

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
" КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ "

*На правах рукопису*  
УДК 621.338.27:537.221

**Ващенко Вячеслав Андрійович**

**Наукові основи керування якістю  
електронно-променевої обробки виробів  
із спеціальних оптичних матеріалів**

Спеціальність 05.03.07 - Процеси лазерної та фізико-технічної обробки

**АВТОРЕФЕРАТ**

**дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора технічних наук**

Київ-1996



00753576 (X)

AB 35.039

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Черкаському інженерно-технологічному інституті на кафедрі фізики.

Науковий консультант: чл.-кореспондент Інженерної Академії України, доктор технічних наук, професор Д.І.Котельніков

Офіційні опоненти : Доктор технічних наук, професор Л.Ф.Головко  
Доктор технічних наук, професор А.А.Бондарев  
Доктор фізико-математичних наук, професор В.Г.Литвинов

Провідна організація - виробниче об'єднання "завод Арсенал", м. Київ

Захист відбудеться " 18 " 06 1996 р. о 15.00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 01.02.09 при Національному Технічному Університеті України "Київський політехнічний інститут" за адресов: 252056, м. Київ, пр. Перемоги, 37 корп. I, ауд.214.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут".

Автореферат розісланий " 17 " 05 1996 р.

Вчений секретар спеціалізованої вченої ради Д 01.02.09 доктор технічних наук, професор

Н.С.Равська

ЛННБ ім. В. Стефаніка  
АН України

Актуальність теми. В теперішній час однією із важливих проблем, що стоять перед точним приладобудуванням, ІЧ-технікою, засобами аерокосмічної техніки та іншими важливими галузями промисловості є підвищення довговічності і надійності роботи виробів із оптичних матеріалів, які експлуатуються в екстремальних зовнішніх умовах /підвищені температури нагріву, зовнішній тиск, надзвуковий обдув потоком повітря, осесиметричні обертання/.

Це обумовлено, з одного боку, тим, що мікрорельєф і дефекти поверхні виробів, які залишаються після традиційних методів їх обробки /механічної, хімічної, подум'ям та ін./, призводять до зменшення роздільної здатності виробів, зародження тріщин в порушених приповерхневих шарах і зниження їх загальної механічної міцності. З іншого боку, вироби в екстремальних умовах експлуатації зазнають інтенсивних термодій, які призводять до порушення їх поверхневих шарів.

Традиційні способи обробки матеріалів розвинуті А.П.Гавришем і його учнями для фінішної обробки оптичного скла, включаючи і цілий ряд інших високоміцних і труднооброблюваних матеріалів, не дозволяють отримувати гладкі з мінімальною шорсткістю, чисті і бездефектні поверхні, які відповідають всім вимогам субмікронних технологій різного призначення, які інтенсивно розвиваються і виключити порушення виробів при їх експлуатації.

Фундаментальні і застосовні дослідження, що проведені в області розробок нових високоінтенсивних технологій обробки різних матеріалів М.М.Рикаліним, І.В.Зуєвим, В.С.Коваленком, Д.І.Котельниковим, Л.Ф.Головком, Г.В.Дудко та ін. показали, що найбільш перспективними джерелами енергії для таких технологій є сфокусовані потоки заряджених часток /електронів, іонів/, лазерне випромінювання, потоки низькотемпературної плазми та ін.

Зокрема, в роботах Г.В.Дудка та його учнів були встановлені принципіальні можливості якісної обробки виробів із оптичного скла і керамік рухомих електронним променем стрічкової форми.

Проте, відсутність наукових основ керування якістю електронно-променевої обробки виробів із оптичних матеріалів, що базуються на створенні сучасного ефективного технологічного, лабораторно-випробувального, експериментального, математичного і програмного забезпечень, не дозволили довести електронно-променевої обробку до рівня керованої, що дає відтворювані результати технологічних процесів.

Метод роботи є теоретичне узагальнення закономірностей теплової дії стрічкового електронного променя на оптичне скло, кераміку і вирішення важливої народногосподарської задачі по керуванню якістю електронно-променевої обробки виробів мікроелектроніки, інтегральної і волоконної оптики, ІЧ-техніки та ін., що використовуються в умовах екстремальної зовнішньої дії.

Для досягнення вказаної мети поставлені та розв'язані такі основні задачі:

1. Проведений теоретичний аналіз сучасних технологічних процесів обробки виробів із оптичних матеріалів і методів математичного моделювання процесів обробки матеріалів КІЕ.

2. Теоретично узагальнені процеси і розроблені інженерні методи розрахунку:

- розподілу температури і її градієнта вздовж поверхні виробів і по їх товщині, а також швидкості нагріву виробів, що обдуваються надзвуковим повітряним потоком, в залежності від різних умов їх польоту /висоти і швидкості, температури і складу оточуючого середовища/;

- розподілів температури, її градієнта і швидкості нагріву в різних точках виробів при їх обробці стрічковим електронним променем в залежності від форми і розмірів виробів, а також від технологічних параметрів електронного променя;

- оптимальних технологічних параметрів електронних променів, сукупна дія яких на оброблювані вироби реалізує задані розподілені по поверхні виробів теплові дії.

3. Проведені експериментальні дослідження залежності модифікованих властивостей поверхні та поверхневих шарів оптичного скла і керамік від технологічних режимів електронно-променевої обробки, а також параметрів екстремальних зовнішніх дій:

температур нагріву/до 800 K/, зовнішнього тиску /до 250 кг/см<sup>2</sup>/, швидкостей обдува потоком повітря /до 2000 м/с/ і кутових швидкостей обертання /до 70000 об/хв/.

4. Розроблена математична модель і алгоритм оптимізації вибору заходів по впровадженню на підприємстві виробів із оптичних матеріалів з покращеними характеристиками після керованої електронно-променевої обробки при умовах жорстких обмежень на фінансові кошти.

5. Модифікована електронно-променева установка для підвищення якості обробки виробів із оптичного скла і керамік, розроблено випробувальне обладнання для дослідження поведінки виробів в лабораторних умовах, що моделюють екстремальні умови їх експлуатації.

6. Розроблено спеціалізоване програмне забезпечення у вигляді комплексу пакетів прикладних програм, орієнтованих на ЕОМ різного рівня /ЕС ЕОМ, ПЕОМ класу IBM/, для проведення інженерних розрахунків, як основи автоматизованих систем проектування і керування технологічними процесами електронно-променевої обробки виробів із спеціальних оптичних матеріалів.

Методики досліджень. Основні наукові положення, висновки і аргументації, сформульовані в дисертації, отримані з використанням сучасних методів фізичного аналізу /оптичної і електронної мікроскопії, рентгенофазного аналізу, інтерферометричних і спектроскопічних методів, шлірен-фотографічних і методів безконтактного вимірювання температури, визначення твердості матеріалів та ін./, математичного моделювання і чисельного аналізу /гідро- і газодинаміки, теорії нелінійної теплопроводності, інтегральних перетворень Фур'є, математичної статистики, багатокритеріальної оптимізації та ін./.

При розробці окремих пристроїв і вузлів електронно-променевого і лабораторно-випробувального обладнання використовувалась сучасна елементна база, а розрахунки по математичним моделям проводились в діалоговому режимі на сучасних ЕОМ з використанням спеціально розроблених пакетів прикладних програм.

Наукова новизна. В роботі отримані наступні нові наукові результати:

1. Вперше теоретично узагальнені і установлені закономірності впливу технологічних параметрів електронного променя /питомої потужності, швидкості переміщення/ на якісні характеристики поверхні і поверхневих шарів оптичного скла і керамік /температуру, висоту залишкових мікронерівностей, мікроструктуру, глибину поверхневого оплавлення, мікротвердість і товщину зміцнених шарів/.

2. Отримані данні про поведінку виробів із оптичних матеріалів в більш широкому діапазоні зміни параметрів екстремальних зовнішніх умов /температура нагріву до 800 К, зовнішній тиск до 250 кг/см<sup>2</sup>, швидкість обдува потоком повітря до 2000 м/с, кутова швидкість обертання до 70000 об/хв/.

3. Вперше запропонований теоретичний метод оптимального керування сукупною дією електронних променів на оброблювані протяженні вироби, що дозволяє розрахунковим шляхом визначати оптимальні значення параметрів електронних променів /число променів, їх місцезосташування, потужність і коефіцієнт зосередженості кожного променя/.

4. Побудовані нелінійні математичні моделі кінетичного нагріву надзвуковим потоком повітря виробів із оптичних матеріалів /пластини, сферичні оболонки/, що враховують температурні залежності теплофізичних властивостей матеріала виробів, умови контакту на межі, розміри і форму виробів, які дозволяють розраховувати з відносною похибкою 15...20 % вплив параметрів зовнішніх умов /висоти і швидкості польота/ на місцезосташування на їх поверхні зон, в яких вироби піддаються інтенсивним термодіям.

