

Г.В. Канашевич, д.т.н., доц.

Черкаський державний технологічний університет

ТЕХНОЛОГІЧНІ УМОВИ І ПОКАЗНИКИ ЕФЕКТИВНОСТІ СПЕЦІАЛЬНОЇ ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВОЇ ОБРОБКИ ПОВЕРХНІ ОПТИЧНОГО СКЛА

Представлено технічні і технологічні умови електронно-променевої обробки поверхні скла та запропоновано показники ефективності при її впровадженні у промислову сферу. Запропонована програма метрологічного забезпечення якісних характеристик модифікованої електронним потоком поверхні оптичного скла.

Ключові слова: оптичне виробництво, оптичне скло, електронно-променева обробка, дефектний шар, шорсткість поверхні, метрологічне забезпечення, ефективність обробки.

Вступ. Електронно-променева обробка, як перспективний засіб вирішення широкого кола технологічних задач мікрооптики, інтегральної та інтегральної оптики, потребує не тільки створення спеціальних технологічних умов [1], але й впровадження необхідних засобів діагностики і контролю якості поверхні, вимірювання параметрів шорсткості поверхні з використанням, у тому числі, й атомно-силової мікроскопії [2].

Мета роботи: Вибір необхідних технологічних умов для ефективної електронно-променевої обробки поверхні і поверхневого шару оптичного скла шляхом застосування спеціальних засобів контролю та діагностики їх якості.

Обладнання, матеріали і інструмент електронно-променевої обробки. Обладнання. Електронно-променева установка виготовлена на базі вакуумної установки УВН74-ПЗ і оснащена піччю попереднього нагріву та охолодження скла. Електронний термодарний регулятор температури РИФ-101 (Феодосія, Україна) забезпечує необхідний температурний профіль печі з точністю ± 1 °С. Максимальна робоча температура нагріву печі 800 °С. Механізм переміщення забезпечує рух пластин в об'ємі вакуумної камери зі швидкістю 0...20 см/с, залишковий тиск у вакуумній камері складає 10^{-4} Па.

Об'єкт обробки. Плоско-паралельні пластини з оптичного скла К8, К108, К208, БК10, ТК21, які мають форму дисків (діаметром 20,0 мм і товщиною 2; 4; 6; 8 мм) та прямокутників з лінійними

розмірами $70 \times 14 \times 6$ мм з відполірованими поверхнями ($Rz = 0,025$ мкм).

Інструмент обробки. Електронно-променева гармата Пірса, яка розташована у вакуумній установці УВН74-ПЗ і генерує стрічковий електронний потік питомої потужності $10^1 \text{ Вт/см}^2 \leq P_{\text{потоку}} \leq 10^5 \text{ Вт/см}^2$, який може переміщуватися по поверхні виробу зі швидкістю $U_{\text{ном}} = 0 \dots 20$ см/с, b' – ширина стрічки $0,5 \dots 3$ мм.

Отримані результати та їх обговорення. Поверхня пластини оплавляється електронним потоком на глибину до 160 мкм (рис. 1, а), а охолодження є кінцевою стадією формування модифікованого ПШ (рис. 1, б). Сформований ПШ відрізняється від основного матеріалу за структурою, хімічним складом, оптичними властивостями, мікрогеометрією.

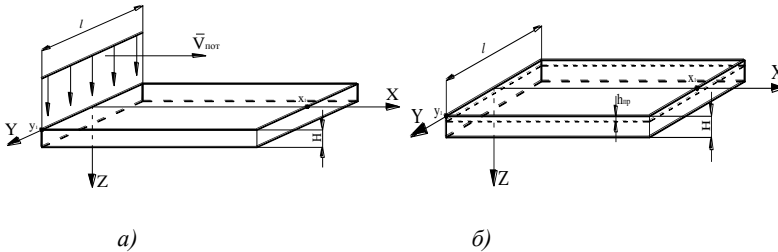


Рис. 1. Схема дії стрічкового електронного потоку на плоско-паралельну пластину (а) та розташування модифікованого ПШ (б)

