і сенсорних приладів”, *Український фізичний журнал*. **10**, 980-984 (2008).
- [180] В.П. Маслов, *Фізико-технологічні проблеми з'єднання прецизійних деталей оптико-електронних приладів* (НТУУ “КПІ”, Київ, 2012), 160 с.
- [181] В.П. Маслов, “Закономірності поведінки точності оптичних призм зовнішнього відбиття”, *Вісник НТУУ “КПІ”*. **47**, 95-102 (2014).
- [182] В.П. Маслов та Н.В. Качур, “Стан та перспективи розвитку оптичних методів неруйнівного контролю внутрішніх напружень та дефектів у оптичних матеріалах”, *Вісник ЖДТУ*. **1** (68), 66-74 (2014).
- [183] В.П. Маслов, В.І. Дунаєвський, Т.А. Туру, С.С. Назарчук та Н.В. Качур, “Оптичний поляризаційний спосіб неруйнівного контролю нагрівача на основі прозорі електропровідної плівки ІТО”, *Eastern European scientific journal*. **4**, 63-67 (2015).
- [184] Г.А. Мачулка, *Лазерная обработка стекла* (Советское радио, Москва, 1979), 136 с.
- [185] Дж. Милленд, *Основы оптоэлектроники и волоконной оптики* (Машиностроение, Москва, 1989), 264 с.
- [186] В.Т. Миллер и А.Ф. Первеев, “Устройство для ионной очистки подложек и полировки слоев”, *Оптический журнал*. **2**, 72-75 (1993).

- [187] Л.И. Миркин, *Справочник по рентгеноструктурному анализу поликристаллов* (Физматгиз, Москва, 1961), 863 с.
- [188] Л.И. Миркин, *Физические основы обработки материалов лучом лазера* (МГУ, Москва, 1975), 186 с.
- [189] Л.И. Миркин, *Рентгеноструктурный контроль машиностроительных материалов. Справочник* (Машиностроение, Москва, 1979), 134 с.
- [190] А.В. Молодык, в: Спеціальне приладобудування: Збірник тез доповідей 2-ї Української науково-технічної конференції (КП СПБ “Арсенал”, Київ, 2016), с. 15-17.
- [191] А.В. Молодык, Н.И. Носов, Г.А. Смоляр и Д.В. Лозбин, в: Спеціальне приладобудування: стан та перспективи: Збірник тез доповідей 2-ї Української науково-технічної конференції (КП СПБ “Арсенал”, Київ, 2016), с. 54-56.
- [192] А.В. Молодык, И.И. Ильницкий, Д.В. Лозбин, Л.С. Козуб, А.А. Могила, Г.И. Хлопов, В.К. Василец и О.И. Сухареский, в: Спеціальне приладобудування: стан та перспективи: Збірник тез доповідей 2-ї Української науково-технічної конференції (КП СПБ “Арсенал”, Київ, 2016), с. 47-48.
- [193] А.В. Молодык, В.М. Тягур и С.Ф. Лысенко, в: Спеціальне приладобудування: стан та перспективи: Збірник тез доповідей 2-ї Української науково-технічної конференції (КП СПБ “Арсенал”, Київ, 2016), с. 53-54.
- [194] С.В. Москвин, *Эффективность лазерной терапии* (НПЛЦ “Техника”, Москва, 2003), 256 с.
- [195] В.Г. Назаров и А.М. Виноградов, “Влияние параметров ионного пучка на температуру поверхностного слоя расплавленного образца”, *Оптико-механическая промышленность*. **1**, 32-35 (1988).
- [196] Національний стандарт України. Оптика та оптичні прилади. Готування креслеників оптичних елементів та систем. Частина 3. Дефекти матеріалу. Пухирці та вкраплення (ISO 10110-3: 1996, IDT). ДСТУ ISO 10110-3: 2004 (Держстандарт України, Київ, 2005), с. 1-4.
- [197] Національний стандарт України. Оптика та оптичні прилади. Готування креслеників оптичних елементів та систем. Частина 5. Допуски на форму

поверхні (ISO 10110-5: 1996, IDT). ДСТУ ISO 10110-5: 2004 (Держстандарт України, Київ, 2005), с. 1-19.

[198] Національний стандарт України. Оптика та оптичні прилади. Готування креслеників оптичних елементів та систем. Частина 7. Допуски на дефекти поверхні (ISO 10110-7: 1996, IDT). ДСТУ ISO 10110-7: 2004 (Держстандарт України, Київ, 2005), с. 1-11.

[199] Національний стандарт України. Оптика та оптичні прилади. Вимоги до роботи в певних навколишніх умовах. Частина 8. Вимоги до випробувань в екстремальних умовах (ISO 10109-8: 1994, IDT). ДСТУ ISO 10109-8: 2004 (Держстандарт України, Київ, 2005), с. 1-6.

[200] В.А. Никитин, в: *Физическая энциклопедия*, А.М. Прохоров, редактор (Большая Российская энциклопедия, Москва, 1994). **4**, с. 626.

[201] В.А. Никитин, в: *Физическая энциклопедия*, А.М. Прохоров, редактор (Большая Российская энциклопедия, Москва, 1994). **4**, с. 611-615.

[202] М. Новицки, *Лазеры в электронной технологии и обработке материалов* (Машиностроение, Москва, 1981), 152 с.

[203] В.А. Одарич, Л.В. Поперенко, В.С. Стащук та А.В. Якунов, *Прикладна оптика. Оптична система: теорія, розрахунок, конструювання, технологія* (ВПЦ “Київський університет”, Київ, 2010), 232 с.

[204] М.А. Окатов, Э.А. Антонов, А.Б. Байгожин, *Справочник оптика-технолога* (Политехника, Санкт-Петербург, 2004), 679 с.

[205] Оптическая керамика КО2 (ОСТ-3-1952-86), КО4 (ТУ АВ-7-84), КО12 (ОСТ-3-4892-80). Физико-химические свойства. Основные параметры.

[206] А.П. Осипов, В.А. Десятников, В.С. Рабизов, В.М. Мордашев, В.В. Семенов и Р.Г. Кочетков, “Измерение энергии электронного луча с помощью калориметра”, *Сварочное производство*. **2**, 43-44 (1989).

[207] С.В. Павлов, Т.І. Козловська, В.П. Думенко та О.О. Сидорук, “Оптико-електронний мультиспектральний пристрій для визначення стану периферійного кровообігу”, *Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології*. **2**, 50-54 (2016).

- [208] В.А. Панов, М.Я. Кругер, В.В. Кулагин и др., *Справочник конструктора оптико-механических приборов* (Машиностроение, Ленинград, 1980), 742 с.
- [209] А.Ф. Первеев, В.В. Ильин и А.В. Михайлов, “Ионная полировка стекла”, *Оптико-механическая промышленность*. **10**, 40-43 (1972).
- [210] Г.Т. Петровский и А.В. Доценко, “Стеклообразные и стеклокристаллические оптические материалы”, *Оптический журнал*. 11, 69-75 (1993).
- [211] А.Н. Пихтин, *Физические основы квантовой электроники и оптоэлектроники* (Высшая школа, Москва, 1983), 304 с.
- [212] И.Г. Пичугин и Ю.М. Тапров, *Технология полупроводниковых приборов* (Высшая школа, Москва, 1984), 288 с.
- [213] А.А. Поскачей и Е.П. Чубаров, *Оптико-электронные системы измерения температуры* (Энергоатомиздат, Москва, 1988), 248 с.
- [214] Л.В. Поперенко та В.Г. Кравець, *Новоматеріали: оптичні, магнітооптичні, магніторезистивні та електронні властивості* (ВПЦ КНУ, 2011), 219 с.
- [215] В.Ф. Попов и Ю.Н. Горин, *Процессы и установки электронно-ионной технологии* (Высшая школа, Москва, 1984), 255 с.
- [216] В.Д. Попов, редактор, *Современные аспекты квантовой терапии в клинической медицине* (Киев, 1996), 129 с.
- [217] В.Д. Попов, редактор, *Современные аспекты лазерной терапии* (Вертикаль, Черкассы, 2011), 608 с.
- [218] Преобразователи термоэлектрические ТПП-0679-01, ТПР-0679-01, паспорт 0.282.189 ПСКМ (1982).
- [219] Э.С. Путилин, редактор, *Оптическая технология. Учебное пособие* (ИТМО, Санкт-Петербург, 2006), 108 с.
- [220] І.А. Рева, М.О. Бондаренко, Ю.І. Коваленко, Г.В. Канашевич, І.В. Яценко та В.А. Ващенко, “Дослідження впливу морської води на мікрогеометрію металевих покриттів на оптичному склі К8”, *Вісник Приазовського державного технічного університету*. **20**, 222-225 (2010).

- [221] В.П. Редько и А.В. Хомченко, А. с. СССР № 1269069 (1986).
- [222] М.П. Рудь, В.П. Бойко, Г.В. Канашевич, Ю.І. Коваленко, М.О. Бондаренко, І.В. Яценко та В.А. Ващенко, "Визначення розподілу густини струму стрічкового електронного потоку при обробці оптичних матеріалів", в: Динаміка наукових досліджень – 2006: Матеріали V міжнародної науково-практичної конференції (Наука і освіта, Дніпропетровськ: 2006), с. 45-47.
- [223] М.П. Рудь, В.П. Бойко, М.О. Бондаренко, Ю.І. Коваленко, І.В. Яценко та В.А. Ващенко, "Дослідження просторово-енергетичних характеристик електронного потоку стрічкової форми", в: Эффективность реализации научного, ресурсного и промышленного потенциала в современных условиях: Матеріали X Ювілейної міжнародної промислової конференції (п. Славське, Карпати, 2010), с. 162-164.
- [224] М.П. Рудь, Г.В. Канашевич, В.П. Бойко, М.О. Бондаренко, Ю.І. Коваленко, І.В. Яценко та В.А. Ващенко, "Моделювання та алгоритм оптимального керування процесом електронно-променевої обробки оптичних матеріалів", Наук. пр.: наук.-метод. журн. "Комп'ютерні технології" ЧДУ ім. П. Могили. Миколаїв. **173** (161), 150 – 155 (2011).
- [225] Н.Н. Рыкалин, И.В. Зуев и А.А. Углов, *Основы электронно-лучевой обработки материалов* (Машиностроение, Москва, 1978), 239 с.
- [226] Н.Н. Рыкалин, А.А. Углов, И.В. Зуев и А.Н. Кокора, *Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов. Справочник* (Машиностроение, Москва, 1985), 496 с.
- [227] А.А. Самарский и А.В. Гулин, *Численные методы* (Наука, Москва, 1989), 432 с.
- [228] М.Н. Семибратов, редактор, *Технология оптических деталей* (Машиностроение, Москва, 1978), 415 с.
- [229] М.С. Содха и А.К. Гхатак, *Неоднородные оптические волноводы. Пер. с англ.* (Связь, Москва, 1980), 216 с.
- [230] Спектрофотометр инфракрасный ИКС-29. Техническое описание и инструкция по эксплуатации.

- [231] Спектрофотометр СФ-46. Техническое описание и инструкция по эксплуатации.
- [232] Дж. Спенс, *Экспериментальная электронная микроскопия высокого разрешения. Пер. с англ.* (Наука, Москва, 1986), 320 с.
- [233] А.А. Суслов и С.А. Чижик, “Сканирующие зондовые микроскопы (обзор)”, *Материалы, технологии, инструменты.* **3**, 79-89 (1997).
- [234] Т. Тамир, *Волноводная оптоэлектроника* (Мир, Москва, 1991), 575 с.
- [235] В.В. Тарасов и Ю.Г. Якушенков, *Инфракрасные системы “смотрящего” типа* (Логос, Москва, 2004), 444 с.
- [236] “Технические характеристики фоторезистора ФУО-613”, *Электронная промышленность.* **9**, 18-23 (1985).
- [237] В.В. Травин, М.А. Калинина, Л.Д. Птицына, Т.Е. Васильева, А.П. Булкин и Л.Г. Маляренко, “Технология изготовления сверхгладких поверхностей крупногабаритных оптических деталей”, *Оптический журнал.* **69** (1), 58-59 (2002).
- [238] В.Е. Тютюнник и Ю.А. Гулоян, “Технология ИК-отжига стеклоизделий”, *Стекло и керамика.* **8**, 33-37 (2000).
- [239] А.А. Углов и Д.И. Чередниченко, “Расчет профиля фазового перехода при поверхностном оплавлении подвижным источником тепла”, *Физика и химия обработки материалов.* **1**, 3-8 (1980).
- [240] А.А. Углов, *Математические модели процессов обработки материалов концентрированными потоками энергии* (Наукова думка, Київ, 1988), 168 с.
- [241] С.Э. Уманский, С.А. Романченко, В.И. Тальянт и др., “Технологические напряжения и деформации в сварных стеклоизделиях”, *Физика и химия стекла.* **1**, 109-115 (1988).
- [242] Э. Уэдд, редактор, *Волоконно-оптические датчики. Вводный курс для инженеров и научных работников* (Москва, 2008), 520 с.
- [243] М.А. Філінюк, “Оптонегатроніка – історичний шлях розвитку та перспективи”, *Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології.* **1**, 251-259 (2001).

- [244] О.Д. Хайт, “Расчет процесса химического полирования”, *Стекло и керамика*. **3**, 18-19 (1982).
- [245] Б.А. Чакгир и Г.М. Алексеева, *Фотометрические методы анализа. Методические указания* (Издательство СПХФА, Санкт-Петербург, 2002), 44 с.
- [246] С.І. Черняк, С.М. Кадочніков та В.Г. Липунова, Патент України № 99021 (Бюлетень №15, 2012).
- [247] С.І. Черняк та Є.В. Жук, “Універсальний алгоритм позиціонування при неповній інформації по реперних вузлах”, *Збірник наукових праць Національного університету оборони України*. **6** (120), 91-96 (2013).
- [248] С.І. Черняк, М.І. Архіпов та С.М. Туренко, Патент України № 93037 (Бюлетень №17, 2014).
- [249] Е.П. Чубаров, *Управление системами с подвижными источниками воздействия* (Машиностроение, Москва, 1985), 288 с.
- [250] Е.П. Чубаров, в: *Управление распределенными системами с подвижным воздействием* (Наука, Москва, 1979), с. 9-16.
- [251] В.Л. Шевченко, “Современная концепция построения лазерных терапевтических аппаратов”, *Фотобіологія та фотомедицина*. **2** (1), 90-96 (1999).
- [252] З. Шиллер, У. Гайзинг и З. Панцер, *Электронно-лучевая технология* (Мир, Москва, 1980), 426 с.
- [253] М.М. Шульц и О.В. Мазурин, *Современные представления о строении стекол и их свойствах* (Наука, Ленинград, 1988), 198 с.
- [254] Т. Шуп, *Решение инженерных задач на ЭВМ* (Мир, Москва, 1982), 238 с.
- [255] *Экспериментальные и клинические аспекты фотодинамической терапии* (Вертикаль, Черкассы, 2013), 128 с.
- [256] Л. Энгель и Г. Клингеле, *Растровая электронная микроскопия* (Металлургия, Москва, 1986), 374 с.
- [257] И.В. Яценко, Д.М. Краснов, В.А. Ващенко и О.В. Кириченко, “Математическое моделирование термоупругих напряжений при нагреве оптических полусферических изделий инфракрасных приборов”, *Вісник Черкаського державного технологічного університету*. **1**, 80-86 (2004).

- [258] І.В. Яценко, І.А. Рева та В.А. Ващенко, в: Динаміка наукових досліджень – 2006: Матеріали V міжнародної науково-практичної конференції (Дніпропетровськ, 2006), с. 13-15.
- [259] І.В. Яценко, В.А. Ващенко, В.В. Цыбулин та О.М. Чепурна, “Тепловий вплив стрічкового електронного потоку на вироби оптичних інтегральних схем”, Вісник Черкаського державного технологічного університету. **4**, 37-44 (2009).
- [260] І.В. Яценко, “Дослідження впливу керованих параметрів СЕП на температуру в зоні впливу на підкладки оптичних інтегральних схем”, Вісник Черкаського державного технологічного університету. **2**, 111-115 (2009).
- [261] І.В. Яценко, “Дослідження впливу керованих параметрів СЕП на термопружні напруження в поверхневих шарах оптичних прямокутних елементів”, Вісник Черкаського державного технологічного університету. **3**, 88-94 (2009).
- [262] І.В. Яценко, “Дослідження залежностей енергетичних характеристик СЕП від його керованих параметрів при впливі на вироби мікрооптики і інтегральної оптики”, Сб. “Труды Одесского политехнического института”. **2** (32), 143-149 (2009).
- [263] І.В. Яценко, В.А. Ващенко, В.В. Цыбулин, І.А. Рева та О.М. Чепурна, “Підвищення ефективності електронної мікрообробки виробів з оптичних матеріалів”, Вісник Черкаського державного технологічного університету. **1**, 74-81 (2010).
- [264] И.В. Яценко, В.А. Ващенко, В.В. Цыбулин, И.А. Рева и О.Н. Чепурна, “Компьютерное моделирование температурных полей в многослойных оптических элементах при воздействии ленточного электронного потока”, в: Современные методы и средства неразрушающего контроля и технической диагностики: Материалы XVIII международной конференции (г. Ялта, 2010), с. 215-217.
- [265] І.В. Яценко, В.А. Ващенко, В.В. Цыбулін, І.А. Рева та О.М. Чепурна, “Вплив параметрів стрічкового електронного потоку на температурні поля в

елементах ВОЛЗ”, Вісник Черкаського державного технологічного університету. **3**, 107-113 (2010).

[266] І.В. Яценко, В.А. Ващенко, В.В. Цибулін, І.А. Рева та О.М. Чепурна, “Дослідження впливу параметрів СЕП на розподіли температур в елементах мікрооптики”, Вісник Черкаського державного технологічного університету. **1**, 104-107 (2012).

[267] И.В. Яценко, В.С. Антонюк, В.А. Ващенко и В.В. Цыбулин, “Тепловое воздействие сверхзвукового газового потока на поверхность оптических обтекателей ИК-приборов”, Ежем. науч.-техн. и произв. журн. “Наноинженерия” (Машиностроение. Москва). **10** (52), 38 – 42 (2015).

[268] И.В. Яценко, В.С. Антонюк, В.А. Ващенко и В.В. Цыбулин, “Определение критических значений параметров внешних термовоздействий на поверхность обтекателей ИК-приборов в условиях выстрела и полета”, Ежем. науч.-техн. и произв. журн. “Наноинженерия” (Машиностроение. Москва) . **12** (54), с. 20 – 25 (2015).

[269] И.В. Яценко, В.С. Антонюк, В.А. Ващенко и В.В. Цыбулин, “Упреждение возможных разрушений оптических обтекателей ИК-приборов в условиях выстрела и полета”, Ежем. науч.-техн. и произв. журн. “Наноинженерия” (Машиностроение. Москва). **12** (54), 26 – 31 (2015).

[270] І.В. Яценко, В.А. Ващенко, В.В. Цибулін и В.С. Антонюк, “Критичні значення параметрів зовнішніх термодій при поверхневому оплавленні оптичних елементів приладобудування”, в: Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем: Матеріали V Міжнародної науково-практичної конференції (м. Чернігів, 2015), с. 121-122.

[271] І.В. Яценко, В.С. Антонюк, О.В. Кириченко та В.А. Ващенко, “Визначення критичних значень параметрів зовнішніх термодій на оптичні елементи точного приладобудування”, Вісн. Нац. техн. ун-ту України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”. **51** (1), 71 – 75 (2016).

[272] І.В. Яценко, “Визначення критичних параметрів зовнішніх термодій на прямокутні оптичні елементи точного приладобудування”, Наука та вир-во: міжвузів. темат. зб. наук. пр. Приазов. держ. техн. ун-ту. Маріуполь. **17**, 5 – 13 (2017).

[273] І.В. Яценко, В.С. Антонюк, В.А. Ващенко та В.В. Цибулін, “Попередження можливих руйнувань оптичних елементів точного приладобудування в умовах зовнішніх термодій”, Журнал нано- та електронної фізики. **8** (1), 01027(бсс) (2016).

[274] І.В. Яценко, В.І. Гордієнко, О.В. Кириченко, В.А. Ващенко та В.В. Цибулін, “Визначення термоударних зовнішніх дій на ІЧ-прилади при їх експлуатації”, Вісник Черкаського державного технологічного університету. **3**, 95-102 (2016).

[275] І.В. Яценко, В.І. Гордієнко, О.В. Кириченко, В.А. Ващенко та В.В. Цибулін, “Визначення розподілів температури та термопружних напружень по товщині оптичних обтічників ІЧ-приладів в умовах інтенсивних зовнішніх термодій”, Вісник Черкаського державного технологічного університету. **4**, 20-27 (2016).

[276] І.В. Яценко, В.С. Антонюк, О.В. Кириченко та В.А. Ващенко, “Покращення техніко-експлуатаційних характеристик приладів з оптичними елементами шляхом збільшення їх коефіцієнта пропускання ІЧ-випромінювання”, в: Инженерия поверхности и реновации изделий: Материалы 16 Международной научно-технической конференции (АТМ України, Затока-Київ, 2016), с. 185-187.

[277] І.В. Яценко, В.С. Антонюк, В.І. Гордієнко, О.В. Кириченко та В.А. Ващенко, “Підвищення метрологічних характеристик та надійності приладів для вимірювання та теплового контролю об’єктів різної фізичної природи шляхом електронно-променевої обробки їх оптичних елементів”, в: Приладобудування та метрологія: сучасні проблеми, тенденції розвитку: Материали II всеукраїнської науково-практичної конференції (м. Луцьк 2016), с. 100-101.

- [278] І.В. Яценко, В.С. Антонюк, В.І. Гордієнко, О.В. Кириченко та В.А. Ващенко, “Підвищення метрологічних характеристик та надійності лазерних далекомірів шляхом фінішної електронно-променевої обробки їх оптичних вікон”, в: Спеціальне приладобудування: стан та перспективи: Збірник тез доповідей 2-ї Української науково-технічної конференції (КП СІБ “Арсенал”, Київ, 2016), с. 147-150.
- [279] І.В. Яценко, В.С. Антонюк, В.І. Гордієнко, О.В. Кириченко, В.А. Ващенко та В.В. Холін, “Підвищення надійності лазерних медичних приладів шляхом фінішної електронно-променевої обробки торцевих поверхонь їх світловодів”, Збірник наукових праць Луцького національного університету. **9**, 154-160 (2016).
- [280] І.В. Яценко, В.С. Антонюк, В.А. Ващенко та В.В. Цибулін, “Визначення критичних значень параметрів електронного променя при поверхневому оплавленні оптичних елементів точного приладобудування”, Журнал нано- та електронної фізики. **9** (1), 01010(5с) (2017).
- [281] P.F. Becher, “Surface Hardening of Sapphire and Rutil Associated with Machining”, I. Am. Ceram. Soc. **57** (2), 107-108 (1974).
- [282] H.E. Bennett, A.J. Glass, A.H. Guenther, B.E. Newnam and H.E. Bennett, in: Laser-induced Damage in Optical Materials: eleven ASTM symposium (Appl. Opt., 1980), pp. 2375 – 2397.
- [283] G.E. Bernal and B.G. Koepke, “Residual Stresses on Machined MgO Crystal”, I. Am. Ceram. Soc. **56**, 634 – 639, 1974.
- [284] G. Binnig, C.F. Quate and Ch. Gerber, “Atomic Force Microscopy”, Phys. Rev. Lett., **56** (9), 930-933 (1986).
- [285] N. Clonssen, in: I. Am. Ceram. Soc. Meeting (Cincinnati, OH, 1979), pp. 96-98.
- [286] Dieter Bäuerle, *Laser Processing and Chemistry*, 4th ed. (Springer Heidelberg Dordrecht, London, New York, 2011).

- [287] G. Dorozinsky, T. Doroshenko and V. Maslov, “Influence of Technological Factors on Sensitivity of Analytical Devices Based on Surface Plasmon Resonance”, *Journal of Sensor Technology*. **5**, 54-61 (2015).
- [288] M.G. Drexhage and P.K. Gupta, “Strong Teeming of Classes by Partial Leading”, *I. H. M. Ceram. Soc.* **63**, 72-77 (1980).
- [289] L. Geppert, “Quantum Transistors: Toward Nanoelectronics”, *IEEE Spectrum*. **9**, 46-51 (2000).
- [290] Harold A. Davis, Gennady E. Remnev, Regan W. Stinnett and Kiyoshi Yatsui, “Intense Ion-Beam Treatment of Materials”, *MRS Bulletin*. **21**(8), 58-62 (1996).
- [291] ISO 9211-1:1994. Optics and optical instruments. Optical coatings. Part 1. Definitions.
- [292] ISO 9211-2:1994. Optics and optical instruments. Optical coatings. Part 2. Optical properties.
- [293] ISO 9211-3:1994. Optics and optical instruments. Optical coatings. Part 3. Environmental durability.
- [294] ISO 9211-4:1996. Optics and optical instruments. Optical coatings. Part 4. Specific test methods.
- [295] B.G. Koepke and R.I. Strokes, “Grinding damage ceramics”, *Soc. Manufacturing Eng. Tech.* **10**, 77-358 (1978).
- [296] V.G. Kolobrodov and M.I. Lyholit, *Design of Television and Thermovision Observing Systems. Textbook* (NTUU “KPI”, Kyiv, 2007), 364 p.
- [297] L.I. Konopaltseva, “Some data about works in the field of integrated optics in the CIS”, *OE Bulletin*. **3**, 8-9 (1994).
- [298] V. Kovalenko, M. Anyakin and V. Anyakin, in: *Proceeding of International Conference LTWMP-2003* (Kiev, 2003), pp. 183-187.
- [299] Y.I. Kovalenko, M.A. Bondarenko, E.V. Verstanova, I.V. Yatsenko, V.A. Andrienko and Y.Y. Bondarenko, “Study of Ordered Oxide Patterns Got on the Dielectric Surfaces with the Combined Electronic Technology”, в: *Фізика і технологія тонких плівок та наносистем: Матеріали XIV Міжнародної конференції МКФТТПН – XIV* (м. Івано-Франківськ, 2013), с. 92.