5. Розроблений комплекс одно-, двух- і трьохмірних нелінійних математичних моделей нестационарної теплової дії рухомого стрічкового електронного променя на вироби із оптичних матеріалів, що дозволяє, завдяки сукупному врахуванню температурних залежностей і теплофізичних властивостей матеріала, розмірів і форми виробів /тонкоплівкові елементи, одно- та двухшарові пластини, циліндричні, сферичні і криволінійні /з двоякою кривизною/ елементи, прямокутні бруски/, точніше розраховувати /відносна похибка 10...15 % замість 30...40 %/ вплив параметрів променя /потужності і форми її розподілення,

швидкості переміщення, коефіцієнта зосередженості і розмірів/ на характеристики теплових полів /температура, градієнт температури, швидкість нагріву/ і тим самим керувати процесом нагріву виробів.

6. Побудовані квазістаціонарні нелінійні математичні моделі поверхневого оплавлення виробів із оптичних матеріалів рухомих стрічковим електронним променем, що враховують температурні залежності теплофізичних властивостей матеріала виробів і різні швидкісні режими руху променя /помірно рухомих і швидко рухомих променів/ і дозволяють розраховувати з відносною похибкою 15...20 % вплив технологічних параметрів променя /питома потужність, швидкість переміщення/ на товщину оплавленого шару, тобто керувати розмірами рідкої ванни, що утворюється на поверхні виробу.

7. Вперше розроблена багатокритеріальна математична модель і модифікований чисельний алгоритм оптимізації впровадження на підприємстві виробів із оптичних матеріалів з покращеними техніко-експлуатаційними характеристиками після їх якісної електронно-променевої обробки в умовах жорстких обмежень на фінансові кошти.

8. Вперше на отриманій базі даних, розроблених математичних моделях і спеціалізованому програмному забезпеченні, що представляють собою технологічні основи, розроблений алгоритм керування якісними характеристиками поверхні і поверхневих шарів виробів із оптичних матеріалів при електронно-променевої обробці з врахуванням екстремальних зовнішніх умов їх експлуатації.

9. Розроблені оригінальні, на рівні винаходів, технологічне електронно-променеве обладнання, комплекс із трьох лабораторно-випробувальних установок, пристрої і методи для вимірювання і контролю параметрів обробки і експлуатації виробів.

Практична цінність роботи полягає в розробці науково-технічної бази для керування якістю електронно-променевої поверхневої обробки виробів із оптичного скла і кераміки, що широко використовуються в різних галузях промисловості /мікроелектроніці, інтегральній і волоконній оптиці, Ч-техніці та ін./.

Можливості використання результатів роботи:

- при створенні автоматизованої системи керування процесом електронно-променевої поверхневої обробки виробів із оптичних матеріалів;
- при розробці і впровадженні технологічних процесів електронно-променевого полірування поверхонь оптичного скла і зміцнення поверхневих шарів оптичних керамік;
- при проектуванні і розробці електронно-променевого технологічного обладнання, засобів вимірювання і контролю параметрів технологічних процесів обробки;
- при створенні лабораторно-випробувальних стендів, що моделюють екстремальні умови експлуатації виробів /підвищений зовнішній тиск і температури нагріва, швидкості обдува потоком повітря і обертання/, і розробці методів вимірювання і контролю їх техніко-експлуатаційних параметрів в процесі випробувань;
- при чисельному рішенні в діалоговому режимі на ЕОМ різноманітних інженерно-технологічних задач: розрахунок температурних та дифузійних полів, гідро-газодинамічних характеристик, керування технологічними режимами, багатокритеріальна оптимізація та ін.;
- в навчальному процесі студентів механічних та технологічних спеціальностей з курсів "Електро-фізико-хімічні методи обробки", "Технологія машинобудування" та ін.; в практичній діяльності наукових співробітників та аспірантів, які спеціалізуються в області вискоєфективних процесів обробки.

Реалізація роботи. Результати теоретичних і експериментальних досліджень впроваджені в 1984-1994 рр. на ряді підприємств України /ПО "завод Арсенал", ЦКБ "Арсенал", Київський інститут нових фізичних і застосовних проблем, Запорізький машинобудівний інститут, НПО "Ротор", НПК "Фотоприлад", Черкаський завод телеграфної апаратури, Черкаський приладобудівний завод, Черкаський інженерно-технологічний інститут та ін./:

- результати експериментальних досліджень властивостей модифікованих поверхневих шарів оптичних матеріалів і результати їх випробувань в умовах, близьких до умов експлуатації;
- спеціалізовані ППП для розрахунку на ЕОМ оптимальних умов експлуатації виробів, теплових полів у виробках при їх елек-

тронно-променевої обробці, оптимізації теплової дії сукупності електронних променів;

- технологічне електронно-променеве обладнання, оптимальні режими полірування і зміцнення оптичних матеріалів, лабораторно-випробувальні установки;
- наукова методологія оптимізації впровадження на підприємстві виробів з оптичних матеріалів після електронно-променевої обробки.

Зазначені результати роботи були використані при розробці серійних виробів мікроелектроніки, інтегральної і волоконної оптики, оптико-механічних приладів ІЧ-області спектра, оптико-електронних і інтегрально-оптичних пристосувань спеціального призначення, що дозволило: зменшити висоту залишкових мікронерівностей поверхні виробів в 10...15 разів, підвищити ударну міцність поверхневих шарів виробів на 50...60 %; зменшити габарити і вагу виробів в 4...5 разів; збільшити строк служби виробів в 1,5...2 рази. Економічний ефект від впровадження результатів роботи склав більше 2 млн. крб. / в цінах до 1992 р./.

За тематикою дисертації під керівництвом автора та при його безпосередній участі були виконані науково-дослідні господарські і держбюджетні роботи, теоретичне узагальнення і завершення які знайшли при виконанні проекту 6.8-303 "Розробка технології і метрології електронно-променевої обробки оптичних деталей" /постанова ДКНТ України № 12 від 04.05.92/, науковим керівником якого був автор. Результати роботи використовуються також у навчальному процесі Черкаського інженерно-технологічного інституту.

Апробація роботи. Основні положення, наукові і практичні результати роботи доповідались на міжнародних, Всесоюзних, республіканських і галузевих науково-технічних конференціях, семінарах і нарадах: наукові семінари по технології СВЧ-синтеза /ОІХФ АН СРСР, м. Чорноголовка, Московська обл., 1974 р., 1975 р., 1979 р./; Всесоюзна НТК "Вопросы испарения и газовой динамики дисперсных систем" /Одеський державний університет, 1974 р./; Всесоюзна НТК "Тепловые двигатели в народном хозяйстве" /Іжевський механічний інститут, 1974 р./; галузеві науково-технічні наради з газової динаміки /м. Люберці, Московська обл., науково-дослідний інститут хімічного машинобудування,

1975, 1979 гг./; Всесоюзна НТК "Методы и практические проблемы повышения эффективности использования трудовых, материальных и энергетических ресурсов в химической, нефтехимической, микробиологической промышленности и промышленности строительных материалов" /м. Мінськ, науково-дослідний інститут техніко-економічних досліджень, 1980 р./; Всесоюзний семінар "Методы получения, свойства и области применения нитридов" /м. Рига, інститут неорганічної хімії АН Латв. РСР, 1984 р./; Всесоюзний семінар "САПР и АСУТП в химической промышленности" /м. Черкаси, філіал Київського політехнічного інституту, 1987 р./; Всесоюзна НТК "Проблемы обработки поверхностей деталей машин концентрированными потоками энергии" /м. Мінськ, фізико-технічний інститут, 1988 р./; Всесоюзна НТК "Обработка материалов высококонцентрированными источниками энергии" /Пензенський політехнічний інститут, 1988 р./; Всесоюзна НТК "Современные проблемы механики и технологии машиностроения" /Московський енергетичний інститут, 1989 р./; ІУ Всесоюзна НТК "Применение электронно-ионной технологии в народном хозяйстве" /Московський енергетичний інститут, 1992 р./; П Всесоюзна НТК "Физика и техника монодисперсных систем" /Московський енергетичний інститут, 1991/; І Всесоюзна НТК "Интегральная оптика" /Ужгородський державний університет, 1991 р./; Європейська конференція-виставка по матеріалам та технологіям "Восток-Запад" /м. Санкт-Петербург, Росія, 1993 р./.

Особистий внесок автора. Основні наукові результати дисертаційної роботи отримані автором самостійно. Роботи по експериментальному дослідженню та впровадженню виконувалися разом з співавторами, прізвища яких наведено в переліку публікацій. Із робіт, що опубліковані у співавторстві, використовуються результати, отримані особисто пошукувачем.

Публікації. По темі дисертаційної роботи опубліковано 60 наукових праць, у тому числі 5 монографій, 2 брошури і 3 авторських свідоцтва на винаходи.

