УДК 681.51:621.9.048

СПЕЦИФІКА ТА СИСТЕМНІ ПРОБЛЕМИ ПОВЕРХНЕВОЇ ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВОЇ ОБРОБКИ ОПТИЧНОГО МАТЕРІАЛУ

Канашевич Г. В., *д.т.н., професор*
Черкаський державний технологічний університет

Анотація. *В статті розглянуто специфіку поверхневої електронно-променевої обробки оптичного матеріалу та системні проблеми, які виникають при переході в область технологій мікро- та нанообробки. Систематизовано основні фізичні явища та технологічні фактори електронно-променевої обробки оптичного матеріалу. Вказано шляхи вирішення проблем, які виникають при переході в область технологій мікро- та нанообробки.*

Ключові слова: *оптичне виробництво, електронно-променева обробка, оптичне і технічне скло, поверхневий шар, якість поверхні, глибина проплавлення, залишкові термонапруження.*

SPECIFICITY AND SYSTEMIC PROBLEMS OF SURFACE ELECTRON-BEAM PROCESSING OF OPTICAL MATERIALS

Kanashevych G. V., *D.Sc., professor*
Cherkasy State Technological University

Abstract. *The article considers the specificity of surface electron-beam processing of optical materials and systemic problems which occur during the transition in the sphere of micro- and nano-processing technologies. The basic physical phenomena and technological factors of electron-beam processing of optical materials are systematized. The ways of solving problems which arise during the transition in the sphere of micro- and nanoprocessing technologies.*

Keywords: *optical production, electron-beam processing, optical and technical glass, surface layer, surface quality, depth of penetration, residual thermal stresses.*

Актуальність. Електронно-променева обробка матеріалів є специфічною і, незважаючи на сучасні техніко-економічні проблеми оптичної, напівпровідникової та електронної промисловості України, може вигідно використовуватися як інноваційна для створення елементної бази оптоелектроніки та мікрохвильової техніки.

У започаткованих роботах Г. В. Дудка та В. М. Лісоченка [1, 2] показано і наступними технологічними роботами автора і в роботах В. А. Ващенка, М. О. Бондаренка, І. В. Яценко, М. П. Рудя [3-5] підтверджено, що рухомий стрічковий низькоенергетичний ($E \leq 8$ кеВ) електронний потік фіксованої потужності, діючи у вакуумі на оптичне скло, забезпечує не тільки зменшення зовнішнього мікрорельєфу його поверхні, але й усунення дефектного та тріщиновидного шарів у матеріалі проплавленням його поверхні на глибину до 120 мкм. При цьому змінюється мікроструктура, хімічний склад поверхневого шару (ПШ) матеріалу.

На теперішній час, вирішуючи питання якісної обробки поверхні оптичного, технічного або кварцового скла на мікро- і нанорівні, постійно наштовхуємося на проблеми фізико-технічного характеру. Ці проблеми стосуються як інструменту обробки (електронного потоку), так і специфічних властивостей самого матеріалу, які є наслідковими, малопередбачуваними і залежать як від природи матеріалу, так і від технологічних умов виробництва.

Мета роботи. Визначення особливостей та проблем системного характеру, які виникають при поверхневій обробці оптичного матеріалу електронами, для забезпечення електронній стрічці умов переходу в область мікро- та нанотехнологій.

Постановка експерименту. Для електронно-променевої обробки використані плоскопаралельні пластини з оптичного скла К8, ТК21 та БК10 круглої форми (діаметром 20 мм і товщиною 6 мм) та прямокутні пластини (розміром 70×14×6 мм), поверхні яких

оброблені методом глибокого шліфування і полірування (ГШП) в умовах оптичного виробництва, а також фотопластини без емульсії, поверхня яких формувалася полум'яним поліруванням. Технологічний об'єм використано з вакуумної установки марки УВН-74. Як інструмент для поверхневої обробки використано параксіальний електронний потік стрічкової форми, який генерувався електронно-променевою гарматою Пірса. Параметри електронної обробки: $P_{пит} = 10^2...5\cdot10^3$ Вт/см^2; $V_{обр} =$ 1,5...4,5 см/с; температура попереднього нагріву скла $T_{нагр}$ = 250...490 ºС. Ширина електронної стрічки b = 1.5…2,5 мм. Для виявлення структурних особливостей ПШ скла після електронно-променевої обробки використане вибіркове травлення поверхні скла в розчині HF+гліцерин у співвідношенні 1 : 9. Нанорельєф поверхонь пластин визначався за допомогою атомно-силового мікроскопа NT-206V. Глибина проплавленого шару визначалася за допомогою спеціально розроблених методик з використанням електронного мікроскопа РЕМ-100У. Залишкові напруження в оптичному матеріалі визначалися на приладі ПКС-250.