- [300] A. S. Krasnikov, A. I. Berezhnoi, L. I. Mirkin, et al., “Structure and Properties of Ceramic Materials after Laser Radiation”, *Glass and Ceramic*. **5-6**, 172-176 (1999).
- [301] A.A. Kravchenko and L.G. Magaev, “Electron Gun with a Ribbon Beam”, *IET*. **36** (2), 311-313 (1993).
- [302] W. Kurz and R. Trivedi, “Microstructure and Phase Selection in Laser Treatment of Materials”, *J. Eng. Mater. Technol* , **114**(4), 450-458 (1992).
- [303] Lent. Craig, in: *Proceeding of the IEEE* (April 1997), pp. 541-557.
- [304] R. Luthi, E. Meyer, L. Howald, H. Haefke, D. Anselmetti, M. Drieier, M. Ruetschi, T. Bonner, R. Overney, J. Frommer and H. Guntherodt, “Progress in Noncontact Dynamic Force Microscopy”, *J. Vac. Sci. Technol.* **3** (B12), 1673-1676 (1994).
- [305] V. Maslov, “Effect of the State of the Surface Layers on the Strength of Materials for Optoelectronic and Sensors Devices”, *International Scientific Journal Semiconductor Physics, quantum Electronics and Optoelectronics*. **11** (3), 286-291 (2008).
- [306] V. Maslov, “Promising Micro- Nanotechnologies and Materials for Joining Precision Parts of Optics-and-Electronics Devices”, *Universal Journal of Materials Science*. **2** (4), 77-81 (2014).
- [307] I. Matyash, I. Minailova, B. Serdega, V. Maslov and N. Kachur, “Residual Stresses in Transparent Glassceramics and Their Evolution During Step-by-Step Annealing”, *International Journal of Materials Science and Applications*. **4** (5), 288-292 (2015).
- [308] E. Meyer, “Atomic force microscopy”, *Progress in Surface Science*. **41** (1), 3-49 (1992).
- [309] M. A. Montealegre, G. Castro, P. Rey, J. L. Arias, P. Vázquez and M. González, “Surface Treatments by Laser Technology, *Contemporary Materials*”, **I-1**, 19-30 (2010).
- [310] S.V. Pavlov, S.V. Sander, T.I. Kozlovska, A.S. Kaminsky and W. Wojcik, in: *Optic Fibers and Their Applications 2012* (January 2013).

- [311] V.K. Salakhutdinov, "High-speed Channel Switching Using Dynamic Bacteriorhodopsin-based Hologram Matrix", *OE Bulletin*. **1**, 23-24 (1993).
- [312] P.A. Temple, W.N. Lowdermilk and D. Milan, "Carbon Dioxide Laser Polishing of Fused Silica Surfaces for Increased Laser-damage Resistance at 1064", *Appl. Opt.* **21** (18), 3249-3255 (1982).
- [313] R.J. Weiss, "Lens Graining has Undergone Imaginative Automation", *OE Reports*. **126**, 3-8 (1994).
- [314] C.W. White, *Laser and Electron Beam Processing of Materials*, 1st ed. (Academic Press, New York, 1980).
- [315] Y.M. Xiao and M. Bass, "Thermal Stress Limitation to Laser Fire Polishing of Glasses", *Appl. Opt.* **22** (18), 2933-2936 (1983).
- [316] I. Yatsenko, V. Antoniuk, M. Bondarenko and V. Vashchenko, "Influence of Parameters by Electronic Ray on Properties of Superficial Layers of Optical Elements of Exact Instrument-making", *Int. J. for Science and Innovations for the Industry "Innovations in Discrete Productions"*. **1**, 13 – 15 (2015), <<http://www.stumejournals.com/innovations/archive/2015/1-2015.pdf>>.
- [317] I. Yatsenko, V. Antoniuk, O. Kiritchenko and V. Vashchenko, "Improvement of Technical and Operational Characteristics of Devices with Optical Elements by Preliminary Electron Beam Treatment of their Surface", *Int. J. for Science, Technics and Innovations for the Industry "Machines. Technologies. Materials"*. **6**, 47 – 50 (2016), <<http://www.stumejournals.com/mtm/Archive/2016/6-2016.pdf>>.
- [318] I. V. Yatsenko, "Experimental and Statistical Models of Impact Determination of the Electron Beam Parameters on Surface Layers Properties of Optical Elements in Precision Instruments Building", "Pratsi. Odes'kyi Politechnichniy Universytet". **1**(48), 63 – 69 (2016).
- [319] I. V. Yatsenko, "Improvement of Surface Layers Properties of Precision Engineering Elements of Optical Ceramics by Preliminary Electron-beam Surfacing", "Pratsi. Odes'kyi Politechnichniy Universytet". **2** (49), 88 – 96 (2016).
- [320] I. Yatsenko, V. Antoniuk, O. Kiritchenko, V. Vashchenko and V. Tsybulin, "Increasing the Resistance of Precision Instrument-making Elements from Optical

Glass to External Thermo-influences by Preliminary Electron-beam Processing of Surfaces”. Int. J. for Science and Innovations for the Industry “Innovations in Discrete Productions”. **1**, 9 – 12 (2016), <<http://www.stumejournals.com/innovations/archive/2016/1-2016.pdf>>.

[321] I. Yatsenko, V. Antoniuk, O. Kiritchenko and V. Vashchenko, “Improving the reliability instruments of measuring and thermal control of objects of different physical nature by the finish of electron beam processing surfaces of optical elements”, Int. J. for Science and Innovations for the Industry “Machines. Technologies. Materials”. **1**, 20 – 23 (2017), <<http://www.stumejournals.com/mtm/Archive/2017/1-2017.pdf>>.

[322] I. V. Yatsenko, V. S. Antoniyk, V. I. Hordienko, O. V. Kyrychenko and V. V. Kholin, “Improvement of Metrological Specifications of Impulse Laser Rangefinders by Finishing Electron Ray Processing of their Optical Elements”, Вісн. Нац. техн. ун-ту України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”. **52** (2), 52 – 57 (2016).

[323] I. V. Yatsenko, “Influence Patterns of the Finishing Electron Beam Treatment of the Surface of Optical Parts on their Physical-mechanical Properties”, Journal of Multidisciplinary Engineering Science Studies (JMESS). Germany. **3** (5), 1764 – 1770 (2017), <<http://www.jmess.org/wp-content/uploads/2017/05/JMESSP13420346.pdf>>.

[324] I. V. Yatsenko, V. I. Hordienko and V. V. Kholin, “Improving the Reliability of Pulsed Laser Rangefinder and Infrared Devices of Homing and Surveillance by Final Electron Beam Processing of their Optical Components”, Pratsi Odes’kyi Politechnichniy Universytet. **1** (51), 72 – 81 (2017).

[325] I. Yatsenko, “Improvement of Performance Characteristics of Optical Elements by Using Electron Beam Treatment”, Worldwide Journal of Multidisciplinary Research and Development (WWJMRD). **3** (8), 18 – 26 (2017), <<http://wwjmr.com/vol%203/issue8/assets/14.1.pdf>>.

[326] I. Yatsenko, V. Antoniuk, O. Kiritchenko, V. Gordienko and V. Vashchenko, “Improvement of optical characteristics of components of optoelectronic devices in

the harsh conditions of their functioning by using electron beam technology”, Int. Sci. J. “Material Science. Nonequilibrium Phase Transformations”. **2**, 42 – 48 (2017), <<http://www.stumejournals.com/ms/archive/2017/2-2017.pdf>>.

ДОДАТОК А

Пакет прикладних програм “ППП1” по методам регресії та інтерполяції (математична обробка експериментальних даних, побудова експериментально-статистичних моделей для визначення впливу режимів електронно-променевої технології на експлуатаційні характеристики оптичних елементів оптико-електронних приладів)

11-01-2010

11:48:23

МЕТОДИ РЕГРЕСІЇ І ІНТЕРПОЛЯЦІЇ

=====

===

Задача регресії полягає у відновленні функціональної залежності $Y(X)$ по результатам вимірювань (X_i, Y_i) , $i=1,2,\dots,n$. Шукану залежність $Y(X)$ апроксимують функцією $Y(X)=Y(X, a_1, a_2, \dots, a_k)+E$,

де a_j – невідомі параметри регресії, E_i - похибка експерименту.

Інтерполяція функції $Y(X)$, заданої $N+1$ вузлами $Y_i(X_i)$, полягає в знаходженні значень Y за значеннями X , які знаходяться в проміжках між вузлами X_i .

Методи регресії:

Метод лінійної регресії	a_0+a_1*X
Метод параболічної регресії	$a_0+a_1*X+a_2*X^2$
Метод поліноміальної регресії	$a_0+a_1*X+a_2*X^2+\dots+a_M*X^M$
Метод гіперболічної регресії	a_0+a_1/X
Метод степінної регресії	$a_0*X^{a_1}$
Метод показникової регресії	$a*v^X$
Метод експоненціальної регресії	$a_0*EXP(a_1*X)$
Метод логарифмічної регресії	$a_0+a_1*lg(X)$
Метод квадратичної регресії	$a_0+SUMa_1(i)*X(i)+SUMa_2(i)*X(I)^2$

Універсальний метод регресії для 16 типів рівнянь

Методи інтерполяції:

Інтерполяція по Лагранжу

Інтерполяція поліномом Ньютона

°ПРОБЛ-наст. метод ВВЕДЕННЯ-вибір методу для розрахунку F10-вихід із пакету

11-01-2010

11:48:23

Метод лінійної регресії

У випадку лінійної регресії апроксимуюча функція має вигляд

$$Y(X)=a_0+a_1*X$$

коефіцієнти які обчислюються по формулам:

$$a_0 = \frac{\sum_{i=1}^n Y_i \sum_{i=1}^n X_i^2 - \sum_{i=1}^n X_i \sum_{i=1}^n X_i Y_i}{\sum_{i=1}^n X_i^2 - (\sum_{i=1}^n X_i)^2}$$

$$a_1 = \frac{\sum_{i=1}^n X_i Y_i - \sum_{i=1}^n X_i \sum_{i=1}^n Y_i}{\sum_{i=1}^n X_i^2 - (\sum_{i=1}^n X_i)^2}$$

$$E_1 = \sum_{i=1}^n (Y_i - 1/n \sum_{i=1}^n Y_i)^2$$
 - міра розкиду результатів експерименту

$$E_2 = \sum_{i=1}^n (Y_i - a_0 - a_1 X_i)^2$$
 - відхилення результатів експерименту від лінійної регресії

°ПРОБЛЛ-наст. метод ВВЕДЕННЯ-вибір методу для розрахунку F10-вихід із пакету

11-01-2010

11:48:23

Метод лінійної регресії

Апроксимуюча функція має вигляд:

$$Y(X)=a_0+a_1*X$$

Задайте початкові дані:

кількість вузлів інтерполяції $n = 5$
масиви $X(i)$ та $Y(i)$ попарно $i = 1, 5$

$X(1)=2$ $Y(1)= 5.500000$ $X(2)= 4$ $Y(2)= 6.300000$
 $X(3)=6$ $Y(3)= 7.200000$ $X(4)= 8$ $Y(4)= 8$
 $X(5)= 10$ $Y(5)= 8.600000$

для обчислення значення формули регресії $Y(X)$ значення $X = 4$

Результати регресії:

Функція

$$Y(X) = 4.749999 + 0.395000 * X$$

$$a_0 = 4.749999 \quad a_1 = 0.395000$$

Міра розкиду $E_1 = 2.503597$

Міра відхилення від регресії $E_2 = 0.164316$

°ПРОБЛЛ-наст. метод ВВЕДЕННЯ-вибір методу для розрахунку F10-вихід із пакету

11-01-2010

11:48:23

Метод параболічної регресії

=====

Параболічна регресія забезпечує отримання трьох параметрів a_0 , a_1 , a_2 наближення параболічною функцією

$$Y(X)=a_0+a_1*X+a_2*X^2$$

з розв'язку системи трьох рівнянь:

$$a_0*n+a_1*\sum_{i=1}^n X_i + a_2*\sum_{i=1}^n X_i^2 = \sum_{i=1}^n Y_i$$

$$a_0*\sum_{i=1}^n X_i+a_1*\sum_{i=1}^n X_i^2 + a_2*\sum_{i=1}^n X_i^3 = \sum_{i=1}^n X_i*Y_i$$

$$a_0*\sum_{i=1}^n X_i^2+a_1*\sum_{i=1}^n X_i^3 + a_2*\sum_{i=1}^n X_i^4 = \sum_{i=1}^n X_i^2*Y_i$$

°ПРОБЛ-наст. метод ВВЕДЕННЯ-вибір методу для розрахунку F10-вихід із пакету

11-01-2010

11:48:23

Метод параболічної регресії

=====

Апроксимуюча функція має вигляд:

$$Y(X)=a_0+a_1 *X+a_2*X^2$$

Здайте початкові дані:

кількість вузлів інтерполяції $n = 7$

масиви $X(i)$ та $Y(i)$ попарно $i = 1, 7$

$X(1)=2$	$Y(1)= 3.760000$	$X(2)=4$	$Y(2)= 4.440000$
$X(3)=6$	$Y(3)= 5.040000$	$X(4)= 8$	$Y(4)= 5.560000$
$X(5)= 10$	$Y(5)= 6$	$X(6)= 12$	$Y(6)= 6.360000$
$X(7)= 14$	$Y(7)= 6.640000$		

Результати регресії:

Функція $Y(X)= 2.999995 + 0.400002*X -0.010000*X^2$

$a_0 = 2.999995$ $a_1 = 0.400002$ $a_2 = -0.010000$

Значення формули регресії $Y(4)= 4.440000$

°ПРОБЛ-наст. метод ВВЕДЕННЯ-вибір методу для розрахунку F10-вихід із пакету

11-01-2010

11:48:23

Метод поліноміальної регресії

Поліноміальна регресія забезпечує знаходження параметрів функції

$$Y(X)=a_0+a_1*X+a_2*X^2+\dots+a_M*X^M$$

із розв'язку системи рівнянь:

$$C_0*a_0 + C_1*a_1 + C_2*a_2 + \dots + C_k*a_k = D_0$$

$$C_1*a_0 + C_2*a_1 + C_3*a_2 + \dots + C_{k+1}*a_k = D_1$$

.....

$$C_k*a_0 + C_{k+1}*a_1 + C_{k+2}*a_2 + \dots + C_{2k}*a_k = D_k$$

де
$$C_j = \sum_{i=1}^n X_i^j \quad j=0,1,2,\dots,2*k$$

$$D_j = \sum_{i=1}^n X_i^j * Y_i \quad k=0,1,2,\dots,k$$

Поліном степені $k < n$, де n -число пар X_i і Y_i , забезпечує апроксимацію таблично заданої функції $Y_i(X_i)$ з мінімальною середньоквадратичною похибкою

$$E = \left(\sum_{i=1}^n e^2 / (n+1) \right)^{1/2}$$

Метод дозволяє автоматичний вибір степені полінома.

°ПРОБЛ-наст. метод ВВЕДЕННЯ-вибір методу для розрахунку F10-вихід із пакету

11-01-2010

11:48:23

Метод поліноміальної регресії

Апроксимуюча функція має вигляд:

$$Y(X)=a_0+a_1*X+a_2*X^2+\dots+a_M*X^M$$

Здайте початкові дані:

кількість вузлів інтерполяції $n = 7$

Автоматичний вибір ступеня полінома ? (Y/N) Y

середньоквадратична погрішність $E1 = \%9.999999974752427E-007$

масиви $X(i)$ и $Y(i)$ попарно $i = 1, 7$

$X(1)=2$	$Y(1)= 3.760000$	$X(2)=4$	$Y(2)= 4.440000$
$X(3)=6$	$Y(3)= 5.040000$	$X(4)= 8$	$Y(4)= 5.560000$

Результати регресії:

Степінь полінома $M = 2$

Похибка інтерполяції $E = 5.6E-07$

Коефіцієнти полінома:

$a_0 = 2.999999$ $a_1 = 0.400001$ $a_2 = -0.010000$

Значення формули регресії $Y(4) = 4.440001$

°ПРОБЛ-наст. метод ВВЕДЕННЯ-вибір методу для розрахунку F10-вихід із пакету

11-01-2010

11:48:23

Метод гіперболічної регресії

Гіперболічна регресія забезпечує знаходження параметрів функції

$$Y(X)=a_0+a_1/X$$

з розв'язку системи рівнянь:

$$a_0 \cdot n + a_1 \cdot \sum_{i=1}^n 1/X_i = \sum_{i=1}^n Y_i$$

$$a_0 \cdot \sum_{i=1}^n 1/X_i + a_1 \cdot \sum_{i=1}^n 1/X_i^2 = \sum_{i=1}^n Y_i/X_i$$

°ПРОБЛІ-наст. метод ВВЕДЕННЯ-вибір методу для розрахунку F10-вихід із пакету

11-01-2010

11:48:23

Метод гіперболічної регресії

Апроксимуюча функція має вигляд:

$$Y(X)=a_0+a_1/X$$

Здайте початкові дані:

кількість вузлів інтерполяції $n = 8$

масиви $X(i)$ и $Y(i)$ попарно $i = 1, 8$

$X(1)=1$	$Y(1)= 12.20000$	$X(2)=2$	$Y(2)= 6.800000$
$X(3)= 3$	$Y(3)= 5.200000$	$X(4)= 4$	$Y(4)= 4.600000$
$X(5)=5$	$Y(5)= 3.900000$	$X(6)= 6$	$Y(6)= 3.700000$
$X(7)=7$	$Y(7)= 3.500000$	$X(8)= 8$	$Y(8)= 3.200000$

Результати регресії:

Функція $Y(X)= 1.935762 + 10.16018/X$

$a_0= 1.935762$ $a_1= 10.16018$

Значення формули регресії $Y(4)= 4.475806$

°ПРОБЛІ-наст. метод ВВЕДЕННЯ-вибір методу для розрахунку F10-вихід із пакету

11-01-2010

11:48:23

Метод степеневі регресії

Степінна регресія забезпечує знаходження параметрів функції

$$Y(X)=a_0 \cdot X^{a_1}$$

по формулам:

$$a_1 = \frac{\sum_{i=1}^n \ln(X_i) \cdot \sum_{i=1}^n \ln(Y_i) - n \cdot \sum_{i=1}^n \ln(X_i) \cdot \ln(Y_i)}{(\sum_{i=1}^n \ln(X_i))^2 - n \cdot \sum_{i=1}^n (\ln(X_i))^2}$$

$$a_0 = \text{EXP} \left[\frac{\sum_{i=1}^n \ln(Y_i) - a_1 \cdot \sum_{i=1}^n \ln(X_i)}{n} \right]$$

°ПРОБІЛ-наст. метод ВВЕДЕННЯ-вибір методу для розрахунку F10-вихід із пакету

11-01-2010

11:48:23

Метод степеневі регресії

Апроксимуюча функція має вигляд:

$$Y(X)=a_0 \cdot X^{a_1}$$

Задайте початкові дані:

кількість вузлів інтерполяції $n = 6$

масиви X(i) и Y(i) попарно	i = 1, 6		
X(1)=1	Y(1)=3	X(2)=2	Y(2)=12
X(3)=3	Y(3)=27	X(4)=4	Y(4)= 48
X(5)=5	Y(5)=75	X(6)=6	Y(6)= 108

для обчислення значення формули регресії Y(X) значення X = 2

Результати регресії:

Функція $Y(X)= 2.999998 \cdot X^{(2.000000)}$

$a_0 = 2.999998$

$a_1 = 2.000000$

Значення формули регресії Y(2)= 12.00000

°ПРОБІЛ-наст. метод ВВЕДЕННЯ-вибір методу для розрахунку F10-вихід із пакету

11-01-2010

11:48:23

Метод показникової регресії

Показникова регресія забезпечує отримання параметрів функції

$$Y(X)=A*B^X$$

з розв'язку системи рівнянь:

$$n*\lg A + \lg B * \sum_{i=1}^n X_i = \sum_{i=1}^n \lg Y_i$$

$$\lg A * \sum_{i=1}^n X_i + \lg B * \sum_{i=1}^n X_i^2 = \sum_{i=1}^n (X_i * \lg Y_i)$$

°ПРОБЛ-наст. метод ВВЕДЕННЯ-вибір методу для розрахунку F10-вихід із пакету

11-01-2010

11:48:23

Метод показникової регресії

Апроксимуюча функція має вигляд:

$$Y(X)=a*B^X$$

Задайте початкові дані:

кількість вузлів інтерполяції $n = 5$

масиви X(i) и Y(i) попарно		$i = 1, 5$	
X(1)=1	Y(1)=6	X(2)=2	Y(2)=7
X(3)=3	Y(3)= 8.700000	X(4)= 4	Y(4)= 10.40000
X(5)= 5	Y(5)= 12.40000		

для обчислення значення формули регресії Y(X) значення X = 2

Результати регресії:

Функція $Y(X) = 4.941991 * (1.202950)^X = 4.941991$ B = 1.202950

Значення формули регресії $Y(2) = 7.151499$

°ПРОБЛ-наст. метод ВВЕДЕННЯ-вибір методу для розрахунку F10-вихід із пакету

11-01-2010

11:48:23

Метод експоненціальної регресії

=====
===

Експоненційна регресія забезпечує знаходження параметрів функції

$$Y(X)=a_0*EXP(a_1*X)$$

по формулам:

$$a_1 = \frac{\sum_{i=1}^n X_i * \sum_{i=1}^n \ln(Y_i) - n * \sum_{i=1}^n X_i * \ln(Y_i)}{(\sum_{i=1}^n X_i)^2 - n * \sum_{i=1}^n X_i^2}$$

$$a_0 = EXP\left[\frac{\sum_{i=1}^n \ln(Y_i) - a_1 * \sum_{i=1}^n X_i}{n} \right]$$

°ПРОБІЛ-наст. метод ВВЕДЕННЯ-вибір методу для розрахунку F10-вихід із пакету

11-01-2010

11:48:23

Метод експоненціальної регресії

=====
=====

Апроксимуюча функція має вигляд:

$$Y(X)=a_0*EXP(a_1*X)$$

Здайте початкові дані:

кількість вузлів інтерполяції n = 9

масиви X(i) и Y(i) попарно		i = 1, 9	
X(1)=2	Y(1)= 3.500000	X(2)=3	Y(2)= 5
X(3)=4	Y(3)= 6.200000	X(4)= 5	Y(4)= 9
X(5)=6	Y(5)=13	X(6)=7	Y(6)=16
X(7)=8	Y(7)=23	X(8)=9	Y(8)=30

Результати регресії:

Функція Y(X)= 1.939480*EXP(0.305283*X)

a0= 1.939480

a1 = 0.305283

Значення формули регресії Y(3)= 4.846565

°ПРОБІЛ-наст. метод ВВЕДЕННЯ-вибір методу для розрахунку F10-вихід із пакету

11-01-2010

11:48:23

Метод логарифмічної регресії

Логарифмічна регресія забезпечує знаходження параметрів функції

$$Y(X)=a_0+a_1*\lg(X)$$

з розв'язку системи рівнянь:

$$a_0*n+a_1*\sum_{i=1}^n \lg(X_i) = \sum_{i=1}^n Y_i$$

$$a_0*\sum_{i=1}^n \lg(X_i) + a_1*\sum_{i=1}^n (\lg(X_i))^2 = \sum_{i=1}^n (Y_i*\lg(X_i))$$

°ПРОБЛ-наст. метод ВВЕДЕННЯ-вибір методу для розрахунку F10-вихід із пакету

11-01-2010

11:48:23

Метод логарифмічної регресії

Апроксимуюча функція має вигляд:

$$Y(X)=a_0+a_1*\lg(X)$$

Задайте початкові дані:

кількість вузлів інтерполяції $n = 6$

масиви X(i) и Y(i) попарно	$i = 1, 6$		
X(1)=1	Y(1)=1	X(2)=2	Y(2)= 1.451000
X(3)=3	Y(3)= 1.716000	X(4)=4	Y(4)= 1.903000
X(5)=5	Y(5)= 2.048000	X(6)= 6	Y(6)= 2.167000

для обчислення значення формули регресії Y(X) значення X = 2

Результати регресії:

Функція $Y(X)= 0.999932 + 1.499794*\lg(X)$

$a_0 = 0.999932$

$a_1 = 1.499794$

Значення формули регресії $Y(2) = 1.451415$

°ПРОБЛ-наст. метод ВВЕДЕННЯ-вибір методу для розрахунку F10-вихід із пакету

11-01-2010

11:48:23

Метод квадратичної регресії

- 1 -

Задача апроксимації полягає у відновленні функціональної залежності $Y(X)$ по результатам вимірювань (X_i, Y_i) , $i=1, 2, \dots, N$. Шукану залежність $Y(X)$ апроксимують функцією $f(X, a_1, a_2, \dots, a_k)$, відповідно, результати вимірювань можна представити у вигляді

$$Y_i = f(X_i, a_1, a_2, \dots, a_k) + E_i,$$

де a_i – невідомі параметри апроксимації,

E_i - похибка експерименту.

У випадку квадратичної апроксимації апроксимуюча функція має вигляд:

$$Y(X) = A_0 + \sum_{i=1}^N A_1(i) * X(i) + \sum_{i=1}^N A_2(i) * X(i)^2 \quad (1)$$

де A_0 - вільний член многочлена

$A_1(i)$ - коефіцієнти многочлена при невідомих першої степені

$A_2(i)$ - коефіцієнти многочлена при невідомих другої степені

N - число відомих

ПРОБЛ-вивід наступного листа опису метода

°ПРОБЛ-наст. метод ВВЕДЕННЯ-вибір методу для розрахунку F10-вихід із пакету

11-01-2010

11:48:23

Метод квадратичної регресії

- 2 -

Для визначення коефіцієнтів багаточлена використовується метод якнайменших квадратів. Нехай відомо NN результатів вимірів ($NN > N$) функції $Y(X)$ в точках X_m , координати яких записані по строкам прямокутної матриці $\{X_{ml}\}$ розміром $NN * N$.

Значення багаточлена k -тої точки дорівнює

$$J(k) = Y(X_k) = A_0 + \sum_{i=1}^N A_1(k) * X(k, i) + \sum_{i=1}^N A_2(k) * X(k, i)^2$$

Число коефіцієнтів багаточлена при невідомих визначається по формулі $L = 2 * N$

Приврівнюючи нулю часткові похідні від суми квадратів відхилень

$$E = \sum_{i=1}^N (J(i) - Y(X))^2$$

отримаємо щодо невідомих систему лінійних алгебраїчних рівнянь з симетричною матрицею. Для розв'язку системи застосований метод квадратних коренів.

Обчислювальна схема даного метода реалізується таким чином:

ПРОБЛ-вивід наступного листа опису метода

°ПРОБЛ-наст. метод ВВЕДЕННЯ-вибір методу для розрахунку F10-вихід із пакету

11-01-2010

11:48:23

Метод квадратичної регресії

- 3 -

- 1) Утворюється матриця A_{ij} , яка містить X_i, X_i^2, Y_i .
- 2) Обчислюються середні значення для кожного стовпця отриманої матриці по формулі:

$$M(i) = \frac{\sum_{i=1}^N A_{ij}}{N}, i=1 \dots, L$$

- де A_{ij} - матриця значень невідомої функції
 $L=2*(T-1)$
 T - число невідомих, включаючи функцію.

