

ВИНИКНЕННЯ НАПРУЖЕНЬ У ОПТИЧНОМУ СКЛІ ВІД ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНОГО ВПЛИВУ ЕЛЕКТРОННОГО ПОТОКУ

Визначено характер залишкових напружень у поверхневому шарі (ПШ) пластин з оптичного скла К8, які виникають у результаті термоелектричного впливу при електронно-променевої обробці поверхні. Залишкові напруження у поверхневому шарі оптичного скла є характерним результатом термоелектричної дії потоку електронів на матеріал (як при утворенні рідкої фази у ПШ, так і без неї). Показано, що міцність модифікованого ПШ скла з залежить від режиму охолодження. Механізм залишкових напружень використано для спрямованого відшаровування ділянок модифікованого ПШ у вигляді пластин необхідної форми.

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

Вступ

У попередніх роботах [1–3] показано, як електронний потік з низькими енергіями електронів ($E \leq 10$ keV) використано для покращення оптичних властивостей поверхневого шару (ПШ) оптичного скла на глибину до 2 мкм за рахунок термічної і електричної дії на сполуки Na_2O та K_2O . Покращені характеристики поверхні оптичного скла (зменшення нанорельєфу поверхні, рафінування за хімічним складом, усунення мікро- і нанодфектів) досягаються електронно-променевим поліруванням [2] з переплавленням ПШ при температурах 1200...1300 °C на глибину до 160 мкм.

Проте електронним потоком можна досягти й інших результатів при поверхневій обробці оптичних матеріалів. Оскільки оптичне скло відноситься до матеріалів з низькою теплопровідністю, у його ПШ відбувається

накопичення та зміна внутрішньої енергії, у тому числі за рахунок локального наведення електронним потоком градієнту температур. Така енергія трансформується у внутрішні напруження матеріалу при його охолодженні, які є небезпечними і можуть призвести до викривлення виробу або його руйнування.

Подібного роду з'являються напруження у ПШ пластин з натріє-кальцієво-силікатного скла внаслідок низькотемпературного йонного обміну йонів Na^+ на йони Ca^{2+} [4, 5]. Ці напруження є стискувальні, вони призводять до викривлення пластини без її руйнування і виникають у результаті охолодження.

Для подальшого вдосконалення цієї технології [3, 6–9] вкрай важливими є питання визначення причино-наслідкових зв'язків між залишковими напруженнями в матеріалі і основними параметрами процесу.

Мета роботи. Визначення характеру залишкових напружень у модифікованому ПШ пластин з оптичного скла, встановлення причин і взаємозв'язку з параметрами електронно-променевої обробки.

Обладнання, матеріали та інструмент електронно-променевої обробки

Обладнання. Електронно-променева установка, яка виготовлена на базі вакуумної установки УВН74-ПЗ оснащена піччю попереднього нагріву та охолодження скла. Електронний термодарний регулятор температури РИФ-101 (Феодосія, Україна) забезпечує необхідний температурний профіль печі з точністю $\pm 1^\circ\text{C}$. Максимальна робоча температура нагріву печі 800°C . Механізм переміщення забезпечує рух пластин в об'ємі вакуумної камери зі швидкістю $0 \dots 20 \text{ см/с}$, залишковий тиск у вакуумній камері становить 10^{-4} Па . Полярископ-поляриметр ПКС-250 для визначення та вимірювання залишкових напружень у прозорих матеріалах.

Об'єкт обробки. Плоскопаралельні, які мають форму дисків (діаметром $20,0 \text{ мм}$ і товщиною $1; 4; 6 \text{ мм}$) з відполірованими поверхнями ($R_z = 0,025 \text{ мкм}$); прямокутні пластини з оптичного скла К8 лінійних розмірів $70 \times 14 \times 6 \text{ мм}$ з відполірованими плоскопаралельними поверхнями та боковими поверхнями, які виготовлені в умовах оптичного виробництва ($R_z = 0,025 \text{ мкм}$).

