

УДК 004.93:004.896:681.7.02

**А.В. Ярмілко**, ст. викладач

Черкаський національний університет імені Богдана Хмельницького, м. Черкаси, Україна

## **ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДІВ ВІЗУАЛІЗАЦІЇ У ДІАГНОСТИЦІ ТА УПРАВЛІННІ ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВИМ МІКРООБРОБЛЕННЯМ ОПТИЧНИХ МАТЕРІАЛІВ**

**А.В. Ярмілко**, ст. преподаватель

Черкасский национальный университет имени Богдана Хмельницкого, г. Черкассы, Украина

## **ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ВИЗУАЛИЗАЦИИ В ДИАГНОСТИКЕ И УПРАВЛЕНИИ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ МИКРООБРАБОТКОЙ ОПТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ**

**A.V. Yarmilko**, senior lecturer

Bohdan Khmelnytsky National University at Cherkasy, Cherkasy, Ukraine

## **APPLYING THE IMAGING TECHNIQUES FOR DIAGNOSTICS AND CONTROLLING OF ELECTRON-RADIAL STREAM MICROMACHINING OF THE OPTICAL MATERIALS**

*Запропоновано використання візуального каналу спостереження для діагностики та управління електронно-променевим обробленням оптичних матеріалів, встановлення показників якості скляних пластин за метричними та статистичними оцінками, отриманими за кольоровими растровими зображеннями оптичних ефектів після оброблення поверхні скла стрічковим електронним потоком. Представлено результати виділення візуальних ознак із зображень з подвійним променезаломленням у модифікованому поверхневому шарі. Розроблено структуру інтелектуального регулятора для керування електронно-променевим обробленням за даними візуалізації.*

**Ключові слова:** методи візуалізації, оптичні матеріали, електронно-променеве оброблення, діагностика, інтелектуальне керування.

*Предложено использование визуального канала наблюдения для диагностики и управления электронно-лучевой обработкой оптических материалов, установление показателей качества стеклянных пластин на основе метрических и статистических оценок, полученных при обработке цветных растровых изображений оптических эффектов после обработки поверхности стекла ленточным электронным потоком. Представлены результаты выделения визуальных признаков из изображений с двойным лучепреломлением в модифицированном поверхностном слое. Разработана структура интеллектуального регулятора для управления электронно-лучевой обработкой по данным визуализации.*

**Ключевые слова:** методы визуализации, оптические материалы, электронно-лучевая обработка, диагностика, интеллектуальное управление.

*The article deals with problem of applying the visual monitoring for diagnostics and controlling of electron-radial stream micromachining of the optical materials. The author have proposed to establish the quality indicators of the glass plates for metric and statistical evaluations, obtained by color raster images of optical effects after surface treatment of glass ribbon electron beam. The results of visual features' selection of the images of birefringence in the modified surface layer are obtained. This article also represented the structure of intelligent controller for controlling electron beam processing for data visualization.*

**Key words:** imaging techniques, optical materials, electron-radial stream micromachining, diagnostics, intelligent control.

**Постановка проблеми.** Технологічні процеси сучасного виробництва у багатьох випадках потребують прецизійного управління з використанням складних моделей. До таких процесів відноситься електронно-променеве мікрооброблення оптичного скла. Суттю цього процесу є усунення тріщин та згладжування мікрорельєфу поверхні скляних виробів. Для оброблення використовують електронно-променеву гармату Пірса, розташовану у вакуумній установці, яка генерує стрічковий електронний потік питомої потужності  $10^1 \text{ Вт/см}^2 \leq P_{\text{пит}} \leq 10^5 \text{ Вт/см}^2$ . Електронна стрічка може переміщуватися по поверхні виробу зі швидкістю  $v_{\text{пот}} = 0 \dots 20 \text{ см/с}$ . При цьому скляна поверхня спочатку оплавляється електронним потоком на глибину до 160 мкм, а потім охолоджується задля формування модифікованого поверхневого шару. При цьому важливим є забезпечення необхідного температурного профілю печі (з точністю  $\pm 0,5^\circ\text{C}$ ) при максимальній робочій температурі нагріву печі  $800^\circ\text{C}$  [6]. Сформований поверхневий шар відрізняється від основного матеріалу структурою, хімічним складом, оптичними властивостями, мікрогеометрією. Проте процеси електронно-променевого оброблення є досить складними та багатofакторними. Чутливість виробничої системи до поточного стану

діючих чинників викликає утворення у структурі оброблюваного матеріалу зон з різними фізико-хімічними властивостями (зокрема, залишковим тиском), що суттєво відбивається й на його оптичних властивостях (рис. 1).

