

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЕЛЕКТРОННОЇ МІКРООБРОБКИ ВИРОБІВ
З ОПТИЧНИХ МАТЕРІАЛІВ

Яценко І.В., к.т.н., доцент,
Ващенко В.А., д.т.н., професор,
Цибулін В.В.,
Рева І.А.,
Чепурна О.М.

Черкаський державний технологічний університет

На базе разработанных математических и экспериментально-статистических моделей термогазодинамических процессов и физикотехнических процессов обработки, а также специализированного программного комплекса в виде двух пакетов прикладных программ была сформулирована методология обоснования условий повышения эффективности электронной обработки оптических материалов.

Ключевые слова: электронная микрообработка, математические и экспериментально-статистические модели, термогазодинамические процессы обработки, физикотехнические процессы обработки

Вступ

Розвиток техніки висуває підвищені вимоги до якості, надійності та довговічності виробів з оптичного скла і кераміки, які широко використовуються у точному приладобудуванні. Тенденція до мініатюризації виробів оптоелектроніки, інтегральної та волоконної оптики вимагає одержання бездефектних поверхонь високої чистоти та гладкості. Використання ІЧ-оптико-механічних приладів в умовах надзвукового обдуву потоком повітря зі швидкостями до $M = 5 \dots 6$ (M – число Маха [1]) призводить до ударних термічних навантажень їх поверхонь з подальшим руйнуванням. Одним зі способів вирішення цих проблем є використання стрічкового електронного потоку (СЕП) для полірування та зміцнення поверхонь виробів з оптичних матеріалів. В роботах [2–5] встановлено головні закономірності нових технологічних процесів обробки матеріалів з використанням концентрованих потоків енергії та визначено принципові проблеми складної взаємозалежності багатьох технологічних параметрів при вузьких діапазонах зміни їх оптимальних значень, високій вартості, малій продуктивності устаткування. Зокрема, в роботах [6 – 9] були показані можливості застосування рухомих СЕП: для полірування оптичного скла та одержання поверхонь високої чистоти та гладкості при зменшенні дефектних приповерхневих шарів,

On the basis of mathematical and experimental-statistical developed models of thermogas dynamic processes and physicotchnical manufacturing process and also a specialized software package in a form of two application packages, the electronic optical materials processing conditions increase reasoning method.

Key words: electronic microtreatment, mathematical and experimental-statistical models, thermo-gas-dynamic processes of treatment, physic-technical processes of treatment.

які містять подряпини, риси, локальні горбки, западини, тріщини та інші дефекти; для зміцнення поверхневих шарів оптичної кераміки на глибину до декількох десятків мікрметрів. У теперішній час методологія подальшого підвищення ефективності використання СЕП для мікронаобробки різних виробів з оптичних матеріалів відсутня. Розробка цієї методології стримується через: відсутність даних про поведінку оптичних виробів в екстремальних умовах експлуатації та методів прогнозування критичних умов їх експлуатації; відсутність систематизованих даних про вплив на теплофізичні процеси у модифікованих шарах оптичних матеріалів технологічних параметрів СЕП; відсутність математичних та експериментально-статистичних моделей, що дозволяють в режимах діалогу та реального часу проводити розрахунки параметрів технологічних процесів електронної обробки.

Вказані обставини відображаються на можливості створення автоматизованих систем проектування та керування процесами електронної обробки виробів з оптичних матеріалів з врахуванням їх експлуатації в екстремальних зовнішніх умовах. Таким чином, **метою даної роботи** є розробка розглядуваної методології, яка має важливе наукове і практичне значення та сприяє підвищенню ефективності електронної обробки оптичних матеріалів.

1. Методологія прогнозування критичних умов експлуатації й допустимих режимів електронної обробки оптичних матеріалів

Отримані в роботах [6, 9–14] результати дозволили розробити важливу для практики методологію прогнозування в режимах діалогу й реального часу на ПЕОМ класу IBM критичних умов експлуатації виробів з оптичних матеріалів і припустимих режимів їхньої електронної обробки (рис. 1).