Структура і обсяг роботи. Дисертаційна робота складається із вступу, 6 розділів, висновків, списку літератури та додатків і включає 243 сторінки основного тексту, 102 рисунка, 14 таблиць, список літератури з 309 найменувань та 70 сторінок додатків.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

На початку роботи обґрунтовується важливість проблеми, її народно-господарське значення, актуальність питань, яким присвячена дисертація, поставлена мета роботи і сформульовані основні задачі, що вирішуються в ній. В літературному огляді проведено аналіз сучасних технологічних процесів обробки виробів із оптичних матеріалів. Показано, що всім традиційним методам полірування оптичного скла притаманні наступні серйозні недоліки: механічному поліруванню – наявність порушеного поверхневого шару і прихованих дефектів типу подряпин, локальних упроваджень абразивних зерен та ін.; хімічному поліруванню – низька точність збереження геометричних характеристик поверхні, що оброблюється і екологічно брудне виробництво; хіміко-механічне полірування – відсутність екологічної чистоти і наявність порушеного шару, незважаючи на його маду, у порівнянні з механічним поліруванням товщину /десяті долі мкм/; полірування подум'ям і інфрачервоне полірування – непередбаченість зміни геометричних характеристик поверхні виробів і неможливість отримання джерел дії з високою концентрацією енергії. Сучасні методи підвищення міцності оптичних керамік, які направлені, в основному, на зміну стану поверхні матеріала або складу і структури його приповерхневих шарів, а також на використання спеціальних композиційних матеріалів /волокнистих, шаристих та ін./ безпосередньо в технологічних процесах виготовлення матеріалів, малоефективні, екологічно брудні і дорогі. При цьому встановлена принципова можливість і перспективність якісного полірування і зміцнення виробів із оптичного скла і керамік при електронно-променевої обробці, до числа значних переваг якого відносяться: при поліруванні скла усувається порушений шар, приховані дефекти типу рисок, подряпин та ін., формуються поверхні із залишковими мікронерівностями до 5 нм, зберігаються їх геометричні характеристики при екологічно чистому виробництві; зміцнення керамік є достатньо простим методом, який має високу технологічну чистоту і не потребує зміни технології виробництва матеріалу, що використовується.

Але, відсутність систематизованого наукового підходу до рішення проблеми підвищення якості електронно-променевої обробки виробів із оптичного скла і керамік, що базується на сучас-

ному математичному та програмному забезпеченні у вигляді пакетів прикладних програм, а також базі експериментальних даних, що пов'язує основні характеристики якості обробки /температуру поверхні  $T_p$ , висоту залишкових мікронерівностей  $h$ , глибину оплавленого шару  $h_m$ , мікротвердість  $H_v$ , товщину зміцнених шарів  $\Delta$  та ін./ з керованими технологічними параметрами електронного променя /потужністю  $P$  або питомою потужністю  $P_{уд}$ , швидкістю переміщення  $V$ , формою розподілення потужності  $\Psi$ , коефіцієнтом зосередженості  $k$ , часом обробки  $t$  і розмірами зони дії променя/ і враховуючих екстремальні умови експлуатації виробів, не дозволило довести електронно-променевою обробку до рівня керованої, що дає відтворювані результати технологічних процесів. Тому дана робота присвячена створенню наукових основ керування якісними характеристиками поверхні і поверхневих шарів виробів із оптичного скла і керамік різного призначення при їх електронно-променевої обробці з урахуванням екстремальних умов експлуатації

Для проведення досліджень дії електронного променя на виробу із оптичних матеріалів, вибору їх технологічних режимів, а також дослідження і випробування виробів в умовах екстремальних зовнішніх дій був розроблений комплекс установок, що складається із електронно-променевої установки і трьох експериментальних установок по дослідженню зовнішніх дій, які захищені авторськими свідоцтвами на винахід.

Електронно-променева установка складається із наступних основних вузлів:

- приймальної частини інфрачервоного /ІЧ/ випромінювання від оброблюваного виробу на базі фоторезистора і механічного пристрою, що виключає засвічування виробу розкаленою ниткою катода електронної гармати;
- аналого-цифрового перетворювача, що перетворює сигнал з підсилювача у двоїчний код послідууючої машинної обробки;
- керуючої міні-ЕОМ типа КІ-20 для накопичення інформації про зміну температури поверхні виробу, що обробляється;
- привода обертального руху виробу;
- електронної гармати з керованим законом розподілення густини потоку енергії по двом координатам і електростатичним відхиленням променя.

Відмінною особливістю данної установки від існуючих електронно-променевих установок є наявність у неї програмно керованої оснастки для вимірювання температури окремих ділянок оброблюваних поверхонь виробів, а також оригінального механічного пристрою, що представляє собою протифазне обертання дисків з прорізами, для виключення засвічування фоторезистора розкаленою ниткою катода електронної гармати. В установці застосовувався низькоенергетичний електронний промінь стрічкової форми із слідуючими керованими параметрами: питомою потужністю до  $10^4$  Вт/см<sup>2</sup>; швидкістю переміщення до 10 см/с; коефіцієнтом зосередженості до 400 см<sup>-2</sup>; розмірами зони дії до 3...100 мм. В якості об'єктів досліджень використовувались вироби із оптичного скла /К-8, К-108, К-208 та ін./ і керамік /К0-1, К0-2, К0-12 та ін./ різної форми і розмірів: прямокутні пластини /70x14x16 мм/, циліндричні елементи /діаметром 20...25 мм, товщиною 4...6 мм/, сферичні елементи /діаметром 40...50 мм, товщиною 3...8 мм/, криволінійні /з двокрою кривизною/ елементи /радіуси кривизни 5...10 мм, товщина 3...5 мм/; вузькі прямокутні елементи /80x10x4 мм/, полусферичні оболонки /діаметром 25...60 мм, товщиною 2...3 мм/. При цьому, з метою зняття рівня термонапруги в оброблюваних виробках, вони попередньо нагрівались кварцевими лампами до температури  $T_0 = 0,90...0,95 \cdot T^* / T^*$  - температура плавлення /розм'якчення/ оптичного матеріала, при цьому нагрів контролювався за допомогою програмно керованого терморегулятора РИФ-101.

Дослідження структури поверхні і поверхневих шарів, глибини мікрорельєфа /залишкових мікронерівностей на поверхні/, твердості поверхневих шарів, фазового складу, а також опору ударним діям оброблених і необроблених електронним променем виробів проводились за допомогою сучасних методів оптичної і електронної мікроскопії, мікрозондового аналізу, метода реплік /платино-вугільних, золото-вугільних, хромо-вугільних/, дифрактометричних методів та ін. методів фізичного аналізу, що широко використовуються на ведучих державних оптичних підприємствах. Результати експериментальних досліджень оброблювались відомими методами математичної статистики за допомогою спеціально розробленого пакета прикладних програм по методам регресії і інтерполяції, при цьому відносна похибка не перевищувала 10...15 %.

Розроблений комплекс лабораторно-випробувального обладнання складається із слідуючих трьох експериментальних установок і не має вітчизняних і зарубіжних аналогів:

- установка для дослідження і випробування виробів при підвищених зовнішніх тисках до  $250 \text{ кг/см}^2$ ;
- установка для дослідження і випробування виробів при сумісній дії підвищених температур нагріва до  $800 \text{ K}$  і зовнішніх тисках до  $250 \text{ кг/см}^2$ ;
- установка для дослідження і випробування виробів при сумісній дії надзвукового обдуву потоком повітря до  $2000 \text{ м/с}$  і осесиметричного обертання до  $70000 \text{ об/хв}$ .

Найбільш суттєвою відмінною розробленого лабораторно-випробувального комплексу від існуючих газодинамічних установок є те, що вперше в лабораторних умовах здійснено моделювання найбільш жорстких зовнішніх дій – зустрічного надзвукового обдува потоком повітря і осесиметричного обертання виробу, яким він піддається в умовах експлуатації. Розроблена оригінальна методика дослідження структури газового потоку, який обтікає виріб з різними швидкостями, яка базується на шлірен-фотографічних дослідженнях і дозволяє візуально визначити місцезорозташування зон інтенсивної термодії на поверхню виробів.

Для більш точного визначення місцезорозташування указаних зон, з метою їх попередньої обробки електронним променем, були розроблені слідуючі методи їх розрахунку.

Розглянуті газодинамічні задачі надзвукового обдува потоком повітря і нагріва виробів у вигляді пластини і полусферичного обтікателя, що являються основними виробами ІЧ-техніки. В основу задач покладені відомі рівняння в'язкого пограничного шару для зовнішнього газового потоку і рівняння теплопровідності для матеріала виробів. Відміна використаних рівнянь від відомих рівнянь конвективного нагріву пластини і сфери складається в урахуванні температурних залежностей теплофізичних властивостей матеріала виробу /об'ємної теплоємності  $C_v$  і коефіцієнта теплопровідності  $\lambda$  / у вигляді емпіричних формул /відносна похибка 5...8 %/

$$C_{vi} = C_{voi} \cdot T^{\gamma_i}, \quad \lambda_i = \lambda_{oi} \cdot T^{\gamma_i}, \quad /I/$$

де  $C_{voi}$ ,  $\lambda_{oi}$ ,  $\gamma_i$  /  $i = 1, 2, \dots$  - індекс, який відповідає певному типу кераміки/ - емпіричні константи, які врахо-

вують природу і властивості оптичної кераміки. Окрім того, для ламінарного режиму вирішувалась контактна теплова задача, а для турбулентного – коефіцієнти зовнішнього теплообміну брались із даних продувок в аеродинамічних трубах у вигляді емпіричного співвідношення.