Зважаючи на цю обставину, проблема вдосконалення управління процесами електронно-променевого оброблення не втрачає своєї актуальності та вимагає нових рішень.

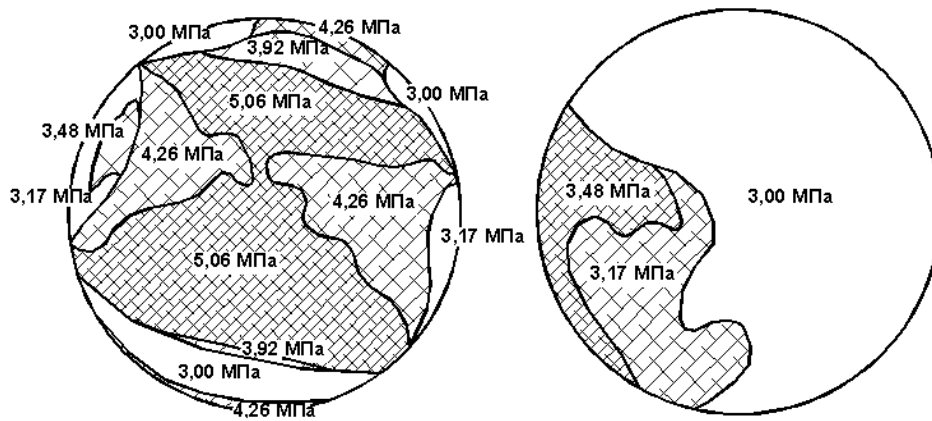


Рис. 1. Розподіл внутрішніх термонапружень в оптичних пластинах (діаметр 20 мм; товщина 6 мм; скло К8), отримані при різних режимах охолодження [6]

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Теорія і практика електронно-променевого оброблення оптичних матеріалів за останні роки набули значного розвитку [1-3; 5-7], який стимулюється практичними потребами мікро- і наноінженерії. Отримання молекулярно-гладких поверхонь та структури оптичного матеріалу із заданими характеристиками потребує досягнення високих показників якості. Для плоскопаралельних скляних пластин якість електронно-променевого мікрооброблення визначають такі параметри [3]:

- середньостатистичний нанорельєф поверхні;
- середньостатистична глибина модифікованого поверхневого шару;
- оптична однорідність (бездефектність, залишкові термонапруження) поверхневого шару;
- площинність поверхні та відхилення від неї;
- залишковий рівень вихідної поверхні.

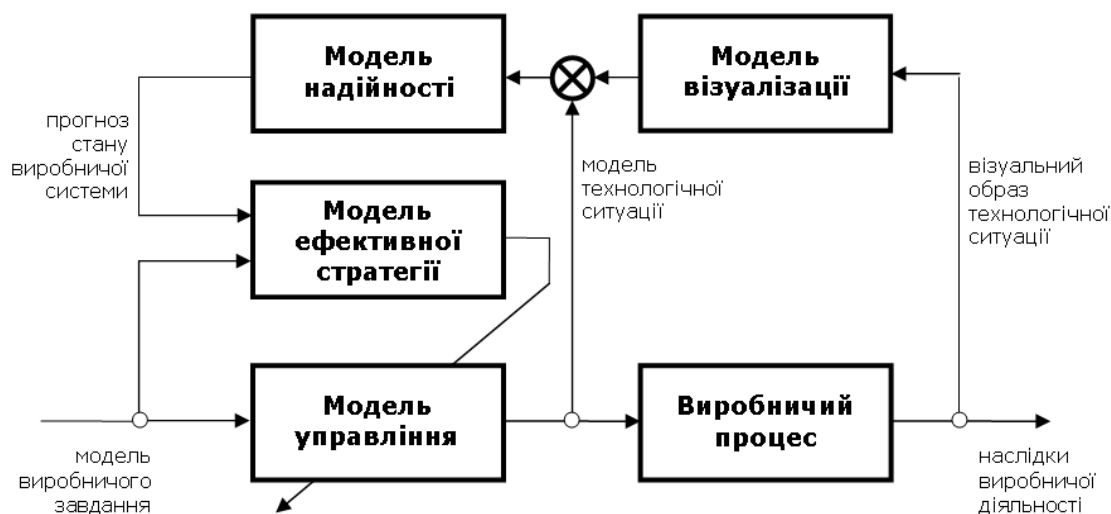
Фактори, які впливають на якість мікрооброблення, пов'язані зі станом технологічного середовища (залишковим тиском, температурою нагріву та охолодження виробів), досконалістю інструменту оброблення – електронного потоку, можливостями обладнання та програмного забезпечення підтримати гнучкі та якісні режими мікрооброблення. Для забезпечення керування цими параметрами задля отримання потрібної глибини пропалення оптичної поверхні використовуються математичні моделі, побудовані за теплофізичними характеристиками матеріалу, параметрами електронного потоку та рівнем зниження поверхні. Розроблено алгоритм керування якістю поверхневого шару [3], призначений для використання в інноваційних технологіях створення елементної бази мікрооптики та інтегральної оптики. В основу моделі, на якій базується алгоритм, покладено рівняння задачі теплопровідності, яка описується комплексом одно-, дво- і тривимірних нелінійних математичних моделей. Серед них – моделі теплового впливу стрічкового електронного променя на вироби з оптичних матеріалів різної форми і розмірів, модель оброблення поверхневого шару матеріалу стрічковим електронним потоком з урахуванням явища випаровування частки матеріалу розплаву у вакуум від термічного впливу потоку. Таке модельне представлення процесу оброблення дозволяє досягти певної збіжності з експериментальними даними (відхилення не перевищує 1,4 %).

**Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми.** Незважаючи на значні досягнення в розробленні методів управління технологічними процесами електронно-променевого оброблення оптичних матеріалів, забезпечення заданих показників якості виробів потребує впровадження нових підходів до організації процесу оброблення. При цьому для отримання нової якості управління важливо забезпечити збирання та оброблення технологічно значимої діагностичної інформації, у тому числі за рахунок розширення діапазону сигналів технологічного процесу, які фіксуються у процесі оброблення.

**Мета статті.** Головною метою цієї роботи є розроблення методу отримання діагностичної інформації за зображенням візуальних ефектів, які виникають у обробленому поверхневому шарі плоскопаралельної скляної пластини, а також розроблення способу її використання в управлінні технологічним процесом.

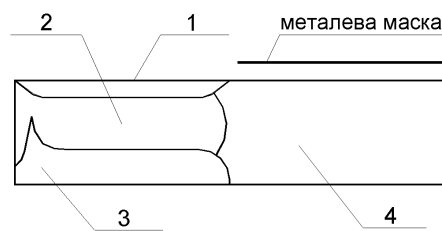
**Виклад основного матеріалу.** Подальший розвиток технологій мікрооброблення оптичного скла, а також інших матеріалів спеціального призначення (технічне скло, кварцове скло, оптична кераміка) пов'язується з інтелектуалізацією процесу управління. Такий підхід узгоджується з концепціями, які набули розвитку в останні роки [10; 11]. Нами було запропоновано метод інтелектуального управління, який поєднує принципи оптимальності та адаптивності і забезпечує вибір оптимальної поведінкової стратегії інтелектуального виробничого модуля за критеріальними оцінками, які визначаються під час застосування таких критеріїв відбору: критерію песимізму (Уолда), критерію надзвичайного оптимізму, критерію коефіцієнта оптимізму (Гурвіца), критерію сприятливого в середньому рішення (Лапласа), критерію жалкування (Севіджа) [9]. Реалізація цього підходу потребує розширення джерел забезпечення алгоритмів прийняття рішення оперативними даними про поточний стан технологічної системи. Для їхнього отримання запропоновано запровадити моніторинг візуальних ефектів, пов'язаних з оптичними властивостями оброблених скляних виробів. Оцінювання інформативності візуального сигналу високоенергетичних процесів оброблення, а також ефективність методів виділення інформаційних ознак технологічного процесу та способи їхньої інтерпретації розглядалися у [8].

На основі представленого у [9] методу і дослідженого у [8] способу організації зворотного зв'язку за візуальним каналом нами запропоновано впровадження у структуру управління обладнанням та процесами, які мають властивості загальнотехнічної гнучкості, інтелектуального регулятора, структура якого наведена на рис. 2. Зважаючи на характеристики виробничих комплексів, які використовуються для електронно-променевого мікрооброблення оптичних матеріалів, та особливості перебігу технологічних процесів [6], такий регулятор може бути ефективним і у процесах зазначеного типу.