Комплекс моделей і ППП. Основу цієї методології становлять математичні і експериментально-статистичні моделі, а також спеціально розроблені ППП “REGINT” й “IRIS” для створення бази даних про вплив процесів екстремальних термовпливів на вироби з оптичних матеріалів при їх експлуатації й параметрів СЕП на теплофізичні та технологічні характеристики їх електронної обробки й, в остаточному підсумку, знаходження критичних умов експлуатації й допустимих режимів електронної обробки цих елементів: граничних значень швидкостей надзвукового обдуву потоком повітря виробів з оптичних матеріалів (пластини різної товщини) і динамічних режимів їх обтікання (ламінальний, турбулентний), при яких на поверхні виробів з’являються небезпечні ділянки, де відбувається руйнування оптичного матеріалу і які необхідно додатково обробляти СЕП з метою їх поверхневого термозміцнення, на стадії фінішного виготовлення виробів; сукупність значень керованих параметрів СЕП (струму електронного потоку, прискорюючої напруги, відстані від поверхні, що оброблюється, швидкості переміщення електронного потоку, часу обробки), що не допускають погіршення як основних теплофізичних характеристик електронної обробки оптичних матеріалів (температури в зоні обробки, товщини оплавленого шару), так і її технологічних характеристик (мікротвердості поверхні, товщини зміцнених шарів) (рис. 2).

В основу пакета прикладних програм “REGINT” покладені сучасні методи регресії й інтерполяції [15]. Згідно з цими методами, задача регресії полягає у відновленні функціональної залежності $y(x)$ за результатами вимірювань (x_i, y_i) , $i = 1, 2, \dots, n$. Шукану залежність $y(x)$ апроксимують функцією $y(x) = y(x, a_0, a_1, \dots, a_k) + E$, де a_j ($j = 0, 1, \dots, k$) – невідомі параметри регресії, E – похибка експерименту. До складу пакета входять такі методи регресії: метод лінійної регресії – $y(x) = a_0 + a_1 \cdot x$; метод параболічної регресії

– $y(x) = a_0 + a_1 \cdot x + a_2 \cdot x^2$; метод поліноміальної регресії –

$y(x) = a_0 + a_1 \cdot x + a_2 \cdot x^2 + \dots + a_m \cdot x^m$; метод

гіперболічної регресії – $y(x) = a_0 + \frac{a_1}{x}$; метод

степеневий регресії – $y(x) = a_0 \cdot x^{a_1}$; метод по-

казовий регресії – $y(x) = a_0 \cdot x_1^x$; метод експо-

ненціальної регресії – $y(x) = a_0 \cdot e^{a_1 \cdot x}$; метод

логарифмічної регресії – $y(x) = a_0 + a_1 \cdot \lg x$; метод

квадратичної регресії –

$y(x) = a_0 + \sum_{i=1}^n a_{1i} \cdot x + \sum_{i=1}^n a_{2i} \cdot x^2$; універсальний

метод регресії для 16 спеціальних типів рів-

нянь. Інтерполяція функції $y(x)$, заданої $N + 1$

вузлами $y_i(x_i)$, полягає в знаходженні значень

y за значеннями x , що перебувають у промі-

жку між вузлами (x_i, x_{i+1}) . Пакет містить два

найбільш широко використовувані методи ін-

терполяції: метод інтерполяції за Лагранжем;

метод інтерполяції поліномом Ньютона. Для

функціонування пакета “REGINT” необхідна

ПЕОМ класу IBM з об’ємом ОЗП не менше

128 кбайт із операційною системою MS-DOS.

Для роботи пакета необхідна наявність на ак-

тивному дисководі файлів REGINT.TXT й

REGINT.AT, у яких перебувають відповідно

тексти формул і вихідні параметри формул

(постійні й змінні) і виконуваного файлу

REGINT.EXE. Запуск пакета здійснюється

набором імені REGINT.EXE у відповідь на

запрошення DOS. Після запуску пакета в ни-

жньому рядку екрана висвічується допоміжне

меню, що дозволяє користувачеві вибирати

варіанти подальшого функціонування пакета.