В результаті проведення розрахунків на ЕОМ з використанням спеціально розроблених пакетів прикладних програм було встановлено: для ламінарного режиму обтікання /швидкість обдува до 700...1000 м/с/ максимальні температури поверхні виробу знаходяться поблизу передньої критичної точки; у випадку турбулентного режиму обтікання /швидкість обдува більш 1000...1500 м/с/ максимальні значення температури поверхні виробу вже зміщені від передньої критичної точки відповідної  $Q = 0^\circ$ ,  $/\theta$  – сферична координата/ уздовж зовнішнього контура поверхні виробу на величину  $Q = 34...43^\circ$  в залежності від швидкості польоту виробу. Порівняння результату розрахунків з натурними випробуваннями виробів показало, що відміна між ними не перевищує 15...20 %.

Таким чином, за допомогою розроблених методів розрахунку можна прогнозувати з похибкою 10...20 % вплив на місцезостачування зон з інтенсивними термодіями на поверхні пластин і сферичних обтікателів, які піддаються дії надзвукового обдува потоком повітря, режиму обтікання виробів, швидкості і висоти їх польоту, а також часу експлуатації. Це дозволяє на стадії виготовлення виробів, з метою запобігання можливих аномалій в їх роботі, додатково піддавати термозміцненню електронним променем вказані зони і тим самим підвищувати надійність і довговічність виробів із оптичних матеріалів, що експлуатуються в екстремальних зовнішніх умовах.

Для попереднього вибору оптимальних технологічних режимів електронно-променевої обробки виробів був розроблений комплекс нестационарних нелінійних математичних моделей разом з спеціальним програмним забезпеченням їх нагріву стрічковим електронним променем до максимальної температури поверхні, яка не повинна перевищувати температури рідкого стану скла /1300...1500K/, так як в протилежному випадку почнеться процес інтенсивного випарювання скла і поверхня стає хвилеподібною, тобто вказана температура в даному випадку є основним параметром якості обробки. В основу моделей покладено рівняння теплопроводності

з рухомих джерелом теплової дії, яке, наприклад, для виробів прямокутної форми має наступний вигляд /рис. 1/ :

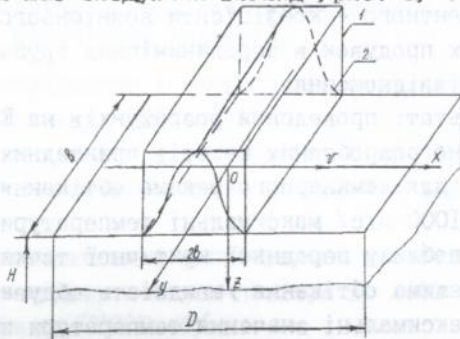


Рис. 1 Схема нагріву виробу прямокутної форми рухомих електронним променем: 1 - рівномірний розподіл потужності джерела в межах полоси  $2b \times B$ ; 2 - гауссовське розподілення потужності джерела в межах полоси  $2b \times B$ ;  $2b$  - ширина рухомого джерела;  $v$  - швидкість одноциклового руху джерела;  $x, y, z$  - система координат, пов'язана з рухомих джерелом;  $B, H, D$  - ширина, товщина і довжина виробу.

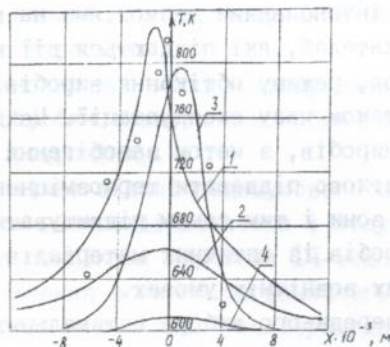


Рис. 2 Розподіл температури в різних точках виробу для різних моментів часу /скло К-208/:  $T_0=600$  К,  $v=2 \cdot 10^{-3}$  м,  $\ell=3 \cdot 10^{-3}$  м,  $k=10^{-2}$  см $^{-2}$ ,  $P=100$  Вт,  $v=0,45 \cdot 10^{-2}$  м/с,  $z=10^{-3}$  м, джерело гауссовського типу; ——— - результати чисельних розрахунків; o - експериментальні дані / $t=1$  с; 1 - при  $t=1$  с і  $y=0$ ; 2 - при  $t=1$  с і  $y=0,67 \cdot 10^{-2}$  м; 3 - при  $t=0,1$  с і  $y=0$ ; 4 - при  $t=0,1$  с і  $y=0,67 \cdot 10^{-2}$  м

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

$$t > 0, \quad -\infty < x, y < +\infty, \quad z > 0, \quad /2/$$

$$T|_{t=0} = T_0, \quad /3/$$

$$-\lambda(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0} = F_{\text{пов}}(x, y, z, t), \quad /4/$$

$$T \rightarrow T_0, \quad \left( \frac{\partial T}{\partial x} \right), \left( \frac{\partial T}{\partial y} \right), \left( \frac{\partial T}{\partial z} \right) \rightarrow 0 \quad \text{при} \quad \begin{matrix} x \rightarrow \pm \infty \\ y \rightarrow \pm \infty \\ z \rightarrow + \infty \end{matrix} \quad /5/$$

де  $F_{\text{пов}}(x, y, z, t)$  - поверхнева густина теплової дії /Вт/см<sup>2</sup>/. Відмінною особливістю вказаного комплексу моделей є те, що він дозволяє в діалоговому режимі більш точно розраховувати багатofакторну дію на вказаний параметр якості обробки виробів, враховуючи їх розміри і форму /тонкоплівкові елементи, одно- і двошарові пластини, циліндричні, сферичні, криволінійні елементи, прямокутні бруски/, температурні залежності теплофізичних властивостей матеріала, а також технологічні параметри променя /потужність, швидкість переміщення, форму розподілу потужності, коефіцієнт зосередженості, розміри зони дії/. При рішенні рівнянь моделі типа /2/ - /5/ використовувались емпіричні залежності /1/, а також методи інтегральних перетворень Фур'є. Співставлення результатів розрахунків з експериментальними даними /рис. 2/ показують, що відміна між ними не перевищує 10...15 %.

При відпрацюванні технологічних режимів полірування виробів із оптичного скла поряд з прогнозуванням і контролем допустимих значень максимальної температури оброблюваної поверхні, важливе значення має прогнозування іншого параметра якості обробки - оптимальної глибини рідкої ванни /глибини оплавлення/,

яка утворюється на поверхні оброблюваного виробу, в залежності від різних режимів полірування. Це обумовлено тим, що при виникненні глибокого проплавлення виробу /більш 300...400 мкм/ виникає помітне розтікання розплаву, яке призводить до зміни форми і розмірів виробу, тобто до його відбраковки.

Для прогнозування глибини оплавлення виробів стрічковим електронним променем були використані квазістаціонарні математичні моделі типа /2/ - /5/ з урахуванням залежностей /1/. Відміню цих моделей є те, що в них ураховуються різні швидкісні режими руху променя: промінь, який рухається з помірною швидкістю /не більш 0,2 см/с / і швидко рухаючийся промінь /швидкість руху до 10 см/с і більше/. Співставлення результатів розрахунків залежностей максимальної глибини зони оплавлення від основних параметрів променя з експериментальними даними /рис. 3, 4/ показало, що відміни між ними лежать в межах 15...20 %.

При обробці протяжених виробів одиничним рухомих джерелом теплової дії /електронним променем, лазерним променем та ін./, як показано професорами А.М.Бутковським, Є.П.Чубаровим, Г.К.Кубишкіним та ін. для отримання необхідної розподіленої теплової дії вздовж оброблюваної поверхні /рівномірна, гауссовська та ін./ необхідно керувати швидкістю руху джерела, а така задача керування в теперішній час ще не вирішена. Тому в даній роботі вперше запропонований метод реалізації заданої розподіленої теплової дії за допомогою сукупності нерухомих дискретно розташованих вздовж оброблюваної поверхні джерел гауссовського типа /одиничних стрічкових електронних променів/ різної інтенсивності і коефіцієнта зосередженості, що захищений авторським свідоцтвом на винахід. Для чисельної реалізації на ЕОМ вказаного метода був розроблений алгоритм, в основу якого покладено рішення задачі середньоквадратичної апроксимації дискретизованої заданої розподіленої дії  $P(X_i) / i = 1, 2, \dots, M$ ;  $M$  - задане число розбивки ділянки дії / суперпозицією імпульсів  $I_j$  типа

$$I_j = \frac{1}{\sigma_j \cdot (2\pi)^{1/2}} \cdot \exp\left[-\frac{(X_i - S_j)^2}{2\sigma_j^2}\right], \quad /6/$$

де  $j = 1, \dots, N$  /  $N$  - задане число імпульсів;/;  $S_j$  - положення  $j$ -го джерела;  $k_j = 1/2\sigma_j^2$  - коефіцієнт зосередженості  $j$ -го джерела.