Інструмент обробки. Стрічковий електронний потік питомої потужності $10^1 \text{ Вт/см}^2 \leq P_{\text{нум}} \leq 10^5 \text{ Вт/см}^2$, який

генерується електронно-променевою гарматою Пірса [3, 10], яка розташована у вакуумній камері. Електронна стрічка може переміщуватися по поверхні виробу зі швидкістю $v_{\text{ном}} = 0 \dots 20 \text{ см/с}$, b – ширина стрічки $0,5 \dots 3 \text{ мм}$.

Отримані результати та їх обговорення

Мікрообробка ПШ оптичного скла проводилася за схемою, рис. 1.

Технологічні параметри мікрообробки забезпечують модифікування ПШ пластини на глибину 2 мкм (без утворення рідкої фази) на глибину до 160 мкм (з проплавленням – утворення рідкої фази). Сформований ПШ відрізняється від основного матеріалу структурою, хімічним складом, оптичними властивостями, мікрогеометрією. Оплавлення пластин здійснюється як без захисних елементів, так із захисними елементами (тонких, товщиною до 1 мкм , металевих плівок Al , Cu , які отримані на поверхні термовакуумним осадженням та з'ємних пластин Ni товщиною 100 мкм). Охолодження є кінцевою стадією температурної обробки.

У результаті термоелектричного впливу у потоку на поверхню пластини скла можна виділити два її характерних типи руйнування: руйнування по товщині пластини і руйнування (відшарування) ПШ. Руйнування пласти по її товщині відбувається у вакуумній камері при великій потужності потоку, рис. 2, а, або при великій швидкості охолодження – руйнування ПШ, рис. 2, б.

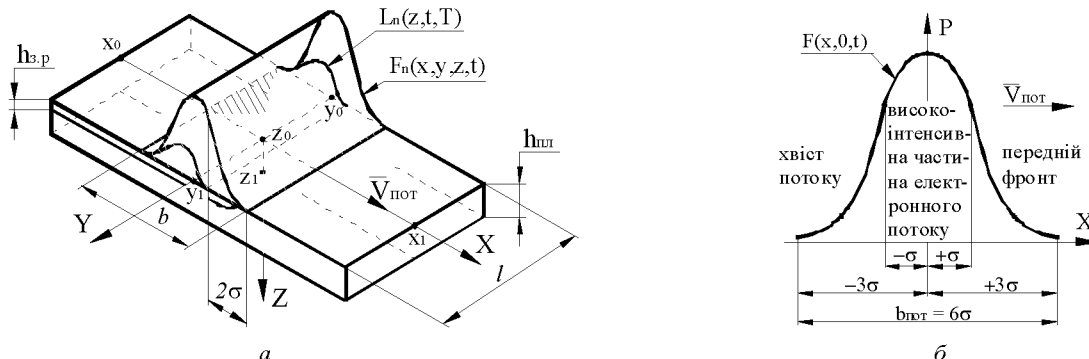


Рис. 1. Схема мікрообробки ПШ пластини з оптичного скла рухомих стрічковим електронним потоком (а) та енергетичний профіль електронного потоку (б): $F(x, y, z, t)$ – розподіл теплового потоку від дії електронної стрічки; $L_n(z, t, T)$ – розподіл теплового потоку з поверхні матеріалу у вакуум, обумовлений леткістю розплаву; l – довжина зони термічної дії потоку; b – ширина зони термічної дії потоку; 6σ – ширина енергетичного профілю на поверхні пластини; V_n – швидкість руху електронної стрічки по поверхні пластини



Рис. 2. Характерне руйнування пластин зі скла К8 у камері установки від дії стрічкового електронного потоку (а) та при прискореному охолодженні (б): а – скло К8, товщина 1 мм , діаметр 20 мм , $P_{\text{нум}} \leq 5 \cdot 10^3 \text{ Вт/см}^2$, $V_{\text{ном}} \leq 1,5 \text{ см/с}$; $T_0 = 400^\circ\text{C}$; б – скло К8, товщина 6 мм , діаметр 20 мм , $P_{\text{нум}} = 5 \cdot 10^3 \text{ Вт/см}^2$, $V_{\text{ном}} = 1,5 \text{ см/с}$; $T_0 = 400^\circ\text{C}$

