

**ВИСОКОЕФЕКТИВНІ ТЕХНОЛОГІЧНІ ПРОЦЕСИ
В ПРИЛАДОБУДУВАННІ**

УДК 621.373.826.038

**ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИЙ ВПЛИВ НИЗЬКОЕНЕРГЕТИЧНОГО
ЕЛЕКТРОННОГО ПОТОКУ НА ДЕФЕКТНИЙ ШАР ОПТИЧНОГО СКЛА**

Канашевич Г. В.

Черкаський державний технологічний університет, м. Черкаси, Україна

Визначено фізичні умови електронно-променевої мікрообробки (енергія електронів $E \leq 8$ кеВ) та механізм взаємодії електронного потоку із дефектним шаром оптичного скла. Встановлено межі потужності електронного потоку, що призводять до оплавлення дефектного шару. Визначено стадії термічної і електричної дії електронного потоку на дефектний шар скла.

Отримані результати дозволили розширити існуючі технологічні можливості термічної електронно-променевої обробки діелектричних матеріалів і використати електронний потік стрічкової форми в якості інструменту для мікрообробки та модифікування хімічних властивостей дефектного шару оптичного скла. Показано, що стрічковий електронний потік може використовуватися як засіб для ідентифікування дефектного шару деталей з оптичного скла, що пройшли фінішну обробку поліруванням в умовах оптичного виробництва. Область застосування: приладобудування, мікрооптика, нанооптика, волоконна оптика.

Ключові слова: *електронний потік, електронно-променева обробка, оптичний матеріал, електронно-променева мікрообробка, оптичне скло, дефектний шар, мікрооптика, нанооптика.*

Вступ

Застосування механізмів термічного та електричного впливу, у тому числі, і вибіркової дії енергії електронів на матеріали, є наразі питаннями актуальними для створення спеціальних технологій, особливо технологій мікро- і нанообробки та наноінженерії.

Одним із аспектів розвитку технологій мікро- і нанообробки, мікро- і наноінженерії у сучасному приладобудуванні є створення комбінованими методами поверхонь і поверхневих шарів із новими фізико-хімічними властивостями та з розвинутим мікро- і нанорельєфом.

Термічна електронно-променева обробка (енергія електронів $E \leq 10$ кеВ), свого часу, знайшла використання у поверхневій обробці матеріалів із напівпровідниковими та діелектричними властивостями, особливо за умови зменшення нанорельєфу до 3...5 нм [1-5, 9, 10-12] та модифікації поверхонь за хімічним складом [1, 8, 11-13]. Розроблений В. М. Лісоченком спосіб полірування поверхні оптичного скла К8 електронним потоком забезпечив покращену прозорість вікон відиконів [1] та мав подальший розвиток у роботах В.А. Вашенка, Д.І. Чередниченка, О.О. Кравченка в технологіях макрооптики [4, 5, 13] та мікроелектроніки [2, 12]. Суть методу полягає у знищенні дефектного шару (ДШ) у поверхні скла рухомою ванною розплаву з її наступним охолодженням та

утворенням молекулярно-гладкої поверхні силами поверхневого натягу. Водночас, проплавлення поверхні матеріалу здійснюється стрічковим електронним потоком на глибину більшу за 10 мкм.

Проте для більш тонкої обробки цей спосіб залишається примітивним, і на шляху його вдосконалення та використання електронів, в якості інструмента для мікро- і нанообробки оптичних матеріалів, залишається невизначеною низка обставин, головною з яких є фізичні умови взаємодії та впливу електронів на дефектний шар оптичного скла.

Мета роботи: визначення фізичних умов та механізму впливу електронного потоку на дефектний шар оптичного скла, а також визначення межі потужності потоку, до якої змінюються властивості дефектного шару без його переплавлення.

Обладнання та матеріали електронно-променевої мікрообробки

Обладнання. Електронно-променева установка, що виготовлена на базі вакуумної установки УВН74-ПЗ і оснащена піччю попереднього нагріву та охолодження скла. Електронний термопарний датчик температури РИФ- 101 (Феодосія, Україна) забезпечує необхідний температурний профіль печі із точністю $\pm 0,5^\circ\text{C}$. Максимальна робоча температура нагріву печі 800°C . Механізм переміщення забезпечує рівномірний прямолінійний рух пластин у вакуумній камері та їх швидкість у межах $0 \dots 50$ см/с.

Інструмент обробки. Параксіальний стрічковий електронний потік із питомою потужністю у межах: $10^1 \text{ Вт/см}^2 \leq P_{\text{пит}} \leq 10^5 \text{ Вт/см}^2$, що сформований електронно-променевою гарматою Пірса. Електронна стрічка довжиною $l=60$ мм та шириною $b=0,5$ мм має гаусове розподілення електронів за енергіями у своєму перерізі та площу $S_{\text{пот}}$. Стрічка спрямовується від електронної гармати на об'єкт обробки (пластину) за нормаллю (кут у 90°).