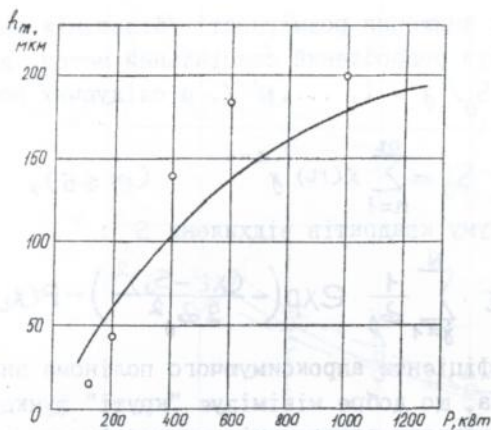


Рис. 3. Залежність максимальної глибини оплавлення виробів від потужності рухомого електронного променя /оптичне скло К-8/:  $T_0 = 600$  К,  $k = 10^2 \text{ см}^{-2}$ ,  $V = 0,05$  см/с, розміри зони дії  $20 \times 30$  мм,  $X = 0,2$  см, ———— - результати розрахунків, о - експериментальні данні.

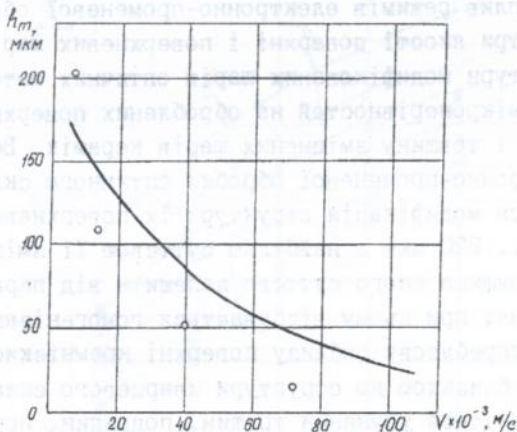


Рис.4 Залежність максимальної глибини оплавлення виробів від швидкості переміщення електронного променя:  $T_0 = 600$  К,  $k = 10^2 \text{ см}^{-2}$ ,  $P = 10^3$  Вт, розміри зони дії  $20 \times 30$  мм,  $X = 0,2$  см, ———— - результати розрахунків, о - експериментальні данні.

Для значного зниження розмірності /більш, ніж на порядок/ вказаної задачі був розроблений спеціальний метод, який полягає в знаходженні не  $S_j / j = 1, \dots, N /$ , а слідуєчих поліноміальних залежностей  $S_j$  :

$$S_j = \sum_{n=1}^m x(n) \cdot j^{n-1} \quad (m \leq 5), \quad /7/$$

які мінімізують суму квадратів відхилень  $S$  :

$$S = \sum_{i=1}^M \left[ \frac{1}{(2\pi)^{1/2}} \cdot \sum_{j=1}^N \frac{1}{\sigma_j} \cdot \exp\left(-\frac{(x_i - S_j)^2}{2\sigma_j^2}\right) - P(x_i) \right]^2 \quad /8/$$

При цьому коефіцієнти апроксимуючого полінома знаходяться методом Розенброка, що добре мінімізує "круті" функції.

Отримані результати розрахунків по спеціально розробленому програмному забезпеченню показали, що за прийнятний для практики час обробки можна знаходити оптимальну кількість одиничних електронних променів, їх місцерозташування, потужність в центрах дії і коефіцієнти засередженості.

Для отримання необхідної бази експериментальних даних, вперше були проведені систематизовані дослідження і отримані нові данні про вплив режимів електронно-променевої обробки на такі важливі параметри якості поверхні і поверхневих шарів виробів, як зміна структури модифікованих шарів оптичних матеріалів, висоту залишкових мікронерівностей на оброблених поверхнях скла, мікротвердість і товщину зміцнених шарів керамік. Встановлено, що після електронно-променевої обробки оптичного скла оплавленням відбувається модифікація структури їх поверхневих шарів на глибину до 200...220 мкм з найбільш суттєвою її зміною в оплавленому шарі, товщина якого суттєво залежить від параметрів електронного променя; при цьому відбувається гомогенізація поверхні і орієнтована перебудова поблизу поверхні кремнікисневої сітки скла, яка стає близькою до структури кварцевого скла; на самій поверхні відбувається усунення тріщин, подряпин, порушеного шару / глибиною 1...3 мкм/ і зменшуються висоти остаточних мікронерівностей з 30...40 нм після механічного полірування до кількох нм після електронно-променевої обробки, величина яких також суттєво залежить від параметрів променя /рис. 5,6/. Отримано, що при електронно-променевій дії без оплавлення на оптичну кераміку відбувається помітна зміна структури матеріала на глибину 150...200 мкм, мікрореформація кристалічної ґратки, поява стис-

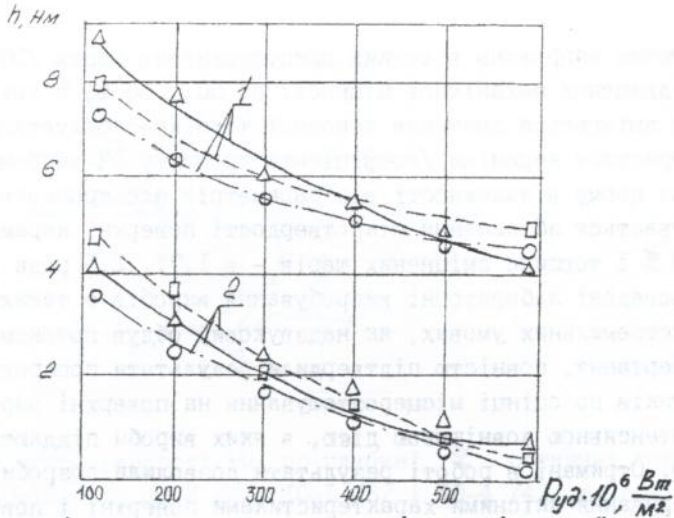


Рис. 5 Залежність висоти залишкових мікронерівностей поверхні оптичного скла від питомої потужності електронного променя: 1 -  $v = 8 \cdot 10^{-2}$  м/с; 2 -  $v = 3 \cdot 10^{-3}$  м/с; — — — скло К-8; - - - - скло ТФ-II0; - . - . - скло БК-10; ○, Δ, □ - експериментальні точки.

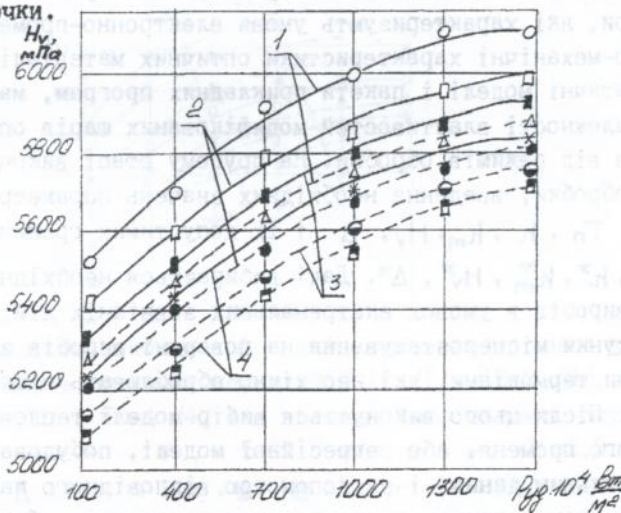


Рис. 6 Залежність мікротвердості  $H_v$  поверхні оптичних керамік КО-12 /1/, КО-2 /2/, КО-1 /3/ і КО-4 /4/, які оброблені електронним променем, від його питомої потужності: — — —  $v = 6 \cdot 10^{-3}$  м/с; - - - -  $v = 1,3 \cdot 10^{-2}$  м/с; ○, Δ, □, \*, ●, ■, ⊙ - експериментальні точки

куючих напружень в тонких приповерхневих шарах /30...50 мкм/ і підвищення механічної міцності до 50...60 %, а також практично не змінюються значення основної техніко-експлуатаційної характеристики кераміки /коефіцієнта пропуску ІЧ-випромінювання/; при цьому в залежності від параметрів електронного променя відбувається збільшення мікротвердості поверхні кераміки до 30...40 % і товщини зміцнених шарів - в 1,7...2,5 рази /рис. 7,8/. Проведені лабораторні випробування виробів в таких складних екстремальних умовах, як надзвуковий обдув потоком повітря і обертання, повністю підтвердили результати попередніх розрахунків по оцінці місцерозташування на поверхні виробів зон з інтенсивною зовнішньою дією, в яких вироби піддаються порушенню. Отримані в роботі результати дозволили розробити алгоритм керування якісними характеристиками поверхні і поверхневих шарів оптичних матеріалів при дії на них стрічкового електронного променя.