- 3) Обчислюється середньоквадратичне відхилення для кожної величини по формулі:

$$S(j) = \left[\frac{\sum_{i=1}^N (A_{ij} - m(j))^2}{N} \right]^{1/2}, j=1 \dots, L$$

- 4) Обчислюються коефіцієнти системи лінійних рівнянь по формулі:

$$B(k,i) = \sum_{j=1}^N A_{jk} * A_{ji} - N * M(k) * M(i), k=1 \dots, L$$

ПРОБЛ-вивід наступного листа опису метода

°ПРОБЛ-наст. метод ВВЕДЕННЯ-вибір методу для розрахунку F10-вихід із пакету

11-01-2010

11:48:23

Метод квадратичної регресії

- 4 -

- 5) Обчислюються праві частини системи лінійних рівнянь по формулі:

$$C(k) = \sum_{i=1}^N A_{iK} * X_i - N * M(K) * M(2*T-1), i=1 \dots, L$$

- 6) Обчислюються коефіцієнти багаточлена (1) по формулі:

$$Z(i) = (C(i) - MI) / B(i,i), i=L, L-1, \dots, 1$$

- де $MI = \sum_{k=0}^N B(i, L-k) * Z(L-k)$

- 7) Обчислюється вільний член багаточлена (1) по формулі

$$A_0 = M(2*T-1) - \sum_{i=1}^L Z(i) * M(i), i=1 \dots, L$$

- $Z(i)$ - коефіцієнти багаточлена

ПРОБЛ-вивід наступного листа опису метода

°ПРОБЛ-наст. метод ВВЕДЕННЯ-вибір методу для розрахунку F10-вихід із пакету

11-01-2010

11:48:23

Метод квадратичної регресії

- 5 -

8) Обчислюється коефіцієнт регресії для отриманого багаточлена 2-го степеня по формулі:

$$R = \left[1 - \frac{\sum_{i=1}^N (-X(i,1))^2}{\sum_{i=1}^N (-m(2T-1))^2} \right]^{1/2}$$

ПРОБЛ-вивід наступного листа опису метода

°ПРОБЛ-наст. метод ВВЕДЕННЯ-вибір методу для розрахунку F10-вихід із пакету

11-01-2010

11:48:23

Метод квадратичної регресії

Апроксимуюча функція має вигляд:

$$Y(X) = a_0 + \sum a_1(i) * X(i) + \sum a_2(i) * X(i)^2$$

Задайте початкові дані:

число невідомих = 2

кількість вимірів N = 3

масиви X(i,j) и Y(i) i=1,3 j=1, 3

X(1,1)=1 X(1,2)=2 X(2,1)=4 X(2,2)=3

X(3,1)=2 X(3,2)=7 Y(1)=8 Y(2)= 10 Y(3)= 8

Введіть X1, X2 для обчислення Y(X 1, X2): X(1)= 4 X(2)= 7

Результати регресії:

Масив середньоарифметичних значень m(i):

2.333333 4 7 20.66667 8.666667

Масив середньоквадратичних відхилень S(i):

1.247219 2.160247 20.13841 6.480741

Коефіцієнти багаточлена другого степеня :

3.970451 -2.488660 -0.570281 0.226304

Вільний член багаточлена: A0 = 8.671934

Коефіцієнт регресії: R = 1

Значення формули регресії Y(2)= 9.097529

°ПРОБЛ-наст. метод ВВЕДЕННЯ-вибір методу для розрахунку F10-вихід із пакету

11-01-2010

11:48:23

Універсальний метод регресії для 16 типів рівнянь

Типи рівнянь:

-
- 1 $Y(X)=A+B \cdot X$ (лінійна функція)
 - 2 $Y(X)=1/(A+B \cdot X)$
 - 3 $Y(X)=A+B/X$ (гіперболічна функція)
 - 4 $Y(X)=X/(A+B \cdot X)$
 - 5 $Y(X)=A \cdot B^X$
 - 6 $Y(X)=A \cdot \text{EXP}(B \cdot X)$ (експоненціальна функція)
 - 7 $Y(X)=A \cdot 10^{(B \cdot X)}$
 - 8 $Y(X)=1/(A+B \cdot \text{EXP}(-X))$
 - 9 $Y(X)=A \cdot X^B$ (степенева функція)
 - 10 $Y(X)=A+B \cdot \lg(X)$ (логарифмічна функція)
 - 11 $Y(X)=A+B \cdot \ln(X)$
 - 12 $Y(X)=A/(B+X)$
 - 13 $Y(X)=A \cdot X/(B+X)$
 - 14 $Y(X)=A \cdot \text{EXP}(B/X)$
 - 15 $Y(X)=A \cdot 10^{(B/X)}$
 - 16 $Y(X)=A+B \cdot (X^K)$

Введіть тип рівняння = _

°ПРОБЛ-наст. метод ВВЕДЕННЯ-вибір методу для розрахунку F10-вихід із пакету

11-01-2010

11:48:23

Універсальний метод регресії для 16 типів рівнянь

Апроксимуюча функція має вигляд:

$$Y(X)=A+B \cdot X \text{ (лінійна функція)}$$

Задайте початкові дані:

кількість вузлів інтерполяції $n = 4$ масиви $X(i)$ та $Y(i)$ попарно $i=1,4$

$X(1)=1$	$Y(1)=0$	$X(2)=2$	$Y(2)= 0.900000$
$X(3)= 3.500000$	$Y(3)= 2.500000$	$X(4)= 5$	$Y(4)= 4.200000$

для обчислення значення формули регресії $Y(X)$ значення $X = 4$

Результати регресії:

Функція $Y(X)= A+B \cdot X$ (лінійна функція) $=-1.135374$ $B = 1.055782$ Коефіцієнт кореляції $= 0.999078$ Значення формули регресії $Y(4) = 3.087755$

°ПРОБЛ-наст. метод ВВЕДЕННЯ-вибір методу для розрахунку F10-вихід із пакету

11-01-2010

11:48:23

Універсальний метод регресії для 16 типів рівнянь

Апроксимуюча функція має вигляд:

$$Y(X)=1/(A+B*X)$$

Задайте початкові дані:

кількість вузлів інтерполяції $n = 4$

масиви $X(i)$ та $Y(i)$ попарно $i=1,4$

$X(1)= 1$	$Y(1)= 0.100000$	$X(2)= 2$	$Y(2)= 0.050000$
$X(3)= 3.500000$	$Y(3)= 0.027000$	$X(4)= 5$	$Y(4)= 0.020000$

для обчислення значення формули регресії $Y(X)$ значення $X = 1.500000$

Результати регресії:

Функція $Y(X)= 1/(A+B*X) = 0.110851$ $B = 10.13858$

Коефіцієнт кореляції = 0.998449

Значення формули регресії $Y(1.500000)= 0.065280$

°ПРОБЛ-наст. метод ВВЕДЕННЯ-вибір методу для розрахунку F10-вихід із пакету

11-01-2010

11:48:23

Універсальний метод регресії для 16 типів рівнянь

Апроксимуюча функція має вигляд:

$$Y(X)=A+B/X \text{ (гіперболічна функція)}$$

Задайте початкові дані:

кількість вузлів інтерполяції $n = 4$

масиви $X(i)$ та $Y(i)$ попарно $i=1,4$

$X(1)=1$	$Y(1)= 10.30000$	$X(2)=2$	$Y(2)= 5$
$X(3)= 3.500000$	$Y(3)=3$	$X(4)= 5$	$Y(4)= 2.400000$

для обчислення значення формули регресії $Y(X)$ значення $X = 3$

Результати регресії:

Функція $Y(X)= A+B/X$ (гіперболічна функція) = 0.207627 $B = 10.00622$

Коефіцієнт кореляції = 0.998802

Значення формули регресії $Y(3) = 3.543033$

°ПРОБЛ-наст. метод ВВЕДЕННЯ-вибір методу для розрахунку F10-вихід із пакету

11-01-2010

11:48:23

Універсальний метод регресії для 16 типів рівнянь

Апроксимуюча функція має вигляд:

$$Y(X)=X/(A+B*X)$$

Задайте початкові дані:

кількість вузлів інтерполяції $n = 4$

масиви $X(i)$ та $Y(i)$ попарно $i=1,4$

$X(1)=1$	$Y(1)= 0.170000$	$X(2)=2$	$Y(2)= 0.180000$
$X(3)= 3.500000$	$Y(3)= 0.190000$	$X(4)= 5$	$Y(4)= 0.192000$

для обчислення значення формули регресії $Y(X)$ значення $X = 1$

Результати регресії:

Функція $Y(X)= X/(A+B*X) = 0.938177$ $B = 5.017694$

Коефіцієнт кореляції = 0.999934

Значення формули регресії $Y(1) = 0.167902$

°ПРОБЛ-наст. метод ВВЕДЕННЯ-вибір методу для розрахунку F10-вихід із пакету

11-01-2010

11:48:23

Універсальний метод регресії для 16 типів рівнянь

Апроксимуюча функція має вигляд:

$$Y(X)=A*B^X$$

Задайте початкові дані:

кількість вузлів інтерполяції $n = 4$

масиви $X(i)$ та $Y(i)$ попарно $i=1,4$

$X(1)=1$	$Y(1)=2$	$X(2)=2$	$Y(2)=4$
$X(3)= 3.500000$	$Y(3)=11$	$X(4)=5$	$Y(4)=31$

для обчислення значення формули регресії $Y(X)$ значення $X = 4$

Результати регресії:

Функція $Y(X)= A*B^X = 1.011712$ $B = 1.981573$

Коефіцієнт кореляції = 0.999987

Значення формули регресії $Y(4) = 15.59903$

°ПРОБЛ-наст. метод ВВЕДЕННЯ-вибір методу для розрахунку F10-вихід із пакету

11-01-2010

11:48:23

Універсальний метод регресії для 16 типів рівнянь

Апроксимуюча функція має вигляд:

$$Y(X)=A*EXP(B*X) \text{ (експоненціальна функція)}$$

Задайте початкові дані:

кількість вузлів інтерполяції $n = 4$

масиви $X(i)$ та $Y(i)$ попарно $i=1,4$

$X(1)=1$	$Y(1)= 7.400000$	$X(2)=2$	$Y(2)= 53$
$X(3)= 3.500000$	$Y(3)=1040$	$X(4)= 5$	$Y(4)= 20300$

для обчислення значення формули регресії $Y(X)$ значення $X = 2$

Результати регресії:

Функція $Y(X)= A*EXP(B*X)$ (експоненціальна функція) = 1.016803 $B = 1.980041$

Коефіцієнт кореляції = 0.999999

Значення формули регресії $Y(2)= 53.34312$

°ПРОБЛ-наст. метод ВВЕДЕННЯ-вибір методу для розрахунку F10-вихід із пакету

11-01-2010

11:48:23

Універсальний метод регресії для 16 типів рівнянь

Апроксимуюча функція має вигляд:

$$Y(X)=A* 10^{(B*X)}$$

Задайте початкові дані:

кількість вузлів інтерполяції $n = 4$

масиви $X(i)$ та $Y(i)$ попарно $i=1,4$

$X(1)=1$	$Y(1)=3$	$X(2)=2$	$Y(2)=5$
$X(3)= 3.500000$	$Y(3)= 10$	$X(4)= 5$	$Y(4)= 20$

для обчислення значення формули регресії $Y(X)$ значення $X = 1$

Результати регресії:

Функція $Y(X)= A*10^{(B*X)}$ = 1.904977 $B = 0.205005$

Коефіцієнт кореляції = 0.999787

Значення формули регресії $Y(1)= 3.054184$

°ПРОБЛ-наст. метод ВВЕДЕННЯ-вибір методу для розрахунку F10-вихід із пакету

11-01-2010

11:48:23

Універсальний метод регресії для 16 типів рівнянь

Апроксимуюча функція має вигляд:

$$Y(X)=1/(A+B*EXP(-X))$$

Задайте початкові дані:

кількість вузлів інтерполяції $n = 4$

масиви $X(i)$ та $Y(i)$ попарно $i=1,4$

$X(1)=1$	$Y(1)= 2.100000$	$X(2)=2$	$Y(2)= 4.200000$
$X(3)= 3.500000$	$Y(3)= 7.700000$	$X(4)= 5$	$Y(4)= 9.300000$

для обчислення значення формули регресії $Y(X)$ значення $X = 2$

Результати регресії:

Функція $Y(X)= 1/(A+B*EXP(-X)) = 0.099793$ $B = 1.022886$

Коефіцієнт кореляції = 0.999992

Значення формули регресії $Y(2) = 4.197708$

°ПРОБЛ-наст. метод ВВЕДЕННЯ-вибір методу для розрахунку F10-вихід із пакету

11-01-2010

11:48:23

Універсальний метод регресії для 16 типів рівнянь

Апроксимуюча функція має вигляд:

$$Y(X)=A*X^B \text{ (степенева функція)}$$

Задайте початкові дані:

кількість вузлів інтерполяції $n = 4$

масиви $X(i)$ та $Y(i)$ попарно $i=1,4$

$X(1)=1$	$Y(1)=1$	$X(2)=2$	$Y(2)=4$
$X(3)= 3.500000$	$Y(3)=12$	$X(4)= 5$	$Y(4)= 25$

для обчислення значення формули регресії $Y(X)$ значення $X = 4$

Результати регресії:

Функція $Y(X)= A*X^B \text{ (степенева функція)} = 0.999352$ $B = 1.994930$

Коефіцієнт кореляції = 0.999976

Значення формули регресії $Y(4) = 15.87764$

°ПРОБЛ-наст. метод ВВЕДЕННЯ-вибір методу для розрахунку F10-вихід із пакету

11-01-2010

11:48:23

Універсальний метод регресії для 16 типів рівнянь

Апроксимуюча функція має вигляд:

$$Y(X)=A+B*\lg(X) \text{ (логарифмічна функція)}$$

Задайте початкові дані:

кількість вузлів інтерполяції $n = 4$

масиви $X(i)$ та $Y(i)$ попарно $i=1,4$

$X(1)=1$	$Y(1)=1$	$X(2)=2$	$Y(2)= 1.600000$
$X(3)= 3.500000$	$Y(3)= 2.100000$	$X(4)= 5$	$Y(4)= 2.400000$

для обчислення значення формули регресії $Y(X)$ значення $X = 2$

Результати регресії:

Функція $Y(X)= A+B*\lg(X)$ (логарифмічна функція) = 0.999239 $B = 2.009654$

Коефіцієнт кореляції = 0.999961

Значення формули регресії $Y(2)= 1.604205$

°ПРОБЛЛ-наст. метод ВВЕДЕННЯ-вибір методу для розрахунку F10-вихід із пакету

11-01-2010

11:48:23

Універсальний метод регресії для 16 типів рівнянь

Апроксимуюча функція має вигляд:

$$Y(X)=A+B*\ln(X)$$

Задайте початкові дані:

кількість вузлів інтерполяції $n = 4$

масиви $X(i)$ та $Y(i)$ попарно $i=1,4$

$X(1)=1$	$Y(1)=1$	$X(2)=2$	$Y(2)= 2.400000$
$X(3)= 3.500000$	$Y(3)= 3.500000$	$X(4)= 5$	$Y(4)= 4.200000$

для обчислення значення формули регресії $Y(X)$ значення $X = 4$

Результати регресії:

Функція $Y(X)= A+B*\ln(X) = 1.008314 B =1.987638$

Коефіцієнт кореляції = 0.999973

Значення формули регресії $Y(4)= 3.763766$

°ПРОБЛЛ-наст. метод ВВЕДЕННЯ-вибір методу для розрахунку F10-вихід із пакету

11-01-2010

11:48:23

Універсальний метод регресії для 16 типів рівнянь

Апроксимуюча функція має вигляд:

$$Y(X)=A/(B+X)$$

Задайте початкові дані:

кількість вузлів інтерполяції $n = 4$

масиви $X(i)$ та $Y(i)$ попарно $i=1,4$

$X(1)=1$	$Y(1)= 3.300000$	$X(2)=2$	$Y(2)= 2.500000$
$X(3)= 3.500000$	$Y(3)= 1.800000$	$X(4)= 5$	$Y(4)= 1.400000$

для обчислення значення формули регресії $Y(X)$ значення $X = 2$

Результати регресії:

Функція $Y(X)= A/(B+X) = 9.702739$ $B = 1.910564$

Коефіцієнт кореляції = 0.999861

Значення формули регресії $Y(2)= 2.481161$

°ПРОБІЛ-наст. метод ВВЕДЕННЯ-вибір методу для розрахунку F10-вихід із пакету

11-01-2010

11:48:23

Універсальний метод регресії для 16 типів рівнянь

Апроксимуюча функція має вигляд:

$$Y(X)=A*X/(B+X)$$

Задайте початкові дані:

кількість вузлів інтерполяції $n = 4$

масиви $X(i)$ та $Y(i)$ попарно $i=1,4$

$X(1)=1$	$Y(1)= 3.330000$	$X(2)=2$	$Y(2)= 5$
$X(3)= 3.500000$	$Y(3)= 6.360000$	$X(4)= 5$	$Y(4)= 7.140000$

для обчислення значення формули регресії $Y(X)$ значення $X = 2$

Результати регресії:

Функція $Y(X)= A*X/(B+X) = 10.00373$ $B = 2.003747$

Коефіцієнт кореляції = 0.999999

Значення формули регресії $Y(2)= 4.997186$

°ПРОБІЛ-наст. метод ВВЕДЕННЯ-вибір методу для розрахунку F10-вихід із пакету

11-01-2010

11:48:23

Універсальний метод регресії для 16 типів рівнянь

Апроксимуюча функція має вигляд:

$$Y(X)=A*EXP(B/X)$$

Задайте початкові дані:

кількість вузлів інтерполяції $n = 4$

масиви X(i) та Y(i) попарно	i=1,4		
X(1)=1	Y(1)=74	X(2)=2	Y(2)=27
X(3)= 3.500000	Y(3)=17	X(4)= 5	Y(4)= 15

для обчислення значення формули регресії Y(X) значення X = 2

Результати регресії:

Функція $Y(X)= A*EXP(B/X) = 9.801435$ B = 2.019953

Коефіцієнт кореляції = 0.999625

Значення формули регресії Y (2)= 26.91020

°ПРОБЛ-наст. метод ВВЕДЕННЯ-вибір методу для розрахунку F10-вихід із пакету

11-01-2010

11:48:23

Універсальний метод регресії для 16 типів рівнянь

Апроксимуюча функція має вигляд:

$$Y(X)=A*10^(B/X)$$

Задайте початкові дані:

кількість вузлів інтерполяції $n = 4$

масиви X(i) та Y(i) попарно	i=1,4		
X(1)=1	Y(1)=500	X(2)=2	Y(2)=50
X(3)= 3.500000	Y(3)=19	X(4)= 5	Y(4)= 13

для обчислення значення формули регресії Y(X) значення X = 2

Результати регресії:

Функція $Y(X)= A*10^(B/X) = 5.161513$ B =1.983935

Коефіцієнт кореляції = 0.999981

Значення формули регресії Y (2)= 50.66927

°ПРОБЛ-наст. метод ВВЕДЕННЯ-вибір методу для розрахунку F10-вихід із пакету

11-01-2010

11:48:23

Універсальний метод регресії для 16 типів рівнянь

Апроксимуюча функція має вигляд:

$$Y(X)=A+B*(X^K)$$

Задайте початкові дані:

кількість вузлів інтерполяції $n = 4$

масиви $X(i)$ та $Y(i)$ попарно $i=1,4$

$X(1)=1$	$Y(1)= 2.100000$	$X(2)=2$	$Y(2)= 2.280000$
$X(3)= 3.500000$	$Y(3)= 2.650000$	$X(4)= 5$	$Y(4)= 3.120000$

для обчислення значення формули регресії $Y(X)$ значення $X = 2$

Результати регресії:

Функція $Y(X)= A+B*(X^K)$ при $K=3$
 $= 2.195221 B = 0.007741$

Коефіцієнт кореляції = 0.976716

Значення формули регресії $Y(4)= 2.690619$

°ПРОБЛ-наст. метод ВВЕДЕННЯ-вибір методу для розрахунку F10-вихід із пакету

11-01-2010

11:48:23

Інтерполяція по Лагранжу

Інтерполяція функції $Y(X)$, яка задана $N+1$ вузлами $Y_i(X_i)$, полягає в знаходженні значень Y по значенням X , які знаходяться в проміжках між вузлами X_i . При інтерполяції функція $Y(X)$ замінюється інтерполяційним многочленом $P(X)$, значення якого $P(X_i)$ в вузлах точно співпадають з $Y(X_i)$. Значення N точно задає степінь полінома $P(X)$.

Інтерполяція поліномом Лежандра при довільному розташуванні вузлів в загальному випадку зводиться до обчислення $Y(X)=L_n(X)$ за допомогою інтерполяційного полінома, який має вид:

$$L_n(X) = \frac{(X-X_1)(X-X_2)\dots(X-X_n)}{(X_0-X_1)(X_0-X_2)\dots(X_0-X_n)} * Y_0 + \frac{(X-X_0)(X-X_2)\dots(X-X_n)}{(X_1-X_0)(X_1-X_2)\dots(X_1-X_n)} * Y_1 + \dots$$

$$+ \frac{(X-X_0)(X-X_1)\dots(X-X_{n-1})}{(X_n-X_0)(X_n-X_1)\dots(X_n-X_{n-1})} * Y_n$$

°ПРОБЛ-наст. метод ВВЕДЕННЯ-вибір методу для розрахунку F10-вихід із пакету

11-01-2010

11:48:23

Інтерполяція по Лагранжу

=====

===

Здайте початкові дані:

кількість вузлів інтерполяції $n = 6$ масиви $X(i)$ и $Y(i)$ попарно $i = 0, 5$ $X(0)= 1.500000$ $Y(0)= 0.886227$ $X(1)= 1.510000$ $Y(1)= 0.886592$ $X(2)= 1.525000$ $Y(2)= 0.887293$ $X(3)= 1.540000$ $Y(3)= 0.888178$ $X(4)= 1.540000$ $Y(4)= 0.889639$ $X(5)= 1.590000$ $Y(5)= 0.892428$ для обчислення значення формули інтерполяції $Y(X)$ значення $X = 1.550000$

Результати інтерполяції:

Значення формули регресії $Y(1.550000)= 0.889639$

°ПРОБЛ-наст. метод ВВЕДЕННЯ-вибір методу для розрахунку F10-вихід із пакету

11-01-2010

11:48:23

Інтерполяція поліномом Ньютона

=====

Інтерполяція функції $Y(X)$, заданої $N+1$ вузлами $Y_i(X_i)$, полягає в знаходженні значень Y по значенням X , які знаходяться в проміжках між вузлами X_i . При інтерполяції функція $Y(X)$ замінюється інтерполяційним многочленом $P(X)$, значення якого $P(X_i)$ в вузлах точно співпадають з $Y(X_i)$. Значення N точно задає степінь полінома $P(X)$.

Інтерполяція з одночасним отриманням коефіцієнтів полінома

$$P(X) = A_n X^n + A_{n-1} X^{n-1} + \dots + A_1 X + A_0$$

може виконуватися з застосуванням інтерполяційної формули Ньютона:

$$P_{n-1}(X) = Y_1 + (X-X_1) * f(X_1, X_2) + (X-X_1) * (X-X_2) * f(X_1, X_2, X_3) + \dots + (X-X_1) * (X-X_2) * \dots * (X-X_{n-1}) * f(X_1, X_2, \dots, X_n)$$

°ПРОБЛ-наст. метод ВВЕДЕННЯ-вибір методу для розрахунку F10-вихід із пакету

11-01-2010

11:48:23

Інтерполяція поліномом Ньютона

Задайте початкові дані:

кількість вузлів інтерполяції $n = 5$

масиви $X(i)$ та $Y(i)$ попарно $i = 1, 5$

$X(1)= 2.200000$ $Y(1)= 0.486097$ $X(2)= 2.300000$ $Y(2)= 0.489276$ $X(3)= 2.400000$

$Y(3)= 0.491803$ $X(4)= 2.500000$ $Y(4)= 0.493790$ $X(5)= 2.600000$ $Y(5)= 0.495339$

для обчислення значення формули інтерполяції $Y(X)$ значення $X = 2.300000$

Результати інтерполяції:

Коефіцієнти статечного багаточлена:

$= 0.789443$ $= -0.361617$ $= 0.075197$ $= -0.005980$ $= 0$

Значення формули регресії $Y(2.300000) = 0.489276$

ДОДАТОК Б

Пакет прикладних програм “ППП2” по методам чисельного інтегрування функцій (визначення розподілів температур та термопружних напружень, товщин оплавлених шарів у оптичних елементах в умовах зовнішніх термовпливів, знаходження критичних значень їх параметрів)

11-01-2010
11:48:23

ПАКЕТ ПРИКЛАДНИХ ПРОГРАМ

ПО МЕТОДАМ ЧИСЕЛЬНОГО ІНТЕГРУВАННЯ ФУНКЦІЙ

Призначення пакету полягає в обчисленні інтегралів.

Визначені інтеграли

Метод Сімпсона (по числу інтервалів інтегрування)

Метод Боде

Метод Уеддля

Метод Ньютона-Котеса

Метод Чебишева

Метод Гаусса (по числу інтервалів інтегрування)

Метод Гаусса (з заданою точністю)

Метод Гаусса (по формулі Лежандра)

Визначені інтеграли спеціального виду

Метод Сімпсона (з заданою точністю і особливістю $f(X)$)

Метод Гаусса (при $B \rightarrow$ до нескінченності)

Подвійні інтеграли

Формула Сімпсона

Проста формула Гаусса

Складна формула Гаусса

°ПРОБЛ-наст. метод ВВЕДЕННЯ-вибір методу для розрахунку F10-вихід із пакету

11-01-2010
11:48:23

Метод Сімпсона (по числу інтервалів інтегрування)

В основі метода Сімпсона обчислення інтеграла покладена складена формула Сімпсона :

$$\int_a^b f(x) dx = \frac{h}{6} * [y_0 + 2 * [y_2 + y_4 + \dots + y_{(2m-2)}] + 4 * [y_1 + y_3 + \dots + y_{(2m-1)}] + y_{(2m)}] + R_1$$

a

де $[a,b]$ - відрізок інтегрування

$$x(i) = a + i * h$$

$$h = (b - a) / n$$

$n = 2 * m$ - парне число розбиття відрізка $[a,b]$

За наближене значення інтегралу, обчислене по формулі Сімпсона з поправкою по Рунге, приймають

$$INTEGRAL = I(2n) + [I(2n) - I(n)] / 15$$

Похибка оцінюється величиною $ER = [I(2n) - I(n)] / 15$

°ПРОБЛ-наст. метод ВВЕДЕННЯ-вибір методу для розрахунку F10-вихід із пакету

11-01-2010

11:48:23

Метод Бодє

Чисельне інтегрування полягає в інтерполяції підінтегральної функції $f(X)$ на відрізку $[A,B]$ поліномом, що підходить для якого інтеграл обчислюється по формулам чисельного інтегрування.