Вихід з пакета здійснюється натисканням кла-

віші F10 (або ESC). Всі файли виконані у ви-

гляді вихідних текстів програм, написаних

досить зручною для числових розрахунків

алгоритмічною мовою Turbo-Basic

(Version 1.0, 1987) [16]. Пакет прикладних

програм “IRIS” реалізований мовою програ-

мування Delphi [17]. Вибір мови обумовлений

тим, що код Delphi, по-перше, найбільш оп-

тимальний за швидкістю виконання після мо-

ви Assembler, по-друге – досить компактний і

тому займає невеликий об’єм оперативної па-

м’яті порівняно з кодами, одержуваними за

допомогою інших Visual-орієнтованих ін-

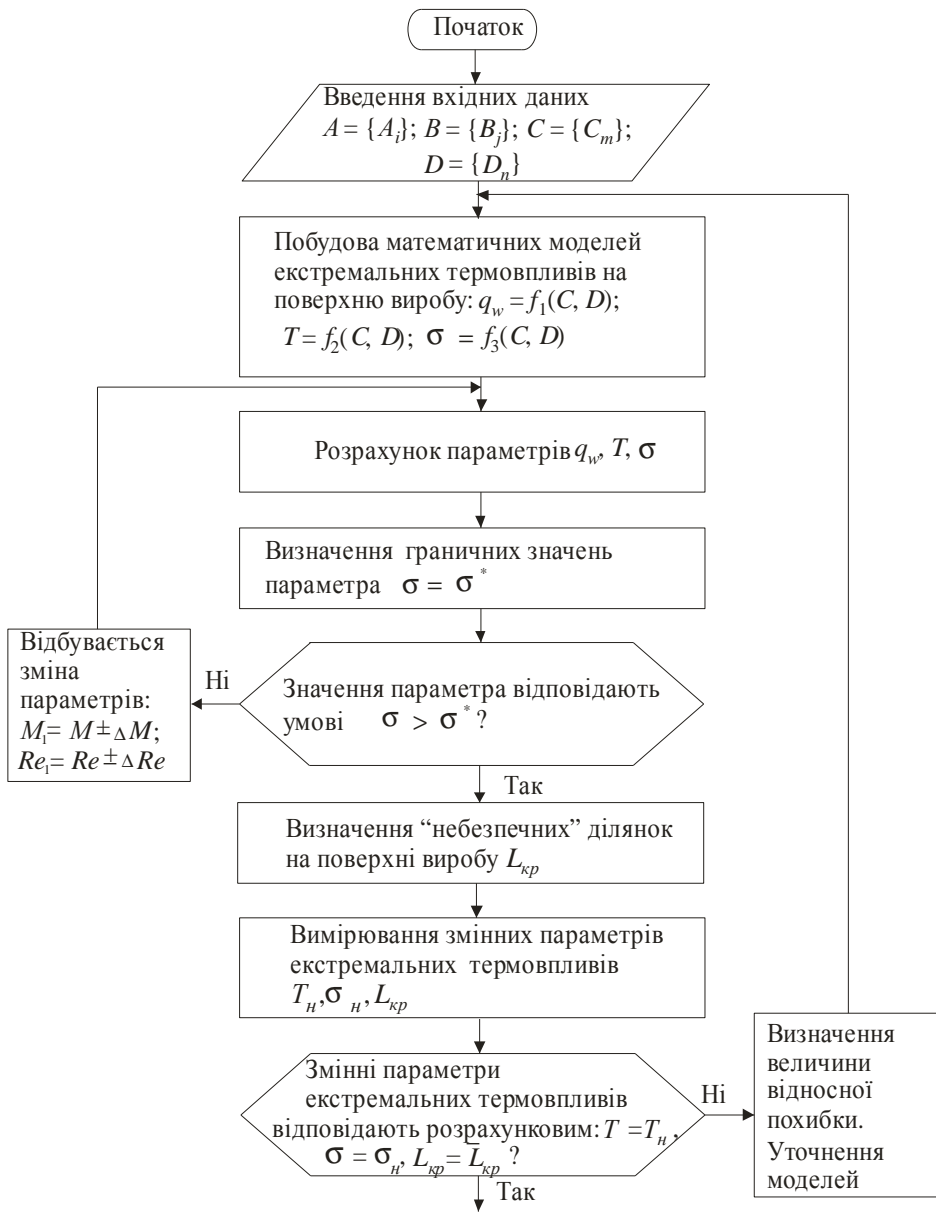
струментальних засобів програмування. Про-

грамний комплекс містить такі програмні мо-

дулі: основний модуль Main.pas, у якому опи-

сані всі 20 використовуваних в пакеті екранних форм, а також містяться процедури їх активізації; 20 програмних модулів з іменами Model1.pas, Model2.pas,..., Model20.pas, кожен з яких реалізує розрахунок за певною математичною або експериментально-статистичною моделлю; модуль ModelMath.pas, що містить функції й процедури, у яких реалізовані числові методи розрахунків, загальні для всіх програмних модулів пакета (методи розв'язання нелінійних і трансцендентних рівнянь, звичайних диференціальних рівнянь, а також методів числового інтегрування різних функцій [15]). Оскільки пакет "IRIS" розроблений як Windows-додаток, для функціонування цього пакета потрібна наявність на

ПЕОМ класу IBM операційної системи версій Windows 98 / Windows 2000/ Windows XP або вище, з жорстким диском не менше 1 Гбайт, об'ємом ОЗП не менше 64 Мбайт (однак через наявність великої кількості графічних елементів на формах для забезпечення нестомлюючої для користувача швидкості роботи з пакетом бажано мати оперативну пам'ять 128 Мбайт). Розмір оперативної пам'яті й загальна конфігурація робочого місця впливає тільки на швидкість роботи програмного комплексу. Рекомендована конфігурація робочого місця для роботи з пакетом: процесор Pentium 133 або вище, розмір оперативної пам'яті – 128 Мбайт, мінімальний вільний об'єм на жорсткому диску – 60 Мбайт.