За критерії якості ПШ при мікрообробці обрано:

- середньостатистичний нанорельєф Rz поверхні;
- середньостатистична глибина $h_{\text{мод}}$ модифікованого ПШ;
- оптична однорідність ПШ (бездефектність, залишкові термонапруження);
- площинність N , ΔN поверхні пластин;
- залишковий рівень вихідної поверхні Δh ;
- площа поверхні пластини, яку оброблено електронним потоком $S_{\text{обр}}$.

При цьому, якість мікрообробки визначається станом технологічного середовища, досконалістю інструмента обробки – електронного потоку, точністю і гнучкістю керування процесом та

засобами діагностики і контролю якості обробки.

На основі отриманих автором даних [3–5], у тому числі рисунок 2, визначено основні технічні та технологічні умови реалізації високоєфективної термічної обробки поверхонь оптичних матеріалів електронними потоками стрічкової форми, на основі яких формулюємо основні принципи конструювання обладнання.

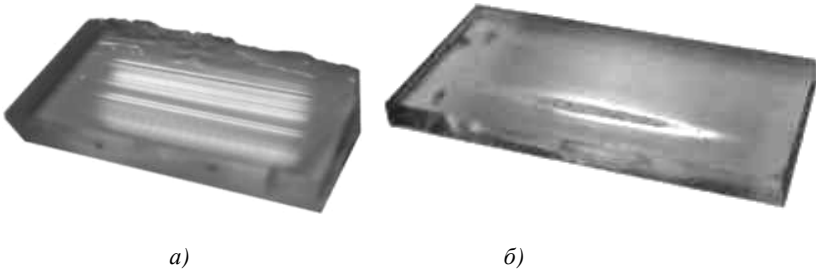


Рис. 2. Зовнішній вигляд поверхні скляних пластин з хвилястістю (а), слідами кипіння поверхневого шару (б), які утворилися в результаті недотримання технологічного режиму електронно-променевої обробки ($T_0 \geq 600$ °С, $U_{np} = 4 \dots 5$ кВ, $I_{ном} \leq 100$ мА та $I_{ном} \geq 250$ мА, $l \leq 50$ мм та $l \geq 50$ мм, $V_{ном} \leq 2,5$ см/с)

Таким чином, до технічних умов для забезпечення ефективної електронно-променевої обробки скла належать:

1. Наявність спеціального технологічного вакуумного обладнання, або адаптація існуючого вакуумного обладнання, які б забезпечили використання:

- термопечі (вакуум не менший за 10^{-3} Па) для попереднього нагріву і охолодження виробів з регульованим діапазоном робочих температур $20 \dots 640$ °С ± 1 °С протягом 10 годин роботи установки;

- технологічної арматури, механізмів руху, які б забезпечили швидкість проходження електронного потоку зі швидкістю $0,2 \dots 20$ см/с;

- електронно-променевої гармати Пірса зі стрічковою формою потоку з необхідним нахилом потоку до поверхні виробу.

2. Наявність джерел живлення електронно-променевої гармати Пірса, які б забезпечили стабільну роботу гармати в межах питомої потужності $P_{пит} = 0,5 \cdot 10^2 \dots 5 \cdot 10^4$ Вт/см² та регульований нагрів ($20 \dots 800$) °С і охолодження оптичних матеріалів зі швидкістю, меншою за 8 °С/хв., в умовах обробки.

3. Забезпечення автоматизованої системи зондування електронного потоку та керування режимами електронно-променевої обробки.

4. Наявність приладів та обладнання для забезпечення технологічного контролю якості виробів, отриманих поверхонь і функціональних шарів.