Зазвичай відрізок $[A,B]$ розбивається на N частин, до кожної з яких застосовується відповідна проста формула. Таким чином отримують складові формули чисельного інтегрування.

Метод Бодє оснований на застосування до кожного з N відрізків розбиття $[A,B]$ формули:

$$I = \int_{x_0}^{x_4} f(x) dx = \frac{2 \cdot N}{45} * (7 \cdot y_0 + 32 \cdot y_1 + 12 \cdot y_2 + 32 \cdot y_3 + 7 \cdot y_4) - \frac{8 \cdot N^7}{945} * f_4(e),$$

де $N = (B-A)/N$

$f_4(e)$ - значення четвертої похідної $f(x)$ в точці $x=e$, де вона максимальна.

°ПРОБЛ-наст. метод ВВЕДЕННЯ-вибір методу для розрахунку F10-вихід із пакету

11-01-2010

11:48:23

Метод Уєддлє

Чисельне інтегрування полягає в інтерполяції підінтегральної функції $f(X)$ на відрізку $[A,B]$ поліномом, який підходить для якого інтеграл обчислюється по формулам численного інтегрування.

Зазвичай відрізок $[A,B]$ розбивається на N частин, до кожної з яких застосовується відповідна проста формула. Таким чином отримують складові формули чисельного інтегрування.

Метод Уєддлє оснований на застосування до кожного з N відрізків розбиття $[A,B]$ формули:

$$I = \int_{x_0}^{x_6} f(x) dx = \frac{3 \cdot N}{10} * (y_0 + 5 \cdot y_1 + y_2 + 6 \cdot y_3 + y_4 + 5 \cdot y_5 + y_6) + \frac{47 \cdot N^7}{12700} * f_4(e),$$

де $N = (B-A)/N$

$f_4(e)$ – значення четвертої похідної $f(x)$ в точці $x=e$, де вона максимальна.

°ПРОБЛ-наст. метод ВВЕДЕННЯ-вибір методу для розрахунку F10-вихід із пакету

11-01-2010

11:48:23

Метод Ньютона-Котеса

Чисельне інтегрування полягає в інтерполяції підінтегральної функції $f(x)$ на відрізку $[A, B]$ поліномом, який підходить для якого інтеграл обчислюється по формулам численного інтегрування.

Зазвичай відрізок $[A, B]$ розбивається на N частин, до кожної з яких застосовується відповідна проста формула. Таким чином отримують складові формули чисельного інтегрування.

Метод Ньютона-Котеса оснований на застосування до кожного з N відрізків розбиття

$[A, B]$ формули:

$$I = \int_{x_0}^{x_6} f(x) dx = \frac{H}{140} * (41*y_0 + 216*y_1 + 27*y_2 + 272*y_3 + 27*y_4 + 216*y_5 + 41*y_6) - \frac{9*H^9}{1400} * f_8(\epsilon),$$

x_0

де $H = (B - A) / N$

$f_8(\epsilon)$ – значення восьмої похідної $f(x)$ в точці $x = \epsilon$, де вона максимальна.

°ПРОБЛЛ-наст. метод ВВЕДЕННЯ-вибір методу для розрахунку F10-вихід із пакету

11-01-2010

11:59:09

Метод Чебишева

Формула для інтегрування 1

$$f(X) = (A * X^2 + B * X + C) * \text{EXP}(-(z - X)^2 / (4 * a^2 * t))$$

Максимальне число видів = 19

°ПРОБЛЛ-огляд формул ВВЕДЕННЯ-вибір формули F2-огляд методів

11-01-2010

11:59:09

Метод Гаусса (по числу інтервалів інтегрування)

Формула для інтегрування 1

$$f(X)=(A*X^2+B*X+C)*EXP(-(z-X)^2/(4*a^2*t))$$

Максимальне число видів = 19

°ПРОБЛ-огляд формул ВВЕДЕННЯ-вибір формули F2-огляд методів

11-01-2010

11:59:09

Метод Гаусса (з заданою точністю)

Формула для інтегрування 1

$$f(X)=(A*X^2+B*X+C)*EXP(-(z-X)^2/(4*a^2*t))$$

Максимальне число видів = 19

°ПРОБЛ-огляд формул ВВЕДЕННЯ-вибір формули F2-огляд методів

11-01-2010

11:48:23

Метод Гаусса (по формулі Лежандра)

Обчислення інтегралів по методу Гаусса реалізується по такому алгоритму:

$$\text{ІНТЕГРАЛ} = C/2 + \sum_{i=1}^8 f((A+B+C*T(i)/2)*D(i)),$$

де [A,B] - відрізок інтегрування,

$$C = B - A$$

T(i) - нулі полінома Лежандра:

$$\begin{aligned} T(1) &= -0.96028986 & T(2) &= -0.79666648 & T(3) &= -0.52553242 & T(4) &= -0.18343464 \\ T(5) &= 0.18343464 & T(6) &= 0.52553242 & T(7) &= 0.79666648 & T(8) &= 0.96028986 \end{aligned}$$

D(i) - коефіцієнти формули:

$$\begin{aligned} D(1) &= 0.10122854 & D(2) &= 0.22238104 & D(3) &= 0.31370664 & D(4) &= 0.36268378 \\ D(5) &= 0.36268378 & D(6) &= 0.31370664 & D(7) &= 0.22238104 & D(8) &= 0.10122854 \end{aligned}$$

°ПРОБЛ-наст. метод ВВЕДЕННЯ-вибір методу для розрахунку F10-вихід із пакету

11-01-2010

11:48:23

Метод Сімпсона (з заданою точністю та особливостями f(X))

Невласними інтегралами називаються інтеграли, в яких f(x) прямує до нескінченності на відрізку [A,B], або f(A) або f(B) прямує до нескінченності.

Якщо f(x) має на кінцях границі інтегрування видаткову особливість, наприклад невизначеність виду 0/0 чи неск/неск, застосовують метод Сімпсона з окремим введенням значень f(A) або f(B).

°ПРОБЛ-наст. метод ВВЕДЕННЯ-вибір методу для розрахунку F10-вихід із пакету

11-01-2010

11:48:23

Метод Гаусса (при $B \rightarrow$ до нескінченності)

====

Невласний інтеграл виду
неск B

$$I = \int_A^B f(x) dx = \int_A^A f(x) dx + I$$

обчислюється як звичайний при виборі додаткової проміжної
границі інтегрування

неск

$$I = \int_B^{\text{неск}} f(x) dx < E, \quad \text{де } E - \text{ задана похибка інтегрування.}$$

Відбувається автоматичне змінення B ,
як $B_0, 2B_0, 4B_0$ тощо, де B_0 -початкове
значення B з контролем на кожній i -ой стадії
умови $I(i) - I(i-1) < E$.
При виконанні цієї умови розрахунок припиняється.

°ПРОБЛ-наст. метод ВВЕДЕННЯ-вибір методу для розрахунку F10-вихід із пакету

11-01-2010

11:48:23

Формула Сімпсона

====

Подвійні (кратні) інтеграли обчислюються по кубатурній формулі Сімпсона.
При цьому область інтегрування в площині X, Y розбивається на чотири квадрати
і значення інтегралу обчислюється по формулі:

$$I = \int_A^B \int_C^D f(x,y) dx dy = \frac{H_X * H_Y}{9} * \{ [f(x_0,y_0) + f(x_2,y_0) + f(x_0,y_2) + f(x_2,y_2)] + \\ + 4 * [f(x_1,y_0) + f(x_0,y_1) + f(x_2,y_1) + f(x_1,y_2)] + 16 * f(x_1,y_1) \}$$

де $[A, B]$ - відрізок інтегрування по X $[C, D]$ - відрізок інтегрування по Y $H_X = (B - A) / 2$ $H_Y = (D - C) / 2$

°ПРОБЛ-наст. метод ВВЕДЕННЯ-вибір методу для розрахунку F10-вихід із пакету

11-01-2010

11:48:23

Проста формула Гаусса

=====
===

Подвійні (кратні) інтеграли обчислюються по кубатурній формулі Гаусса. При цьому область інтегрування в площині X,Y розбивається на два квадрати і значення інтегралу обчислюється по формулі:

$$I = \int_A^B \int_C^D f(x,y) dx dy = N_X * N_Y * [f(x_1, y_1) + f(x_2, y_2) + f(x_3, y_3) + f(x_4, y_4)]$$

де [A,B] - відрізок інтегрування по X

[C,D] - відрізок інтегрування по Y

$$N_X = (B-A)/2 \quad N_Y = (D-C)/2$$

°ПРОБЛ-наст. метод ВВЕДЕННЯ-вибір методу для розрахунку F10-вихід із пакету

11-01-2010

11:48:23

Складна формула Гаусса

=====
===

Подвійні (кратні) інтеграли виду $I = \int_A^B \int_C^D f(x,y) dx dy$

обчислюються по складній кубатурній формулі Гаусса, яка реалізується розбиттям відрізка [A,B] на N і відрізка [C,D] на M частин з застосуванням для кожного елементарного прямокутника формули :

$$I = \int_a^b \int_c^d f(x,y) dx dy = N_X * N_Y * [f(x_1, y_1) + f(x_2, y_2) + f(x_3, y_3) + f(x_4, y_4)]$$

де [A,B] ([a,b]) - відрізок інтегрування по X

[C,D] ([c,d]) - відрізок інтегрування по Y

$$N_X = (b-a)/2 \quad N_Y = (d-c)/2$$

°ПРОБЛ-наст. метод ВВЕДЕННЯ-вибір методу для розрахунку F10-вихід із пакету

ДОДАТОК В

Пакет прикладних програм “ПППЗ” по методам чисельного розв’язку диференціальних рівнянь (нестационарного та квазістационарного рівнянь теплопровідності та термодружності для оптичних елементів, термогазодинамічних рівнянь нагріву обтічників надзвуковим потоком повітря)

11-01-2010	ПАКЕТ ПРИКЛАДНИХ ПРОГРАМ ПО МЕТОДАМ ЧИСЕЛЬНОГО РОЗВ’ЯЗКУ ДИФЕРЕНЦІЙНИХ РІВНЯНЬ	11:48:23
=====		
Призначення пакета полягає в розв’язку диференціальних рівнянь чи систем.		
Розв’язок диференціальних рівнянь 1-го порядку		
Метод Рунге-Кутта		
Метод Ейлера-Коші з ітераціями		
Розв’язок диференціальних рівнянь 2-го порядку		
Метод Рунге-Кутта		
Метод Мілна		
Метод прогонки (з крайовими умовами)		
Різничний метод (з крайовими умовами)		
Задача Дирихле для рівняння Лапласа методом сіток		
Розв’язок систем диференціальних рівнянь 1-го порядку		
Метод трапецій		
Метод Рунге-Кутта		
Метод Рунге-Кутта-Мерсона (автомат. вибір кроку)		
Метод Рунге-Кутта-Фельберга (автомат. вибір кроку)		
Обчислення функцій Бесселя		
Функції Бесселя 1-го роду $J_n(X)$ і $I_n(x)$		
Функції Бесселя 2-го роду $JU(X)$, $YU(X)$ і $IU(x), KU(X)$		
°ПРОБІЛ-наст. метод ВВЕДЕННЯ-вибір методу для розрахунку F10-вихід із пакету		

11-01-2010	Метод Рунге-Кутта	11:48:23
=====		
Метод Рунге-Кутта призначений для розв’язку звичайних диференціальних рівнянь 1-го порядку виду:		
$Y' = F(X, Y)$		
з початковою умовою $Y(X_0) = Y_0$ на інтервалі $[X_0, X_K]$.		
°ПРОБІЛ-наст. метод ВВЕДЕННЯ-вибір методу для розрахунку F10-вихід із пакету		

11-01-2010

11:48:23

Метод Ейлера-Коші з ітераціями

Метод Ейлера-Коші з ітераціями призначений для розв'язку звичайних диференціальних рівнянь 1-го порядку виду:

$$Y' = F(X, Y)$$

з початковою умовою $Y(X_0) = Y_0$ на інтервалі $[X_0, X_K]$ з кроком H .

Початкове наближення до розв'язку визначається за формулою:

$$Y_i(0) = D_i + F(X(i-1), Y(i-1)) * H/2$$

де $D_i = B + F(X(i-1), Y(i-1)) * H/2$

i -номер точки, в якій шукається розв'язок

$B = Y_i$

$$Y_i(k) = D_i + F(X(i-1), Y_i(k-1)) * H/2, \quad k\text{-номер ітерації}$$

°ПРОБЛЛ-наст. метод ВВЕДЕННЯ-вибір методу для розрахунку F10-вихід із пакету

11-01-2010

11:59:09

Метод Рунге-Кутта

Рівняння 1

$$Y'' = (d + f * Y^2) * Y + (a * X^2 + b * X + c) * Y$$

Максимальне число видів = 14

°ПРОБЛЛ-огляд формул ВВЕДЕННЯ-вибір формули F2-огляд методів

11-01-2010

11:48:23

Метод Мілна

Метод Мілна призначений для розв'язку звичайних диференціальних рівнянь 2-го порядку виду:

$$Y'' = F(X, Y, Y')$$

з початковими умовами: $Y(X_0) = Y_0$, $Y'(X_0) = Y_1$ на інтервалі $[X_0, X_K]$.

В програмі реалізується наступний алгоритм:

Початкове наближення до $Y(i+1)$ визначається за прогнозуючою формулою Мілна:

$$P = D + 4 * H / 3 * (2 * U - S + 2 * R)$$

Для покращення початкового наближення використовується виправляюча формула Мілна:

$$P_1(k) = B + (F(T, Y^{(k-1)}, P) + 4 * R + S) * H / 3,$$

де $Y^{(k-1)} = W + (P + 4 * A + B) * H / 3$, k -номер ітерації.

°ПРОБЛ-наст. метод ВВЕДЕННЯ-вибір методу для розрахунку F10-вихід із пакету

11-01-2010

11:48:23

Метод прогонки (з крайовими умовами)

Метод прогонки призначений для розв'язку звичайних диференціальних рівнянь 2-го порядку виду:

$$U(X) * Y'' + V(X) * Y' + W(X) * Y = F(X)$$

на інтервалі $[X_0, X_K]$ з крайовими умовами:

$$A * Y(X_0) + B * Y'(X_0) = B$$

$$C * Y(X_K) + D * Y'(X_K) = E$$

Пряма прогонка здійснюється по формулам:

$$P(1) = 2 * B * U(1) / [2 * U(1) * (B - A * H) + H^2 * (A * V(1) - B * W(1))]$$

$$Q(1) = [-B * H^2 * F(1) + B * H * (V(1) * H - B * W(1))] / [2 * U(1) * (B - A * H) + H^2 * (A * V(1) - B * W(1))]$$

$$P(k) = -(2 * U(k) + V(k) * H) / [2 * H^2 * W(k) + (2 * U(k) - V(k) * H) * P(k-1) - 4 * U(k) * Q(k-1)]$$

$$2 * H^2 * F(k) - (2 * U(k) - V(k) * H) * Q(k-1)$$

$$Q(k) = -P(k) * \frac{2 * H^2 * F(k) - (2 * U(k) - V(k) * H) * Q(k-1)}{2 * U(k) + V(k) * H} \quad \text{при } k=2, 3, \dots, N$$

Зворотню прогонку здійснюємо по формулам:

$$E * H * (2 * U(N+1) + V(N+1) * H) - D * (H^2 * F(N+1) - 2 * U(N+1) * Q(N))$$

$$Y(N+1) = \frac{E * H * (2 * U(N+1) + V(N+1) * H) - D * (H^2 * F(N+1) - 2 * U(N+1) * Q(N))}{C * H * (2 * U(N+1) + V(N+1) * H) - D * (2 * U(N+1) * (P(N) - 1) + W(N+1) * H^2)}$$

$$Y(k) = P(k) * Y(k+1) + Q(k) \quad k=N, N-1, \dots, 1$$

°ПРОБЛ-наст. метод ВВЕДЕННЯ-вибір методу для розрахунку F10-вихід із пакету

11-01-2010

11:48:23

Різницевий метод (з крайовими умовами)

Різницевий метод призначений для розв'язку диференціальних рівнянь в часткових похідних

$$\frac{D1U}{DT} = \frac{D11U}{DX}$$

де X з $[X0, XK]$ з кроком H , T з $[T0, TK]$ з кроком HT

$U=F(X)$ і крайові умови: $U(X0, T)$ і $U(XK, T)$

°ПРОБЛЛ-наст. метод ВВЕДЕННЯ-вибір методу для розрахунку F10-вихід із пакету

11-01-2010

11:59:09

Задача Дирихле для рівняння Лапласа методом сіток

Рівняння 1

$$U_{11x} + U_{11y} = 0 \quad X_0 < x < X_K, \quad Y_0 < y < Y_K = 0$$

Крайові умови:

$$U(0, Y) = 0, \quad U(1, Y) = Y \quad \text{для } Y \text{ з } [0; 1]$$

$$U(X, 0) = 0, \quad U(X, 1) = X \quad \text{для } X \text{ з } [0; 1]$$

Максимальне число видів = 5

°ПРОБЛЛ-огляд формул ВВЕДЕННЯ-вибір формули F2-огляд методів

11-01-2010

11:59:09

Метод трапецій**Система 1**

$$Y_{11}=Y(2)$$
$$Y_{21}=(Y(1)/X-Y(2))/X-Y(1)$$

Максимальне число видів = 4

°ПРОБЛ-огляд формул ВВЕДЕННЯ-вибір формули F2-огляд методів

11-01-2010

11:59:09

Метод Рунге-Кутта**Система 1**

$$Y_{11}=Y(2)$$
$$Y_{21}=(Y(1)/X-Y(2))/X-Y(1)$$

Максимальне число видів = 4

°ПРОБЛ-огляд формул ВВЕДЕННЯ-вибір формули F2-огляд методів

11-01-2010

11:59:09

Метод Рунге-Кутта-Мерсона (автоматичний вибір кроку)

Система 1

$$Y11=Y(2)$$
$$Y21=(Y(1)/X-Y(2))/X-Y(1)$$

Максимальне число видів = 4

°ПРОБЛІ-огляд формул ВВЕДЕННЯ-вибір формули F2-огляд методів

11-01-2010

11:59:09

Метод Рунге-Кутта-Фельберга (автоматичний вибір кроку)

Система 1

$$Y11=Y(2)$$
$$Y21=(Y(1)/X-Y(2))/X-Y(1)$$

Максимальне число видів = 4

°ПРОБЛІ-огляд формул ВВЕДЕННЯ-вибір формули F2-огляд методів

11-01-2010

11:48:23

Функції Бесселя 1-го роду $J_n(X)$ и $I_n(x)$

=====
====

Обчислення функцій Бесселя 0 -го порядку:

Задайте вихідні дані:

Введіть -1 для $JN(X)$ чи 1 для $IN(X)$: =-1

°ПРОБЛ-наст. метод ВВЕДЕННЯ-вибір методу для розрахунку F10-вихід із пакету

11-01-2010

11:48:23

Функції Бесселя 2-го роду $JU(X)$, $YU(X)$ и $IU(x), KU(X)$

=====
====

Обчислення функцій Бесселя 1 -го порядку:

Задайте вихідні дані:

Введіть 0 для $JU(X), YU(X)$ чи 1 для $IU(X), KU(X)$: =-1

°ПРОБЛ-наст. метод ВВЕДЕННЯ-вибір методу для розрахунку F10-вихід із пакету

ДОДАТОК Г

Пакет прикладних програм “ППП4” з методів чисельної оптимізації технологічних режимів електронно-променевої обробки оптичних матеріалів

' Файл PP5.BAS

'=====

DEFDBL A-Z ' : DEFINT I,J
GOTO START

' 1. Метод Фібоначчі

FUNMET1:

Z=X*X*X*X-14*X*X*X+60*X*X-70*X
RETURN

' 2. Метод золотого перетину

FUNMET2:

Z=-EXP(-X)*LOG(X)
RETURN

' 3. Метод градієнтного спуску

FUNMET3:

Z=EXP(X(1)^2+X(2)^2)+2*X(1)-3.5*X(2)
RETURN

FUNMET31:

YE=EXP(X(1)^2+X(2)^2)
P(1)=YE*2*X(1)+2
P(2)=YE*2*X(2)-3.5
RETURN

' 4. Метод Хука-Дживса

FUNMET4:

Z=(X(1)-2)^2+(X(2)-5)^2+(X(3)+2)^4
FE=FE+1
RETURN

' 5. Симплексний метод Нелдера-Мида

FUNMET5:

Z=100*(X(2)-X(1)^2)^2+(1-X(1))^2
TEV=TEV+1
RETURN

' 6. Метод найшвидшого спуску

FUNMET61:

Z=(X(1)-1)^2+(X(2)-3)^2+4*(X(3)+5)^2
FE=FE+1
RETURN

FUNMET62:

GO=0


```

G(1)=2*(X(1)-1)
G(2)=2*(X(2)-3)
G(3)=8*(X(3)+5)
FOR I=1 TO N : GO=GO+G(I)*G(I) : NEXT I
GO=SQR(GO)
RETURN
' 7. Метод сумісних градієнтів
SUB F7(X(1),Y)
  Y1=EXP(1-X(1)^2-20.25*(X(1)-X(2))^2)
  Y=-Y1*X(1)*X(1)
END SUB

SUB G7(X(1),P(1))
  Y2=EXP(1-X(1)^2-20.25*(X(1)-X(2))^2)
  P(1)=-2*Y2*X(1)*(1-X(1)*(X(1)+20.25*(X(1)-X(2))))
  P(2)=-X(1)^2*Y2*40.5*(X(1)-X(2))
END SUB

' 8. Модифікований метод Хука-Дживса
FUNMET8:
  IF X(1)>=0 AND X(2)>=0 AND X(1)+X(2)>=4 THEN
    Z=3*X(1)^2+4*X(1)*X(2)+5*X(2)^2
  END IF
  FE=FE+1
  RETURN

' 9. Комплексний метод
FUNMET9:
  Z=-X(1)*X(2)*X(3)+3300
  FE=FE+1
  RETURN

FUNMET91:
  FOR II=1 TO 2*N : EC(II)=0 : NEXT II : EC=0
  FOR II=1 TO M : IC(II)=0 : NEXT II : IC=0
  IF IM=1 THEN M97100
  FOR II=1 TO N
    IF X(II)<L(II) THEN EC(II)=1 : EC=1
    IF X(II)<U(II) THEN EC(N+II)=1 : EC=1
  NEXT II
M97100:
  G(1)=X(1)+2*X(2)+2*X(3)
  IF G(1)>72 THEN IC(1)=1 : IC=1
  RETURN

DMET9:
  DATA 0,20,0,11,0,42

' 10. Симплексний метод
' для лінійної функції
DMET10L:
  DATA 1,2,-1,2

```

```

DATA 2,1,3,7
DATA -4,3,2,-9
DATA -1,-4,3,0
' для дрібної функції
DMET10D:

DATA -3,6,1,2
DATA -1,7,2,12
DATA -2,4,-1,-1
DATA 1,2,-1,0

' 11. Метод випадкового пошуку
DMET11:
DATA -1,-2,-1 : REM A11(I) масив нижніх меж пошуку
DATA 1, 2, 2 : REM B(I) масив верхніх меж пошуку

SUB FUNMET11(X(1),FUN)
FUN=X(1)^2+(X(2)-1)^2+(X(3)-2)^2
END SUB

DEF FNTRUNC(X)
IF X>=0 THEN FNTRUNC=INT(X) ELSE FNTRUNC=-INT(ABS(X))
END DEF

' 12. Метод вектору спаду (загального вигляду)
DMET12:
DATA 1, 1, 1 : REM Y(I)
DATA -1,3,-3 : REM C1(I)
DATA 4, 2, 3 : REM B1(I)
DATA 2,1,-1,4,-3,0,-3,2,1 : REM A1(I,J)

' 13. Метод вектору спаду (лін. функція с булевими змінними)
DMET13MIN:
DATA 0,0,0 : REM X(I)
DATA 1,4,-2 : REM C1(I)
DATA 5,3,6 : REM B(I)
DATA 3,1,-1,4,-3,0,-2,3,1 : REM A1(I,J)
DMET13MAX:
DATA 0,0,0 : REM X(I)
DATA 2,5,-1 : REM C1(I)
DATA 7,8,11 : REM B(I)
DATA 5,2,-3,6,-3,1,-1,4,2 : REM A1(I,J)

START:
SCREEN 0,0,0,0 : KEY OFF : COLOR 14,1 : CLS : LOCATE 1,1,1,5,7
DIM MET$(20)
COLOR 15,3
? SPACES$(80);
? " ПАКЕТ ПРИКЛАДНИХ ПРОГРАМ ";
? " ПО МЕТОДАМ ЧИСЕЛЬНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ ";
? " ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ";

```

```

? SPACES$(80);
I=CSRLIN : COLOR 13,1
LOCATE I+1,20 : ? " Чисельні методи: "
LOCATE ,20 : ? " ----- "
ON KEY(10) GOSUB QUIT : KEY(10) ON : COLOR 14,1
MET$(1)="Метод Фібоначчі
MET$(2)="Метод золотого перетину
MET$(3)="Метод градієнтного спуска
MET$(4)="Метод Хука-Дживса
MET$(5)="Симплексний метод Нелдера-Мида
MET$(6)="Метод найшвидшого спуска
MET$(7)="Метод сумісних градієнтів
MET$(8)="Модифікований метод Хука-Дживса (при наявності обмежень)
MET$(9)="Комплексний метод
MET$(10)="Симплексний метод
MET$(11)="Метод випадкового пошуку
MET$(12)="Метод вектору спаду (загального виду)
MET$(13)="Метод вектору спаду (лін. функція с булевими змінними)
FOR I=1 TO 13 : ? TAB(5) I TAB(9) "- " MET$(I) : NEXT I
NR0=CSRLIN+1
COLOR 10,11:LOCATE 25,20:? " Натискання F10 - вихід у БЕЙСІК ";
COLOR 14,1
800:
SCREEN ,,0,0
802:
LOCATE NR0,1,1 : ?SPACES$(70) : LOCATE NR0,10
COLOR 13 : INPUT "Введіть номер метода = ",Z$ : NM=VAL(Z$) : COLOR 14,1
IF MET$(NM)="" THEN 802
SCREEN ,,1
840:
CLS : LOCATE 2,1 : Z$=""
X$=SPACES$(40-2-LEN(MET$(NM)))/2
? X$ MET$(NM) : ? STRING$(80,"=");
ON NM GOSUB MET1,MET2,MET3,MET4,MET5,MET6,MET7,MET8,MET9,MET10
ON NM-10 GOSUB MET11,MET12,MET13
TRET:
COLOR 10,11:LOCATE 25,2
?" F10-вихід у БЕЙСІК, ПРОБІЛ-повтор обчислення, будь-яка клавіша-вивід методів ";
COLOR 14,1
GOSUB BBO
IF Z$="" THEN 840 ELSE 800
QUIT:
LOCATE 25,20 : ?" Для виходу у БЕЙСІК натисни будь-яку клавішу ! ";
END

ZID:
? : ? TAB(10) " Задайте вихідні дані:"
? TAB(10) "-----"
RETURN

REZ:
? : ? TAB(10) " Результати обліку:"