Обговорення результатів експерименту. Даний процес обробки відноситься до високотемпературних і передбачає сильний локальний термічний вплив електронної стрічки на поверхню заготовки (градієнт температур на поверхні досягає значень $10^2...10^3$ ºС/мм).

Ефективно реалізуємо цей метод на двох стадіях теплової дії (СТД) електронного потоку, а саме I СТД – без утворення рідкої фази в поверхні матеріалу і II СТД – з утворенням рідкої фази в поверхні матеріалу. Обробка на I СТД покращує оптичні характеристики ПШ оптичних виробів, зменшуючи компоненту світлорозсіяння від оптичної поверхні за рахунок гомогенізації хімічного складу продуктів гідролізу, які заповнюють дефектний ПШ [6]. Така обробка не знищує дефектний шар і проводиться на глибину до 2,0 мкм.

Повне усунення дефектного і тріщиновидного шарів та зменшення шорсткості поверхонь Ra з 8…15 нм до 2…5 нм після механічного шліфування і полірування реалізується на II СТД шляхом проплавлення ПШ на глибину 10…120 мкм. Так покращуються і оптичні, і механічні характеристики поверхонь деталей з оптичного скла (табл. 1).

Таблиця 1

Характеристики ПШ оптичного скла К8, ТК21, БК10 після електронно-променевої обробки (II СТД)

№ п/п	Марка скла	Мікротвердість, МПа	Показник заломлення, n	Максимальні залишкові термонапруження, МПа	Зниження рівня (усадка) поверхні, мкм	Залишкова шорсткість, R_a нм
1	К8	350	1,498	6,6	80	2,2...3,6
2	ТК21	330	1,652	6,3	80	3,8...4,3
3	БК10	310	1,557	6,2	80	2,9...3,2

Вирішено теплофізичну задачу для обробки ПШ при утворенні рідкої фази в межах питомих потужностей $P_{пит} = 0{,}5\cdot10^1...5\cdot10^3$ Вт/см^2 (рис. 1).

В основу розрахунку нами покладено рівняння теплопровідності для напівобмеженого тіла з початковими та граничними умовами і вперше враховано явище леткості матеріалу розплаву з поверхні у вакуум в зоні обробки:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a^2\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right);$$

$$-\infty < x < +\infty;\ -\infty < y < +\infty;\ 0 \le z < +\infty;$$

$$T(x, y, z, 0) = T_0;$$

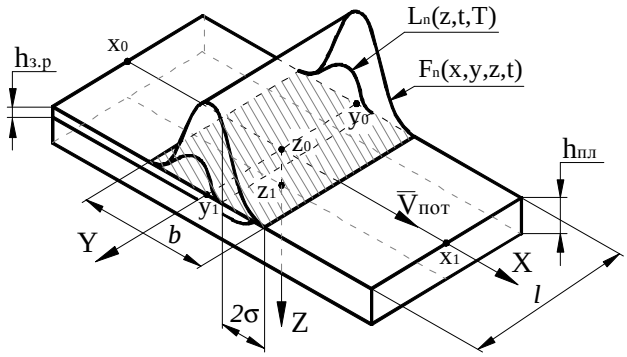
$$\lambda \left.\frac{\partial T}{\partial z}\right|_{z=0} = F_n(x_0 - V_{пот}\cdot t, y, 0, t) -$$