При цьому до технологічних умов слід віднести забезпечення:

- оптимальних значень вакууму, температур попереднього нагріву виробів у вакуумній камері перед електронно-променевою обробкою;
- оптимальних значень потужності і швидкості переміщення електронного потоку при поверхневій обробці оптичних матеріалів;
- оптимальних режимів нагріву та охолодження виробів після електронно-променевої обробки.

Сам процес обробки передбачає сильний локальний термічний вплив електронної стрічки на поверхню заготовки (градієнт температур на поверхні сягає значень $10^2 \dots 10^3$ К/мм), і, виходячи з розмірів електронної стрічки (довжина робочої частини катоду не перевищує 80 мм, а діаметр 0,8 мм), визнаємо, що ширина і довжина зони обробки будуть обмеженими. З врахуванням цих умов та необхідної номенклатури оптичних матеріалів проведено класифікацію виробів, які можливо обробляти електронно-променевим методом, а саме:

- за матеріалом (скляні без металізації і з металізацією поверхні; керамічні без металізації і з металізацією поверхні);
- за розмірами: по довжині і ширині (малих розмірів – до 5 мм; середніх розмірів – від 5 до 30 мм; крупних розмірів – від 30 до 60 мм); по товщині (тонкі – до 3 мм; середні – від 3 до 8 мм; товсті – більше 8 мм);
- за формою поверхні (плоскі; з мікрорельєфом; опуклі; увігнуті);
- за способом обробки (без оплавлення поверхні; з оплавленням поверхні).

Сукупність цих ознак обумовлює межі використання електронного потоку, як інструменту обробки оптичного матеріалу.

Обладнання для електронно-променевої обробки оптичних матеріалів містить:

- 1) систему нагріву і охолодження (джерела нагріву і охолодження);
- 2) систему захисту оброблюваних матеріалів від зовнішньої атмосфери (робоча камера та вакуумна система);
- 3) інструмент обробки (електронний потік);
- 4) контрольно-регулюючу апаратуру;

5) систему живлення.

Ці умови відповідають фізиці і техніці процесу низькоенергетичної електронно-променевої обробки без проплавлення і з проплавленням поверхневого шару матеріалу при електричному впливі ($U_{\text{ном}}, I_{\text{ном}}$), термічному впливі ($T_{\text{впл}}$), охолодженні виробів протягом часу ($t_{\text{впл}}, t_{\text{охол}}$) при визначеній активності (ΔG) оточуючого середовища.

Залежно від форми і матеріалу виробу ці параметри можуть змінюватися у широкому діапазоні значень. При виборі обладнання необхідно оцінити ступінь його універсальності для отримання найбільшого техніко-економічного ефекту від його впровадження. Це можливо при оптимальній відповідності обладнання технологічним і економічним вимогам. Перші визначаються згаданими вище характеристиками виробів та відповідними параметрами обробки. Інші вимоги визначаються необхідною якістю виробу ($R_a, R_z, h_{\text{нр}}, n, \sigma_p, \sigma_{\text{ст}}$ та інші) та його серійністю.

Для порівняння варіантів вакуумного обладнання з урахуванням технологічних і техніко-економічних особливостей, які виникають у конкретних ситуаціях, недостатньо відомих критеріїв, тому виникла необхідність доповнити їх показниками ефективності і техніко-економічними критеріями [5]:

$P_{\text{нр}} = \Sigma T_{\text{н}}/S_{\text{обр}}$, нормо-години/см² – питома трудомісткість процесу електронно-променевої обробки;

$P_{\text{м}} = \Sigma C_{\text{м}}/S_{\text{обр}}$, грн./см² – питома матеріалоємність процесу електронно-променевої обробки;

$C = \Sigma C_{\text{с}}/S_{\text{обр}}$, грн./см² – собівартість процесу електронно-променевої обробки;

$P_{\text{к}} = \Sigma C_{\text{к}}/S_{\text{обр}}$, грн./см² – питома капіталовкладення;