```

```
? TAB(10) "-----"
RETURN
```

BBO:

```
Z$=INKEY$ : IF LEN(Z$)=0 THEN BBO
RETURN
```

'-----

MET1:

```
' Пошук методом Фібоначчі"
? " В програмі здійснюється пошук відрізка (A,B),
? " що містить точку мінімуму унімодальної
? " функції F(X), за N обчислень функції.
? " Функція F(X) обчислюється у рядку FUNMET1 у вигляді Z=F(X).
? " Необхідні числа Фібоначчі обчислюються тут."
DIM F(40)
GOSUB ZID
INPUT " N = ",N
INPUT " EPS = ",E
INPUT ";" інтервал A,B: A = ",A : INPUT " B = ",B
GOSUB REZ
F(0)=1 : F(1)=1
FOR I=2 TO N : F(I)=F(I-1)+F(I-2) : NEXT I
X1=A : X2=A+((B-A)*F(N-1)+E*(-1)^N)/F(N) : X3=B
X=X2 : GOSUB FUNMET1 : F2=Z
? " Поточний інтервал:"
K=1 : ? " " X1,X3
```

M1290:

```
X4=X1-X2+X3
X=X4 : GOSUB FUNMET1 : F4=Z
IF F4>F2 THEN
  IF X2<X4 THEN X3=X4 ELSE X1=X4
ELSEIF X2<X4 THEN
  X1=X2: X2=X4 : F2=F4
ELSE
  X3=X2: X2=X4 : F2=F4
END IF
? " " X1,X3 : CALL ANROW(24)
K=K+1
IF K<=N THEN M1290
? " Конечний інтервал: " : ? " " X1,X3
? " Значення функції =" F2
ERASE F
RETURN
```

'-----

MET2:

```
DEFDBL A-Z
' Метод золотого перетину
? " В програмі здійснюється пошук відрізка (A,B),
? " що містить точку мінімуму унімодальної
? " функції F(X), за N обчислень функції.
```

```

? " Функція F(X) обчислюється у рядку FUNMET2 в виде Z=F(X)." : ?
GOSUB ZID
? " Задайте інтервал (A,B)"
INPUT ;" A=" ,A : INPUT " B=" ,B
T1=0.3819660113# : T2=1-T1 : FE=0
X0=A : X1=A+T1*(B-A) : X2=A+T2*(B-A) : X3=B
X=X1 : GOSUB FUNMET2 : F1=Z
X=X2 : GOSUB FUNMET2 : F2=Z
GOSUB REZ
? " Поточний інтервал"
M2170:
? X0,X3
CALL anrow(24)
IF F2<F1 THEN M2250
I=X2-X0 : X3=X2 : X2=X1 : X1=X0+T1*I
F2=F1 : X=X1 : GOSUB FUNMET2 : F1=Z : GOTO M2300
M2250:
I=X3-X1 : X0=X1 : X1=X2 : X2=X0+T2*I
F1=F2 : X=X2 : GOSUB FUNMET2 : F2=Z
M2300:
IF I>0.00005 THEN M2170
? : ?" X=" X1, "F(X)="F1
RETURN

'-----
MET3:
' Метод градієнтного спуску
GOSUB ZID
INPUT " Введіть розмірність простору N =", N
DIM X(N),P(N),X1(N)
? " Введіть координати початкової точки X(I):"
CALL BVMASTXT("X",X(),N)
? " Введіть компоненти градієнта f' цільової функції:"
CALL BVMASTXT("f'",P(),N)
INPUT " Введіть початкове значення параметра AL =", AL
INPUT " Введіть значення EPS =", EPS
GOSUB REZ
K=0 : GOSUB FUNMET3 : Y=Z
M31:
GOSUB FUNMET31 : S=0
FOR I=1 TO N : S=S+P(I)^2 : NEXT I
IF S<=EPS THEN M7 ELSE K=K+1
M30:
FOR I=1 TO N : X1(I)=X(I)-AL*P(I) : NEXT I
GOSUB FUNMET3 : Y1=Z
IF Y1<=Y THEN M53 ELSE AL=AL*0.5
GOTO M30
M53:
FOR I=1 TO N : X(I)=X1(I) : NEXT I
Y=Y1 : GOTO M31
M7:
? " Точка мінімуму:"

```

```
CALL MASTXT("X",X(),N)
? " Значення функції ="Y
? " Кількість ітерацій ="K
ERASE X,P,X1
RETURN
```

'-----

МЕТ4:

```
' Метод Хука-Дживса
? " Функція обчислюється у вигляді  $Z=F(X_1,X_2,\dots,X_N)$  у рядку FUNMET"
GOSUB ZID
INPUT " Введіть число змінних N = " , N
DIM X(N),B(N),Y(N),P(N)
?" Введіть початкову точку  $X_1,X_2,\dots,X_N$  : "
CALL BBMASTXT("X",X(),N)
INPUT " Введіть довжину кроку H = " , H
GOSUB REZ
K=H : FE=0
FOR I=1 TO N : Y(I)=X(I) : P(I)=X(I) : B(I)=X(I) : NEXT I
GOSUB FUNMET4 : FI=Z
? " початкове значення функції =" Z
CALL MAS(X(),N)
PS=0 : BS=1
J=1 : FB=FI
```

M4200:

```
X(J)=Y(J)+K
GOSUB FUNMET4
IF Z<FI THEN M4280
X(J)=Y(J)-K
GOSUB FUNMET4
IF Z<FI THEN M4280
X(J)=Y(J) : GOTO M4290
```

M4280:

```
Y(J)=X(J)
```

M4290:

```
GOSUB FUNMET4
FI=Z
? " Досліджуваний пошук" Z : CALL ANROW(24)
CALL MAS(X(),N) : CALL ANROW(24)
IF J=N THEN M4360
J=J+1
GOTO M4200
```

M4360:

```
IF FI<FB-1E-08 THEN M4540
IF PS=1 AND BS=0 THEN M4420
GOTO M4490
```

M4420:

```
FOR I=1 TO N : P(I)=B(I) : Y(I)=B(I) : X(I)=B(I) : NEXT I
GOSUB FUNMET4 : BS=1 : PS=0
FI=Z : FB=Z
? " Заміна базисної точки "Z : CALL ANROW(24)
CALL MAS(X(),N)
J=1 : GOTO M4200
```

M4490:

```
K=K/10
? " Зменшити довжину кроку" : CALL ANROW(24)
IF K<1E-08 THEN M4700
J=1 : GOTO M4200
```

M4540:

```
FOR I=1 TO N : P(I)=2*Y(I)-B(I) : B(I)=Y(I) : X(I)=P(I) : Y(I)=X(I) : NEXT I
GOSUB FUNMET4 : FB=FI : BS=0 : PS=1 : FI=Z
? " Пошук по зразку " Z : CALL ANROW(24)
CALL MAS(X(),N) : CALL ANROW(24)
J=1 : GOTO M4200
```

M4700:

```
CALL ANROW(24-N-3) : ? " Мінімум знайдено у точці:"
CALL MASTXT("X",P(),N)
? " Мінімум функції ="FB
? " Кількість обчислень функції =" FE
ERASE X,B,Y,P
RETURN
```

'-----

MET5:

```
' Симплексний метод Нелдера-Мида"
?:?" Функція обчислюється у вигляді  $Z=F(X_1,X_2,\dots,X_N)$  у рядку FUNMET5"
GOSUB ZID
INPUT " Введіть число змінних N = ", N
DIM S(N+1,N)
DIM X(N),XH(N),XG(N),XL(N),XO(N)
DIM XR(N),XC(N),XE(N),F(N+1)
?" Початкове наближення : "
FOR I=1 TO N : INPUT ;" " S(1,I) : NEXT I : ?
INPUT " Введіть довжину кроку K = ", K
TEV=0
FOR I=2 TO N+1 : FOR J=1 TO N
  IF J=I-1 THEN S(I,J)=S(1,J)+K : GOTO M5360
  S(I,J)=S(1,J)
```

M5360:

```
NEXT J : NEXT I
INPUT " Введіть ALFA = ",AL
INPUT " Введіть BETA = ",BE
INPUT " Введіть GAMMA = ",GA
GOSUB REZ
FOR I=1 TO N+1
  FOR J=1 TO N : X(J)=S(I,J) : NEXT J
  GOSUB FUNMET5 : F(I)=Z
NEXT I
```

M5620:

```
FH=-1E+20 : FL=1E+20
FOR I=1 TO N+1
  IF F(I)>FH THEN FH=F(I) : H=I
  IF F(I)<FL THEN FL=F(I) : L=I
NEXT I
FG=-1E+20
```

```

FOR I=1 TO N+1
  IF I=H THEN M5800
  IF F(I)>FG THEN FG=F(I) : G=I
M5800:
NEXT I
FOR J=1 TO N
  XO(J)=0
  FOR I=1 TO N+1
    IF I=H THEN M5910
    XO(J)=XO(J)+S(I,J)
M5910:
NEXT I
XO(J)=XO(J)/N : XH(J)=S(H,J) : XG(J)=S(G,J) : XL(J)=S(L,J)
NEXT J
FOR J=1 TO N : X(J)=XO(J) : NEXT J
GOSUB FUNMET5
FO=Z ': ?" Обчисліть центр тяжіння у рядку 1120"
FOR J=1 TO N
  XR(J)=XO(J)+AL*(XO(J)-XH(J))
  X(J)=XR(J)
NEXT J
GOSUB FUNMET5: FR=Z ': ?" Виконайте відбиття у рядку M51220 " Z
IF FR<FL THEN M51300
IF FR>FG THEN M51600
GOTO M51520
M51300:
FOR J=1 TO N
  XE(J)=GA*XR(J)+(1-GA)*XO(J)
  X(J)=XE(J)
NEXT J
GOSUB FUNMET5: FE=Z
IF FE<FL THEN M51440
GOTO M51520
M51440:
FOR J=1 TO N : S(H,J)=XE(J) : NEXT J
F(H)=FE ': ?" Виконайте розтяг у рядку M51480 "Z
GOTO M52060
M51520:
FOR J=1 TO N : S(H,J)=XR(J) : NEXT J
F(H)=FR ': ?" Виконайте відбиття у рядку M51560 "
GOTO M52060
M51600:
IF FR>FH THEN M51700
FOR J=1 TO N : XH(J)=XR(J) : NEXT J
F(H)=FR
M51700:
FOR J=1 TO N
  XC(J)=BE*XH(J)+(1-BE)*XO(J)
  X(J)=XC(J)
NEXT J
GOSUB FUNMET5 : FC=Z
IF FC>FH THEN M51920

```



```

FOR J=1 TO N : S(H,J)=XC(J) : NEXT J
F(H)=FC ' : ?" Виконайте стиснення у рядку M51880" Z
GOTO M52060
M51920:
FOR I=1 TO N+1 : FOR J=1 TO N
  S(I,J)=(S(I,J)+XL(J))/2
  X(J)=S(I,J)
NEXT J : GOSUB FUNMET5 : F(I)=Z : NEXT I
M52060:
S1=0 : S2=0
FOR I=1 TO N+1 : S1=S1+F(I) : S2=S2+F(I)*F(I) : NEXT I
SIG=S2-S1*S1/(N+1) : SIG=SIG/(N+1)
IF SIG<1E-10 THEN M52220
GOTO M5620
M52220:
CALL ANROW(24-N-2) : ? " Мінімум знайдено у точці:"
CALL MASTXT("X",XL(),N)
?" Значення мінімуму функції =" F(L)
?" Кількість обчислень функції =" TEV
ERASE S,X,XH,XG,XL,XO,XR,XC,XE,F
RETURN

'-----
MET6:
' Метод найшвидшого спуску
? " Функція Z=F(X1,X2,...,XN) обчислюється у рядку FUNMET61
? " Частинні похідні G(1),G(2),...,G(N) обчислюються у рядку FUNMET62
GOSUB ZID
INPUT " число змінних N = ", N
DIM X(N),Y(N),G(N),D(N),L(4),FF(4)
?" координати початкової точки X(I):"
CALL BVMASXT("X",X(),N)
INPUT " початковий крок = ", L
GOSUB REZ
? " поточні значення"
FOR I=1 TO N : Y(I)=X(I) : NEXT I
GOSUB FUNMET61 : GOSUB FUNMET62 : IF GO<0.000001 THEN M61200
M6340:
FOR I=1 TO N : D(I)=-G(I)/GO : NEXT I
L(1)=0 : FF(1)=Z : ZZ=Z
M6400:
L(3)=L
FOR I=1 TO N : X(I)=Y(I)+L(3)*D(I) : NEXT I
GOSUB FUNMET61 : FF(3)=Z
GOSUB FUNMET62
G2=0
FOR I=1 TO N : G2=G2+G(I)*D(I) : NEXT I
IF FF(3)>=FF(1) OR G2>=0 THEN M6500
L=2*L : GOTO M6400
M6500:
L(2)=L/2540 : FOR I=1 TO N : X(I)=Y(I)+L(2)*D(I) : NEXT I
GOSUB FUNMET61 : FF(2)=Z

```

```

L(4)=L*(FF(2)-0.75*FF(1)-0.25*FF(3))/(2*FF(2)-FF(1)-FF(3))
IF L(4)<0 THEN ?"ВНИМАНИЕ !!!"
FOR I=1 TO N : X(I)=Y(I)+L(4)*D(I) : NEXT I
GOSUB FUNMET61 : FF(4)=Z
M6700:
FOR J=1 TO 3
FOR K=J+1 TO 4
IF FF(J)<=FF(K) THEN M6760
LL=L(J) : L(J)=L(K) : L(K)=LL
FO=FF(J) : FF(J)=FF(K) : FF(K)=FO
M6760:
NEXT K : NEXT J
IF ABS(L(1)-L(2))<0.00005 THEN M61000
S1=SGN(L(2)-L(1)) : S2=SGN(L(3)-L(1))
S3=SGN(L(4)-L(1))
IF S1=S2 AND S1=-S3 THEN L(3)=L(4) : FF(3)=FF(4)
DN=(L(2)-L(3))*FF(1)+(L(3)-L(1))*FF(2)+(L(1)-L(2))*FF(3)
F=(FF(1)-FF(2))/(2*DN)
F=F*(L(2)-L(3))*(L(3)-L(1))
L(4)=(L(1)+L(2))/2+F
FOR I=1 TO N : X(I)=Y(I)+L(4)*D(I) : NEXT I

GOSUB FUNMET61 : FF(4)=Z
GOTO M6700
M61000:
FOR I=1 TO N : X(I)=Y(I)+L(1)*D(I)
Y(I)=X(I) : ? " X" I "=" X(I) : CALL ANROW(24)
NEXT I
GOSUB FUNMET61 : GOSUB FUNMET62
?" F =" Z : ? : CALL ANROW(24)
L(2)=L/2
IF GO>0.00001 THEN M6340
M61200:
CALL ANROW(24-N-1)
CALL MASTXT("X",X(),N)
GOSUB FUNMET61 : ? " Мінімум функції F(X1,X2,...,XN) =" Z
ERASE X,Y,G,D,L,FF
RETURN

'-----
MET7:
' Метод сумісних градієнтів
GOSUB ZID
INPUT " Введіть розмірність простору N = ", N
DIM X(N),P(N)
DIM X7(N),XL(N),XP(N),S7(N),X2(N),X1(N),P1(N)
?" Введіть початкове наближення : "
CALL BVMASHTXT("X",X(),N)
INPUT " Введіть значення EPS = ", EPS
GOSUB REZ
' Алгоритм Флетчера-Ривса
GS=0.6180339

```

```

CALL G7(X(),P())
CALL F7(X(),Y)
K=0 : PN=0
FOR J=1 TO N : PN=PN+P(J)^2 : S7(J)=-P(J) : NEXT J
M71000:
FOR J=1 TO N : X1(J)=X(J)+S7(J) : NEXT J
CALL F7(X1(),Y1)
IF Y1>Y THEN B=1 : GOTO M7302
M74:
FOR J=1 TO N : X2(J)=X1(J)+S7(J) : NEXT J
CALL F7(X2(),Y2)
IF Y2=>Y1 THEN B=2 : GOTO M7302
FOR J=1 TO N : X(J)=X1(J) : X1(J)=X2(J) : NEXT J
Y=Y1 : Y1=Y2
GOTO M74
M7302:
A=0 : AP=B*GS : AL=B-AP
FOR J=1 TO N : XP(J)=X(J)+AP*S7(J) : XL(J)=X(J)+AL*S7(J) : NEXT J
CALL F7(XP(),YP)
CALL F7(XL(),YL)
M730:
IF YP<YL THEN M710
B=AP : AP=AL : YP=YL : AL=B-(B-A)*GS
FOR J=1 TO N : XL(J)=X(J)+AL*S7(J) : NEXT J
CALL F7(XL(),YL)
GOTO M720
M710:
A=AL : AL=AP : YL=YP : AP=A+(B-A)*GS
FOR J=1 TO N : XP(J)=X(J)+AP*S7(J) : NEXT J
CALL F7(XP(),YP)
M720:
SP=0
FOR J=1 TO N : SP=SP+S7(J)^2 : NEXT J
SPA=SP*(B-A)
IF SPA>EPS THEN M730
XO=0.5*(A+B)
FOR J=1 TO N : X1(J)=X(J)+XO*S7(J) : NEXT J
CALL G7(X1(),P1())
SN=0
FOR J=1 TO N : SN=SN+(X1(J)-X(J))^2 : NEXT J
IF SN<EPS THEN M7500
PN1=0
FOR J=1 TO N : PN1=PN1+P1(J)^2 : NEXT J
SP=0
FOR J=1 TO N : SP=SP+P1(J)*(P1(J)-P(J)) : NEXT J
K=K+1 : IND=K-(K/N)*N
BET=SP/PN
IF IND=0 THEN BET=0
PN=PN1
FOR J=1 TO N
S7(J)=-P1(J)+BET*S7(J) : X(J)=X1(J) : P(J)=P1(J)
NEXT J

```

```

GOTO M71000
M7500:
FOR J=1 TO N : X(J)=X1(J) : NEXT J
?" Точка мінімуму:"
CALL MASTXT("X",X(),N)
?" Кількість ітерацій ="K
ERASE X,P,X7,XL,XP,S7,X2,X1,P1
RETURN

'-----
MET8:
' Метод Хука-Дживса при наявності обмежень
?" Функція обчислюється у вигляді  $Z=F(X1,X2,\dots,XN)$  у рядку FUNMET8
GOSUB ZID
INPUT " Введіть число змінних N = ", N
DIM X(N),B(N),Y(N),P(N)
?" Введіть початкову точку X1,X2,...,XN : "
CALL BVMASHTXT("X",X(),N)
INPUT " Введіть довжину кроку H = ", H
GOSUB REZ
K=H : FE=0
FOR I=1 TO N : Y(I)=X(I) : P(I)=X(I) : B(I)=X(I) : NEXT I
GOSUB FUNMET8 : FI=Z
?" Початкове значення функції =" Z
?" " ; : FOR I=1 TO N : ? X(I) " " ; : NEXT I : ?
PS=0 : BS=1
J=1 : FB=FI
M8200:
X(J)=Y(J)+K
GOSUB FUNMET8
IF Z<FI THEN M8280
X(J)=Y(J)-K
GOSUB FUNMET8
IF Z<FI THEN M8280
X(J)=Y(J) : GOTO M8290
M8280:
Y(J)=X(J)
M8290:
GOSUB FUNMET8
FI=Z
CALL ANROW(22)
?" Пробний крок " Z
?" " ; : FOR I=1 TO N : ? X(I) " " ; : NEXT I : ? : CALL ANROW(24)
IF J=N THEN M8360
J=J+1
GOTO M8200
M8360:
IF FI<FB-1E-08 THEN M8540
IF PS=1 AND BS=0 THEN M8420
GOTO M8490
M8420:
FOR I=1 TO N : P(I)=B(I) : Y(I)=B(I) : X(I)=B(I) : NEXT I

```

```

GOSUB FUNMET8 : BS=1 : PS=0
FI=Z : FB=Z
? " Заміна базисної точки "Z
? " "; : CALL MAS(X(),N)
J=1 : GOTO M8200
M8490:
K=K/10
? " Зменшити довжину кроку"
IF K<1E-08 THEN M8700
J=1 : GOTO M8200
M8540:
FOR I=1 TO N
P(I)=2*Y(I)-B(I) : B(I)=Y(I) : X(I)=P(I) : Y(I)=X(I)
NEXT I
GOSUB FUNMET8 : FB=FI : BS=0 : PS=1 : FI=Z
? " Пошук по зразку " Z
? " "; : CALL MAS(X(),N)
J=1 : GOTO M8200
M8700:
? " Мінімум знайдено"
CALL MASTXT(" X",P(),N)
? " Мінімум функції = "FB
? " Кількість обчислень функції = " FE
ERASE X,B,Y,P
RETURN

'-----
MET9:
RESTORE DMET9
' Комплексний метод
? " Функція Z=F(X1,X2,...,XN) обчислюється у рядку FUNMET9
? " Обчислення значень G1,G2,...,GN у рядку FUNMET91
GOSUB ZID
INPUT " Введіть число змінних N = ", N
INPUT " Введіть число обмежень M = ", M
K=2*N : PP=0
DIM X(N),Y(N),L(N),U(N),XC(N),XO(N),XR(N),XH(N)
DIM C(K,N),F(K),G(M),IC(M),EC(K)
?" Введіть початкові значення : "
CALL VBMASTXT("X",X(),N)
FOR J=1 TO N : C(1,J)=X(J) : XC(J)=X(J) : NEXT J
'Прочитати значення нижніх та верхніх меж
FOR J=1 TO N : READ L(J),U(J) : NEXT J
?" Масив значень нижніх меж : "
?" L(I) : "; : CALL MAS(L(),N)
?" Масив значень верхніх меж : "
?" U(I) : "; : CALL MAS(U(),N)
INPUT " Введіть X = ",X
GOSUB REZ
I=1
GOSUB FUNMET9 : F(1)=Z
M9600:

```

```

I=I+1
FOR J=1 TO N : C(I,J)=L(J)+RND(X)*(U(J)-L(J)) : X(J)=C(I,J) : NEXT J
M9640:
IM=1 : GOSUB FUNMET91
IF IC=1 THEN M9720
FOR J=1 TO N : XC(J)=((I-1)*XC(J)+C(I,J))/I : NEXT J
GOTO M9760
M9720:
FOR J=1 TO N : C(I,J)=(C(I,J)+XC(J))/2 : X(J)=C(I,J) : NEXT J
GOTO M9640
M9760:
GOSUB FUNMET9 : F(I)=Z
IF I<K THEN M9600
FOR J=1 TO K-1
FOR I=J+1 TO K
IF F(J)<=F(I) THEN M9900
F=F(J) : F(J)=F(I) : F(I)=F
FOR L=1 TO N : Y(L)=C(J,L) : C(J,L)=C(I,L) : C(I,L)=Y(L) : NEXT L
M9900:
NEXT I : NEXT J
FM=F(1)
CALL ANROW(24-2-N) : ? " Перша точка"
? " Мінімальне значення =" F(1)
? " Мінімальна точка : "
FOR L=1 TO N : ? " X" L " =" C(1,L) : NEXT L : ?
A=1.3
M91190:
FOR L=1 TO N : XH(L)=C(K,L) : XO(L)=(K*XC(L)-XH(L))/(K-1) : NEXT L
FOR L=1 TO N : XR(L)=(1+A)*XO(L)-A*XH(L) : X(L)=XR(L) : NEXT L
M91500:
IM=0
GOSUB FUNMET91
IF EC=0 AND IC=0 THEN M91800
M91600:
IF EC=0 THEN M91800
FOR J=1 TO N
IF EC(J)=1 THEN XR(J)=L(J)+0.00001 : X(J)=XR(J)
IF EC(J+N)=1 THEN XR(J)=U(J)-0.00001 : X(J)=XR(J)
NEXT J
M91800:
IF IC=0 THEN
GOSUB FUNMET9 : FR=Z
IF FR<F(K) THEN M92410
END IF
FOR L=1 TO N : XR(L)=(XR(L)+XO(L))/2 : X(L)=XR(L) : NEXT L
GOTO M91500
M92410:
F(K)=FR
FOR L=1 TO N
XC(L)=(K*XC(L)-C(K,L)+XR(L))/K : C(K,L)=XR(L)
NEXT L
FOR J=1 TO K-1 : FOR I=J+1 TO K

```

```

    IF F(J)<=F(I) THEN M92600
    F=F(J) : F(J)=F(I) : F(I)=F
    FOR L=1 TO N : Y(L)=C(J,L) : C(J,L)=C(I,L) : C(I,L)=Y(L) : NEXT L
M92600:
    NEXT I : NEXT J
    IF F(1)<FM THEN PP=1
    IF PP=0 THEN M91190
    S1=0 : S2=0
    FOR I=1 TO K : S1=S1+F(I) : S2=S2+F(I)*F(I) : NEXT I
    SD=(S2-S1*S1/K)/K
    DM=0
    FOR I=1 TO K-1 : FOR J=I+1 TO K
        D=0
        FOR L=1 TO N : D=D+(C(I,L)-C(J,L))^2 : NEXT L
        D=SQR(D)
        IF D>DM THEN DM=D
    NEXT J : NEXT I
    IF PP=0 THEN M93800
    CALL ANROW(24-3-N) : ? " Нова точка у рядку M93500"
    ? " Мінімальне значення =" F(1)
    ? " Точка мінімуму :"
    FOR L=1 TO N : ? " X" L "=" C(1,L) : NEXT L : ?
    FM=F(1) : PP=0

```

```

M93800:
    IF SD>0.000001 AND DM>0.0001 THEN M91190
    CALL ANROW(24-3-N) : ? " Мінімум знайдено" : ? " Точка мінімуму :"
    FOR I=1 TO N : ? " X" I "=" C(1,I) : NEXT I
    ? " Мінімум функції =" F(1)
    ? " Кількість обчислень функції =" FE
    ERASE X,Y,L,U,XC,XO,XR,XH,C,F,G,IC,EC
    RETURN