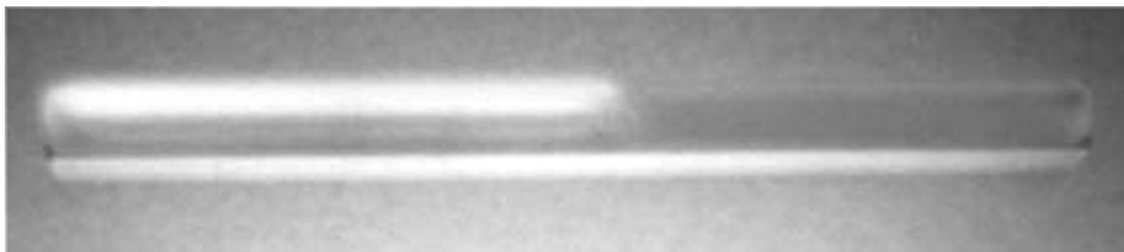
*Рис. 2. Структура інтелектуального регулятора*

Особливості електронно-променевого оброблення скляних поверхонь дозволяють організувати спостереження за структурно-просторовими змінами пластини за оптичними ефектами, викликаними внутрішніми термічними напруженнями, причиною яких є неоптимальність процесу охолодження після оброблення стрічковим електронним потоком. Так, під час проходження поляризованого світла через оброблені електронним потоком попередньо відполіровані плоскопаралельні пластини з оптичного скла (К8, К108, К208 та ін.) внаслідок подвійного променезаломлювання утворюються області з різними спектральними характеристиками (рис. 3, зони 1, 2, 3), відмінними від параметрів екранованої частини пластини (зона 4) [6; 7]. Аналіз метричних та статистичних характеристик зазначених зон надає дані для модифікації управління технологічним процесом.



*Рис. 3. Області з різними показниками променезаломлення в обробленому оптичному склі*

Оцінювання параметрів якості скляної пластини за даними відеоспостереження передбачає застосування методів візуалізації на основі растрових зображень досліджуваного зразка (рис. 4). Такі зразки та технологічне тлумачення оптичних ефектів представлені у роботах [6; 4]. З погляду візуалізації, кольорові растрові зображення є джерелом візуальних ознак різних типів, серед яких – бінарні, тонові, статистичні, спектральні, контурні та інші ознаки.



*Рис. 4. Подвійне променезаломлення в оптичному склі К8*

Для визначення характеристик зон 1, 2, 3 проводилося виділення меж областей зображення з різними спектральними властивостями. Алгоритм оброблення вхідного кольорового зображення передбачав послідовне застосування процедур розмивання Гауса, бінаризації за вказаними значеннями параметрів каналів RGB, отримання меж із застосуванням алгоритмів Кенні та формування опуклої оболонки. На рис. 5 представлено зображення меж зеленої спектральної області на картині подвійного променезаломлення в оптичному склі К8. Пошук меж виконувався для значень палітри RGB {95; 115; 12} та {167; 234; 175}. Аналогічні результати отримано під час виділення жовтої та жовто-зеленої спектральних областей.



Рис. 5. Зелена спектральна область на картині подвійного променезаломлення

На основі отриманих меж технологічно значимих зон проводилося вимірювання їхньої глибини та визначення статистичних характеристик (рис. 6). Зазначимо, що програма вимірювань може варіювати залежно від завдань моніторингу, проте обмежується технічними характеристиками оптичного каналу спостереження, зокрема – роздільною здатністю відеосенсора. Можлива організація вимірювань як глибини окремих шарів, так і відстані точок отриманих роздільних ліній окремих спектральних областей від базової поверхні (первинної поверхні скляної пластини), що дозволяє отримати дані для визначення наведених у [3] ознак якості виробу.

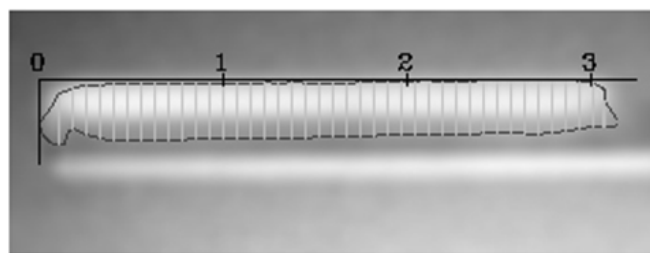


Рис. 6. Виміри глибини жовто-зеленої спектральної області (розміри – у дюймах)

