

УДК 621.373.826.038

**Г.В. Канашевич, В.І. Унрод, М.В. Голуб,
С.М. Мацепа, Ю.І. Коваленко, Є.В. Хижняк**

**ВИКОРИСТАННЯ ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВОГО МЕТОДУ
ОБРОБКИ ДЛЯ ВІДШАРУВАННЯ ПЛАСТИН МАЛОЇ ТОВЩИНИ
З ПОВЕРХНІ ОПТИЧНОГО МАТЕРІАЛУ**

Канашевич Георгій Вікторович – доктор технічних наук, професор, Черкаський державний технологічний університет, Черкаси, kgv-elbeam@gambler.ru

Унрод Володимир Ізяславович – доктор технічних наук, доцент, Черкаський державний технологічний університет, Черкаси, unr1948@gmail.com

Голуб Микола Васильович – асистент, Черкаський державний технологічний університет, Черкаси, G.nikolay@ukr.net;

Мацепа Сергій Михайлович – асистент, Черкаський державний технологічний університет, Черкаси, s_matsepa@ukr.net;

Коваленко Юрій Іванович – ст. викладач, Черкаський державний технологічний університет, Черкаси, kovalenkoyi@ukr.net

Хижняк Євген Валерійович – ст. викладач, Черкаський державний технологічний університет, Черкаси, Ehizh1@yahoo.com

В статті представлені результати досліджень з термічної обробки низькоенергетичними електронами (енергія електронів $E \leq 6$ кеВ) поверхні силікатного скла у вакуумі, за якою відбувається оплавлення поверхневого шару. За певних умов обробки відбувається відшарування поверхні у вигляді пластин товщиною 0,1...1.2 мм. Відшарована поверхня відрізняється покращеною хімічною однорідністю, покращеним залишковим нанорельєфом, змінним показником заломлення. Такі пластини мають перспективу для використання в мікрооптиці (МО), інтегральній оптиці (ІО) та волоконній оптиці (ВО).

***Ключові слова:** оптичне скло, поверхня скла, поверхневий шар скла, пластини малої товщини, електронний потік, електронно-променева мікрообробка скла, МО, ІО, ВО.*

АКТУАЛЬНІСТЬ

В сучасних технологіях поверхневої обробки оптичного скла існує проблема, яка полягає у поширеному використанні абразиву, кислотних, лужних та інших миючих сумішей, які не можуть забезпечити високої хімічної однорідності та бездефектності поверхневого шару (ПШ) матеріалу при виготовленні пластин малих товщин [1, 2, 3]. Таким чином, коло сучасних технологій зростає до рівня впровадження прецизійного, екологічно чистого інструментарію та середовищ, які забезпечують обробку оптичного матеріалу з наданням його поверхні і ПШ хімічної однорідності та однорідного показника заломлення [4, 5, 6, 11, 12, 13].

Нами пропонується розширення існуючих технологічних можливостей прецизійного методу електронно-променевої обробки, суть якого полягає у проплавленні електронним потоком у вакуумі тонкого поверхневого шару оптичного матеріалу з наступним відшаруванням проплавленого шару у вигляді пластин малої товщини.

МЕТА РОБОТИ

Розширення технологічних можливостей сучасної електронно-променевої обробки для виготовлення пластин малої товщини з поверхні крихкого оптичного матеріалу.

Матеріали і інструмент обробки:

Матеріали обробки. Плоскопаралельні пластини у формі дисків (діаметром 20,0 мм і товщиною 2...6 мм) та прямокутників з лінійними розмірами 70×14×6 мм з оптичного скла К8, К108 та відполірованими в умовах оптичного виробництва поверхнями ($R_z = 0,025$ мкм).

Інструмент обробки. Електронний потік на поверхні оброблюваної пластини формується електронно-променевою гарматою Пірса у вигляді стрічки, довжина стрічки $l = 60$ мм, ширина $b = 1,2...2$ мм. Питома потужність стрічки P_{num} регулюється і може приймати значення 10^1 Вт/см²... 10^5 Вт/см², а швидкість потоку v_{nom} (швидкість стрічки на поверхні пластини) може змінюватися в межах 0...50 см/с.

ОТРИМАНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

При виконанні роботи були використані дві схеми обробки. Перша схема (рис. 1) забезпечує перекриття електронною стрічкою площі S поверхні пластини та розподіл енергії електронів, який відповідає гаусовому розподіленню. Максимальною енергією володіють електрони на вісі такої стрічки. Більша частина електронів взаємодіють з поверхнею матеріалу [7, 8, 9], віддаючи енергію та нагріваючи його. В результаті такої взаємодії в матеріалі виникає тепловий потік $F(x,y,t)$, який з поверхні розповсюджується вглиб пластини.

За першою схемою обробки (рис. 1) електронна стрічка рухається зі швидкістю \vec{v}_{nom} вздовж поверхні виробу за координатою x .

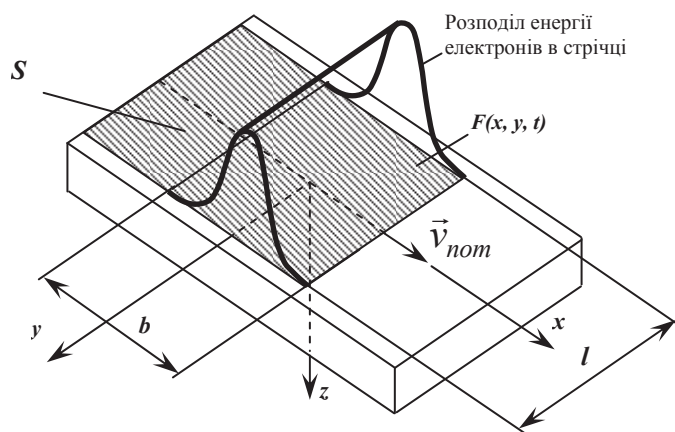


Рис. 1. Схема обробки рухомим стрічковим електронним потоком поверхні скляної пластини: $F(x, y, t)$ – тепловий потік від дії електронної стрічки, Вт/см²; l – довжина стрічки, мм; b – ширина стрічки, мм; \vec{v}_{nom} – напрямок і швидкість руху електронної стрічки, см/с; S – площа обробленої поверхні см²

Через певний час t зона обробленої поверхні буде відповідати площі S . Змінюючи час t , тобто швидкість v_{nom} та ширину електронної стрічки b (питому потужність P_{num}), ми змінюємо глибину термічного впливу електронів на матеріал.

Якщо необхідно реалізувати об'ємне джерело теплоти на поверхні матеріалу (проплавити ПШ до 200 мкм), то ми повинні знати, як змінюються його характеристики за напрямком z ; якщо ж потрібно досягти тільки

поверхневого впливу (глибиною до 1 мкм), то треба реалізувати залежність характеристик стрічки від координат x, y .

Рівень термічного впливу електронного потоку на оптичне скло визначається, з одного боку, теплофізичними властивостями матеріалу (a, λ), його структурною щільністю та електропровідністю (χ), яка збільшується з температурою, та з іншого боку, потужністю електронного потоку, питомою потужністю потоку та часом його дії на матеріал.

Вирішуючи задачу нагріву поверхні матеріалу стрічковим електронним потоком, використовуємо відомий вираз для нормального розподілення щільності потоку вздовж вісі x [7, 8]:

$$T(x, t) = \frac{P_0}{l} \sqrt{\frac{k}{\pi}} \cdot e^{-kx^2} \quad (1)$$

де P_0 – потужність потоку на вісі стрічки, Вт;
 k – коефіцієнт зосередженості, см^{-2} .

Друга схема обробки представлена на рис. 2.

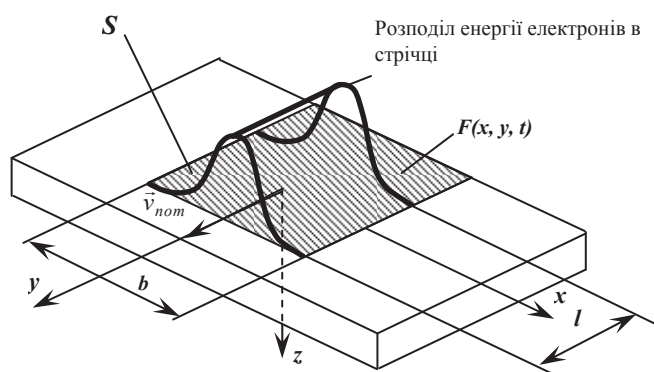


Рис. 2. Схема обробки рухомих стрічковим електронним потоком поверхні скляної пластини (спосіб, який пропонується $l \approx b$): $F(x, y, t)$ – тепловий потік від дії електронної стрічки, $\text{Вт}/\text{см}^2$; l – довжина стрічки, мм; b – ширина стрічки, мм; \vec{v}_{nom} – напрямок і швидкість руху електронної стрічки, $\text{см}/\text{с}$; s – площа обробленої поверхні, см^2

Розподілення за віссю x щільності стрічкового електронного потоку шириною b та довжиною l , при умові $l \approx b$, можна записати:

$$q(x, t) = q_0 \cdot e^{-kb^2} \quad (2)$$

де q_0 – максимальна щільність потоку;
 k – коефіцієнт зосередженості, см^{-2} ;
 b – ширина потоку.