```

'-----
MET10:

```

    GOSUB ZID
    ? " Симплексний метод :"
    ? " 1 - для лінійної функції"
    ? " 2 - для дрібно-раціональної функції"
    ? " Введіть вид функції ( 1 або 2 ) : ";
    INPUT ,NF
    IF NF=2 THEN RESTORE DMET10D ELSE RESTORE DMET10L
    INPUT " Введіть число невідомих N = ", N
    INPUT " Введіть число обмежень M = ", M
    DIM D(M),X(N),A(N+1,M+1)
    INPUT " Введіть кількість рівностей L = ", L
    ? " Матриця обмежень та коефіцієнтів функціонала,"
    ? " записана по рядкам:";
    CALL MAS2(A(),N,M)
    GOSUB REZ
    LL=0
    FOR I=1 TO M-1 : IF I<=L THEN D(I)=-1 ELSE D(I)=0 : NEXT I

```

```

FOR J=1 TO N-1 : X(J)=J : NEXT J
IF NF=2 THEN DLIN
LIN:
'----- для лінійної функції
M1:
  FOR I=1 TO M-1
    IF D(I)<0 THEN U=-1 : GOTO M3
  NEXT I
  LL=1
M2:
  FOR I=1 TO M-1
    IF A(I,N)<0 THEN U=1 : GOTO M3
  NEXT I
  LL=2
  GOTO M5
M3:
  FOR K=1 TO N-1
    IF U*A(I,K)<0 THEN M4
  NEXT K
  ?" Задача не має єдиного рішення"
  GOTO КОН10
M4:
  C=10^11
  FOR I=1 TO M-1
    F=A(I,K) : IF F=0 THEN G ELSE B=A(I,N)/F
    IF B>=0 THEN
      IF B=0 THEN
        IF F*A(I,N)<0 THEN G
      END IF
      IF B<=C THEN C=B : R=I
    END IF
  G:
  NEXT I
  V=A(R,K)
  FOR I=1 TO M
    P=A(I,K)
    FOR J=1 TO N
      IF J=K THEN
        IF D(R)<0 THEN
          A(I,K)=0
        ELSE
          IF I=R THEN A(I,K)=1/V ELSE A(I,K)=-P/V
        END IF
      ELSE
        IF I<R THEN
          A(I,J)=A(I,J)-P/V*A(R,J)
        ELSE
          IF I=R THEN A(I,J)=A(R,J)/V ELSE A(I,J)=A(I,J)-P*A(R,J)
        END IF
      END IF
    NEXT J
  NEXT I
  NEXT I

```



```

Y=X(K) : X(K)=D(R) : D(R)=Y
IF LL=1 THEN M2
IF LL=0 THEN M1
M5:
T=A(M,1) : K=1
FOR J=2 TO N-1
  IF A(M,J)<T THEN T=A(M,J) : K=J
NEXT J
IF T<0 THEN M6
?" Значення не нульових невідомих : "
FOR I=1 TO M-1
  IF D(I)>0 THEN ?" X"D(I)"="A(I,N)
NEXT I
?" Екстремальне значення функціонала Z =" A(M,N)
GOTO КОН10
M6:
FOR I=1 TO M-1
  IF A(I,K)>0 THEN M4
NEXT I
?" Необмежене рішення"
GOTO КОН10
DLIN:
'----- для дрібно-раціональної функції
MD1:
FOR I=1 TO M-1
  IF D(I)<0 THEN U=-1 : GOTO MD3
NEXT I
LL=1
MD2:
FOR I=1 TO M-1
  IF A(I,N)<0 THEN U=1 : GOTO MD3
NEXT I
LL=2 : GOTO MD5
MD3:
FOR K=1 TO N-1
  IF U*A(I,K)<0 THEN MD4
NEXT K
? " Задача не має рішень"
GOTO КОН10
MD4:
C=10^11
FOR I=1 TO M-1 : F=A(I,K)
  IF F=0 THEN GD
  B=A(I,N)/F
  IF B>=0 THEN
    IF B=0 THEN
      IF F*A(I,N)<0 THEN GD
    END IF
    IF B<=C THEN C=B : R=I
  END IF
GD:
NEXT I

```

```

V=A(R,K)
FOR I=1 TO M
  P=A(I,K)
  FOR J=1 TO N
    IF J=K THEN
      IF D(R)<0 THEN
        A(I,K)=0
      ELSE
        IF I=R THEN A(I,K)=1/V ELSE A(I,K)=-P/V
      END IF
    ELSE
      IF I<R THEN
        A(I,J)=A(I,J)-P/V*A(R,J)
      ELSE
        IF I=R THEN A(I,J)=A(R,J)/V ELSE A(I,J)=A(I,J)-P*A(R,J)
      END IF
    END IF
  NEXT J
NEXT I
Y=X(K) : X(K)=D(R) : D(R)=Y
IF LL=1 THEN MD2
IF LL=0 THEN MD1
MD5:
  T=10^13
  FOR J=1 TO N-1
    FF=A(M,J)*A(M-1,N)-A(M-1,J)*A(M,N)
    IF FF<T THEN T=FF : K=J
  NEXT J
  IF T<0 THEN MD6
  ?" Значення ненульових невідомих :"  

  FOR I=1 TO M-1
    IF D(I)>0 THEN
      ?"  X""(" MID$(STR$(D(I)),2) ")=" A(I,N)
    END IF
  NEXT I
  ?" Екстремальне значення функціонала Z =" A(M,N)/A(M-1,N)
  GOTO KOH10
MD6:
  FOR I=1 TO M-1
    IF A(I,K)>0 THEN MD4
  NEXT I
  ?" Необмежене рішення"  

KOH10:
  ERASE D,X,A
  RETURN

'-----
MET11:
  RESTORE DMET11
  ' Метод випадкового пошуку
  ? " Функція обчислюється у вигляді F(X1,X2,...,XN) у рядку FUNMET11"
  GOSUB ZID

```

```

INPUT " Введіть кількість невідомих N = " , N
DIM A11(N),B(N)
DIM ST(N),EPS(N),X(N),XO(N)
INPUT " Введіть кількість невдалих кроків T1 = " , T1
INPUT " Введіть показник точності обчислень N1 = " , N1
INPUT " Введіть нижню (верхню) межу на функціонал D = " , D
? " Введіть для обчислення максимуму - 0, мінімуму - 1 : ";
GOSUB BBO : IF Z$="0" THEN PP=0 ELSE PP=1
? PP
CALL SREAD(A11(),N)
CALL SREAD(B(),N)
?" Масив нижніх меж пошуку : "
?" A(I) :"; : CALL MAS(A11(),N)
?" Масив верхніх меж пошуку : "
?" B(I) :"; : CALL MAS(B(),N)
GOSUB REZ
P=5087 : G=2900 : T=0
FOR I=1 TO N
  X(I)=(B(I)+A11(I))/2 : XO(I)=X(I) : EPS(I)=(B(I)-A11(I))/2^N1
  ST(I)=(B(I)-A11(I))/4
NEXT I
CALL FUNMET11(X(),YO)
? " Початкове значення функціонала"
? " YO =" YO
? " Координати початкового вектору : "
? " XO ="; : CALL MAS(XO(),N)
H=1 : V=SQR(10) : W=2/V : GG=SQR(3)
? " Проміжні вдалі значення функціонала : "
L:
  FOR I=1 TO N
M11:
  S=0 : R=G*H : AA=R/P : TRUN=FNTRUNC(AA)
  S=S+ABS(AA-TRUN) : K=R-P*TRUN : H=K
  FOR J=2 TO 10
    R=K*H : AA=R/P : TRUN=FNTRUNC(AA)
    S=S+ABS(AA-TRUN) : K=R-P*TRUN
  NEXT J
  X(I)=XO(I)+ST(I)*(W*S-V)*GG
  IF X(I)>B(I) THEN L
  IF X(I)>=A11(I) THEN
    IF I>=N THEN L1 ELSE I=I+1 : GOTO M11
  END IF
NEXT I
L1:
CALL FUNMET11(X(),Y)
IF PP=1 THEN
  IF Y<D THEN L3
  IF Y<YO THEN MMM ELSE LLL
ELSE
  IF Y>D THEN L3
  IF Y>YO THEN MMM ELSE LLL
END IF

```

MMM:

```
FOR I=1 TO N : XO(I)=X(I) : NEXT I
YO=Y : ? " Y =" YO : CALL ANROW(24) : GOTO L
```

LLL:

```
FOR I=1 TO N
IF ST(I)>EPS(I) THEN L2
NEXT I
GOTO L3
```

L2:

```
T=T+1 : IF T<=T1 THEN L
FOR I=1 TO N : ST(I)=ST(I)/2 : NEXT I
T=0 : GOTO L
```

L3:

```
CALL ANROW(24-2-2*N)
IF PP=1 THEN ? " Мінімальне значення функціонала Ymin =" YO
IF PP=0 THEN ? " Максимальне значення функціонала Ymax =" YO
? " Оптимальний вектор : "
CALL MASTXT("XO",XO(),N)
? " Масив кроків у останній ітерації : "
CALL MASTXT("ST",ST(),N)
ERASE A11,B,ST,EPS,X,XO
RETURN
```

'-----

MET12:

```
RESTORE DMET12
' Метод вектору спаду (загального вигляду)
GOSUB ZID
INPUT " Введіть режим рахування PR = ", PR
INPUT " Введіть кількість змінних N = ", N
INPUT " Введіть кількість рівностей M = ", M
INPUT " Введіть кількість нерівностей Q = ", Q
INPUT " Введіть радіус околиці R = ", R
INPUT " Введіть A = min(R,N) A = ", A
INPUT " Введіть число сполучень з N по A = ", C
DIM X(N),Y(N),B(M),D(N),C1(N),A1(Q,N),W1(A,C),W2(A,C)
CALL SREAD(Y(),N)
? " Початкове наближення : "
? " Y(I) :"; : CALL MAS(Y(),N)
CALL SREAD(C1(),N)
? " Коефіцієнти цільової функції : "
? " C(I) :"; : CALL MAS(C1(),N)
CALL SREAD(B1(),Q)
? " Масив правих частин обмежень : "
? " B(I) :"; : CALL MAS(B1(),Q)
? " Масив коефіцієнтів у обмеженнях A(Q,N) :";
```

GOSUB BBO

```
CALL MAS2(A1(),Q,N)
GOSUB REZ
H=0 : L=0
```

L4:

```
FOR I=1 TO A : W1(I,1)=I : NEXT I
```

```

FOR K=1 TO C
  W2(1,K)=1
  FOR I=2 TO A : W2(I,K)=0 : NEXT I
M312:
  SUM1=0 : FOR I=1 TO A : SUM1=SUM1+ABS(W2(I,K)) : NEXT I
  B=SUM1
  IF B<=R THEN
ML:
  FOR I=1 TO A
    IF Y(W1(I,K))<-W2(I,K) THEN M12
  NEXT I
  FOR J=1 TO M
    SUM2=0
    FOR I=1 TO A : SUM2=SUM2+A1(J,W1(I,K))*W2(I,K) : NEXT I
    IF SUM2<>0 THEN M12
  NEXT J
  FOR J=M+1 TO Q
    SUM3=0
    FOR I=1 TO N : SUM3=SUM3+A1(J,I)*Y(I) : NEXT I
    SUM4=0
    FOR I=1 TO A : SUM4=SUM4+A1(J,W1(I,K))*W2(I,K) : NEXT I
    IF SUM3+SUM4>B1(J) THEN M12
  NEXT J
  IF H=0 AND L=0 THEN L=L+1
  SUM5=0
  FOR I=1 TO A : SUM5=SUM5+C1(W1(I,K))*W2(I,K) : NEXT I
  IF PR=0 THEN
    IF SUM5<0 THEN MM12 ELSE M12
  ELSE
    IF SUM5>0 THEN MM12 ELSE M12
  END IF
MM12:
  FOR I=1 TO A : Y(W1(I,K))=Y(W1(I,K))+W2(I,K) : NEXT I
  H=H+1 : GOTO L4
ELSE
  GOTO L6
END IF
M12:
  IF ABS(W2(A,K))<R THEN
L6:
  FOR I=A TO 2 STEP -1 : J=1
M22:

  IF J>I-1 THEN M712
  IF W2(J,K)=-R THEN J=J+1 : GOTO M22
  IF W2(I,K)>0 THEN
    W2(I,K)=-W2(I,K)
  ELSE
    IF W2(I,K)=-R THEN W2(I,K)=0 ELSE W2(I,K)=-W2(I,K)+1
  END IF
M712:
  NEXT I

```

```

IF W2(1,K)>0 THEN
  W2(1,K)=-W2(1,K)
ELSE
  IF W2(1,K)=-R THEN W2(1,K)=0 ELSE W2(1,K)=-W2(1,K)+1
END IF
GOTO M312
END IF
IF W2(A,K)=R THEN W2(A,K)=-R : GOTO ML
IF A>=N THEN M612

IF W1(A,K)<N THEN
  W1(A,K+1)=W1(A,K)+1
  FOR I=1 TO A-1 : W1(I,K+1)=W1(I,K) : NEXT I
  GOTO M412
ELSE
  FOR I=1 TO A-1
    IF W1(A-I,K)=W1(A-I+1,K)-1 THEN M512
    IF W1(A-I,K)=W1(A-I+1,K)-2 THEN
      W1(A-I,K+1)=W1(A-I,K)+1
      FOR J=1 TO A-I-1 : W1(J,K+1)=W1(J,K) : NEXT J
      FOR J=A-I+1 TO A : W1(J,K+1)=W1(J,K) : NEXT J
      GOTO M412
    ELSE
      W1(A-I,K+1)=W1(A-I,K)+1

      FOR J=A-I TO A-1 : W1(I+1,K+1)=W1(I,K+1)+1 : NEXT J
      FOR J=1 TO A-I-1 : W1(J,K+1)=W1(J,K) : NEXT J
      GOTO M412
    END IF
  END IF
M512:
  NEXT I
END IF
M612:
  IF H>0 AND L=0 THEN ?"Вибрати друге початкове наближення"
  GOTO L5
M412:
  NEXT K
L5:
  ? " Вектор рішення : "
  ? "Y= "; : CALL MAS(Y(),N)
  IF PR=0 THEN ? " Мінімальне "; ELSE ? " Максимальне "
  ?"значення функції ";
  SS=0 : FOR I=1 TO N : SS=SS+C1(I)*Y(I) : NEXT I
  ? " F =" SS
  ? " Кількість кроків "
  ? " H =" H
  ERASE X,Y,B,D,C1,A1,W1,W2
  RETURN

```

'-----

MET13:

' Метод вектору спаду

```

' (лінійна цільова функція з булевими змінними)
GOSUB ZID
INPUT " Введіть режим підрахунку PR = ", PR
IF PR=0 THEN RESTORE DMET13MIN ELSE RESTORE DMET13MAX
INPUT " Введіть кількість змінних N = ", N
INPUT " Введіть кількість рівностей L = ", LL
INPUT " Введіть кількість нерівностей M = ", M
INPUT " Введіть радіус околиці R = ", R
DIM X(N),B(M),D(N),C1(N),A1(M,N)
CALL SREAD(X(),N)
CALL SREAD(C1(),N)
CALL SREAD(B(),M)
?" Початкове наближення : "
?" X(I) :"; : CALL MAS(X(),N)
?" Коефіцієнти цільової функції : "
?" C1(I) :"; : CALL MAS(C1(),N)
?" Масив правих частин обмежень : "
?" B(I) :"; : CALL MAS(B(),M)
?" Масив коефіцієнтів у обмеженнях A(I,J) :";
CALL MAS2(A1(),M,N)
GOSUB REZ
H=1 : L=0
P1:
  A=1
P2:
  FOR I=1 TO A : D(I)=I : NEXT I : K=1
P3:
  FOR J=1 TO M : Z=0
  FOR I=1 TO A
    IF X(D(I))=0 THEN Z=Z+A1(J,D(I)) ELSE Z=Z-A1(J,D(I))
    IF J<=LL THEN
      IF Z=0 THEN P ELSE P4
    END IF
  NEXT I
  SUM1=0
  FOR I=1 TO N : SUM1=SUM1+A1(J,I)*X(I) : NEXT I
  IF Z>B(J)-SUM1 THEN P4
P:
  NEXT J
  IF H=1 THEN L=L+1
  Z=0
  FOR I=1 TO A
    IF X(D(I))=0 THEN Z=Z+C1(D(I)) ELSE Z=Z-C1(D(I))
    IF PR=0 THEN
      IF Z<0 THEN MM ELSE P4
    ELSE
      IF Z>0 THEN MM ELSE P4
    END IF
  NEXT I
MM:
  FOR I=1 TO A
    IF X(D(I))=1 THEN X(D(I))=0 ELSE X(D(I))=1

```

```

NEXT I
H=H+1 : GOTO P1
P4:
IF A<N THEN
  IF D(A)<N THEN D(A)=D(A)+1 : GOTO P6
  FOR I=1 TO A-1
    IF D(A-I)=D(-I+1)-1 THEN P5
    IF D(A-I)=D(A-I+1)-2 THEN D(A-I)=D(A-I)+1 : GOTO P6
    D(A-I)=D(A-I)+1
    FOR J=A-I TO A-1 : D(J+1)=D(J)+1 : NEXT J
  GOTO P6
P5:
NEXT I
IF A<R THEN A=A+1 : GOTO P2
GOTO P7
P6:
PR1=1
FOR Y=1 TO A : PR1=PR1*N-(Y-1) : NEXT Y
PR2=1
FOR Y=1 TO A : PR2=PR2*Y : NEXT Y
C=PR1/PR2
IF K<C THEN K=K+1 : GOTO P3
P7:
IF H>1 THEN P8
IF L=0 THEN ? " Вибрати інше поч. наближення"
P8:
END IF
? " Вектор рішення : "
?" X = :"; : CALL MAS(X(),N)
SSS=0 : FOR I=1 TO N : SSS=SSS+C1(I)*X(I) : NEXT I
IF PR=0 THEN ? " Мінімальне"; ELSE ? " Максимальне";
?" значення функції F =" SSS
? " Кількість кроків H =" H
ERASE D,X,B,A1,C1
RETURN

'-----
sub anrow(n)
  row=csrlin
  if row<n then exit sub
  LOCATE 25,10 : ? " Натисніть будь-яку клавішу для продовження виводу ";
  GOSUB BBO : CLS
end sub

SUB MAS(X(1),N)
  FOR I=1 TO N : ? " " X(I); : NEXT I : ?
END SUB

SUB MASTXT(TXT$,X(1),N)
  FOR I=1 TO N
    ? " " TXT$ "(" MID$(STR$(I),2) ")"=" X(I)

```



```
NEXT I  
END SUB
```

```
SUB BBMASTXT(TXT$,X(1),N)  
  FOR I=1 TO N  
    ? "   " TXT$ "(" MID$(STR$(I),2) ")="; : INPUT ,X(I)  
  NEXT I  
END SUB
```

```
SUB SREAD(X(1),N)  
  FOR I=1 TO N : READ X(I) : NEXT I  
END SUB
```

```
SUB MAS2(A(2),N,M)  
  FOR I=1 TO N : ? : FOR J=1 TO M  
    READ A(I,J) : ?"   " A(I,J);  
  NEXT J : NEXT I : ?  
END SUB
```

```
'-----  
'Кінець файла PP5.BAS
```

ДОДАТОК Д

Програмне забезпечення для чисельного розв'язку на ПК задач реалізації заданих розподілених термовпливів вздовж поверхонь оптичних елементів за допомогою системи нерухомих одиничних електронних променів

ОСНОВНА ПРОГРАМА «PROG»

```

OS  EC  FORTRAN  ST 56.02.79
      DIMENSION X(10),I (10),C(10),D(10),E(10),V (10,10)
      INTEGER W,Q,Q1,Q2,Q3,DEL
      REAL M
      N1=1
      W=0
      DEL=1
      X< 1)=20.00
      X(2)=0.00
      X(3)=0.000
      DO 2 K=1,N1
      DO 2 J=1,N1
      V(K,J)=0.0
      IF(K.EQ.J) V(K,J)=1,
2  CONTINUE
      CALL MODEL(X,Y1,N1) DO 3 K=1,N1
3  F(K) = 1
4  DO 4 K=1,N1 D(K)=0
5  C(K)=2,
6  l=1 f
8  DO 7 K=1,N1
7  X(K)=X(K)+E(I)+V(K,I) CALL MODEL(X,Y,N1),
      DEL=DEL+1
      PRINT28,DEL
28  FORMAT(2X,DEL=.15)
      IF(Y.Y1).GT.0) GO TO 10 D(I)=D(I)+F(I) E(I) = 3.*E(I) Y1=Y
      IF(CC I).GT.1.5) C< I) = 1. GO TO 12
10  DO 9 K=1,N1
9  X(K)=X(K).E(I)*V(K,I) E(I) = .0.5*E(I)
      IF (C(I). LT.1.5) C(I)=0
12  DO 11 K=1.N1.
      IF (C(K).GE..5) GO TO 14
11  CONTINUE
      DO 13 K=1.N1 DO 13 J=1,N1 V(K,J)=D(J)*V(K,J) Ql=l+J
      DO 13 Q=Q1*N,1
13  V(K,J)^V<K*J)+D(Q)*V(K,Q)
      DO 15 K=1,N1

```

```

Q2=J.1
DO 17 Q=1,Q2 TT(Q)=0.
DO 17 K=1,N1
17 TT(Q)=TT(Q)+V(K,J)*V(K,Q)
M=0.
Q3=J.1
DO 19 K=1,N1
DO 21 Q=1,Q3
21 V(K,J)=V(K,J).TT(Q)*V(K,Q)
19 M=M+V(K,J)*V(K,J)
M=SOPT(M)
DO 15 K=1,N1
15 V(K,J)=V(K,J)VM
PRINT 23, Y1
23 FORMAT(/2X,'Y1=',E20.8)
DO 32 L=1,N1
32 PRINT25,L,X(L),W
25 FORMAT(/2X,*X(*,*2,*)=*,E15,8,'W=1,13)
GO TO 4
14 IF (I.EQ.N1) GO TO 16
I=I + 1
GO TO 8
16 W=W+1
IF (W.EQ.100*N1) GO TO 18
GO TO 6
18 STOP
END

```

ПІДПРОГРАМА "PROGO"

```

OC EC FORTPAN ST 56.02.79
SUBROUTINE MODEL(X,ETAI,N1)
DIMENSION S(50),Y2(1001),X(N1),R0(50) N=6
M1=1000
CO=0.0
Z=SQPT(1./0.08)
Z1=0.04
C1=1.0C2=0.0
S1=1./N
H=1.0/M1
R1=SQRT(2*3.14159265)
R9=S1/2.
10 ETAI=0.0
M20=M1*1
DO 20 I=1,M20
20 Y2(I) = 0.0
DO 40 I=1,M20

```

```
X1=H*(1.1)
R6=SQRT(X1)
DO 30 J=1,N
RO(J)=RO+(J.1)*S1
R7=(X1.R0(J))**2
S(J)=X(1)
R8=2.*S(J)**2
R2=R7/R8
R3=EXP(-R2)
Y3=1./(R1*S(J))*R3
Y2(I)=Y2(I)*Y3
30 CONTINUE
R5=1
40 ETAI=ETAI+(Y2(I).R5)**2
DEL=DEL+1
PRINT 50,ETAI
50 FORMAT(/2X,*ETAI=*,F20,8)
DO 60 I=1,N1
60 PRINT 70,I,X(I)
70 FORMAT(/X,'X(',12,M = ',F20,8)
PRINT80,(R0(I),S(I),I=1,N)
80 FORMAT(2X,'ЦЕНТР ІМПУЛЬСУ R0(I) СИГМА ІМПУЛЬСУ' /
(F20.8,2X,F20.8))
RETURN
END
```

ДОДАТОК Е

Документація про наукову значимість, практичне використання та впровадження основних результатів роботи

ЗАТВЕРДЖУЮ
 Директор-Головний конструктор
 КП СПБ «Арсенал», д.т.н.
М.І. Лихоліз
 19.04. 2017р.



Акт використання

результатів дисертаційної роботи
 «Закономірності впливу електронно-променевої технології на експлуатаційні
 характеристики оптичних елементів»
 Яценко Ірини В'ячеславівни,
 представленої на здобуття наукового ступеню доктора технічних наук за
 спеціальністю 05.11.07 «Оптичні прилади і системи»

Дисертаційна робота Яценко І.В. вирішує актуальну проблему підвищення функціональних характеристик прецизійних оптичних деталей приладів військового призначення. Розроблена нова технологія та обладнання для обробки рухомим електронним променем поверхні об'єктивів голівок самонаведення (ГСН) ракет «повітря-повітря», які працюють в діапазоні інфрачервоного випромінювання. Автором запропоновано ефективний метод поверхневої обробки оптичних матеріалів рухомим електронним променем, який дозволяє модифікувати поверхневі шари оптичних елементів, позитивно змінюючи їх фізико-механічні властивості.

Використання результатів досліджень дозволило на експериментальних зразках із оптичної кераміки КО-1, КО-12 зменшити площі дефектів, залишкових мікронерівностей на поверхні та порушений від механічного полірування приповерхневий шар, підвищити в 2-3 рази їх мікротвердість та, відповідно, механічну міцність. Це дозволило збільшити стійкість елементів до зовнішніх теплових та механічних навантажень при експлуатації ГСН.

В роботі Яценко І.В. вперше встановлено, що фінішна електронно-променева обробка оптичних елементів з оптичного скла призводить до зменшення коефіцієнта світлорозсіювання їх поверхонь і до збільшення коефіцієнта пропускання в широкому діапазоні оптичного випромінювання.

Результати дисертаційної роботи Яценко І.В. дозволять створити конструкторсько-технологічні засади, які будуть використані КП СПБ у перспективних розробках.

Заст. начальника НВТК-5, к.т.н.

В.М. Тягур
 В.М. Тягур

Секретар Вченої ради
 КП СПБ «Арсенал», к.ф.м.н.

О.І. Клочко
 О.І. Клочко



НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ
НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ФІЗИКИ
НАПІВПРОВІДНИКІВ
ІМЕНІ В.С. ЛАШКАРЬОВА
03028, Київ - 28, пр.Науки, 41
тел.: (044) 525-40-20, факс: (044) 525-83-42
E-mail: info@isp.kiev.ua
<http://www.isp.kiev.ua>
Код ЄДРПОУ 05416952

THE NATIONAL ACADEMY OF
SCIENCES OF UKRAINE
V. LASHKARYOV
INSTITUTE OF
SEMICONDUCTOR PHYSICS

41 pr. Nauki, 03028 Kyiv, Ukraine
ph.: +38 (044) 525-40-20, fax: +38 (044) 525-83-42
E-mail: info@isp.kiev.ua
<http://www.isp.kiev.ua>

20.01.17

№ 31207-М-80

На №

від

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор Інституту фізики
напівпровідників ім. В.С. Лашкарьова
НАН України, м. Київ



Акт

про використання результатів дисертаційної роботи
Яценко Ірини Вячеславівни у науково-дослідній роботі Інституту фізики напівпровідників
ім. В.С. Лашкарьова НАН України, м. Київ

Результати теоретичних та експериментальних досліджень, які отримано І. В. Яценко в області удосконалення оптичних елементів оптико-електронних приладів (лазерних імпульсних далекомірів приладів принципного комплексу, лазерних медичних приладів з волоконно-оптичними світловодами, ІЧ-приладів з обтічниками з оптичних керамік для спостереження та слідування за об'єктами тонцю) шляхом зміцнення їх поверхневого шару з метою попередження можливих руйнувань елементів та виходу з ладу приладів при їх експлуатації в екстремальних умовах мають наукове значення для використання в розробках Інституту фізики напівпровідників ім. В.С. Лашкарьова НАН України, зокрема в темі І.І.11/27 «Розроблення і створення технологій виробництва низькотемпературних наноструктурних сполук кремнію та напівкристалічних матеріалів з низьким коефіцієнтом термічного розширення та впровадження у виробництво мікроелектронних сенсорів, оптичних елементів для авіаційно-космічного приладобудування».