$$-L_n\left(x, y, 0, t, T_{z=0}\right);$$

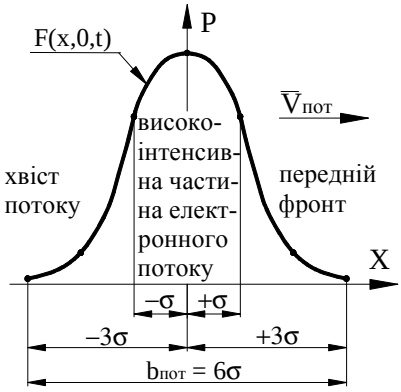
$$\left.\frac{\partial T}{\partial x}\right|_{x=x_1} = \left.\frac{\partial T}{\partial x}\right|_{x=x_0} = \left.\frac{\partial T}{\partial y}\right|_{y=y_1} = \left.\frac{\partial T}{\partial y}\right|_{y=y_0} =$$

$$= \left.\frac{\partial T}{\partial z}\right|_{z=z_0} = 0,$$

де $F_n(x - V_{пот} \cdot t, y, 0, t)$ – функція розподілу інтенсивності електронного потоку на поверхні матеріалу за координатами x, y, z та часом t; $L_n\left(x, y, 0, t, T_{z=0}\right)$ – розподіл потоку, обумовленого леткістю матеріалу з поверхні розплаву за координатами x, y, z та часом t; T(K) – температура в матеріалі; T_0 (K) – температура попереднього нагріву матеріалу; a^2 ($м^2/с$) – коефіцієнт температуропровідності матеріалу; λ ($Вт/см^2 \cdot К$) – коефіцієнт теплопровідності матеріалу.



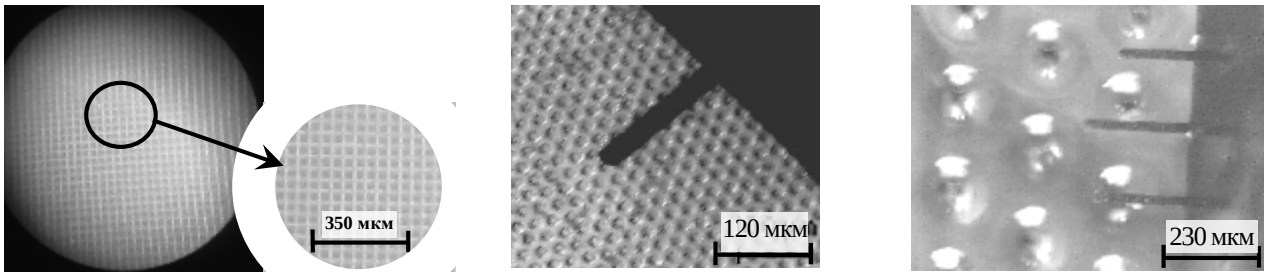
(а)



(б)

Рис. 1. Схема обробки рухомим стрічковим електронним потоком поверхні пластини (а) та енергетичний профіль електронного потоку (б): F(x, y, z, t) – розподіл теплового потоку від дії електронної стрічки; L_n(z, t, T) – розподіл теплового потоку з поверхні матеріалу у вакуум, обумовлений леткістю розплаву; l – довжина зони термічної дії потоку; b – ширина зони термічної дії потоку; $V_п$ – швидкість руху електронної стрічки по поверхні матеріалу

Кінцеві властивості модифікованого ПШ сформовані на стадії охолодження. При цьому, з речовини ПШ отримано як склоподібний стан, так і кристалічний. Кристалізація є характерною лише для тих речовин, які знаходяться у рідкому стані, мають низьку в'язкість, яка при охолодженні зростає порівняно повільно аж до моменту кристалізації. Таким чином, змінюючи умови охолодження поверхневого шару після електронної дії, створюються безліч склоподібних систем, критерії якості яких визначаються зв'язком: склад речовини модифікованого ПШ – режим обробки – режим охолодження. ІІ СТД є прийнятною для зміни площинності поверхні. В основу покладено фізичні явища леткості матеріалу у вакуум при обробці (зменшується вихідний рівень поверхні до 200 мкм) та ущільнення ПШ матеріалу від дії електронного потоку при охолодженні. Так створюються мікрорельєфи решіток або сіток з кроком від 5 мкм до 100 мкм (рис. 2).