Сутність даного алгоритма в наступному. На першому етапі формується база даних, яку створюють параметри екстремальних зовнішніх дій, технологічні параметри електронного променя, параметри, які характеризують умови електронно-променевої обробки, фізико-механічні характеристики оптичних матеріалів, отримані математичні моделі і пакети прикладних програм, масив даних про залежності властивостей модифікованих шарів оптичних матеріалів від режимів обробки. На другому етапі виконується вибір мети обробки, введення необхідних значень параметрів якості обробки  $T_n, h, h_m, H_V, \Delta$  і їх допустимих граничних значень

$T_n^*, h^*, h_m^*, H_V^*, \Delta^*$ . Далі вибирається необхідна модель нагріву виробів в умовах екстремальних зовнішніх дій, виконуються розрахунки місцерозташування на поверхні виробів зон з інтенсивними термодіями, які необхідно обробляють електронним променем. Після цього виконується вибір моделі теплової дії електронного променя, або регресійної моделі, побудованої по експериментальним даним, і за допомогою відповідного пакету прикладних програм виконується розрахунок параметрів обробки  $/T_n, h, h_m, H_V, \Delta/$ , по яким визначаються величини технологічних параметрів електронного променя  $/P$  або  $P_{уд}, \psi, k, v, \epsilon$ , розміри зони дії/, потім вказані параметри якості обробки співставляються з їх граничними значеннями. При наявності розход-

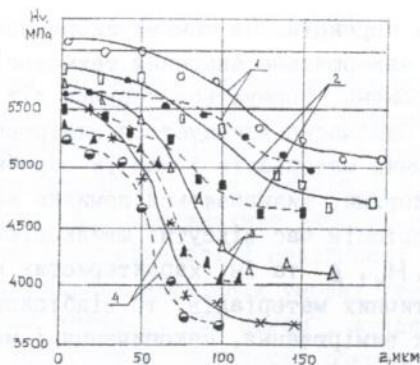


Рис. 7 Зміна мікротвердості  $H_V$  по глибині  $z$  оптичних керамік КО-12 /1/, КО-2 /2/, КО-1 /3/ і КО-4 /4/, що оброблені електронним променем, для різних швидкостей його переміщення  $P_{yg} = 10^7 \text{ Вт/м}^2$ ; — — —  $V = 6 \cdot 10^{-3} \text{ м/с}$ ; - - - -  $V = 1,3 \cdot 10^{-2} \text{ м/с}$ ;  $\circ, \Delta, \square, *, \bullet, \blacksquare, \blacktriangle, \ominus$  - експериментальні точки.

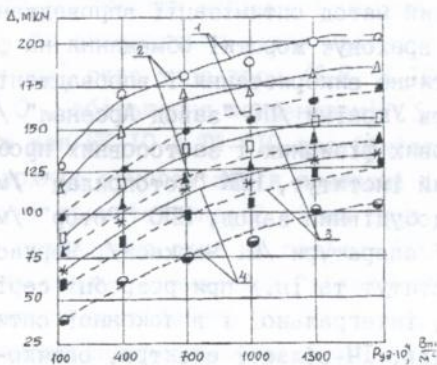


Рис. 8 Залежність глибини  $\Delta$  зміцнених електронним променем шарів оптичних керамік КО-12 /1/, КО-2 /2/, КО-1 /3/ і КО-4 /4/ від значень його питомої потужності: — — —  $V = 6 \cdot 10^{-3} \text{ м/с}$ ; - - - -  $V = 1,3 \cdot 10^{-2} \text{ м/с}$ ;  $\circ, \Delta, \square, *, \bullet, \blacktriangle, \blacksquare, \ominus$  - експериментальні точки.

жень виконується їх корекція. На основі скоректованих параметрів розраховується завершальне значення технологічних параметрів електронного променя, формується керуюча дія і здійснюється запуск процесу. Одночасно виконується вимірювання температури поверхні оптичних матеріалів і час їх обробки, які зіставляються з розрахунковими, визначається помилка керування.

Оскільки в теперішній час відсутні швидкодіючі прилади для вимірювання  $h$ ,  $h_m$ ,  $N_v$ ,  $\Delta$  та ін. характеристик поверхні і поверхневих шарів оптичних матеріалів, то відбірково виконуються експериментальні їх вимірювання, накопичення і математична обробка, отримані дані порівнюються з вхідними даними. При наявності розходжень виконується корекція математичних моделей. На базі цього алгоритма, при вирішенні питання формалізації усіх зв'язків, може бути створена автоматизована система керування процесом електронно-променевої обробки виробів із оптичних матеріалів, які експлуатуються в екстремальних зовнішніх умовах.

Основні результати дисертації, включаючи розроблений науково-обґрунтований метод оптимізації впровадження виробів на підприємстві, що враховує жорсткі обмеження на фінансові кошти, знайшли практичне використання і впроваджені на ряді державних підприємств України /ПО "завод Арсенал" /м.Київ/, Київський інститут нових фізичних і застосовних проблем, Запорізький машинобудівний інститут, НПК "Фотоприлад" /м. Черкаси/, Черкаський приладобудівний завод, НПО "Ротор" /м. Черкаси/, завод телеграфної апаратури /м. Черкаси/, Черкаський інженерно-технологічний інститут та ін./ при розробці серійних виробів мікроелектроніки, інтегральної і волоконної оптики, оптико-механічних приладів, ІЧ-області спектра, оптико-електронних і інтегрально-оптичних пристосувань бортових систем керування аеродинамічною технікою, що дозволило: зменшити висоту залишкових мікронерівностей поверхні виробів в 10...15 разів; підвищити міцність поверхневих шарів виробів на 50...60 %; зменшити габарити і вагу виробів в 4...5 раз; збільшити строк служби виробів в 1,5...2 рази. Економічний ефект від впровадження результатів роботи склав більш 2 млн. крб. /в цінах до 1992 р./.

1. На основі теоретико-експериментальних досліджень вперше вирішена наукова проблема керування якістю електронно-променевої обробки виробів із оптичного скла і керамік, що використовуються в мікроелектроніці, інтегральній і волоконній оптиці, засобах ІЧ-техніки, яка має важливе народно-господарське значення для підвищення довговічності і надійності виробів, що експлуатуються в екстремальних зовнішніх умовах /температура нагріву до 300 К, зовнішні тиски до 250 кг/см<sup>2</sup>, швидкості обдува потоком повітря до 2000 м/с, кутові швидкості обертання до 70000 об/хв/.

2. Вперше встановлено, що в результаті електронно-променевої обробки оптичного скла оплавленням при зміні питомої потужності стрічкового електронного променя від  $10^6$  Вт/м<sup>2</sup> до  $5 \cdot 10^8$  Вт/м<sup>2</sup> і швидкості його переміщення від  $10^{-2}$  м/с до  $10^{-3}$  м/с відбувається: усунення на поверхні тріщин глибиною 0.1...1 мкм, подряпин довжиною 2...10 мкм, порушеного шару товщиною 1...3 мкм і зменшення висоти залишкових мікронерівностей /від 30...40 нм до 0,5...1,2 нм/, що залишаються після механічного полірування; зменшення на поверхні скла типа крон /К-8, К-108, К-208/ концентрації Na і O, збільшення концентрації Si і постійність концентрації K, а для БК-10 і ТФ-110 постійність хімічного складу вздовж їх поверхні; гомогенізація поверхні і орієнтована перестройка у поверхні кремнієкисневої сітки скла в структуру кварцевого скла; оплавлення скла на глибину 200...220 мкм в залежності від марки скла з елементами "в'язкого" порушення, при цьому спостерігається нестійкість K<sub>2</sub>O і Na<sub>2</sub>O по глибині дії стрічкового електронного променя. Отримані емпіричні формули /з відносною похибкою 5...8 %/ для чисельного прогнозування і оптимізації ступеня впливу технологічних параметрів променя на висоту залишкових мікронерівностей оброблених поверхонь скла і товщину рідкої ванни, що утворюється на них.

3. Вперше показано, що при дії стрічкового електронного променя без оплавлення на оптичну кераміку при зміні його питомої потужності в діапазоні  $10^6$ ... $1,5 \cdot 10^7$  Вт/м<sup>2</sup> і швидкості переміщення -  $1,5 \cdot 10^{-2}$ ... $10^{-3}$  м/с відбувається помітне зміння структури матеріалу /збільшення зернистості без фазових перетворень/ на глибину до 150...200 мкм, збільшення мікротвердості поверхні на 20...40 % і товщини зміцненого шару в 1,5...2,5 рази в залеж-

ності від марки кераміки, виникнення стискуєчих напружень в приповерхневих шарах товщиною 30...50 мкм і підвищення механічної міцності виробів на 30...60 % без помітної зміни основної техніко-експлуатаційної характеристики кераміки – коефіцієнта пропуску ІЧ-випромінювання. Отримані емпіричні формули для чисельного прогнозування і оптимізації з відносною похибкою 6...9 % ступеня впливу технологічних параметрів променя на підвищення мікротвердості поверхні керамік і зміну товщини їх зміцнених шарів.

4. В результаті проведених досліджень по впливу екстремальних зовнішніх дій на вироби із оптичної кераміки отримані слідуючі нові данні: при підвищеному зовнішньому тиску /до 250 кг/см<sup>2</sup>/, спільному впливу рівномірного нагріву /до 800 К/ виробів і зовнішнього тиску /до 100 кг/см<sup>2</sup>/ помітних порушень цілості їх поверхні і погіршення коефіцієнта пропуску ІЧ-випромінювання не спостерігається; в умовах обдува надзвуковим потоком повітря /до 2000 м/с/ і осесиметричному обертанні виробів /до 70000 об/хв/ найбільш сильний вплив на місцерозташування тих ділянок їх поверхні, які порушуються в процесі випробувань, виявляє обдув потоком повітря /збільшення швидкості обдува призводить до зміщення указаних зон із розташування передньої критичної точки /від  $\Theta = 0^\circ$  – сферична координата/ обтікателя вздовж зовнішньої лінії контура обтікателя /до  $\Theta = 35...45^\circ$ //; показано, що при електронно-променевої обробці виробів в зонах інтенсивних термодій, які виникають при експлуатації виробів в умовах обдува і обертання, вироби вже не порушуються і значення коефіцієнта пропуску ІЧ-випромінювання не змінюються.