Відшарування ПШ відбувається й після оптимальних режимів термоелектричного впливу, але ініціювати його можна прискореним охолодженням. При цьому ПШ руйнується, як по дефектах у поверхні (наявність дефектного шару від механічного шліфування і полірування в умовах оптичного виробництва), так і по границі, яка відділяє оплавлену і неоплавлену зони пластини. Таким чином, ми маємо лускоподібний характер відшарованої поверхні, рис. 3.

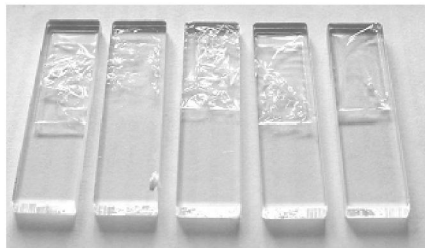


Рис. 3. Руйнування у вакуумній камері незахищених частин поверхні пластин з оптичного скла К8 після їх електронно-променевої обробки в оптимальному режимі ($P_{\text{min}} = 2 \cdot 10^2 \text{ Вт/см}^2$, $T_0 = 510 \text{ }^\circ\text{C}$, $V_{\text{ном}} = 2,7 \text{ см/с}$) потоку та подальшого прискореного охолодження ($V_{\text{охол}} \geq 10 \text{ }^\circ\text{C/с}$)

Для незруйнованих пластин, обробка яких проводилася в оптимальних режимах, а охолодження протягом 8 годин, встановлені зони із залишковими напруженнями (використано метод поляриметрії, прилад ПКС-250). На рис. 4 представлена одна з таких прямокутних пластин у поляризованому світлі (а) та схема з розподіленими у ній залишковими напруженнями (б). Світло проходить через бокову грань пластини (а). Максимальним напруженням, з різницею ходу променів у 275 нм (жовтий колір), відповідають незахищені маскою поверхні.



Рис. 4. Загальний вигляд пластини зі скла К8 прямокутної форми з картиною подвійного променезаломлення (а) та відповідна їй схема з зображенням зон і величин напружень (б). Прилад ПКС-250

Напруження залишаються у пластинах і після тривалого охолодження протягом 12 годин, рис. 5. Ці напруження, як і попередні, можна пояснити зміною щільності структури ПШ внаслідок десорбції слабкозв'язаних іонів Na^+ , K^+ з ПШ у вакуум, що підтверджується роботами.

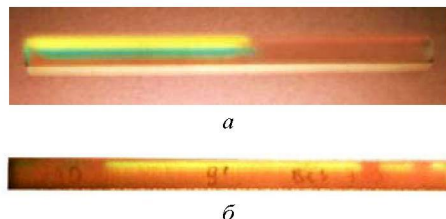


Рис. 5. Картина подвійного променезаломлення у прямокутних пластинах зі скла К8, поверхня яких оброблена електронним потоком через з'ємну маску Ні (а) та через напилену тонку плівку Ні (б). Час охолодження 12 годин

Впливаючи на ПШ у напруженому стані швидкістю охолодження (враховуючи марку скла, режим мікрообробки), досягаємо іншого результату – відшарування поверхонь за необхідною формою, рис. 6.

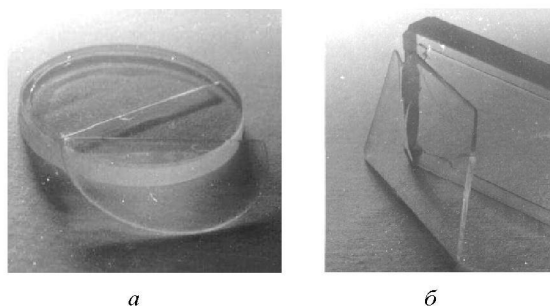


Рис. 6. Відшаровані ПШ від пластин різної форми зі скла К8 після електронно-променевої мікрообробки: а – кругла пластина діаметром 20 мм, товщиною 4 мм; б – прямокутна пластина $70 \times 14 \times 4 \text{ мм}$

Отже, в результаті термоелектричного дії потоку електронів з енергіями $E \leq 10 \text{ кеВ}$ на пластину з силікатного скла його ПШ, незважаючи на довготривале охолодження, залишається в напруженому стані. Напружений стан ПШ призводить до зміни показника заломлення для поляризованого світла. Це явище можна використовувати для спрямованої зміни оптичних властивостей та отримання градієнтних структур в оптичному склі.