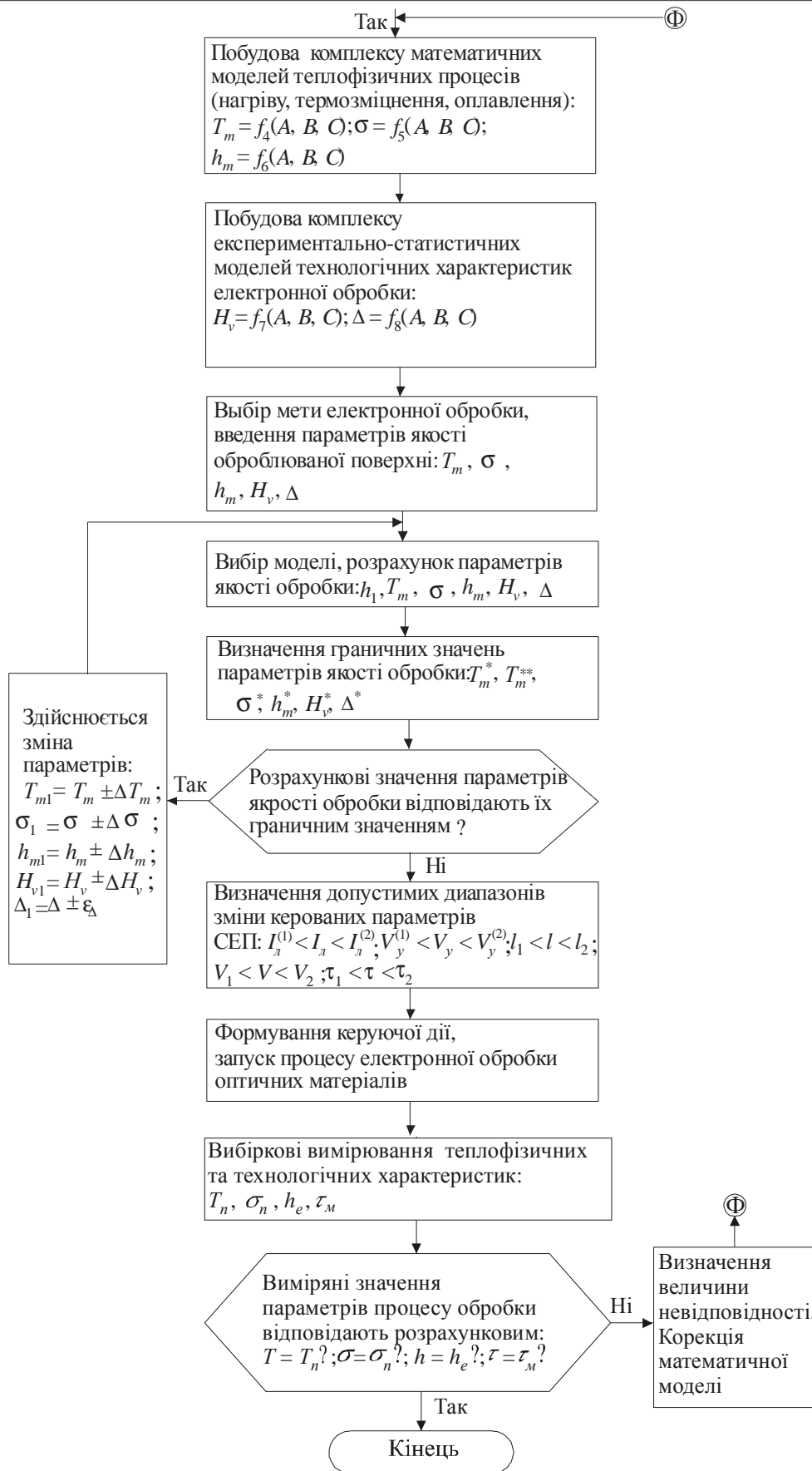


Рис. 1. Структурна схема методики прогнозування критичних умов експлуатації й допустимих режимів електронної обробки оптичних матеріалів: *A* – керовані параметри СЕП; *B* – характеристики умов електронної обробки; *C* – технічні й фізико-механічні характеристики оптичного матеріалу; *D* – параметри екстремальних термовпливів