5. Розроблені нелінійні математичні моделі теплової дії стрічкового електронного променя на вироби із оптичних матеріалів різної форми і розмірів, що враховують температурні залежності теплофізичних властивостей матеріалів: нестационарні моделі нагріву виробів із оптичного скла і керамік, що дозволяє прогнозувати з більш високою ступенню точності /відносна похибка 10...15 % замість 30...40 % для існуючих математичних моделей/ оптимальні діапазони зміни параметрів електронного променя /потужності і форми її розподілення, швидкості переміщення, коефіцієнта зосередженості і розмірів/, що реалізують задані розподілення температури, градієнта температури і швидкості на-

грівів в оброблюваних виробів; нові квазістаціонарні моделі опалення поверхневих шарів виробів із оптичного скла, які дозволяють для різних швидкісних режимів руху електронного променя прогнозувати з відносною похибкою 15...20 % вплив основних його параметрів/питомої потужності і швидкості переміщення/ на протяжність і глибину рідкої ванни, яка утворюється на поверхні оброблюваних виробів.

6. Вперше запропонований теоретичний метод оптимального керування спільною дією стрічкових електронних променів на оброблювані протяжені вироби, що дозволяє розрахунковим шляхом визначати оптимальні параметри електронних променів /число променів, їх місцезростащування, потужність і коефіцієнт зосередженості кожного променя/, тобто програмно керувати процесом електронно-променевої обробки.

7. Для чисельного прогнозування з відносною похибкою 15...20 % місцезростащування на поверхні виробів із оптичних керамік зон інтенсивної дії в умовах надзвучкового обдува потоком повітря /до 2000 м/с/, які необхідно оброблювати електронним променем, запропоновані удосконалені нелінійні математичні моделі кінетичного нагріву виробів /пластини, сферичні оболонки/, що враховують температурні залежності теплофізичних властивостей матеріала, розміри і форму виробів, різні режими обтікання. В результаті розрахунку по вказаним моделям встановлено: зона основної термодії на пластину розташована поблизу її переднього краю незалежно від режимів експлуатації виробів і має місце сильний взаємний вплив повітряного потоку і пластини, зона основної термодії на сферичну оболонку розташована в околиці передньої критичної точки для ламінарного режиму обтікання, а для турбулентного режиму - вже зміщена на значні відстані вздовж зовнішнього контура поверхні оболонки, суттєво залежне від швидкості польоту виробу, розмірів і матеріалу оболонки.

8. Вперше розроблена нелінійна економіко-математична модель, модифікований чисельний алгоритм і програмне забезпечення оптимізації впровадження на підприємстві виробів із оптичного скла і керамік з покращеними техніко-експлуатаційними характеристиками після їх якісної електронно-променевої обробки в умовах жорстких обмежень на фінансові кошти.

9. Вперше розроблений алгоритм керування процесами електронно-променевої обробки виробів із оптичного скла і керамік, створений на основі отриманих нелінійних математичних моделях і спеціалізованого програмного комплексу у вигляді пакетів прикладних програм, які зв'язують технологічні параметри обробки з якісними характеристиками поверхні і зовнішніх шарів оптичних матеріалів з урахуванням екстремальних зовнішніх умов, а також бази даних, отриманих на удосконаленому електронно-променевому технологічному обладнанні і лабораторно-випробувальних установках, що моделюють умови експлуатації виробів.

10. Розроблений новий програмний комплекс, що складається з 9 спеціалізованих пакетів прикладних програм для рішення широкого класу інженерно-технологічних задач /теплових, дифузійних, гідро- і газодинамічних та ін./ на ПЕОМ класа IBM, включаючи технологічні задачі електронно-променевої обробки виробів із оптичного скла і керамік, що складає в систематизованому вигляді І4І програмний модуль по найбільш ефективним чисельним методам. Програмний комплекс може бути використаний в системах автоматизованого проектування і керування технологічними процесами в різних галузях промисловості.

11. Розроблені і захищені авторськими свідоцтвами на винахід:

- технологічне електронно-променеве обладнання, що має на відміну від існуючих електронно-променевих установок, спеціалізовану програмно керовану оснастку для вимірювання температури окремих ділянок оброблюваної поверхні виробів з точністю  $\pm 5^{\circ}\text{C}$ ;
- комплекс із трьох лабораторно-випробувальних установок, що не має вітчизняних і зарубіжних аналогів, для дослідження поведінки виробів при зовнішньому тиску до  $250 \text{ кг/см}^2$ , спільній дії нагріву до  $800 \text{ K}$  і зовнішнього тиску до  $250 \text{ кг/см}^2$ , спільній дії обдува потоком повітря до  $2000 \text{ м/с}$  і несиметричному обертанні до  $70000 \text{ об/хв.}$ ; при цьому основні вузли установок являються оригінальними і сприяють підвищенню ефективності роботи всього комплексу /мультиплікатор для підняття тиску в камері і вузол обертання виробу/

12. Основні результати роботи знайшли практичне використання на ряді підприємств України в 1984-1994 рр. /ПО "завод

Арсенал" /м. Київ/, ЦКБ "Арсенал" /м. Київ/, інститут нових фізичних і застосовних проблем /м. Київ/, Запорізький машинобудівний інститут, НПС "Ротор" /м. Черкаси/, НПК "Фотоприлад" /м. Черкаси/, Черкаський завод телеграфної апаратури, Черкаський приладобудівний завод та ін./ при розробці серійних виробів мікроелектроніки, інтегральної і волоконної оптики, оптико-механічних приладів ІЧ-області спектра, оптико-електронних і інтегрально-оптичних пристосувань спеціального призначення, що дозволило:

- зменшити висоту залишкових мікронерівностей поверхні виробів в 10...15 разів;
- підвищити ударну міцність поверхневих шарів виробів на 50...60 % ;
- зменшити габарити і вагу виробів в 4...5 разів;
- збільшити строк служби виробів в 1,5...2 раза.

Економічний ефект від впровадження результатів роботи склав більше 2 млн. крб. /в цінах до 1992 р./.

## РЕЗУЛЬТАТИ ДИСЕРТАЦІЇ

опубліковані в 60 роботах, основними з яких є:

1. Ващенко В.А. Лабораторно-технологическое оборудование для проведения исследований и испытаний изделий в условиях повышенных внешних давлений. - В кн.: Металлические горючие гетерогенных конденсированных систем /Силин Н.А., Ващенко В.А., Кашпоров Л.Я. и др. - М.: Машиностроение, 1976, 320 с.

2. Ващенко В.А. Лабораторно-технологическое оборудование для проведения исследований и испытаний изделий в условиях повышенных температур нагрева и внешних давлений. - В кн.: Окислители гетерогенных конденсированных систем /Силин Н.А., Ващенко В.А., Зарипов Н.И. и др. М.: Машиностроение, 1978, 426 с.

3. Ващенко В.А. Лабораторно-технологическое оборудование для проведения исследований и испытаний изделий в условиях повышенных скоростей обдува потоком воздуха и вращения. - В кн.: Горение металлизированных гетерогенных конденсированных систем /Силин Н.А., Ващенко В.А., Кашпоров Л.Я. и др. - М.: Машиностроение, 1982, 232 с.

4. Прогнозирование оптимальных технологических режимов и областей устойчивого взаимодействия концентрированных источников энергии с материалами. Монография /Ващенко В.А., Черкасский инженерно-технологический институт. - Черкассы, 1994, 173 с.: ил. - 53, Библиогр. - 65 назв. - Рус. Деп. в ВИНТИ 14.03.94 № 45 - хп 94.

5. Высокотемпературные технологические процессы взаимодействия концентрированных источников энергии с материалами. Монография /Ващенко В.А. Черкасский инженерно-технологический институт. - Черкассы, 1996, 403 с.: ил. - 88, Библиогр. - 343, назв. - Рус. Деп. в ВИНТИ 22.03.96 № 24 - хп 96.

6. Ващенко В.А., Пистун А.М., Артеменко А.П., Тетерко А.Д. Термообработка межслойной изоляции на основе ситаллоцемента СТ-273 толстопленочных микросборок. - Техника средств связи, серия ТПО, вып. 2, 1987, с. 48-52.

7. Ващенко В.А. Оптимальный выбор мероприятий по новой технике на предприятиях промышленного объединения. - Механизация и автоматизация управления, 1987, № 2, с. 1-5.

8. Ващенко В.А., Шигимага А.Ф., Ланин Ю.А. Опыт применения математического моделирования для оптимального выбора мероприятий по новой технике на предприятии химической промышленности. - Экономика и математические методы, 1983, № 3, с. 539-544.