$A = 1 - t_{\text{н}}/t_{\text{обр.с}}$ – критерій адаптивності обладнання, де $t_{\text{н}}$ – час налагодження обладнання під електронно-променеву обробку серійного типорозміру виробу, $t_{\text{обр.с}}$ – час обробки всієї серії;

$Ш = 1 - t_{\text{доп}}/t_{\text{обр}}$ – критерій швидкодії обладнання, де $t_{\text{доп}}$ – час на допоміжні операції; $t_{\text{обр}}$ – час на обробку;

$\Gamma = 1 - t_{\text{с}}/t_{\text{зм}}$ – критерій готовності обладнання, де $t_{\text{с}}$ – термін часу для приведення обладнання у робочий стан після повного відключення, $t_{\text{зм}}$ – термін часу повної робочої зміни;

$P_{\text{w}} = W_i/W_{i+1}$ – критерій точності регулювання потужності джерела енергії, де i – ступінь регулювання;

$P_{\text{ww}} = 1 - W_{\text{мін}}/W_{\text{макс}}$ – критерій діапазону потужності джерела енергії;

$P_s = S_n / S_{ni+1}$ – критерій точності регулювання площі нагріву під електронно-променевим потоком;

$Я = \{R_w; R_z; h_{mp}; n; \sigma p; \sigma_{cm}\}$ – критерій якості виробів після електронно-променевої обробки, який може бути виражено абсолютним або питомим показником шорсткості поверхні, глибиною проплавлення, показником заломлення, напруженнями стиснення або розтягнення у матеріалі після термічної обробки;

ΔG_{01} – критерій активності оточуючого середовища, який приймає два значення: 0 – при негативній дії середовища та 1 – при забезпеченні захисту матеріалів при обробці;

$\eta_{мен}$ – критерій ефективності повної теплової обробки оптичних матеріалів (електронно-променевою гарматою і в термопечах при нагріві та охолодженні).

Ці критерії слід використовувати разом з аналізом особливостей поверхонь і приповерхневих шарів оброблених матеріалів.

Одержані дані, за результатами промислових і експериментальних порівнянь ефективності різних джерел енергії, дозволяють сформулювати вимоги до оптимального джерела енергії при поверхневій мікрообробці оптичних матеріалів таким чином:

- джерело нагріву повинно бути стрічковим, рухомим і забезпечувати локальний нагрів оптичних матеріалів з точним регулюванням площі і форми технологічної зони нагріву матеріалу;
- параметри, що регулюються, повинні змінюватися у межах 2...4 порядків;
- загальна похибка джерела з інтенсивності у технологічній зоні повинна складати величину, не більшу за 1 %.

Для переходу від науково-дослідних до дослідно-конструкторських робіт та промислового виробництва заплановано виконати комплекс заходів щодо визначення якості отриманих мікрорельєфів на поверхні пластини з оптичного скла (скло К8) (рис. 3). Складовою заходів є удосконалення метрологічного забезпечення виробництва шляхом розроблення та впровадження відповідної програми.

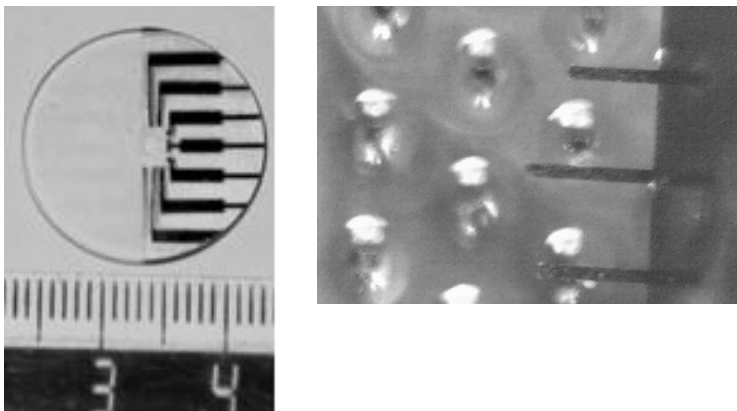


Рис. 3. Мікрорельєфи на поверхні пластини з силікатного скла (скло К8), створені за технологією електронно-променевої обробки поверхні поверхневого шару