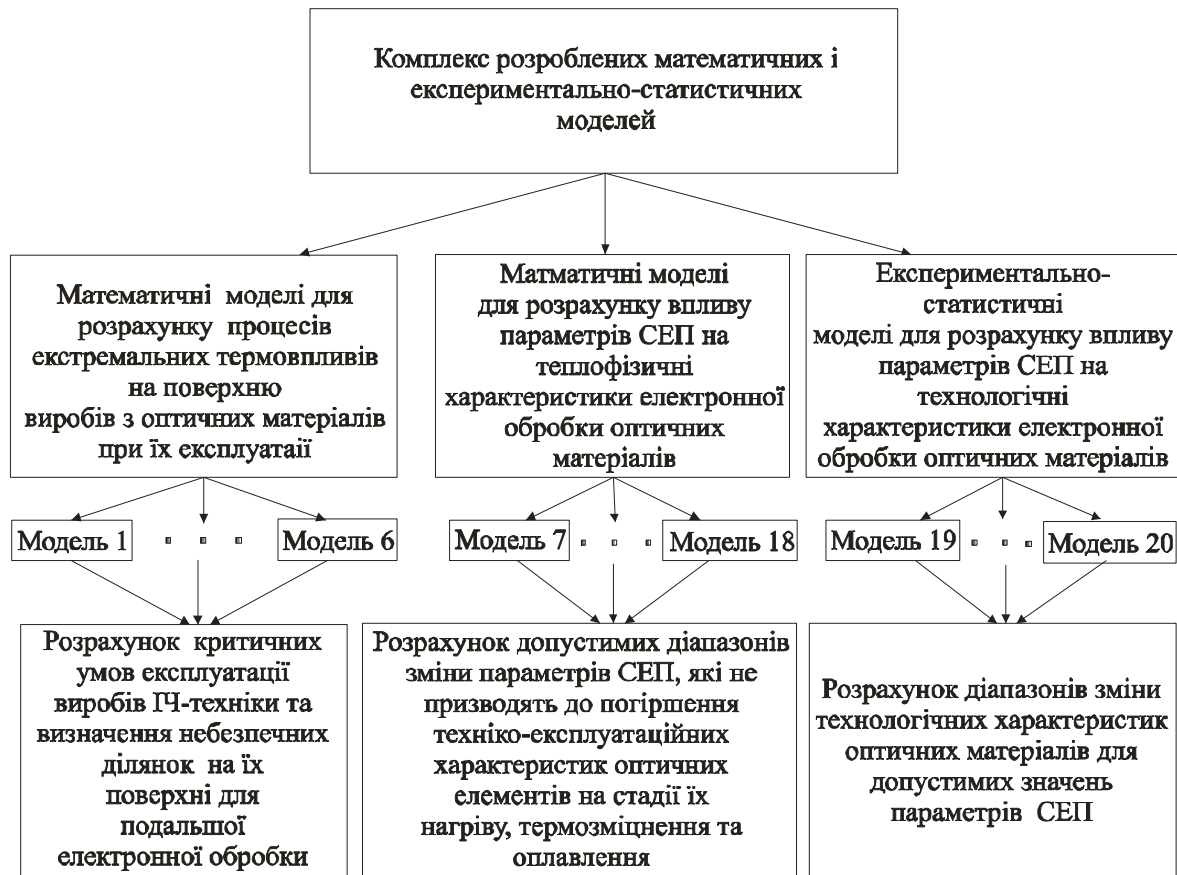


Рис. 2. Комплекс розроблених математичних й експериментально-статистичних моделей для проведення розрахунків по впливу екстремальних зовнішніх термовпливів на вироби з оптичних матеріалів при їх експлуатації, а також впливу керованих параметрів СЕП на теплофізичні й технологічні характеристики їх електронної обробки

Опис методології. Відповідно до цієї методології на першому етапі формується вихідна база даних, яку створюють параметри екстремальних зовнішніх термовпливів (швидкість обдуву потоком повітря M і критерій Рейнольдса Re , що характеризує режим обтікання (ламінарний, турбулентний), геометрична форма й розміри виробу), керовані параметри СЕП (струм електронного потоку I_e , прискорююча напруга V_e , відстань від оброблюваної поверхні l , швидкість переміщення електронного потоку V і тривалість його впливу на матеріал t), теплофізичні й фізико-механічні властивості оптичних матеріалів (об'ємна теплоємність, коефіцієнт теплопровідності, густина, модуль пружності Юнга, коефіцієнт Пуассона й ін.), отриманий комплекс математичних й експериментально-статистичних моделей, а також розроблені пакети прикладних програм "REGINT" й "IRIS" для проведення розрахунків у режимах діалогу й реального часу на ПЕОМ, сумісних з IBM PC, AT, XT. На другому етапі вводяться значення модуля термопружних напружень $|s|$, що виникають у зонах екстремальних