9. Канашевич Г.В., Дубровская Г.Н., Ващенко В.А., Лисоченко В.Н., Котельников Д.И. Модификация структуры и свойств зоны термовоздействия при обработке ленточным электронным лучом оптических материалов. - Тезисы докладов IV Всесоюзной конференции "Применение электронно-ионной технологии в народном хозяйстве", Московский энергетический институт, 1991, с. 171-173.

10. Ващенко В.А., Кривенко Н.И., Канашевич Г.В., Лисоченко В.Н., Котельников Д.И. Численно-экспериментальное исследование теплового воздействия подвижного электронного луча на оптические материалы. - Тезисы докладов IV Всесоюзной конференции "Применение электронно-ионной технологии в народном хозяйстве", Московский энергетический институт, 1991, с. 169-171.

## II.

Vaschenko V.A., Konopaltseva L.I., Kanashevich G.V. Modeling of optical materials processing process by electron beam method. The 4<sup>rd</sup> European East-West conference exhibition on materials and processes, F/p. 46. City of St.Peterburg, Russia, 1993.

12. Kanashevich G.V., Konopaltseva L.I., Vaschenko V.A. Gradient structure in optical materials for integrated optics created by electron beam method. The 4<sup>th</sup> European East-West conference exhibition on materials and processes, F/p. 45. Citi of St. Peterburg, Russia, 1993.

13. Ващенко В.А., Унрод В.И. Математическое моделирование и оптимизация быстротекущих технологических процессов. - Тезисы докладов на Всесоюзном научно-техническом семинаре "САПР и АСУТП в химической промышленности", Черкасский филиал КПИ, 1987, с. 66-67.

14. А.с. № I304I3. Изделия ИК-техники, эксплуатирующиеся в условиях обдува потоком воздуха и вращения /Ващенко В.А., Емельянов В.М., Кожакин В.Н. и др. - 1979.

15. Положительное решение по заявке № 494I29/2I/046728. Устройство для электронно-лучевой полировки изделий /Котельников Д.И., Канашевич Г.В., Ващенко В.А. и др. - 1992.

16. Модификация свойств поверхностей подложек интегральных схем /Канашевич Г.В., Ващенко В.А., Дубровская Г.Н., Черкасский инженерно-технологический институт. Черкассы, 1992, 13 с.: ил. - , Библиогр. - 8, назв. - Рус. Деп. в Укр ИНЕИ 25.08.92 № I322- Ук. 92.

17. Низкоэнергетическая электронно-лучевая обработка поверхности стекла и возможности ее использования в технологии ИО / Г.В.Канашевич, В.А.Ващенко, Л.И.Конопальцева, Н.И.Жученко, Черкасский инженерно-технологический институт. Черкассы, 1993, 10 с.: ил. - 4, Библиогр. - 8, назв. - Рус. Деп. ГНТБ Украины 26.07.93 № I615 - Ук 93.

18. Прогнозирование оптимальных режимов взаимодействия несоорганизующихся концентрированных источников энергии с оптическими материалами на основе моделирования /Ващенко В.А., Черкасский инженерно-технологический институт. Черкассы, 1994, 44 с.: ил. - 14, Библиогр. - 31, назв. - Рус. Деп. в ВИНТИ 20.01.94 № I2 - хп 94.

19. Математические модели для прогнозирования оптимальных режимов взаимодействия концентрированных источников энергии с материалами /Ващенко В.А., Черкасский инженерно-технологический институт. Черкассы, 1994, 78 с.: ил. - 10, Библиогр. - 247, назв. - Рус. Деп. в ВИНТИ 02.03.94 № 29 - хп 94.

20. Прогнозирование оптимальных технологических режимов взаимодействия ленточного электронного луча с оптическими стеклами /Ващенко В.А., Черкасский инженерно-технологический институт. Черкассы, 1994, 15 с. : ил. - 2, Библиогр. - 26, назв. - Рус. Деп. в ВИНТИ 03.03.94 № 41 - хп 94.

21. Комплекс программных средств для решения инженерных задач на ПЭВМ, совместимых с IBM, PC, AT, XT, по моделированию оптимизации и управлению процессами взаимодействия концентрированных источников энергии с материалами /Ващенко В.А., Черкасский инженерно-технологический институт. Черкассы, 1994, 31 с.: ил. - 3, Библиогр. - 147, назв. - Рус. Деп. в ВИНТИ 02.03.94 № 31 - хп 94.

22. Универсальная научная методология для прогнозирования оптимальных технологических режимов и областей устойчивого взаимодействия концентрированных источников энергии с материалами /Ващенко В.А., Черкасский инженерно-технологический институт. Черкассы, 1994, 37 с. : ил. - 7, Библиогр. - 147, назв. - Рус. Деп. в ВИНТИ 02.03.94 № 32 - хп 94.

23. Влияние обдува потоком воздуха и вращения изделий на технологические процессы взаимодействия концентрированных источников энергии с материалами /Ващенко В.А., Черкасский инженерно-технологический институт. Черкассы, 1994, 13 с.: ил. - 4, Библиогр. - 16, назв. - Рус. Деп. в ВИНТИ 22.08.94 № 110 - хп 94.

24. Экспериментальные исследования свойств поверхности и поверхностных слоев изделий из оптических керамик, модифицированных электронным лучом, и их состояния в реальных условиях эксплуатации /Ващенко В.А., Черкасский инженерно-технологический институт. Черкассы, 1996, 25 с.: ил. - 9, Библиогр. - 15, назв. - Рус. Деп. в ВИНТИ 04.01.96 № 2 - хп 96.

25. Разработка и исследование методов реализации оптимального распределенного воздействия с помощью локальных источников /Ващенко В.А., Черкасский инженерно-технологический институт. Черкассы, 1995, 18 с.: ил. - 1, Библиогр. - 10, назв. - Рус. Деп. в ВИНТИ 21.08.95 № 73 - хп 95.

26. Прогнозирование поверхностных участков полусферических изделий подвергающихся максимальным термонагрузкам в условиях сверхзвукового обдува потоком воздуха и вращения /Ващенко В.А., Черкасский инженерно-технологический институт. Черкассы, 1996, 37 с.: ил. - 9, Библиогр. - 32, назв. - Рус. Деп. в ВИНТИ 04.01.96 № 1 - хп 96.

## А Н Н О Т А Ц И Я

Вашченко В.А. Научные основы управления качеством электронно-лучевой обработки изделий из специальных оптических материалов.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.03.07 – Процессы лазерной и физико-технической обработки. Национальный Технический Университет Украины "Киевский политехнический институт", Киев, 1996.

Защищается 60 научных работ, в том числе 5 монографий, 2 брошюры и 3 авторских свидетельства, которые содержат теоретико-экспериментальные исследования процессов теплового воздействия ленточного электронного луча на изделия из оптических стекол и керамик с учетом экстремальных внешних условий их эксплуатации: повышенные температуры нагрева и внешние давления, сверхзвуковой обдув потоком воздуха и осесимметричное вращение. Разработаны математические модели нагрева и оплавления изделий в условиях их эксплуатации и при воздействии электронного луча, приведены результаты экспериментальных исследований зависимостей параметров качества их обработки от технологических параметров луча, полученных на модифицированном электронно-лучевом оборудовании, а также результаты исследований поведения изделий на разработанных лабораторно-испытательных установках, моделирующих их условия эксплуатации. На базе полученных математических моделей, специально разработанных пакетах прикладных программ, экспериментальных данных, что представляют собой технологические основы, разработан алгоритм управления качественными характеристиками поверхности и поверхностных слоев оптических материалов при электронно-лучевой обработке для конкретных условий эксплуатации. Осуществлено промышленное внедрение результатов исследований.

## S U M M A R Y

Vashchenko V.A. Scientific Basis of the control of the quality of electro-radial treatment of the products made of the special optical materials.

The dissertation for the academic degree of Doctor of Technical Sciences, speciality 05.03.07 - The Process of Laser and Physics and Technical Treatment. The National Technical University of Ukraine "The Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, 1996.

60 research works are being defended including 5 monographs, 2 brochures and 3 author's certificates, which present theoretical experimental researches of how the processes of heat influence of conveyer electric rays affect the optical glass and ceramic products taking into consideration the extreme external conditions of their exploitation: higher temperatures of heating and external pressures, ultrasound blowing by air stream and axis symmetrical rotation. The mathematic models of heating and fusion of the products under the conditions of their exploitation and under the influence of an electric ray are designed, the results of experimental research of the dependence of the quality of their treatment upon the technological dimensions of a ray, obtained by help of modified electro-radial equipment, as well as the results of the researches of the products conduct while being treated by the specially designed experimental plants, modeling their exploitation conditions are included. The algorithm of the control of the quality characteristics of the surface and its strata of optical materials by electro-radial treatment for the concrete conditions of exploitation is designed on the basis of mathematic models, purposefully designed programmes and experimental data, which present the technological base.

#### КЛЮЧОВІ СЛОВА:

електронний промінь, оптичне скло і кераміка, параметри якості обробки, теплові процеси, оптимальне керування.

436983

AB 35.039

-----  
Формат 60x84 1/16. Папір коп.  
Тираж 100 прим. Зам. N 170

-----  
Редакційно-видавничий відділ ЧПТ  
257006, м. Черкаси, бульвар Шевченка, 460, 4к.