Програма удосконалення метрологічного забезпечення виробництва. Визначеними цілями впровадження програми удосконалення метрологічного забезпечення виробництва є [6–10]:

- задоволеність споживачів;
- якість та конкурентоспроможність методу обробки;
- стабільність, точність та відтворюваність параметрів під час серійного виробництва;
- перевірка параметрів та характеристик поверхні;
- ефективність управління, автоматизації та комп'ютеризації процесів виготовлення виробів.

Під час освоєння виробництва у програмі метрологічного забезпечення заплановано виконати:

- аналіз стану метрологічного забезпечення;
- проведення метрологічної експертизи конструкторської та технологічної документації;
- калібрування засобів вимірювальної техніки (ЗВТ);
- атестацію випробувального обладнання (ВО);
- розробку та атестацію методик виконання вимірювання;
- розробку, виробництво, атестацію нестандартизованих ЗВТ та ВО;
- розробку автоматизованої системи управління технологічними процесами;
- створення системи керування вимірюванням у складі інтегрованої системи управління.

Програма метрологічного забезпечення охоплює такі стадії: маркетингові дослідження; проектування та розроблення; закупівля сировини, матеріалів, виробів та послуг; виробництво; перевірка. У результаті проведених досліджень, аналізу літератури та нормативної документації [11–21] визначено:

- на стадії закупівлі стан метрологічного забезпечення задовільний;

- на стадії виробництва під час технологічної операції – електронне оброблення поверхневого шару – метрологічне забезпечення потребує удосконалення;

- на стадії перевірки під час технологічної операції – вимірювання параметрів шорсткості поверхні – стан метрологічного забезпечення незадовільний: відсутні атестовані ЗВТ та методики вимірювань.

Вимірювання шорсткості поверхні ОМЕ після електронного оброблення можливе з застосуванням методу атомно-силової мікроскопії [22–24].

У роботі [25] повідомляється про створення еталонної тривимірної лазерної інтерферометричної системи вимірювань нанопереміщень на базі атомно-силового мікроскопу (АСМ). Установка має такі параметри:

- діапазон переміщень по осях X та Y складає від 1 до 3000 нм з точністю вимірювання 0,5 нм;

- діапазон переміщень по осі Z складає від 1 до 1000 нм з точністю вимірювання від 0,5 до 3 нм.

Під час проведених досліджень для оцінювання шорсткості поверхні ОМЕ після електронного оброблення використовувався АСМ NT-206V (ОДО «Микротестмашины», Гомель, Білорусь) з зондами CSC38 (Mikromash).

Порівняння оціночних параметрів шорсткості поверхні ОМЕ та вимог нормативної документації надано у таблиці 1.

Таблиця 1

Порівняння параметрів шорсткості

Параметр шорсткості *			
оціночні після електронного оброблення	найменші значення, що встановлені у ГОСТ 2789 [12]	державний спеціальний еталон згідно з ГОСТ 8.296 [13]	вихідний еталон України. Міра шорсткості з регулярним профілем 1-го розряду [26]

R_z від 0,002 до 0,005 мкм; базова довжина $L = 0,05$ мм	R_z від 0,032 до 0,025 мкм включно; базова довжина $L = 0,08$ мм	У діапазоні від 0,025 до 1600 мкм: для R_{max} , R_z від 0,1 до 1 мкм $S = 0,005$ мкм, $\theta = 0,005$ мкм. для R_{max} , R_z від 1 до 1000 мкм $S = 0,05$ мкм, $\theta = 0,05$ мкм	$R_a = 0,89$ мкм $\Delta = \pm 0,007$ мкм $R_z = 0,42$ мкм $\Delta = \pm 0,01$ мкм $R_{max} = 2,58$ мкм $\Delta = \pm 0,05$ мкм
--	--	---	--