термовпливів надзвукового повітряного потоку на поверхню виробу, і їх граничні значення s^* , при перевищенні яких ($|s| > s^*$ – відповідає критичним умовам експлуатації ($M > M^*$ й $Re > Re^*$)) відбувається руйнування поверхневих шарів виробів. Далі вибирається модель екстремальних термовпливів зазначеного повітряного потоку й за допомогою пакетів прикладних програм виконуються розрахунки значень параметра $|s|$, потім вони порівнюються з їх граничними значеннями й знаходяться місця розташування на поверхні виробів небезпечних ділянок, що визначаються координатами $L_{кр}(M^*, Re^*)$, які можуть зазнавати руйнувань в умовах експлуатації і які необхідно обробляти СЕП на стадії фінішного виготовлення виробів. Крім цього, здійснюються виміри в окремих точках виробу температури нагрівання T_n , величини термонапружень S_n і координат зазначених вище небезпечних ділянок $\bar{L}_{кр}$, які зіставляються з ре-

зультатами розрахунків і визначаються помилки розрахункових методів знаходження критичних умов експлуатації виробів. При виявленні істотних розбіжностей між розрахунковими й експериментальними даними (більше 15...20 %) здійснюється корекція моделей. На третьому етапі здійснюється вибір мети електронної обробки оптичного матеріалу, введення необхідних значень параметрів, що характеризують якість поверхні (T_m – температура в зоні обробки, $|s|$ – модуль залишкових термічних напружень у зоні обробки, h_m – максимальна товщина оплавленого шару, H_v – мікротвердість поверхні, D – товщина ущільнених шарів) та їх граничних величин (T_m^* , T_m^{**} , s^* , h_m^* , H_v^* і D^*), які встановлюються на основі техніко-експлуатаційних вимог, що ставляться до виробів мікрооптики, оптоелектроніки, інтегральної й волоконної оптики, засобів ІЧ-техніки. Після цього вибирається модель (математична модель теплофізичного процесу або експериментально-статистична модель технологічної характеристики електронної обробки) і за допомогою відповідних пакетів прикладних програм виконується розрахунок параметрів T_m , $|s|$, h_m , H_v , D при заданих значеннях керованих параметрів СЕП (I_l , V_y , l , V , t), потім величини параметрів обробки зіставляються з їх граничними значеннями, тобто перевіряється виконання умов: $T_m < T_m^*$ (або T_m^{**}), $|s| < s^*$, $h_m < h_m^*$ (не більше, ніж T_m^* , T_m^{**} , s^* і h_m^* відповідно), $H_v > H_v^*$ й $D > D^*$ (не менше, ніж H_v^* і D^* відповідно). При невиконанні зазначених умов здійснюється коректування значень керованих параметрів СЕП для знаходження їх допустимих діапазонів зміни: $I_l^{(1)} < I_l < I_l^{(2)}$, $V_y^{(1)} < V_y < V_y^{(2)}$, $l_1 < l < l_2$, $V_1 < V < V_2$, $t_1 < t < t_2$. Далі формується керуюча дія й здійснюється запуск процесу електронної обробки оптичного матеріалу. Одночасно виконуються вибіркові вимірювання температури поверхні оптичних матеріалів T_n , термопружних напружень у їх поверхневих шарах s_n , товщини оплавленого шару h_e й часу обробки матеріалу t_m , які зіставляють-

ся з розрахунками, визначаються помилки розрахункових методів знаходження допустимих діапазонів зміни керованих параметрів СЕП при їх електронній обробці. При наявності значних розбіжностей між результатами розрахунків й експериментальними даними (більше 10...15 %) виконується корекція моделей.

2. Використання методології

Розроблена методологія дозволяє прогнозувати в режимах діалогу й реального часу на ПЕОМ класу ІВМ з відносною похибкою, що не перевищує 10...12 %, небезпечних ділянок (ділянок, на яких оптичний матеріал зазнає руйнування в умовах екстремальних зовнішніх термовпливів) на поверхні виробів з оптичних керамік у динамічних умовах їхньої експлуатації (зовнішній надзвуковий обдув потоком повітря), які необхідно, у першу чергу обробляти рухомим СЕП (рис. 3), а також допустимих діапазонів зміни керованих параметрів СЕП (струму електронного потоку, прискорюючої напруги, відстані від оброблюваної поверхні, швидкості переміщення електронного потоку й тривалості обробки), що не призводять до погіршення якості поверхонь оптичних стекел і керамік (поява тріщин, відколів, напливів, зміна геометричної форми, зменшення коефіцієнта ІЧ-пропускання й т.д.) (рис. 4), що широко використовуються в різних галузях точного приладобудування (мікрооптиці, наноелектроніці, інтегральній і волоконній оптиці, ІЧ-техніці й ін.).