а б в

Рис. 2. Мікропрофілі, які створені на поверхні фотопластин на ІІ СТД електронного потоку на матеріал

Таким чином, методом поверхневої електронно-променевої обробки для оптичного матеріалу досягаються такі результати:

- гомогенізація приповерхневого шару за хімічним складом [6];
- повне усунення приповерхневого дефектного і тріщиновидного шарів [7];
- зменшення шорсткості поверхні оптичного матеріалу від значень R_a = 8…15 нм до R_a = 2…5 нм [8];
- повне усунення крапок, ласин в приповерхневому шарі, які залишаються від механічного шліфування і полірування [9];
- створення мікропрофілів з кроком 5…100 мкм [10].

Специфічність методу можна відобразити у вигляді технологічної системи, елементи якої поєднані причинно-наслідковими зв'язками (рис. 3).

Разом з тим, для удосконалення існуючої технології необхідно вирішити, принаймні, дві основні проблеми. Перша проблема стосується інструменту, який на теперішній час можна вважати доволі примітивним. Електронна стрічка, яка застосовується, має довжину 60 мм, а площа перекриття нею оброблюваної поверхні становить більш ніж 10 мм^2. Зрозуміло, що просторово-динамічні характеристики такої стрічки не дозволяють використати енергетичні можливості окремих електронів та реалізувати вибірковий, більш «тонкий», вплив на поверхню матеріалу. Частково ця проблема вирішується нами маскуванням матеріалу, за рахунок чого для обробки можна використати окремі складові потоку.

Значно обмежують гнучкість процесу і конструктивні особливості електронної гармати і системи керування процесом обробки. Для електронної гармати, яка побудована за принципом Пірса, та для систем відхилення та фокусування потрібно знайти такі конструктивні рішення, які б дозволили змінювати прямолінійну траєкторію руху електронного потоку на траєкторію заданої кривизни.

Інша проблема, яка впливає на точність обробки, стосується оптичного матеріалу. Переважна більшість оптичних матеріалів володіє діелектричними властивостями. При електронно-променевій обробці ПШ і об'єм матеріалу миттєво поляризуються, на поверхні накопичується заряд, який своїм знаком і величиною впливає на траєкторію руху електронів від гармати до поверхні. Потік електронів розфокусовується або взагалі відбивається від поверхні. Зменшити до мінімуму вплив поверхневого заряду на електронний потік можна, підвищуючи до необхідного, принаймні, значення електропровідності матеріалу.

Висновки. Для забезпечення електронно-променевому методу обробки оптичних матеріалів умов переходу в область мікро- та нанообробки слід врахувати таке:

1. Невід'ємним і специфічним для цього методу є сукупність багатьох фізичних явищ і технологічних факторів, що приводять до якісних змін поверхневого шару. До таких факторів, у першу чергу, відносяться: технологічне середовище – вакуум (залишковий тиск 10^{3} Па), високі температури у технологічному об'ємі окремих частин технологічної арматури та високотемпературний (T ≤ 1250…1300°C) локальний вплив потоку електронів з енергіями E ≤ 8 кеВ на поверхневий шар оптичного матеріалу. До фізичних явищ, які домінують при обробці, відносяться поляризація та електропровідність матеріалу, які змінюються з температурою, десорбція у вакуум слабозв'язаних компонентів ПШ (переважно іони лужних металів), яка стимулюється сукупним термоелектричним впливом потоку, зміна в'язкості ПШ від твердого стану до рідкоплинного і навпаки, ущільнення структури ПШ, зміна залишкових напружень і сил поверхневого натягу при охолодженні ПШ.