Автором запропоновано для використання оригінальні методики для практичного використання на підприємствах точного приладобудування. Ці методики увійшли в методичні рекомендації «Прогнозування критичних значень небезпечних чинників для попередження руйнувань оптичних елементів точного приладобудування на об'єктах їх виробництва, зберігання, транспортування та застосування» (затверджено ДІНІВК «Фотоприлад» (м. Черкаси, 2016)), які мають науково-практичний інтерес для використання в роботі нашого Інституту.

Зав. відділу фізико-технологічних
основ сенсорного матеріалознавства,
д.т.н., проф.,
науковий керівник теми №І.І.11/27

В.І. Маслов



Код ЄДРПОУ 14308405

УКРАЇНА

ПРИВАТНЕ АКЦІОНЕРНЕ ТОВАРИСТВО
“А В І К О С”

79018, м. Львів, вул. Стороженка 30,32, тел./фак.: (38032) 233-41-16, e-mail: stklyufas@avikos.lviv.ua

19.05.16 № 094-48

На № _____ від _____ 2016р

АКТ

про практичне використання та впровадження у виробничі процеси ПрАТ “Авікос” (м. Львів) результатів дисертаційної роботи Яценко Ірини В’ячеславівни

Результати наукових досліджень, які виконано І. В. Яценко в області удосконалення приладів з оптичними елементами для вимірювання та теплового контролю об’єктів різної фізичної природи шляхом фінішної електронно-променевої обробки поверхонь їх елементів мають важливе значення для розробок серійних приладів з оптичними елементами, що випускаються нашим підприємством, оскільки мають наукову новизну та практичну цілеспрямованість. Автором розвинуто метод електронно-променевої обробки різних діелектричних матеріалів у частині оптимізації параметрів електронного променю (густини теплового впливу, швидкості переміщення), який дозволяє суттєво покращувати (більше ніж у 3...5 разів) властивості їх поверхневих шарів (шорсткість, площинність, мікротвердість, формування зміцнених шарів тощо) і, тим самим, робити їх більш стійкими до різних зовнішніх теплових дій, яким піддаються прилади при їх експлуатації. Практична значимість цього методу полягає в тому, що, використовуючи його на стадії виготовлення оптичних деталей приладів, можна шляхом покращення вказаних властивостей поверхневих шарів деталей значно підвищувати (більше, ніж у 2...3 рази) основні техніко-експлуатаційні характеристики приладів - точність, відтворюваність, надійність, строк служби тощо.

На базі проведених досліджень Яценко І. В. було розроблено методичні рекомендації - “Прогнозування критичних значень небезпечних чинників для попередження руйнувань оптичних елементів точного приладобудування на об’єктах їх виробництва, зберігання, транспортування та використання”, які затверджено ДПНВК “Фото-прилад” (м. Черкаси, 2016) і, які використовуються на нашому підприємстві з метою удосконалення ряду загальнопромислових приладів з оптичними елементами, а також приладів спеціального призначення – камер телевізійних, телевізійних відеомоніторів, що дозволяє шляхом впровадження засобів контролю та технологічних рекомендацій підвищувати у 1,5...2 рази техніко-експлуатаційні характеристики такі, як працездатність, надійність, строк служби тощо.

Генеральний директор,
Головний конструктор Мінпромполітики
України, член-кореспондент
АТН України



С. І. Клюфас

ДЕРЖАВНИЙ КОНЦЕРН
«УКРОБОРОНПРОМ»



STATE CONCERN
«UKROBORONPROM»

ДЕРЖАВНЕ ПІДПРИЄМСТВО
НАУКОВО- ВИРОБНИЧИЙ
КОМПЛЕКС «ФОТОПРИЛАД»

STATE ENTERPRISE
RESEARCH AND PRODUCTION
COMPLEX «PHOTOPRYLAD»

вул. Б. Вишневецького, 85, м. Черкаси, 18000
тел./факс (0472) 45-12-75, (0472) 37-45-31
тел. (0472) 36-03-08
E – mail: oaspu@photopribor.ck.ua

85. B. Vyshnevetsky St., Cherkasy, 18000
tel./fax (0472) 45-12-75, (0472) 37-45-31
tel. (0472) 36-03-08
E – mail: oaspu@photopribor.ck.ua

1.1.02.17 № ЦКБ/65
на № _____ від _____

Акт використання

результатів дисертаційної роботи
«Закономірності впливу електронно-променевої технології на експлуатаційні
характеристики оптичних елементів»
Яценко Ірини В'ячеславівни,
представленої на здобуття наукового ступеню
доктора технічних наук за спеціальністю
05.11.07 «Оптичні прилади і системи»

Результати дисертаційної роботи Яценко І.В., присвяченої рішенням актуальної проблеми підвищенню ефективності експлуатації оптико-електронних приладів в екстремальних умовах (підвищені температури нагріву, зовнішні тиски, надзвуковий обдув потоком повітря, вісесиметричне обертання, агресивні середовища тощо), шляхом фінішної електронно-променевої обробки їх оптичних елементів, мають для ДПНВК «Фотоприлад» значний інтерес у зв'язку з їх новизною та практичною цілеспрямованістю.

В дисертаційній роботі Яценко І.В. встановлені нові важливі для наукових та дослідно-конструкторських розробок ДПНВК «Фотоприлад» наступні закономірності впливу електронно-променевої технології на експлуатаційні характеристики оптичних елементів: площа негативних дефектів на поверхні елементів зменшується в 1,8...2,7 рази, чистота поверхні підвищується з РІV та РІІІ до РІІ та РІ, відхилення від площинності знаходяться в межах нормативних значень ($N=0,5$, $\Delta N=0,2$); залишкові мікронерівності на поверхні зменшуються від 30...40 нм до 0,5...1,2 нм; збільшується її мікротвердість в 1,3...1,7 рази та формуються зміцнені шари товщиною 210...230 мкм; відбувається зміна структури шарів і їх гомогенізація, кремнекиснева сітка стає близькою до кварцового скла; коефіцієнт світлорозсіювання зменшується на 10...30%, а коефіцієнт пропускання ІЧ-випромінювання збільшується на 2...5%; підвищується стійкість елементів до зовнішніх термічних і механічних впливів, також до агресивних середовищ.

На базі проведених досліджень Яценко І.В. були розроблені методичні рекомендації «Прогнозування критичних значень небезпечних чинників для попередження руйнувань оптичних елементів точного приладобудування на

об'єктах їх виробництва, зберігання, транспортування та застосування”, які були використані при модернізації серійних приладів, що випускаються ДПНВК “Фотоприлад” (лазерні прицільні комплекси, прилади нічного бачення тощо), що дозволило збільшити точність та розширити діапазони їх вимірювань, а також підвищити надійність приладів при експлуатації в умовах інтенсивних зовнішніх термовпливів.

Економічний ефект від впровадження результатів дисертаційної роботи Яценко І.В. на ДПНВК “Фотоприлад” склав 360 тис. грн. (розрахунок економічного ефекту від впровадження додається).

Результати дисертаційної роботи Яценко І.В. дозволили створити технологічні основи для покращення експлуатаційних характеристик оптичних елементів на стадії виготовлення оптичних приладів і систем, які будуть використані ДПНВК “Фотоприлад” у розробках нових приладів спеціального призначення.

Заступник генерального директора
з науки – Генеральний конструктор
ДПНВК “Фотоприлад”, д.т.н.



Гордієнко В.І.

ДЕРЖАВНИЙ КОНЦЕРН
«УКРОБОРОНПРОМ»



STATE CONCERN
«UKROBORONPROM»

ДЕРЖАВНЕ ПІДПРИЄМСТВО
НАУКОВО- ВИРОБНИЧИЙ
КОМПЛЕКС «ФОТОПРИЛАД»

STATE ENTERPRISE
RESEARCH AND PRODUCTION
COMPLEX «PHOTOPRYLAD»

вул. Б. Вишневецького, 85, м. Черкаси, 18000
тел./факс (0472) 45-12-75, (0472) 37-45-31
тел. (0472) 36-03-08
E – mail: oaspu@photopribor.ck.ua

85, B. Vyshnevetsky St., Cherkasy, 18000
tel./fax (0472) 45-12-75, (0472) 37-45-31
tel. (0472) 36-03-08
E – mail: oaspu@photopribor.ck.ua

14.02.17 № _____
на № _____ від _____

Розрахунок економічного ефекту від впровадження

результатів дисертаційної роботи «Закономірності впливу
електронно-променевої технології на експлуатаційні
характеристики оптичних елементів»

Яценко Ірини В'ячеславівни,
представленої на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук за спеціальністю
05.11.07 «Оптичні прилади та системи»

В дисертаційній створені роботі нові конструкторсько-технологічні рішення, спрямовані на підвищення експлуатаційних характеристик оптичних деталей оптико-електронних систем спостереження та прицілювання бронетанкової техніки.

Передані для впровадження нові технологічні схеми електронно-променевої обробки поверхні деталей, методи контролю та розрахунки їх надійності можна оцінити як інтелектуальну власність, мінімальна вартість якої (без врахування витрат на матеріали та додаткове обладнання) могла б бути розроблена ЦКБ «Сокіл» фахівцем на рівні провідного інженера з окладом 6 000 грн. протягом двох років досліджень з врахуванням додаткової заробітної плати, загально виробничих витрат, адміністративних витрат складає 360 000 грн.

Таким чином, економічний ефект від впровадження результатів дисертаційної роботи Яценко І.В. складає 360 000 грн.

Заступник генерального директора з науки
Головний конструктор



В.І.Гордієнко

СТРУКТУРА ЦІНИ

НА НАУКОВО-ТЕХНІЧНУ ПРОДУКЦІЮ

по ЦКБ "СОКІЛ"

№ п/п	Статті витрат	Всього	
1	Сировина та матеріали		
2	Покупні та комплектуючі вироби		
4	Основна заробітна плата	6 000,00	
5	Додаткова заробітна плата	1 584,00	26,4%
6	Відрахування на соціальні заходи	1 668,48	22%
7	Витрати на службові відрядження	0,00	
8	Паливо та енергія на технологічні цілі	0,00	79%
9	Загальновиробничі витрати	6 900,00	115%
10	Витрати на роботи, що виконують сторонні організації	0,00	
11	Виробнича собівартість	16152,48	
12	Виробнича собівартість (без врахування вартості покупних та комплектуючих виробів, робіт, що виконують сторонні організації)	0,00	
13	Адміністративні витрати	1 140,00	19%
14	Витрати на збут	0,00	1,4%
15	Загальна собівартість	17 292,48	
16	Прибуток	4 845,74	30%
17	Ціна	22 138,22	
18	ПДВ	4 427,64	20%
19	Разом	26 565,87	

при сред. з/п = 6000,00 грн в місяць.



«Фотоніка Плюс»

18000, Україна, м. Черкаси
вул. Одеська, 8
тел/факс /0472/32-49-63
тел /0472/32-48-74
E-mail: info@fotonikaplus.com.ua

ПМВП «Фотоніка Плюс»
р/р 26006182566003
в Черк. ГРУ ПАТ КБ «ПриватБанк»
МФО 354347, код ЄДРПОУ 24411216
Платник єдиного податку

Акт

про практичне використання та впровадження у виробничі процеси підприємства «Фотоніка Плюс» (м. Черкаси) результатів дисертаційної роботи Яценко Ірини В'ячеславівни

Результати досліджень, які представлено у дисертаційній роботі І. В. Яценко та направлено на попередження можливих руйнувань оптичних приладів при їх експлуатації з врахуванням впливу зовнішніх термодій, мають важливе значення внаслідок наукової новизни та практичного значення для розробок нашого підприємства в області лазерних медичних приладів.

Важливе науково-практичне значення мають також розроблені І. В. Яценко наступні нові методики:

- методика визначення критичних значень параметрів зовнішніх термодій на прилади для попередження можливих руйнувань оптичних елементів та виходу їх з ладу;
- методика покращення властивостей поверхневих шарів оптичних елементів приладів та підвищення їх стійкості до зовнішніх термічних та механічних впливів шляхом попередньої електронно-променевої обробки їх робочих поверхонь.

Розроблені І. В. Яценко методичні рекомендації «Прогнозування критичних значень небезпечних чинників для попередження руйнувань оптичних елементів точного приладобудування на об'єктах їх виробництва, зберігання, транспортування та застосування» використано нашим підприємством у виробничому процесі для покращення лазерних медичних приладів («Ліка-терапевт», «Медик 2К», «Ліка-хірург» та ін.), які випускаються, а також для розробки нових приладів, що дозволяє у 2...3 рази підвищити гранично допустиму дальність розповсюдження лазерного випромінювання по світловодам, а також збільшити 2...2,5 разу працездатність, надійність та строк служби приладів при їх експлуатації з врахуванням впливу зовнішніх термодій.

Директор ЧМПП «Фотоніка Плюс»



/В. В. Холін/



Затверджую

Декан приладобудівного факультету
Національного технічного університету
України «Київський політехнічний
інститут»

ім. Ігоря Сікорського,
доктор технічних наук, професор

 Г. С. Тимчик

“ 14 ” 06 2017 р.

Акт

практичного використання результатів дисертаційної роботи Яценко Ірини В'ячеславівни «Закономірності впливу електронно-променевої технології на експлуатаційні характеристики оптичних елементів» в навчальному процесі Національного технічного університету «Київський політехнічний інститут» ім. Ігоря Сікорського

Ми, що підписались нижче, заступник декана з методичної роботи кандидат технічних наук, доцент Філіппова Марина В'ячеславівна, виконуючий обов'язки завідувача кафедри виробництва приладів кандидат технічних наук, доцент Шевченко Вадим Володимирович, вчений секретар кафедри Матвієнко Сергій Миколайович, склали цей акт про те, що результати дисертаційної роботи кандидата технічних наук, доцента Черкаського технологічного університету Яценко Ірини В'ячеславівни «Закономірності впливу електронно-променевої технології на експлуатаційні характеристики оптичних елементів» використовуються в навчальному процесі кафедри виробництва приладів приладобудівного факультету Національного технічного університету «Київський політехнічний інститут», а саме: при читанні лекцій, проведенні лабораторних і практичних занять, виконанні курсових проектів з навчальних дисциплін «Лазерні технології в медичному приладобудуванні», «Оптичні та медичні прилади», «Нанотехнології в медичному приладобудуванні», «Матеріалознавство», в яких використовуються наступні науково-технічні результати дисертаційної роботи: нові оригінальні методики визначенню закономірностей впливу електронно-променевої обробки оптичних елементів на їх експлуатаційні характеристики, математичні моделі та методи

розрахунку для прогнозування функціональної придатності оптичних елементів в екстремальних умовах експлуатації приладів тощо.

Також у навчальному процесі використовуються результати дисертаційної роботи викладені в монографіях:

– Ващенко В. А. Тепловые процессы при электронной обработке оптических материалов и эксплуатации изделий на их основе. Монография / Ващенко В. А., Котельников Д. И., Лега Ю. Г., Краснов Д. М., Яценко И. В., Кириченко О. В. – К.: Наукова думка, 2006. – 368 с.;

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

Використання студентами і аспірантами науково-технічних результатів дисертаційної роботи Яценко І. В. дозволяє їм детально ознайомитися та освоїти сучасні методи та засоби підвищення точності та надійності оптико-електронних приладів, які працюють в екстремальних умовах експлуатації.

Заступник декана приладобудівного факультету
НТУУ «КПІ» з методичної роботи,
кандидат технічних наук, доцент



М.В. Філіппова

Завідувач кафедри виробництва
приладів НТУУ «КПІ»
кандидат технічних наук, доцент



В.В. Шевченко

Вчений секретар кафедри виробництва
приладів НТУУ «КПІ»



С.М. Матвієнко

исх. №2 от 10.01.2014 г.

на № от

АКТ

производственных испытаний кремниевых зондов CSC38,
модифицированных тонким углеродным покрытием.

Мы, нижеподписавшиеся, с одной стороны: руководители работ д.т.н., профессор, зав. кафедры физики Черкасского государственного технологического университета Ващенко В.А.; к.т.н., доцент Черкасского государственного технологического университета Бондаренко М.А.; к.т.н., доцент Черкасского государственного технологического университета Яценко И.В.; соискатели научной степени кандидата технических наук Черкасского государственного технологического университета Билоконь С.А., Коваленко Ю.И. и с другой стороны: директор ОДО «Микротестмашины» (г. Гомель, Беларусь) к.т.н. Суслов А.А. на основании договора о Международном научно-техническом сотрудничестве от 14.10.2003 г. составили настоящий акт в том, что за период с 27.10.13 г. по 05.01.14 г. в производственных условиях ОДО «Микротестмашины» с помощью атомно-силового микроскопа «NT-206V» проведены сравнительные испытания зондов CSC38, модифицированных функциональным покрытием путем термовакуумного осаждения углеродной пленки (толщиной менее 8 нм) с ее дальнейшей электронной обработкой в одном технологическом цикле.

Испытания модифицированных зондов проводилось на тестовых структурах TGZ1 с дальнейшим контролем их точности измерений, длительности надежной эксплуатации и повторяемости результатов сканирования.

В результате испытаний установлено, что модификация зондов тонким углеродным покрытием позволила увеличить точность измерений нанорельефа поверхности на 7...10%; повысить длительность надежной эксплуатации на 40...60 минут; увеличить повторяемость результатов в 1,4...3,4 раза.

Отдельные образцы зондов используются в ОДО «Микротестмашины» для проведения циклов комплексных испытаний нанорельефа и физико-механических характеристик поверхностей на атомно-силовом микроскопе «NT-206V».

Директор ОДО «Микротестмашины»

А.А. Суслов

Научный руководитель работ

В.А. Ващенко

Ответственный исполнитель работ

М.А. Бондаренко

Научный сотрудник

И.В. Яценко

Соискатель ЧГТУ

С.А. Билоконь

Соискатель ЧГТУ

Ю.И. Коваленко





АКТ

впровадження у навчальний процес Черкаського державного технологічного університету результатів дисертаційної роботи Яценко Ірини В'ячеславівни “Закономірності впливу електронно-променевої технології на експлуатаційні характеристики оптичних елементів”, представленої на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.11.07 – оптичні прилади і системи

Комісія у складі: голови – проректора з навчальної роботи, к. т. н., доцента Ланських Є. В. і членів комісії: декана факультету електронних технологій, к. т. н., доцента Гончарова А. В.; завідувача кафедри електротехнічних систем, к. т. н., професора Ситника О. О.; завідувача кафедри комп'ютеризованих і інформаційних технологій у приладобудуванні, к. т. н., доцента Бондаренко Ю. Ю.; декана факультету комп'ютеризованих технологій у машинобудуванні і дизайну, к. т. н., доцента Підгорного М. В.; завідувача кафедри фізики, д. т. н., професора Ващенко В. А.; завідувача кафедри технології та обладнання машинобудівних виробництв, д. т. н., професора Канашевича Г. В. склала даний акт про те, що наступні результати дисертаційної роботи І. В. Яценко впроваджено у навчальний процес при виконанні курсових та дипломних проектів, при викладанні лекцій, проведенні лабораторних та практичних занять з навчальних дисциплін “Фізика”, “Теоретичні основи електротехніки”, “Теоретичні основи теплотехніки”, “Технологія приладобудування”, “Лазерні технології та обладнання у виробництві приладів”, “Проектування оптико-електронних приладів”, “Нанотехнології у медичному приладобудуванні”, “Методи обробки поверхонь”, “Фізико-хімічні основи обробки матеріалів КПЕ”:

- методи покращення експлуатаційних характеристик оптичних елементів (чистоти та гладкості поверхні, її мікротвердості, товщини зміцнених шарів, коефіцієнтів розсіювання та пропускання ІЧ-випромінювання, стійкості до зовнішніх термічних та механічних впливів тощо) шляхом фінішної електронно-променевої обробки їх робочих поверхонь;
- модифіковане електронно-променево технологічне обладнання для проведення експериментальних досліджень з встановлення закономірностей впливу параметрів електронного променя на експлуатаційні характеристики оптичних елементів;
- математичні моделі, пакети прикладних програм та методи визначення критичних значень параметрів екстремальних зовнішніх впливів (теплових потоків, часів їх дії, швидкостей надзвукового обдуву потоком повітря, кутових швидкостей вісесиметричного обертання та ін.) на оптичні елементи різної геометричної форми та розмірів (плоскопаралельні пластини, прямокутні елементи різної товщини, півсферичні оболонки тощо), перевищення яких призводить до виходу з ладу оптико-електронних приладів.

Крім цього у навчальному процесі використовуються наступні монографії, підручник та навчальний посібник:

1. Ващенко В. А. Тепловые процессы при электронной обработке оптических материалов и эксплуатации изделий на их основе. Монография / Ващенко В. А., Котельников Д. И., Лега Ю. Г., Краснов Д. М., Яценко И. В., Кириченко О. В. – К.: Наукова думка, 2006. – 368 с.
2. Ващенко В. А. Основи електронної обробки виробів з оптичних матеріалів. Монографія. / Ващенко В. А., Яценко І. В., Лега Ю. Г., Кириченко О. В. – К.: Наукова думка, 2011. – 562 с.

3. Антонюк В. С. Біофізика і біомеханіка. Підручник / Антонюк В. С., Бондаренко М. О., Ващенко В. А., Канашевич Г. В., Тимчик Г. С., Яценко І. В. – К.: НТУУ “КПІ”, 2012. – 344 с. (Гриф надано МОН України лист № 1/11 – 11366 від 14. 12. 2010 р.).

4. Ващенко В. А. Основи теплоперенесення в елементах оптичного приладобудування. Навчальний посібник. / Ващенко В. А., Антонюк В. С., Тимчик Г. С., Яценко І. В., Бондаренко М. О., Кириченко О. В., Рудь М. П. – К.: НТУУ “КПІ”, 2012. – 412 с. (Гриф надано МОН України лист № 1/11 – 9530 від 13. 10. 2011 р.).

Використання студентами та аспірантами результатів дисертаційної роботи Яценко І. В. дозволяє їм на більш високому науково-технічному рівні виконувати дипломні проекти, магістерські роботи та кандидатські дисертації.

Голова комісії:

Проректор з навчальної роботи,
к. т. н., доцент

Є. В. Ланських

Члени комісії:

Декан факультету електронних технологій,
к. т. н., доцент

А. В. Гончаров

Завідувач кафедри електротехнічних систем,
к. т. н., професор

О. О. Ситник

Завідувач кафедри комп'ютеризованих і
інформаційних технологій у приладобудуванні,
к. т. н., доцент

Ю. Ю. Бондаренко

Декан факультету комп'ютеризованих
технологій у машинобудуванні і дизайну,
к. т. н., доцент

М. В. Підгорний

Завідувач кафедри фізики,
д. т. н., професор

В. А. Ващенко

Завідувача кафедри технології та
обладнання машинобудівних виробництв,
д. т. н., професор

Г. В. Канашевич

Заключение

о научной и практической значимости результатов исследований к. т. н., доцента кафедры электротехнических систем Яценко Ирины Вячеславовны Черкасского государственного технологического университета в области улучшения свойств поверхностных слоев оптических элементов точного приборостроения путем электронно-лучевой микрообработки их поверхностей

Успехи, достигнутые за последнюю четверть века в освоении электронно-лучевых технологий, привели к созданию разнообразной электронно-лучевой аппаратуры промышленного, научного, медицинского и военного назначения.

Современные приборы с оптическими элементами для измерения и теплового контроля объектов различной физической природы (плоские пластины и диски в качестве подложек светофильтров ИК-приборов, линзовые аэрофотографические объективы и пластины двоякой кривизны для зеркал космического и аэрокосмического назначения, входные окна лазерных дальномеров в приборах прицельных комплексов для наблюдения за объектами, цилиндрические световоды из оптических моноволокон в медицинских приборах для диагностики и лечения, полусферические обтекатели ИК-приборов самонаведения и наблюдения и др.) в условиях эксплуатации подвергаются интенсивным внешним термовоздействиям (повышенные температуры нагрева и внешние давления, ударные термовоздействия в условиях выстрела и полета и др.).

В указанных условиях происходит существенное изменение свойств поверхностных слоев оптических элементов вплоть до их разрушения (появление трещин и сколов, глубокое поверхностное оплавление с образованием наплывов, волнообразных поверхностей и изменением геометрической формы и др. дефектов), что приводит к существенному ухудшению технико-эксплуатационных характеристик приборов (точности, работоспособности, надежности, ресурса и срока службы) и их выходу из строя.

Поэтому существенное значение приобретает предупреждение вынужденных разрушений оптических элементов в случае внешних термических воздействий.

Для предотвращения разрушений оптических элементов автором были разработаны важные для науки и практики электронно-лучевые методы предварительной обработки их рабочих поверхностей на стадии изготовления, которые позволяют улучшать свойства поверхностных слоев элементов, делая их более устойчивыми к внешним тепловым и механическим воздействиям, и тем самым, повышать технико-эксплуатационные характеристики приборов на их основе.

К числу важных научных результатов, полученных автором, можно отнести следующие:

- впервые установлены закономерности влияния внешнего давления на критические значения внешних тепловых потоков и времени их воздействия на оптические элементы, превышение которых приводит к разрушению оптических элементов и выходу из строя приборов;
- предложены математические модели нагрева оптических обтекателей ИК-приборов в условиях выстрела и полета, которые отличаются от существующих тем, что в них учитываются: форма обтекателей в виде полусферических оболочек; температурные зависимости теплофизических свойств оптических материалов, что позволяет повысить точность определения критических диапазонов изменения внешних термовоздействий, контроль превышения которых предотвращает разрушение обтекателей;
- установлено, что электронно-лучевая обработка поверхностных слоев оптических материалов приводит: к увеличению коэффициента пропускания ИК-излучения оптических элементов из стекол и керамик; к увеличению критических значений внешних тепловых потоков и времени их воздействия на элементы, что делает их более устойчивыми к тепловым и механическим нагрузкам; к росту предельно допустимых значений термоупругих напряжений в элементах, приводящих к разрушению в условиях нагрева;
- уточнено и развито влияние параметров электронного луча на физико-механические свойства поверхностных слоев оптических элементов, что позволяет путем целенаправленного управления этими свойствами предотвращать разрушение оптических элементов при наличии внешних термических и механических воздействий.