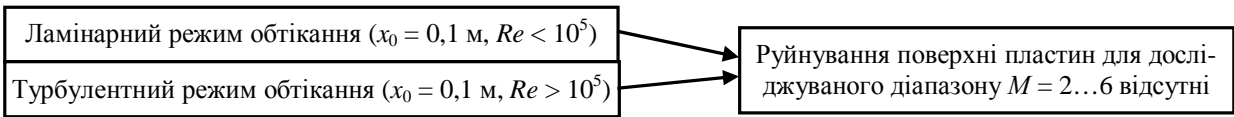
Висновки

Розроблено методологію, що базується на отриманих математичних й експериментально-статистичних моделях і пакетах прикладних програм, які зв'язують керовані параметри СЕП з основними теплофізичними й технологічними характеристиками їх електронної обробки, що дозволяє в режимі діалогу й реального часу на ПЕОМ, сумісних з ІВМ РС, АТ, ХТ, прогнозувати (відносна похибка не перевищує 10...12 %) “небезпечні” ділянки на поверхні виробів з оптичних керамік у динамічних умовах їхньої експлуатації, які необхідно в першу чергу обробляти СЕП, а також допустимі діапазони зміни керованих параметрів СЕП, що не призводять до погіршення якості оброблюваних поверхонь оптичних стекел і керамік.

Пластини, не оброблені СЕП



Пластини, оброблені СЕП



Мікроструктура поверхні сколу оптичної кераміки КО-2

(допустимі режими: $I_n = 200 \text{ мА}, V = 5 \cdot 10^{-3} \text{ м/с}, V_y = 5,5 \text{ кВ}, l = 80 \text{ мм}$)

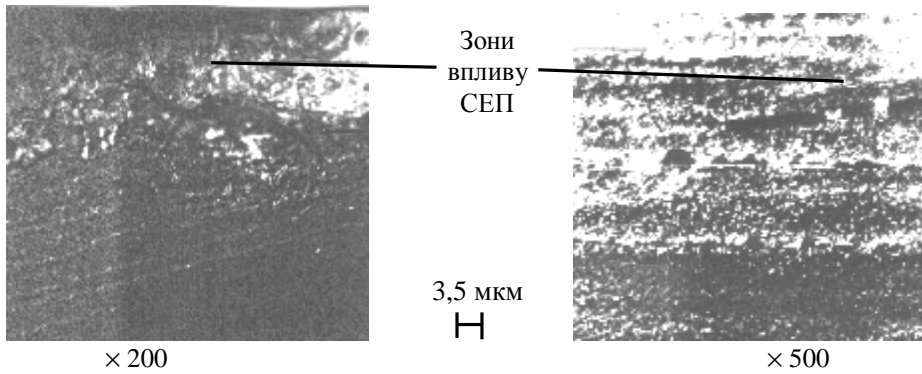
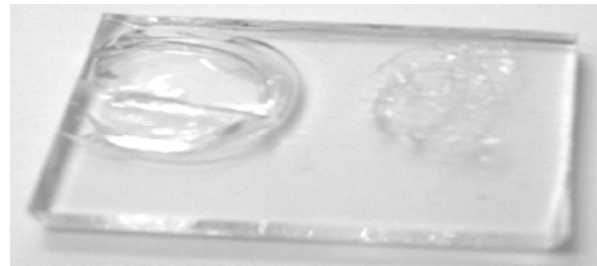
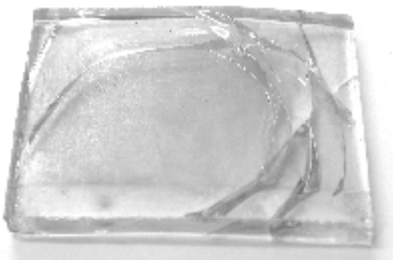


Рис. 3. Стан поверхонь пластин з оптичної кераміки КО-2 після надзвукового обдуву потоком повітря

Перевищення допустимих режимів електронної обробки

$I_n = 280 \text{ мА}, V_y = 6 \text{ кВ}, l = 80 \text{ мм}, n = 200 \text{ с}^{-1}$

$I_n = 350 \text{ мА}, V_y = 5,5 \text{ кВ}, l = 80 \text{ мм}, n = 200 \text{ с}^{-1}$



Допустимі режими електронної обробки ($I_n = 150 \text{ мА}, V_y = 6,5 \text{ кВ}, l = 80 \text{ мм}, n = 200 \text{ с}^{-1}$)