Зв'язок між розподіленнями (1) і (2) встановлюється через коефіцієнт зосередженості k у законі нормального розподілення:

$$b/2 = V^* \cdot k^{-1/2}$$

Якщо $b/2$ визначити як таку відстань від вісі потоку, при якому щільність потоку падає у 2,72 рази, тоді $V^* = 1$, а $b = 2 \cdot k^{-1/2}$.

Приведена модель та розрахунки до неї експериментально підтверджені шляхом зондування електронного потоку [10].

Відмінністю другої схеми обробки є те, що стрічка електронів проходить по поверхні матеріалу не довжиною l , а шириною b .

З врахуванням леткості матеріалу з поверхні при електронно-променевої обробці розподіл температури від поверхні вглиб матеріалу можна описати залежністю [8]:

$$T(z, t) = T_0 + \frac{a}{\lambda \sqrt{\pi}} \int_0^t \frac{F_{n1}(\tau) - L_n(0, \tau, T_{z=0})}{\sqrt{t - \tau}} e^{-\frac{z^2}{4a^2(t-\tau)}} d\tau \quad (3)$$

де $L_n(x, 0, t, T_{z=0}) = k_1 \cdot L \cdot 10^{\frac{p_1 - p_2}{273 + T_{z=0}} + p_3}$ – розподіл теплового потоку з поверхні матеріалу у вакуум, обумовлений леткістю розплаву;
 $p_1 = 1,5 \cdot 10^3$, $p_2 = 2,6 \cdot 10^6$ – коефіцієнти корегування умов леткості;
 $p_3 = 4,2$ – коефіцієнт підбору леткості розплаву К8 у вакуум в залежності від його леткості у повітрі;

$L = 3,5 \cdot 10^6$ Дж/кг – теплота випаровування летких домішок;

T_0 (°C) – температура попереднього нагріву матеріалу;

a^2 (м²/с) – коефіцієнт температуропровідності матеріалу;

λ (Вт/см²·К) – коефіцієнт теплопровідності матеріалу.

В таблиці 1 [6] наведено характер отриманої поверхні в результаті електронно-променевої обробки з наступним її відшаруванням.

Таблиця 1

Характер поверхні оптичного скла К8 в залежності від режимів обробки електронним потоком

Питома потужність електронного потоку, Вт/см ²	Швидкість електронного потоку, см/с	Характер поверхні	Час охолодження, хв
за другою схемою обробки, l=b			
0,5·10 ²	3,5	Без проплавлення	40
2,5·10 ²	3,5	Без проплавлення	40
5·10 ²	2,5	Без проплавлення	40
5·10 ²	0,4	Без проплавлення	40
5·10 ⁴	50	Без проплавлення	40
за першою схемою обробки, l>b			
0,5·10 ²	7	Проплавлення поверхні	40
2,5·10 ²	7	Проплавлення поверхні	40
5·10 ²	5	Проплавлення поверхні	40
5·10 ²	0,8	Проплавлення поверхні	40
5·10 ⁴	100	Проплавлення поверхні	40
10 ¹	0,2	Без проплавлення	40
10 ¹	5	Без проплавлення	40
0,5·10 ²	7	Без проплавлення	40
0,5·10 ²	100	Без проплавлення	40

ВИСНОВКИ

1. Вперше застосовано спосіб поверхневої електронно-променевої обробки, при якому обробка проводиться не довжиною стрічки, а її шириною.

2. Вперше використано зміну коефіцієнту зосередженості електронного потоку для отримання пластин малих товщин (0,1... 1.2 мм) та малих розмірів (1,2...2 мм) при електронно-променевої обробці

3. Отримані пластини малих товщин і розмірів можуть використовуватися в якості плат для мікрооптики та інтегральної оптики.