Картина залишкових напружень пластин з відшарованими поверхнями представлена на рис. 7.

На рисунку видно, що напруження в пластинах практично відсутні, що можна пояснити вивільненням накопиченої ПШ енергії при відшаруванні.

Таким чином, отримані результати дозволяють розширити існуючі технологічні можливості термічної електронно-променевої обробки аморфних матеріалів і використати електронний потік стрічкової форми як інструмент для мікрообробки поверхні та відшарування модифікованого ПШ. Розвитком цієї роботи буде по-

шук фізичних умов створення наноструктур на поверхні і у ПШ оптичного матеріалу з використанням термоелектричного впливу електронного потоку. Сфера застосування: приладобудування, мікрооптика, нанооптика, волоконна оптика.

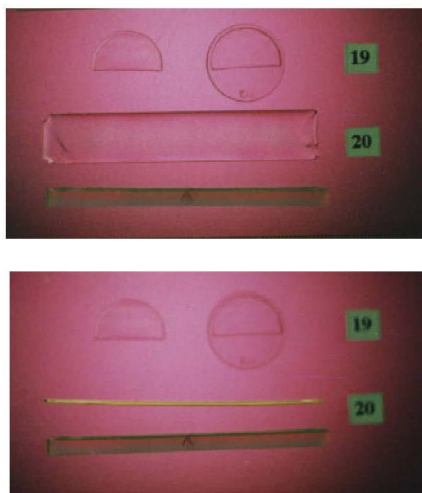


Рис. 7. Відшаровані поверхні та картина їх напружень у поляризованому світлі. Прилад ПКС-250, круглі пластини (19), прямокутні (20)

Висновки

1. Залишкові напруження у поверхневому шарі оптичного скла є характерним і невід'ємним результатом термоелектричної дії потоку електронів на матеріал (як при утворенні рідкої фази у ПШ, так і без неї). Причиною їх виникнення можна вважати процес структурної перебудови поверхневого шару в умовах високих температур (1250...1300 °C), що обумовлений зміною в'язкості від твердого стану до рідкого і навпаки та стимульованою електричним полем десорбцією як слабкоз'язаних йонів-модифікаторів Na^+ , K^+ у вакуум так і інших домішок, які потрапили в ПШ у процесі виготовлення пластин.

2. До основних параметрів впливу, якими можна змінити напружений стан ПШ скла належать електричні параметри електронного потоку: струм потоку $I_{\text{пот}}$, прискорювальна напруга $U_{\text{пот}}$ та час його дії на поверхню $t_{\text{обр}}$ або швидкість руху потоку по поверхні пластини $V_{\text{пот}}$.

3. Міцність щеплення модифікованого електронним потоком ПШ скла з основним матеріалом залежить від режиму охолодження. Спрямоване відшаровування модифікованого ПШ у вигляді пластин необхідної форми від основного матеріалу реалізується при його про-

павленні на глибину 30...160 мкм, ініціюється термоударом і відбувається по границі, яка відділяє зону максимальних напружень ПШ і основного матеріалу.