Примітка: R_{max} – найбільша висота нерівностей профілю; R_z – висота нерівностей профілю по десяти точках; R_a – середнє арифметичне відхилення профілю; S – середнє квадратичне відхилення результату вимірювання; Δ – межа допустимої абсолютної похибки; θ – невилучена систематична похибка

Висновки:

1. Запропоновані засоби контролю і програма удосконалення метрологічного забезпечення дозволяють визначити оптимальні технологічні умови та забезпечити якість електронно-променевої обробки оптичного скла, наблизити цей метод до впровадження у промислову сферу.

2. Для удосконалення метрологічного забезпечення виробництва оптичних деталей з електронно-променевою обробкою поверхні, підвищення якості оцінювання параметрів шорсткості поверхні після електронного оброблення важливим та необхідним є:

- створення засобів вимірювальної техніки та спеціальної оснастки на базі АСМ NT-206V;
- проведення метрологічної атестацію засобів вимірювальної техніки на базі АСМ NT-206V з використанням атестованої міри.

Список використаної літератури:

1. *Канашиевич Г.В.* Термічна електронно-променева обробка скляних плат оптичних інтегральних схем : монографія / *Г.В. Канашиевич.* – Черкаси : НИИТЭХИМ, 2002. – 168 с.
2. Применение метода атомно-силовой микроскопии, как составляющей комплексной методики измерения параметров качества оптических изделий, обработанных низкоэнергетическим электронным потоком / *М.П. Рудь, В.П. Бойко, Г.В. Канашиевич и др.* // Сб. докладов IX Междунар. конф. «Методологические аспекты сканирующей зондовой микроскопии» (Минск, окт., 2010 г.). – Минск, 2010. – С. 220–223.

3. *Kanashevich G.V.* Cooling of plates from optical glass after electronic micro-treatment / *G.V. Kanashevich* // Электронная обработка материалов (Кишинеу). – 2005. – № 4 (234). – С. 79–83.
4. *Kanashevich G.V.* Micro-treatment of surfaces of plates made of optical glass with a low-power electronic stream of a band form. The 7th World Congress on Recovery, Recycling and Reintegration & China International 3R Exhibition, Beijing, China, 25–29 Sept. 2005. – P. 7.
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) // Материаловедческие и технологические основы МНСТ. – 2008. – № 10. – С. 28–30.
6. Закон України “Про метрологію та метрологічну діяльність” від 11.02.1998 № 113/98-ВР (У редакції Закону України від 15.06.2004 № 1765-IV).
7. ДСТУ 3815–98 (ISO 10005:1995(E)). Управління якістю. Настанови щодо програм якості.
8. ДСТУ ISO 10012:2005 (ISO 10012:2003, IDT) Системи керування вимірюванням. Вимоги до процесів вимірювання та вимірювального обладнання.
9. *Рейх Н.Н.* Метрологическое обеспечение производства : учебн. пособие / *Н.Н. Рейх, А.А. Тупиченков, В.Г. Цейтлин* ; под ред. к.т.н. *Л.К. Исаева*. – М. : Изд-во стандартов, 1987. – 248 с.
10. *Ткачик О.* Метрологічна експертиза науково-технічної документації. Сучасні підходи та досвід / *О.Ткачик, В.Бархатян* // Метрологія та прилади. – 2006. – № 1. – С. 33–37.
11. ISO 9211:1994. Optic sandoptical instruments – Optical coatings (Оптика та оптичні прилади. Оптичні покриття).
12. ДСТУ ISO 10110:2004 (ISO 10110:1996, IDT). Оптика та оптичні прилади Готування креслеників оптичних елементів та систем.
13. ГОСТ 8.296–78. Государственный специальный эталон и общесоюзная поверочная схема для средств измерений