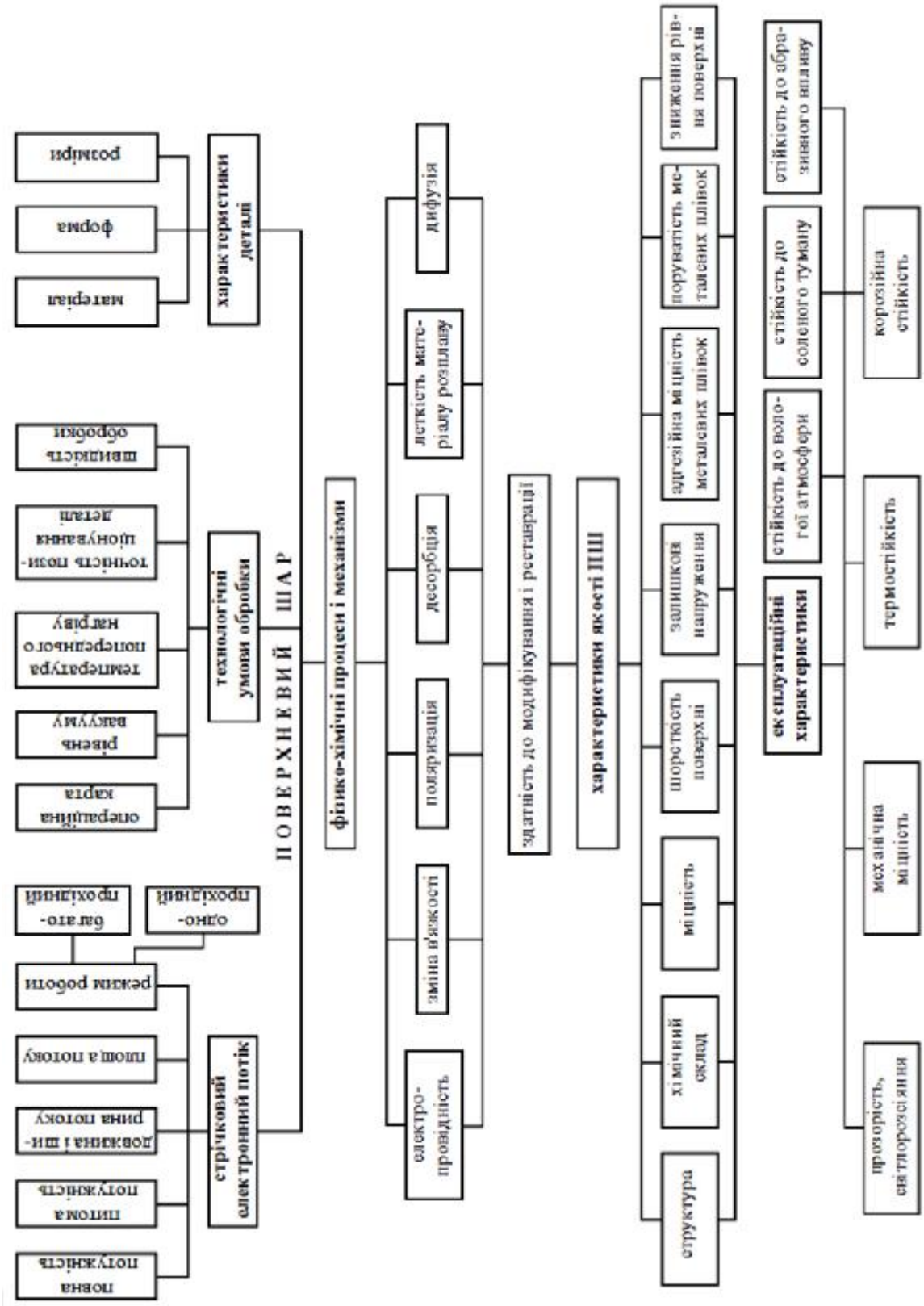


Рис. 3. Технологічна система поверхневої електронно-променевої обробки оптичного матеріалу

2. До системних проблем, які є супутніми і впливають на прецизійність цього методу, можна віднести існуючі макроскопічні розміри інструменту обробки, а саме електронного потоку, та наслідкові фізико-хімічні властивості поверхневого шару оптичного матеріалу, які є різними від процесів шліфування і полірування (механічного, хіміко-механічного, полум'яного тощо).