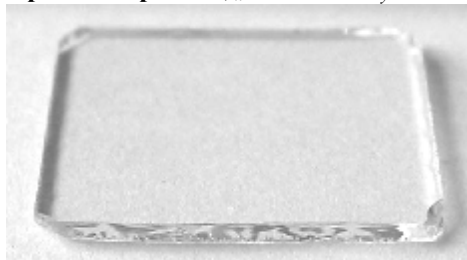


Рис. 4. Фотознімки поверхні пластин з оптичного скла К-8 після електронної обробки

ЛІТЕРАТУРА

1. Абрамович Г.Н. Прикладная газовая динамика. – М.: Наука, 1969. – 824 с.
 2. Григорьянц А.Г., Сафонов А.Н. Методы поверхностной лазерной обработки. – М.: Высшая школа, 1987. – 191 с.
 3. Коваленко В.С. Высокоэффективные технологии – основа интенсификации современного машиностроения // Технология и организация производства, 1989. – № 2. – С. 1–4.
 4. Головки Л.Ф. Технологічні основи керування якістю поверхневого шару при лазерній зміцнюючій обробці матеріалів / Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук. – К.: КПІ, 1994. – 32 с.
 5. Kovalenko V., Anyakin M., Anyakin V. Laser 3D Objects prototyping using their flat images // Proceeding of International Conference LTWMP-2003, RWI NASU, Kiev, 2003. – P. 183–187.
 6. Ващенко В.А. Высокотемпературные технологические процессы взаимодействия концентрированных источников энергии с материалами. Монография. М.: Деп. в ВИНТИ. 07. 08. 96. – № 62. – хп 96. – 408 с.
 7. Ващенко В.А. Наукові основи керування якістю виробів із спеціальних оптичних матеріалів / Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук. – К.: НУТУ “КПІ”, 1996. – 32 с.
 8. Канашевич Г.В. Электронно-променевая обработка поверхности плат оптических интегральных схем / Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук. – К.: НУТУ “КПІ”, 1997. – 32 с.
 9. Ващенко В.А., Котельников Д.И., Лега Ю.Г., Яценко И.В., Краснов Д.М., Кириченко О.В. Тепловые процессы при электронной обработке оптических материалов и эксплуатации изделий на их основе. – К.: Наукова думка, 2006. – 368 с.
 10. Яценко И.В. Теплофизические процессы электронной обработки изделий точного приборостроения // Вісник Черкаського державного технологічного університету, 2004. – № 4. – С. 97–103.
 11. Яценко И.В. Термоупругие напряжения в изделиях ИК-техники при электронной обработке // Вісник Черкаського державного технологічного університету, 2005. – № 1. – С. 93–98.
 12. Яценко И.В. Процессы поверхностного оплавления изделий интегральной и волоконной оптики при электронной обработке // Вісник Черкаського державного технологічного університету, 2005. – № 2. – С. 67–73.
 13. Яценко И.В., Краснов Д.М., Ващенко В.А., Кириченко О.В. Математическое моделирование термоупругих напряжений при нагреве оптических планарных изделий ИК-техники сверхзвуковым потоком воздуха // Вісник Черкаського державного технологічного університету, 2003. – № 4. – С. 98–105.
 14. Яценко И.В., Цыбулин В.В., Краснов Д.М., Котельников Д.И. Экспериментально-статистические модели для расчета влияния параметров ЛЭП на технологические характеристики электронной обработки оптических керамик // Современные методы и средства неразрушающего контроля и технической диагностики: Материалы Двенадцатой ежегодной международной конференции и выставки, 20–24 сентября 2004 г., Ялта – К.: УИЦ “Наука. Техника. Технология”, 2004. – С. 84–85.
 15. Самарский А.А., Гулин А.В. Численные методы. – М.: Наука, 1989. – 432 с.
 16. Верлань А.Ф., Антонова Н.В., Донской В.И. Языки персональных компьютеров. – К.: Наукова думка, 1989. – 240 с.
 17. Комту Марко. Delphi 6 для профессионалов. – С.Пб.: Питер, 2002. – 1088 с.
- Яценко І.В.**, к.т.н., доцент кафедри електротехнічних систем Черкаського державного технологічного університету.
- Ващенко В.А.**, д.т.н., професор, завідувач кафедри фізики Черкаського державного технологічного університету.
- Цибулін В.В.**, викладач кафедри фізики Черкаського державного технологічного університету.
- Рева І.А.**, аспірант Черкаського державного технологічного університету.
- Чепурна О.М.**, студентка Черкаського державного технологічного університету.