- параметров шероховатости R_{\max} и R_z в диапазоне 0,025÷1600 мкм.
14. ГОСТ 2789–73. Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики.
 15. ГОСТ 3519–91. Материалы оптические. Методы определения двулучепреломления.
 16. ГОСТ 3520–92. Материалы оптические. Методы определения показателей ослабления.
 17. ГОСТ 3521–81. Стекло оптическое. Метод определения бесшвильности.
 18. ГОСТ 3522–81. Материалы оптические. Метод определения пузырности.
 19. ГОСТ 11141–84. Детали оптические. Классы чистоты поверхности. Методы контроля.
 20. ГОСТ 26302–93. Стекло. Методы определения коэффициентов направленного пропускания и отражения света.
 21. ГОСТ 28869–90. Материалы оптические. Методы измерений показателя преломления.
 22. Атомно-силовой микроскоп NT-206: Новые возможности / *А.А. Сулов, В.В. Чикунов, Д.И. Шашолко и др.* // Методологические аспекты сканирующей зондовой микроскопии : сб. докладов VI Междунар. семинар. (Минск, 12–15 окт. 2004 г.). – Минск : Ин-т тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАН Беларуси, 2004. – С. 123–130.
 23. *Канашевич Г.В.* Применение АСМ в исследовании поверхностей и функциональных слоев в оптических материалах, полученных методом электронной микрообработки / *В.Г. Канашевич* // Сб. докладов 6-го Белорусского семинара по сканирующей зондовой микроскопии "БелСЗМ-6" (Минск, 12–15 окт. 2004 г.). – Минск, 2004. – С. 42–44.
 24. *Ковшов С.Б.* Проблемы метрологического обеспечения сканирующей зондовой микроскопии в нанотехнологиях / *С.Б. Ковшов, В.С. Купко, И.В. Лукин* // Український метрологічний журнал. – 2005. – № 2. – С. 35–41.
 25. *Тодуа П.А.* Метрология в нанотехнологии / *П.А. Тодуа* // Российские нанотехнологии. – 2007. – № 1–2. – Т. 2. – С. 61–69.
 26. Перелік державних еталонів, створених в Україні, і нормативних документів на державні повірочні схеми станом на 01.01.2006 // Зб. нормативно-правових актів України та

організ.-метод. документів з питань метрології / Держ. ком. України з питань техн. регулювання та спожив. політики. – К. : ТОВ “Авега”. – Вип. 6 /Уклад. : *Р.Домницький та ін.* – 2006. – 350 с. – Дод. (58 с.)

КАНАШЕВИЧ Георгій Вікторович – доктор технічних наук, доцент, завідувач кафедри «Технології та обладнання машинобудівних виробництв» Черкаського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

– оптична обробка скла.

E-mail: kgv-elbeam@rambler.ru

Стаття надійшла до редакції 15.09.2013

Канашевич В.Г. Технологічні умови и показники ефективності спеціальної електронно-променевої обробки поверхні оптичного скла

Канашевич В.Г. Технологические условия и показатели эффективности специальной электронно-лучевой обработки поверхности оптического стекла

Канашевич В.Г. Технологические условия и показатели эффективности специальной электронно-лучевой обработки поверхности оптического стекла

УДК

Технологические условия и показатели эффективности специальной электронно-лучевой обработки поверхности оптического стекла / В.Г.Канашевич

Аннотация

УДК

Канашевич В.Г. Технологические условия и показатели эффективности специальной электронно-лучевой обработки поверхности оптического стекла

Presented technical and technological conditions of electron beam surface treatment of glass and proposed performance indicators in its implementation in the industrial sector. The proposed program of metrological assurance of quality characteristics of electron beam modified surface of optical glass.

Keywords: optical production, optical glass, electron beam treatment, defective layer, surface roughness, metrological support, processing efficiency.