Об'єкт обробки. Плоскопаралельні пластини з оптичного скла К8, К108, К208 мають форму дисків (діаметр 20,0 мм, товщина 2; 4; 6; 8 мм) та форму прямокутників із лінійними розмірами $70 \times 14 \times 6$ мм з відполірованими в умовах оптичного виробництва поверхнями ($R_z = 0,025$ мкм).

Методика експерименту. Отримані результати та їх обговорення

Фізичні явища, що супроводжують фізико-хімічні процеси поверхневої електронно-променевої обробки силікатного скла є доволі складними [13], а їх сукупна дія на кожен марку скла буде різною залежно від режимів обробки. Рух електронів на границі вакуум–діелектрик, взаємодія потоку електронів із поверхневим шаром (ПШ) матеріалу, електричні поля та їх зміна у міжелектродному просторі, температурні поля в матеріалі та інші явища проявляються і залежать, насамперед від: 1) характеру джерела (термоемісія, електричні та магнітні поля, прискорюючі напруги, електричні струми); 2) енергетичних і часових характеристик потоку (структури та форми, потужності, питомої потужності, часу дії); 3) технологічного середовища та контакту з іншими матеріалами; 4) теплофізич-

них характеристик матеріалу (теплопровідності, діелектричної проникливості, електропровідності тощо). Виокремлення одного, або декількох чинників впливу, що є головними, і визначають необхідні умови та процес обробки.

Схему пристрою для прецизійної обробки оптичного скла електронним потоком надано на рис. 1. Пристрій працює наступним чином. У вакуумній камері 1 створюють робочий вакуум $10^{-2} \dots 10^{-4}$ Па. Вироби 6 перед електронно-променевою обробкою знаходяться в зоні печі попереднього розігріву 2 і до необхідної температури розігріваються нагрівачами 5.

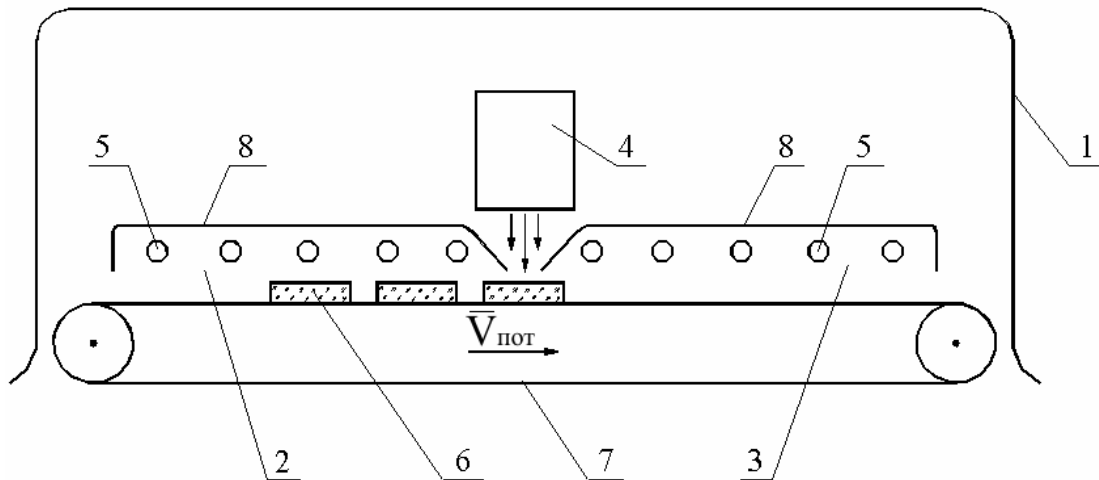


Рис. 1. Схема пристрою для електронно-променевої мікрообробки оптичного скла, де: 1 – вакуумна камера; 2 – піч нагріву; 3 – піч охолодження; 4 – електронно-променева гармата; 5 – нагрівач; 6 – оптичні вироби; 7 – блок транспортування виробів; 8 – тепловий екран

Нагрівачі 5 розташовані в печах попереднього розігріву та охолодження таким чином, щоб забезпечити рівномірний і однаковий за температурами нагрів виробів 6. Екрани 8 печі попереднього розігріву та печі охолодження мають багат шарову конструкцію і забезпечують термоізоляцію виробів від вільного об'єму вакуумної камери. Переміщуючись після попереднього нагріву за допомогою блока транспортування 7, вироби виходять із печі 2 і потрапляють під дію електронного потоку гармати 4.

Інтенсивність потоку та швидкість переміщення виробів під потоком забезпечують необхідні умови термічної дії потоку на ПШ матеріалу (утворюючи рідинну фазу у ПШ, або ні). Пройшовши термічну обробку електронним потоком, вироби потрапляють у піч охолодження 3, де охолоджуються протягом необхідного часу.