**Висновки і пропозиції.** Запропонований підхід надає додатковий канал моніторингу виробничого процесу, на основі якого може бути організовано оцінювання якості виробів, експрес-діагностику та прогнозування стану виробничої системи. Перевагами методу є його відносно невисока потреба у ресурсах, безконтактність та оперативність зняття даних, висока придатність до вбудовування в технологічний процес. Отримані результати дозволяють вдосконалити існуючі [3] алгоритми керування електронно-променевим обробленням оптичного скла та запровадити у технологічний процес методи інтелектуального управління. Зокрема, впровадження управління зі зміною експлуатаційних стратегій [9] сприяло б розкриттю потенціалу гнучкості методу та обладнання електронно-променевим обробленням матеріалів. Позитивний економічний ефект може бути отримано за рахунок оперативної зміни експлуатаційних режимів без зупинки технологічного процесу, адресності процедур контролю виробів за результатами експрес-діагностики у процесі їхнього виготовлення, підвищення показників готовності обладнання та прогнозованості станів виробничої системи. Технічні ж характеристики апаратних та програмних компонентів систем комп'ютерного зору дозволяють забезпечити достатню відповідність методу потребам технологій мікро- та нанооброблення оптичного скла.

#### Список використаних джерел

1. Дудко Г. В. Проблема формирования особочистых и бездефектных поверхностей / Г. В. Дудко, В. Н. Лисоченко // Материалы краткосрочного семинара. – Л., 1985. – С. 13-16.

2. *Электронно-лучевая* обработка фотокатодных стекол / Г. В. Дудко, А. А. Кравченко, Д. И. Чердниченко [и др.] // *Электронная техника. Сер. 4.* – 1989. – Вып. 1. – 294 с.
3. *Канашевич Г. В.* Алгоритм керування якістю поверхневого шару оптичних матеріалів при електронно-променевої мікрообробці / Г. В. Канашевич, А. І. Щерба, І. В. Дробот // *Вісник національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут».* Тематичний випуск «Математичне моделювання в техніці та технологіях». – Х., 2012. – Вип. 27. – С. 231-239.
4. *Канашевич Г. В.* Изменение свойств оптического стекла после электронно-лучевой обработки / Г. В. Канашевич, Д. И. Котельников, Г. Н. Дубровская // *Материалы II Всесоюзной конференции "Модификация свойств конструкционных материалов пучками заряженных частиц".* – Свердловск, 1991. – С. 86-88.
5. *Канашевич Г. В.* Превращения в поверхностном слое оптического стекла и фотопластин из силикатного стекла от действия низкоэнергетического электронного потока / Г. В. Канашевич // *Ежемесячный междисциплинарный теоретический и прикладной научно-технический журнал «Нано- и микросистемная техника» (Россия).* – 2008. – № 10. – С. 28-30.
6. *Канашевич Г. В.* Технологічні основи керування якістю поверхневого шару оптичних матеріалів при електронно-променевої мікрообробці : дис. ... д-ра техн. наук : 05.03.07 / Г. В. Канашевич ; Нац. техн. ун-т України "Київ. політехн. ін-т". – К., 2010.
7. *Кравченко А. А.* О формировании предельно гладких поверхностей стекол / А. А. Кравченко, Ю. Н. Лохов, Д. И. Чердниченко // *Физика и химия стекла.* – 1990. – Т. 16, № 6. – С. 923-927.
8. *Ярмілко А. В.* Експрес-діагностика виробничих процесів за результатами відеоспостережень / А. В. Ярмілко, А. Ю. Небилиця // *Матеріали VI науково-практичної конференції з міжнародною участю "Математичне та імітаційне моделювання систем. МОДС '2011'".* – Чернігів : ФОП Васюта В.В., 2011. – С. 209-212.
9. *Ярмілко А. В.* Формування стратегії керування технологічним модулем за даними поточного моніторингу та експрес-діагностики / А. В. Ярмілко // *Математичні машини і системи.* – 2013. – № 1. – С. 102-110.
10. *Intelligent Manufacturing Systems* [Electronic resource]. – Access mode : <http://www.ims.org/>.
11. *Jorge Gamboa-Revilla and Miguel Ramirez-Cadena.* Intelligent Manufacturing Systems : a methodology for technological migration [Electronic resource]. – Access mode : [www.iaeng.org/publication/WCE2008/WCE2008\\_pp1257-1262.pdf](http://www.iaeng.org/publication/WCE2008/WCE2008_pp1257-1262.pdf).