The article presents the results of research on the heat treatment of low-energy electrons (electron energy $E \leq 6$ keV) of a surface of silica glass in a vacuum, in which the surface layer is melting. Under certain conditions of treatment there is a detachment of the surface in the form of plates in the thickness of 0.1...1.2 mm. The exfoliated surface is characterized by improved chemical homogeneity, improved residual nanorelief, variable refractive index. Such plates have a perspective for use in the micro-optics (MO), integrated optics (IO) and fiber optics (FO).

Key words: optical glass, glass surface, surface layer of glass, small thickness plates, electron flow, electron beam microprocessing of glass, MO, IO, FO.

1. Фізичні явища і механізми за якими змінюється поверхня і поверхневий шар оптичного матеріалу від дії електронного потоку. / Г.В. Канашевич // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил. – 2014. – №1. – С. 184–189.
2. Канашевич Г.В. Дослідження поверхневого шару оптичного скла після електронно-променевої обробки / Г.В. Канашевич // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем: зб. наук. праць. – Краматорськ: ДДМА, 2013. – Вип. 32. – С. 237-244.
3. Канашевич Г.В. Комплексна методика визначення якості поверхні та поверхневих шарів оптичних матеріалів модифікованих електронним променем / Г.В. Канашевич // Вісник Черкаського державного технологічного університету: Черкаси, ЧДТУ. – 2013. – № 3. – С. 108-115.
4. Пат. 102398 України, МПК С30В 33/00, С03С 23/00. Спосіб отримання ювенільних поверхонь на склі / Канашевич Г.В., Голуб М.В.; Заявл. 12.05.2015, Опубл. 26.10.2015. Бюл.№20. – 4 с.
5. Пат. 107755 України, МПК С30В 33/00, С03С 23/00. Спосіб отримання ювенільних поверхонь на склі / Канашевич Г.В., Голуб М.В., Дмитренко П.П., Мацева С.М.; Заявл. 23.11.2015, Опубл. 24.06.2016. Бюл.№12. – 4 с.
6. Пат. 106000 України, МПК С03В29/00, С30В33/00, С03С23/00. Спосіб обробки скла / Канашевич Г.В., Голуб М.В., Мацева С.М.; Заявл. 29.10.2015, Опубл. 11.04.2016. Бюл.№12. – 4 с.
7. Ващенко В.А., Дробот І.В., Канашевич Г.В. Методика использования математического расчета теплового воздействия электронного луча на оптические материалы // Збірник наукових праць. Інститут проблем моделювання в енергетиці. НАН України. Випуск 11. – Київ: 2001.
8. Алгоритм керування якістю поверхневого шару оптичних матеріалів при електронно-променевої мікрообробці / Канашевич Г.В., Щерба А.І. Дробот І.В. / Вісник національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» Тематичний випуск «Математичне моделювання в техніці та технологіях» – Харків, 2012. – Вип. 27. – С. 231 – 239.
9. Ващенко В. А., Дробот І. В., Канашевич Г. В. Розподіл заданого розподілення теплової дії за допомогою системи стрічкових електронних променів // Радиоелектроника и информатика. – 2002, № 2 (19).
10. Моделювання низькоенергетичної стрічкової електронної гармати Пірса методом кінцевих елементів / [М.П. Рудь, Г.В. Канашевич, Ю.І. Коваленко, М.О. Бондаренко] // Наукові праці : наук.-метод. журн. Чорноморськ. держ. ун-ту ім. Петра Могили. – Миколаїв, 2012, Вип. 179, т. 191. – С. 28– 31. – (Серія «Комп'ютерні технології»).
11. Канашевич Г.В. Технологічні умови і показники ефективності спеціальної електронно-променевої обробки поверхні оптичного скла / Канашевич Г.В. // Процеси механічної обробки в машинобудуванні: зб. наук. праць / Житомир: ЖДТУ, 2013. – Вип. 14, с. 62–74.
12. Канашевич Г.В. Термоелектричний вплив низькоенергетичного електронного потоку на дефектний шар оптичного скла / Г.В. Канашевич // Вісник НТУУ «КПІ», Серія Приладобудування. – Вип. 45. 2013 – С. 123-130.
13. Канашевич Г.В. Перспективи використання поверхневої електронно-променевої обробки оптичного і технічного скла/ Канашевич Г.В., Голуб М.В., Антонюк В.С., Слепцов В.Ф.// Вісник НТУУ «КПІ». Секція Приладобудування. Вип. 47 (1). 2014, с. 127-136.