Список літератури

1. Канашевич Г. В. Термоелектричний вплив низькоенергетичного електронного потоку на дефектний шар оптичного скла / Канашевич Г. В. // Вісник НТУУ «КПІ», Серія Приладобудування. – Вип. 45. – 2013. – С. 123–130.
2. Канашевич Г. В. Дослідження поверхневого шару оптичного скла після електронно-променевої обробки / Канашевич Г. В. // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем: зб. наук. праць. – Краматорськ: ДДМА, 2013. – Вип. 32. – С. 237–244.
3. Канашевич Г. В. Превращения в поверхностном слое оптического стекла и фотопластин из силикатного стекла от действия низкоэнергетического электронного потока / Канашевич Г. В. // Ежемесячный междисциплинарный теоретический и прикладной научно-технический журнал «Нано- и микросистемная техника» (Россия). Рубрика: Материаловедческие и технологические основы МНСТ, 2008. – № 10. С. 28–30.
4. Глебов Л. Б. О возникновении напряжений в стекле в процессе низкотемпературного ионного обмена / Л. Б. Глебов, Н. В. Никоноров, Г. Т. Петровский // Физика и химия стекла. – 1988. – Т. 14. – № 6. – С. 904–906.
5. Напряжения изгиба, возникающие при ионнообменной диффузии в стеклах / [М. В. Бабукова, Л. Б. Глебов, Н. В. Никоноров, Г. Т. Петровский] // Физика и химия стекла. – 1985. – Т. 11. – № 1. – С. 45–49.
6. Дудко Г. В. Формирование предельно гладких поверхностей оптических стекол / Дудко Г. В., Кравченко А. А., Чердиченко Д. И. // Физика и химия стекла. – 1987. – Т. 13. – № 5. – С. 740–746.
7. Лохов Ю. Н. Модификация поверхности оптических стекол при электронно-лучевой обработке в вакууме / Ю. Н. Лохов, А. А. Углов, Д. И. Чердиченко // Физика и химия обработки материалов. – 1997. – № 1. – С. 56–62.
8. Лохов Ю. Н. Зарядовые процессы при электронно-лучевой модификации поверхности оптических стекол / Ю. Н. Лохов, В. Г. Сапогин, Д. И. Чердиченко // Изв. ВУЗов, Естественные науки. – 1995. – 91 с.
9. Применение финишной электронно-лучевой обработки для получения полупроводниковых и диэлектрических подложек для микро- и нанотехнологий / [О. А. Агеев, С. П. Авдеев, Д. И. Чердиченко, Е. Ю. Гусев] // Известия ТРТУ № 9. – 2006. – 116 с.
10. Рудь М. П. Визначення розподілу густини струму стрічкового електронного потоку / Рудь М. П. // Вісник Черкаського державного технологічного університету. Спецвипуск. – 2007. – С. 148–150.

Одержано 09.10.2013

Канашевич Г.В. Возникновение напряжений в оптическом стекле от термоэлектрического воздействия электронного потока

Определен характер остаточных напряжений в поверхностном слое пластин из оптического стекла К8, которые возникают в результате термоэлектрического воздействия при электронно-лучевой обработке поверхности. Остаточные напряжения в поверхностном слое оптического стекла являются характерным

результатом термоэлектрического действия потока электронов на материал (как при образовании жидкой фазы в поверхностном слое, так и без нее). Показано, что прочность модифицированного поверхностного слоя стекла зависит от режима охлаждения. Механизм остаточных напряжений использован для направленного отслаивания участков модифицированного поверхностного слоя в виде пластин необходимой формы.

Ключевые слова: электронно-лучевая обработка, оптическое и техническое стекло, поверхностный слой, шероховатость поверхности, качество поверхности, глубина проплавления, остаточные напряжения.

Kanashevich G. Tensions in optical glass from the thermoelectric impact of electronic flow

The character of the residual stress in the surface layer of the optical glass plates K8, which result from thermoelectric effects in electron beam processing of the surface was defined. Residual stresses in the surface layer of optical glass is characteristic result of the thermoelectric action on the material the electron beam (as in the formation of a liquid phase in the surface layer, both with and without it). It is shown that the strength of the modified surface layer of glass depends on the cooling mode. The mechanism of residual stresses is used for directed exfoliation of the surface-modified layer in the form of plates required shapes.

Key words: electron beam processing, optical and technical glass, the surface layer, surface roughness, surface quality, depth of penetration, residual stresses.