Список літератури

1. Лисоченко В. Н. Технология электронно-лучевой полировки плат микросхем и входных окон видиконов : дисс. канд. техн. наук : 05.27.06 / В. Н. Лисоченко. – Б. м., 1977. – 152 с.
2. Дудко Г. В. Проблема формирования особо чистых и бездефектных поверхностей / Г. В. Дудко, В. Н. Лисоченко // Материалы краткосрочного семинара. – Ленинград, 1985. – С. 13–16.
3. Тепловые процессы при электронной обработке оптических материалов и эксплуатации изделий на их основе / [Ващенко В. А., Котельников Д. И., Лега Ю. Г. и др.]. – К. : Наукова думка, 2006. – 368 с.
4. Бондаренко М. О. Оптимізація параметрів стрічкового електронного потоку за допомогою зон термічного впливу / М. О. Бондаренко, Г. В. Канашевич, В. А. Ващенко // Машинобудування та металообробка – 2003 : тези доп. першої Міжнар. НТК. – Кіровоград, 17-19 квітня 2003. – С. 15–16.
5. Рудь М. П. Визначення розподілу густини струму стрічкового електронного потоку / М. П. Рудь // Вісник Черкаського державного технологічного університету. Спецвипуск. – 2007. – С. 148–150.
6. 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). Рубрика : Материаловедческие и технологические основы МНСТ. – 2008. – № 10. – С. 28–30.
7. Канашевич Г. В. Термоелектричний вплив низькоенергетичного електронного потоку на дефектний шар оптичного скла / Г. В. Канашевич // Вісник НТУУ «КПІ». – Вип. 45. – С. 123–130. – (Серія : Приладобудування).
8. Канашевич Г. В. Дослідження поверхневого шару оптичного скла після електронно-променевої обробки / Г. В. Канашевич // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем : зб. наук. праць. – Вип. 32. – Краматорськ : ДДМА, 2013. – С. 237–244.
9. Канашевич Г. В. Комплексна методика визначення якості поверхні та поверхневих шарів оптичних матеріалів, модифікованих електронним променем / Г. В. Канашевич // Вісник Черкаського державного технологічного університету. – 2013. – № 3. – С. 108–115.
10. Канашевич Г. В. Технологічні можливості електронно-променевої обробки оптичного скла // Вісник Черкаського інженерно-технологічного інституту. – 1998. – № 3. – С. 48–55.

References

1. Lisochenko, V. N. (1977) The technology of electron-beam polishing of wafer-plates and vidicons input windows. Dis. of Ph.D.: 05.27.06, 152 p. [in Russian].
2. Dudko, G. V. & Lisochenko, V. N. (1985) The problem of the formation of especially pure and defect-free surfaces. *Proceedings of short-term seminar*. Leningrad, pp. 13-16 [in Russian].
3. Vashchenko, V. A., Kotelnikov, D. I., Lega, Yu. G. et al. (2006) Thermal processes at electronic processing of optical materials and the use of products based on them. Kiev: Naukova dumka, 368 p. [in Russian].
4. Bondarenko, M. O., Kanashevych, G. V. & Vashchenko, V. A. (2003) The optimization of parameters of ribbon electron beam by means of heat-affected zones. Proceedings of the First International STC "Machine building and metal working – 2003". Kirovograd, 17-19 April, pp. 15-16 [in Ukrainian].
5. Rud', M. P. (2007) The determination of the distribution of the density of ribbon electron beam current. *Visnyk Cherkaskogo derzhav-*

nogo tehnologichnogo universitety, Special Edition, pp. 148-150 [in Ukrainian].

6. Kanashevich, G. V. (2008) Transformations in surface layer of optical glass and photographic plates from silica glass from the action of low-energy electron beam. *Monthly interdisciplinary theoretical and applied scientific and technical journal "Nano- and Microsystem Technology" (Russia). Topic: Material science and technological bases of MNST,* (10), pp. 28-30 [in Russian].
7. Kanashevych, G. V. Thermoelectric effect of low-energy electron beam on defective layer of optical glass. *Journal of NTUU "KPI". Series: Instrument,* (45), pp. 123-130 [in Ukrainian].
8. Kanashevych, G. V. (2013) The investigation of surface layer of optical glass after electron-beam processing. *Reliability and optimization of instrument systems: Coll. of scientific works,* (32), Kramators'k: DSMA, pp. 237-244 [in Ukrainian].
9. Kanashevych, G. V. (2013) A comprehensive method of determining surface quality and surface layers of optical materials modified by electron beam. *Visnyk Cherkaskogo derzhavnogo tehnologichnogo universitety,* (3), pp. 108-115 [in Ukrainian].
10. Kanashevych, G. V. (1998) Technological capabilities of electron beam processing of optical glass. *Visnyk Cherkaskogo inzhenerno-tehnologichnogo instytutu,* (3), pp.48-55 [in Ukrainian].