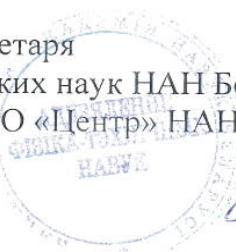
Для практического использования полученных результатов исследований И. В. Яценко были разработаны методики усовершенствования приборов с оптическими элементами для измерения и теплового контроля объектов различной физической природы, которые дают возможность: определять критические значения внешних тепловых потоков и времени их воздействия на оптические элементы, скоростей сверхзвукового обдува потоком воздуха полусферических обтекателей ИК-приборов для различных режимов обтекания, превышение которых приводит к отказу приборов при их применении; улучшать физико-механические свойства поверхностных слоев оптических элементов и повышать их устойчивость к тепловым и механическим воздействиям, а также улучшать технико-эксплуатационные характеристики приборов путем предварительной электронно-лучевой обработки их рабочих поверхностей.

И.В. Яценко на основе теоретических и экспериментальных исследований разработаны методические рекомендации “Прогнозирование критических значений опасных факторов для упреждения разрушений оптических элементов точного приборостроения на объектах их производства, хранения, транспортирования и применения”, которые были внедрены и подтверждены актами внедрения на предприятиях Украины (ГПНПК “Фотоприбор, ЧМПШ “Фотоника Плюс”, НПЧП “Политехник”, г.Черкассы) и Беларуси (ОДО “Микротестмашины”, г.Гомель) с целью усовершенствования ряда общепромышленных приборов с оптическими

элементами для измерения и контроля объектов различной физической природы, что позволило повысить дальность лазерных дальномеров в 1,2...1,3 раза; уменьшить количество выходов из строя приборов при внешних термовоздействиях в 1,7...2,3 раза; увеличить вероятность их работоспособности и надежности в этих условиях в 1,5...2 раза; повысить срок службы в 2...2,5 раза; получить годовой экономический эффект свыше 173,5 тыс. гривен.

Планируется использование в наших организациях результатов, полученных И. В. Яценко по улучшению свойств поверхностных слоев методом электронно-лучевой обработки при проектировании изделий оптоэлектроники и технических средств нанодиагностики на базе методов атомно-силовой микроскопии.

Заместитель академика-секретаря
Отделения физико-технических наук НАН Беларуси,
Гл. научный сотрудник ГНПО «Центр» НАН Беларуси,
д. т. н., профессор



М.Л. Хейфец

Заведующий лабораторией
синтеза и анализа микро- и наноразмерных материалов
Института тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова
НАН Беларуси, к. ф.-м. н.

С.А. Филатов

Личную подпись

Хейфеца М.Л. и Филатова С.А.

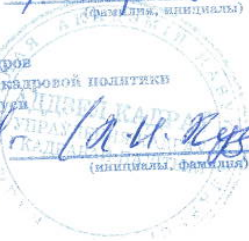
удостоверяю:

начальник отдела кадров
управления кадров и кадровой политики
аппарата НАН Беларуси

Эльза (а.н. Кувшинова)

(подпись)

24.10.2016



Акт

о практическом использовании и внедрении в производственные процессы ОДО “Микротестмашины” (г. Гомель, Беларусь) результатов диссертационной работы Яценко Ирины Вячеславовны

Результаты исследований, полученные И. В. Яценко в области усовершенствования приборов с элементами из оптических стекол (К8, БК10 и др.) и керамик (КО1, КО2, КО3 и др.) для измерения и теплового контроля объектов различной физической природы (плоские пластины и диски в качестве подложек светофильтров ИК-приборов, линзовые аэрофотографические объективы, входные окна лазерных дальномеров в приборах наблюдения и слежения и др.) путем предварительной электронно-лучевой обработки их рабочих поверхностей, имеют большое научное и практическое значение для работ, проводимых на нашем предприятии в области атомно-силовой микроскопии. Эти результаты были использованы для улучшения свойств поверхностных слоев оптических элементов лазерно-лучевой системы детектирования отклонения измерительной консоли и системы видеообзора в атомно-силовых микроскопах NT-206, что позволило повысить стабильность их работы в режимах с изменяемой температурой образца.

По результатам проведенных теоретико-экспериментальных исследований И. В. Яценко разработаны методические рекомендации “Прогнозирование критических значений опасных факторов для упреждения разрушений оптических элементов точного приборостроения на объектах их производства, хранения, транспортирования и применения”, использование которых на нашем предприятии позволяет повышать в 1,5...2 раза надежность и срок службы оптических приборов при их эксплуатации с учетом влияния внешних термовоздействий.



Директор ОДО “Микротестмашины”, к.т.н.

А. А. Сулов

ДОДАТОК Ж

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

[1] В. А. Ващенко, І. В. Яценко, Ю. Г. Лега та О. В. Кириченко, *Основи електронної обробки виробів з оптичних матеріалів* (Наукова думка, Київ, 2011), 562 с.

[2] І. В. Яценко, В. С. Антонюк, В. А. Ващенко та В. В. Цибулін, “Попередження можливих руйнувань оптичних елементів точного приладобудування в умовах зовнішніх термодій”, *Журн. нано- та електронної фізики*. **8** (1), 01027 (6сс) (2016).

[3] І. В. Яценко, В. С. Антонюк, В. А. Ващенко та В. В. Цибулін, “Визначення критичних значень параметрів електронного променя при поверхневому оплавленні оптичних елементів точного приладобудування”, *Журн. нано- та електронної фізики*. **9** (1), 01010 (5сс) (2017).

[4] I. V. Yatsenko, “Experimental and Statistical Models of Impact Determination of the Electron Beam Parameters on Surface Layers Properties of Optical Elements in Precision Instruments Building”, “Pratsi. Odes’kyi Politechnichnyi Universytet”. **1**(48), 63 – 69 (2016).

[5] В. С. Антонюк, І. В. Яценко, О. В. Кириченко та В. А. Ващенко, “Підвищення фізико-механічних параметрів елементів з оптичних керамік фінішною електронно-променевою обробкою”, *Сучасні технології в машинобудуванні: зб. наук. пр. НТУ “ХПІ”. Харків*. **11**, 74 – 86 (2016).

[6] В. А. Ващенко, Г. В. Канашевич, В. М. Лукашенко, М. А. Бондаренко та І. В. Яценко, “Оптоэлектроника и микрооптика – перспективные отрасли науки и техники”, *Вісн. Черкас. держ. технол. ун-ту*. **2**, 52 – 62 (2002).

[7] И. В. Яценко, Д. М. Краснов, В. А. Ващенко та О. В. Кириченко, “Математическое моделирование термоупругих напряжений при нагреве оптических полусферических изделий инфракрасных приборов”, *Вісн. Черкас. держ. технол. ун-ту*. **1**, с.80 – 86 (2004).

[8] Яценко І. В., “Дослідження залежностей енергетичних характеристик СЕП від його керованих параметрів при впливі на вироби мікрооптики і інтегральної оптики”, Сб. “Труды Одесского политехнического университета”. **2** (32), 143 – 149 (2009).

[9] І. В. Яценко, В. А. Ващенко, В. В. Цибулін та О. М. Чепурна, “Тепловий вплив стрічкового електронного потоку на вироби оптичних інтегральних схем”, Вісн. Черкас. держ. технол. ун-ту. **4**, 37 – 44 (2009).

[10] І. В. Яценко, “Дослідження впливу керованих параметрів СЕП на температуру в зоні впливу на підкладки оптичних інтегральних схем”, Вісн. Черкас. держ. технол. ун-ту. **2**, 111 – 115 (2009).

[11] І. В. Яценко, “Дослідження впливу керованих параметрів СЕП на термопружні напруження у поверхневих шарах оптичних прямокутних елементів”, Вісн. Черкас. держ. технол. ун-ту. **3**, 88 – 94 (2009).

[12] І. В. Яценко, В. А. Ващенко, В. В. Цибулін, І. А. Рева та О. М. Чепурна, “Підвищення ефективності електронної мікрообробки виробів з оптичних матеріалів”, Вісн. Черкас. держ. технол. ун-ту. **1**, 74 – 81 (2010).

[13] І. В. Яценко І. В., В. А. Ващенко, В. В. Цибулін, І. В. Рева та О.М. Чепурна, “Вплив параметрів стрічкового електронного потоку на температурні поля в елементах ВОЛЗ”, Вісн. Черкас. держ. технол. ун-ту. **3**, 107 – 113 (2010).

[14] Ю. І. Коваленко, М. О. Бондаренко, І. В. Яценко, М. П. Рудь та Г. В. Канашевич, “Модифікація нанорельєфу на оптичному склі електронно-променевою мікрообробкою”, Вісн. Черкас. держ. технол. ун-ту. **4**, с. 159 – 165 (2010).

[15] І. А. Рева, М. О. Бондаренко, Ю. І. Коваленко, Г. В. Канашевич, І. В. Яценко та В. А. Ващенко, “Дослідження впливу морської води на мікрогеометрію металевих покриттів на оптичному склі К8”, Вісн. Приазов. держ. техн. ун-ту. **20**, 222 – 225 (2010).

[16] М. О. Бондаренко, В. А. Ващенко, С. О. Білокінь, Ю. Ю. Бондаренко, І. В. Яценко та І. А. Рева, “Вивчення умов утворення наноструктур на поверхнях

п'єзоелектричних керамік під дією стрічкового електронного потоку”, Вісн. Східноукр. Нац. ун-ту ім. В. Даля. **8** (162), 30 – 34 (2011).

[17] М. П. Рудь, Г. В. Канашевич, В. П. Бойко, М. О. Бондаренко, Ю. І. Коваленко, І. В. Яценко, В. А. Ващенко та М. П. Рудь, “Моделювання та алгоритм оптимального керування процесом електронно-променевої обробки оптичних матеріалів”, Наук. пр.: наук.-метод. журн. “Комп’ютерні технології” ЧДУ ім. П. Могили. Миколаїв. **173** (161), 150 – 155 (2011).

[18] І. В. Яценко, В. А. Ващенко, В. В. Цибулін, І. А. Рева та О. М. Чепурна, “Дослідження впливу параметрів СЕП на розподіли температур в елементах мікрооптики”, Вісн. Черкас. держ. технол. ун-ту. **1**, 104 – 107 (2012).

[19] І. В. Яценко, В. С. Антонюк, О. В. Кириченко та В. А. Ващенко, “Визначення критичних значень параметрів зовнішніх термодій на оптичні елементи точного приладобудування”, Вісн. Нац. техн. ун-ту України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”. **51** (1), 71 – 75 (2016).

[20] І. В. Яценко, “Визначення критичних параметрів зовнішніх термодій на прямокутні оптичні елементи точного приладобудування”, Наука та вир-во: міжвузів. темат. зб. наук. пр. Приазов. держ. техн. ун-ту. Маріуполь. **17**, 5 – 13 (2017).

[21] I. V. Yatsenko, “Improvement of Surface Layers Properties of Precision Engineering Elements of Optical Ceramics by Preliminary Electron-beam Surfacing”, “Pratsi. Odes’kyi Politechnichniy Universytet”. **2** (49), 88 – 96 (2016).

[22] І. В. Яценко, В. С. Антонюк, В. І. Гордієнко, О. В. Кириченко, В. А. Ващенко та В. В. Холін, “Підвищення надійності лазерних медичних приладів шляхом фінішної електронно-променевої обробки торцевих поверхонь їх світловодів”, Зб. наук. пр. Луцьк. нац. ун-ту. **9** (2), 154 – 160 (2016).

[23] І. В. Яценко, В. І. Гордієнко, О. В. Кириченко, В. А. Ващенко та В. В. Цибулін, “Визначення термоударних зовнішніх дій на ІЧ-прилади при їх експлуатації”, Вісн. Черкас. держ. технол. ун-ту. **3**, 95 – 102 (2016).

[24] I. V. Yatsenko, V. I. Gordienko, O. V. Kyrychenko, V. A. Vashchenko та В. В. Цибулін, “Визначення розподілів температури та термопружних напружень по товщині оптичних обтічників ІЧ-приладів в умовах інтенсивних зовнішніх термодій”, Вісн. Черкас. держ. технол. ун-ту. **4**, 20 – 27 (2016).

[25] I. V. Yatsenko, V. I. Hordienko and V. V. Kholin, “Improving the Reliability of Pulsed Laser Rangefinder and Infrared Devices of Homing and Surveillance by Final Electron Beam Processing of their Optical Components”, Pratsi Odes’kyi Politechnichniy Universytet. **1** (51), 72 – 81 (2017).

[26] I. V. Yatsenko, V. S. Antoniuk, V. I. Hordienko, O. V. Kyrychenko and V. V. Kholin, “Improvement of Metrological Specifications of Impulse Laser Rangefinders by Finishing Electron Ray Processing of their Optical Elements”, Вісн. Нац. техн. ун-ту України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”. **52** (2), 52 – 57 (2016).

[27] I. V. Yatsenko, “Influence Patterns of the Finishing Electron Beam Treatment of the Surface of Optical Parts on their Physical-mechanical Properties”, Journal of Multidisciplinary Engineering Science Studies (JMESS). Germany. **3** (5), 1764 – 1770 (2017), <<http://www.jmess.org/wp-content/uploads/2017/05/JMESSP13420346.pdf>>.

[28] В. С. Антонюк, С. А. Билоконь, М. А. Бондаренко, Ю. Ю. Бондаренко, О. В. Кириченко и И. В. Яценко, “Особенности измерения микротвердости диэлектрических поверхностей кремниевым зондом атомно-силового микроскопа”, Ежем. науч.-техн. и произв. журн. “Наноинженерия” (Машиностроение. Москва). **3** (33), 13 – 16 (2014).

[29] I. Yatsenko, V. Antoniuk, M. Bondarenko and V. Vashchenko, “Influence of Parameters by Electronic Ray on Properties of Superficial Layers of Optical Elements of Exact Instrument-making”, Int. J. for Science and Innovations for the Industry “Innovations in Discrete Productions”. **1**, 13 – 15 (2015), <<http://www.stumejournals.com/innovations/archive/2015/1-2015.pdf>>.

[30] И. В. Яценко, В. С. Антонюк, В. А. Ващенко и В. В. Цибулин, “Тепловое воздействие сверхзвукового газового потока на поверхность

оптических обтекателей ИК-приборов”, Ежем. науч.-техн. и произв. журн. “Наноинженерия” (Машиностроение. Москва). **10** (52), 38 – 42 (2015).

[31] И. В. Яценко, В. С. Антонюк, В. А. Ващенко и В. В. Цыбулин, “Определение критических значений параметров внешних термовоздействий на поверхность обтекателей ИК-приборов в условиях выстрела и полета”, Ежем. науч.-техн. и произв. журн. “Наноинженерия” (Машиностроение. Москва) . **12** (54), 20 – 25 (2015).

[32] И. В. Яценко, В. С. Антонюк, В. А. Ващенко и В. В. Цыбулин, “Упреждение возможных разрушений оптических обтекателей ИК-приборов в условиях выстрела и полета”, Ежем. науч.-техн. и произв. журн. “Наноинженерия” (Машиностроение. Москва). **12** (54), 26 – 31 (2015).

[33] I. Yatsenko, V. Antoniuk, O. Kiritchenko and V. Vashchenko, “Improvement of Technical and Operational Characteristics of Devices with Optical Elements by Preliminary Electron Beam Treatment of their Surface”, Int. J. for Science, Technics and Innovations for the Industry “Machines. Technologies. Materials”. **6**, 47 – 50 (2016), <<http://www.stumejournals.com/mtm/Archive/2016/6-2016.pdf>>.

[34] I. Yatsenko, V. Antoniuk, O. Kiritchenko, V. Vashchenko and V. Tsybulin, “Increasing the Resistance of Precision Instrument-making Elements from Optical Glass to External Thermo-influences by Preliminary Electron-beam Processing of Surfaces”. Int. J. for Science and Innovations for the Industry “Innovations in Discrete Productions”. **1**, 9 – 12 (2016), <<http://www.stumejournals.com/innovations/archive/2016/1-2016.pdf>>.

[35] I. Yatsenko, V. Antoniuk, O. Kiritchenko and V. Vashchenko, “Improving the reliability instruments of measuring and thermal control of objects of different physical nature by the finish of electron beam processing surfaces of optical elements”, Int. J. for Science and Innovations for the Industry “Machines. Technologies. Materials”. **1**, 20 – 23 (2017), <<http://www.stumejournals.com/mtm/Archive/2017/1-2017.pdf>>.

[36] I. Yatsenko, “Improvement of Performance Characteristics of Optical Elements by Using Electron Beam Treatment”, *Worldwide Journal of Multidisciplinary Research and Development*. **3** (8), 18 – 26 (2017), <<http://wwjmr.com/vol%203/issue8/assets/14.1.pdf>>.

[37] I. Yatsenko, V. Antoniuk, O. Kiritchenko, V. Gordienko and V. Vashchenko, “Improvement of optical characteristics of components of optoelectronic devices in the harsh conditions of their functioning by using electron beam technology”, *Int. Sci. J. “Material Science. Nonequilibrium Phase Transformations”*. **2**, 42 – 48 (2017), <<http://www.stumejournals.com/ms/archive/2017/2-2017.pdf>>.

[38] Г. В. Канашевич, Ю. І. Коваленко, М. О. Бондаренко, В. А. Ващенко, В. П. Бойко, М. П. Рудь, та І. В. Яценко, “*Пристрій для електронно-променевого полірування виробів*”, Патент України № 4177 (17 Січень, 2005).

[39] С. О. Білокінь, В. С. Антонюк, Ю. І. Коваленко, М. О. Бондаренко, І. В. Яценко та П. О. Фіалковський, “*Спосіб позиціонування лазерного променя на зонд атомно-силового мікроскопа*”, Патент України № 91523 (10 Липень, 2014).

[40] М. П. Рудь, В. П. Бойко, Г. В. Канашевич, Ю. І. Коваленко, М. О. Бондаренко, І. В. Яценко та В. А. Ващенко, “Визначення розподілу густини струму стрічкового електронного потоку при обробці оптичних матеріалів”, в: *Динаміка наукових досліджень – 2006: Матеріали V міжнародної науково-практичної конференції (Наука і освіта, Дніпропетровськ, 2006)*, с. 45 – 47.

[41] М. А. Бондаренко, Ю. Б. Шевченко, В. П. Бойко, Ю. І. Коваленко, І. В. Яценко, Г. В. Канашевич та В. А. Ващенко, “Исследование микрогеометрии поверхности оптических стекол после электронной и после лазерной обработки методом атомно-силовой микроскопии”, в: *Методологические аспекты сканирующей зондовой микроскопии: Материалы VII международного семинара (г. Минск, Беларусь, 2006)*, с. 139 – 142.

[42] Г. В. Канашевич, М. О. Бондаренко, М. П. Рудь, В. П. Бойко, Ю. І. Коваленко, І. В. Яценко та В. А. Ващенко, “Впровадження комп’ютеризованої

системи керування у процес електронної обробки оптичних матеріалів”, в: Эффективность реализации научного, ресурсного и промышленного потенциала в современных условиях: Материали VII щорічної міжнародної промислової конференції (п. Славское, Карпати, 2007), с. 460.

[43] М. О. Бондаренко, Ю. Ю. Бондаренко, Г. В. Канашевич, И. В. Яценко, В. А. Ващенко и Л. И. Конопальцева, “Исследование поверхностей пьезокерамических элементов, модифицированных электронным потоком методом атомно-силовой микроскопии”, в: Методологические аспекты сканирующей зондовой микроскопии “БелСЗМ-8”: Материали VIII Международного семинара (г. Минск, Беларусь, 2008), с. 23 – 26.

[44] Г. В. Канашевич, М. О. Бондаренко, Ю. Ю. Бондаренко, И. В. Яценко та В. А. Ващенко, “Вивчення впливу високих температур на мікрогеометрію поверхні оптичного скла та п’єзоелектричних керамік”, в: Природничі науки та їх застосування в діяльності служби цивільного захисту: Материали II міжнародної науково-практичної конференції (АПБ ім. Героїв Чорнобиля МНС України, Черкаси, 2008), с. 132 – 134.

[45] М. П. Рудь, В. П. Бойко, М. О. Бондаренко, Ю. І. Коваленко, І. В. Яценко та В. А. Ващенко, “Дослідження просторово-енергетичних характеристик електронного потоку стрічкової форми”, в: Эффективность реализации научного, ресурсного и промышленного потенциала в современных условиях: Материали X Ювілейної міжнародної промислової конференції (п. Славское, Карпати, 2010), с. 162 – 164.

[46] М. А. Бондаренко, В. А. Ващенко, И. А. Рева, Ю. Ю. Бондаренко, Г. В. Канашевич, та И. В. Яценко, “Методика измерения толщины тонких несплошных покрытий на диэлектрических поверхностях методом атомно-силовой микроскопии”, в: Современные методы и средства неразрушающего контроля и технической диагностики: Материали XVIII Ежегодной международной конференции и выставки (УИЦ “Наука. Техника. Технология”, Киев, 2010), с. 209 – 212.

[47] Ю. И. Коваленко, Г. В. Канашевич, В. П. Бойко, В. А. Ващенко, М. П. Рудь та И. В. Яценко, “Применение АСМ в исследовании стойкости к морской воде металлизированных поверхностей оптических стекол, модифицированных электронным потоком”, в: Методологические аспекты сканирующей зондовой микроскопии: Сборник докладов IX Международной конференции (Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАНБ, г. Минск, Беларусь, 2010), с. 50 – 56.

[48] И. В. Яценко, В. А. Ващенко, В. В. Цыбулин, И. А. Рева та О. Н. Чепурна, “Компьютерное моделирование температурных полей в многослойных оптических элементах при воздействии ленточного электронного потока”, в: Современные методы и средства неразрушающего контроля и технической диагностики: Материалы XVIII Международной конференции (г. Ялта, 2010), с. 215 – 217.

[49] В. А. Ващенко, И. В. Яценко, Ю. И. Коваленко, И. А. Рева та В. П. Бойко, “Особенности определения микрогеометрических характеристик наноразмерных оксидных покрытий на поверхностях оптических диэлектриков методом атомно-силовой микроскопии”, в: Современные методы и средства неразрушающего контроля и технической диагностики: Материалы XIX Международной конференции (г. Гурзуф, 2011), с. 193 – 195.

[50] М. А. Бондаренко, И. В. Яценко, П. В. Петлеваний, Ю. И. Коваленко та В. А. Ващенко, “Применение метода атомно-силовой микроскопии в изучении доменно-диссипативных структур, сформированных в пьезокерамике электронно-лучевым методом”, в: Методологические аспекты сканирующей зондовой микроскопии: Сборник докладов X Международной конференции (Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАНБ, г. Минск, Беларусь, 2012), с. 48 – 52.

[51] Ю. И. Коваленко, М. П. Рудь, И. В. Яценко, А. В. Котляр, В. П. Бойко та В. А. Ващенко, “Изучение упорядоченных структур, сформированных на металлизированных поверхностях диэлектриков комбинированной электронной

технологией”, в: РКЭМ-2012: Материалы XXIV Российской конференции по электронной микроскопии (г. Черноголовка, 2012), с. 97.

[52] Ю. И. Коваленко, И. А. Рева, В. А. Андриенко, И. В. Яценко, Ю. Ю. Бондаренко, М. А. Бондаренко та Е. В. Скорина, “Особенности строения оксидных покрытий на оптических диэлектриках после их электронно-лучевой обработки”, в: Тезисы докладов XVIII Российского симпозиума по растровой электронной микроскопии и аналитическим методам исследования твердых тел (РАН, 2013), с. 298 – 299.

[53] В. С. Антонюк, Ю. И. Коваленко, М. А. Бондаренко та И. В. Яценко, “Модифицирование металлизированных поверхностей ленточным электронным потоком”, в: Инженерия поверхности и реновация изделий: Материалы 13-й Международной научно-технической конференции (г. Ялта, 2013), с. 15 – 19.

[54] Y. I. Kovalenko, M. A. Bondarenko, E. V. Verstanova, I. V. Yatsenko, V. A. Andrienko and Y. Y. Bondarenko, “Study of Ordered Oxide Patterns Got on the Dielectric Surfaces with the Combined Electronic Technology”, в: Фізика і технологія тонких плівок та наносистем: Матеріали XIV Міжнародної конференції МКФТТПН – XIV (м. Івано-Франківськ, 2013), с. 92.

[55] М. А. Бондаренко, Ю. И. Коваленко, Ю. Ю. Бондаренко, С. А. Билоконь та И. В. Яценко, “Изучение механизма формирования ультра тонких функциональных покрытий на оптическом стекле при комбинированной электронно-лучевой микрообработке”, в: Современные проблемы физики конденсированного состояния, нанотехнологий и наноматериалов: Сборник трудов III международной научной конференции (г. Алматы, Казахстан, 2014), с. 64 – 65.

[56] І. В. Яценко, В. А. Ващенко, В. В. Цибулін та В. С. Антонюк, “Критичні значення параметрів зовнішніх термодій при поверхневому оплавленні оптичних елементів приладобудування”, в: Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем: Матеріали V Міжнародної науково-практичної конференції (м. Чернігів, 2015), с. 121 – 122.

[57] І. В. Яценко, В. С. Антонюк, О. В. Кириченко та В. А. Ващенко, “Покращення техніко-експлуатаційних характеристик приладів з оптичними елементами шляхом збільшення їх коефіцієнта пропускання ІЧ-випромінювання”, в: Инженерия поверхности и реновации изделий: Материалы 16 Международной научно-технической конференции (АТМ України, Київ, 2016), с. 185 – 187.

[58] І. В. Яценко, В. С. Антонюк, В. І. Гордієнко, О. В. Кириченко та В. А. Ващенко, “Підвищення метрологічних характеристик та надійності приладів для вимірювання та теплового контролю об’єктів різної фізичної природи шляхом електронно-променевої обробки їх оптичних елементів”, в: Приладобудування та метрологія: сучасні проблеми, тенденції розвитку: Матеріали ІІ всеукраїнської науково-практичної конференції (м. Луцьк, 2016), с. 100 – 101.

[59] І. В. Яценко, В. С. Антонюк, В. І. Гордієнко, О. В. Кириченко та В. А. Ващенко, “Підвищення метрологічних характеристик та надійності лазерних далекомірів шляхом фінішної електронно-променевої обробки їх оптичних вікон”, в: Спеціальне приладобудування: стан та перспективи: Збірник тез доповідей 2-ї Української науково-технічної конференції (КП СПБ “Арсенал”, Київ, 2016), с. 147 – 150.