Технічний результат досягається тим, що поверхня оптичного скла нагрівається попередньо у вакуумі, $10^{-4} \dots 10^{-5}$ мм. рт. ст., до температури $(T_g - 100) \dots (T_g - 20)^\circ\text{C}$ (T_g – температура розм'якшення скла), витримується протя-

гом 5...30 хвилин і оброблюється електронним стрічковим пучком із питомою потужністю $(0,5 \dots 5,0) \cdot 10^2$ Вт/см² та швидкістю від 0,1 до 5,0 см/с.

Електронний потік, який генерується гарматою, є параксіальним і симетричним відносно електронно-оптичної осі електронної системи. Враховуючи гаусовий розподіл енергії електронів за перерізом потоку при його русі, розглядаємо вплив на поверхню матеріалу, як послідовну дію, а саме: спочатку термічно впливає передній фронт потоку (який складає близько $\frac{1}{2}$ від максимальної енергії електронів потоку), а надалі діють електрони з максимальними енергіями (близьких до осі потоку) та «хвіст» потоку. Спочатку передній фронт потоку взаємодіє із ДШ. Енергії електронів і підвищення температури у ДШ від переднього фронту потоку стає достатніми для дисоціації хімічних сполук, що заповнюють цей шар. Цей результат можна охарактеризувати, як першу стадію термічної дії електронів на матеріал (І СТД). Разом із процесами дисоціації відбувається процес накопичення негативного заряду у ДШ скла, що можна охарактеризувати, як першу стадію електричної дії (ІСЕД) потоку, рис.2.

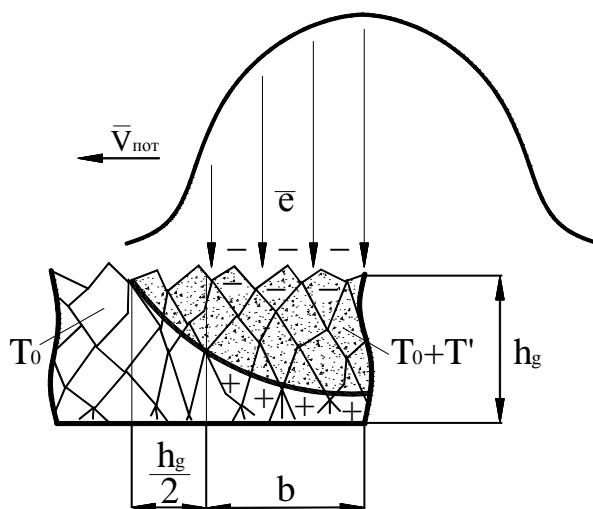


Рис. 2. Схема утворення негативно зарядженої зони у ДШ оптичного скла від дії переднього фронту стрічкового електронного потоку: h_g – глибина дефектного шару; T_0 – температура попереднього нагріву матеріалу; T' – температура ДШ від дії переднього фронту потоку

Гіпотетично можна прийняти розподіл електронів у ДШ матеріалу від дії переднього фронту потоку рівномірним, внаслідок зміни їх траєкторії та дифузного розповсюдження, та врахувати те, що щільність структури ДШ буде багато меншою за щільність самого скла, то глибина зони, в якій підвищуватиметься температура, буде глибиною дефектного шару h_g . Розміри цієї зони будуть значно менші за ширину потоку b і $S_{\text{пот}}$ – площу перерізу електронного потоку на поверхні матеріалу.

Тоді величину накопиченого електричного заряду q_n у ДШ матеріалу можна визначити як: $q_n = q_e \cdot S \cdot h_g \cdot P_e$, де q_e – заряд, який переноситься електронами на по-

верхню і в ДШ матеріалу; h_g – глибина дефектного шару; S – площа поверхні матеріалу, яка перекривається електронним потоком; P_e – відносна кількість електронів, яка осіла в одиниці об'єму дефектного шару.

У результаті передачі енергії від електронів переднього фронту потоку у ДШ, температура ДШ збільшується до значень T_0+T' (для силікатного скла близько 900°C), якщо T_0 взяти в межах від 480 до 510°C . Таке підвищення температури зменшує електричний опір поверхні пластини до $18 \cdot 10^3 \text{ Ом}\cdot\text{м}$. Водночас, накопичений на поверхні та у ДШ (у межах дефектного шару) заряд буде зменшуватися внаслідок розтікання вздовж поверхні у напрямку найменшого опору ($R_{\text{пот}} \gg R_p$, де $R_{\text{пот}}$ – електричний опір електронного потоку; R_p – електричний опір дефектного шару, або, опір розтікання). Здатність матеріалу відводити заряд визначаємо опором розтікання: $R_p = \rho/2h$ і опором потоку: $R_{\text{пот}} = U_{\text{пот}}/I_{\text{пот}}$.

Умова $R_p \ll R_{\text{пот}}$ є еквівалентною умові $\rho_V \ll 4RU_{\text{пот}}/I_{\text{пот}}$, що у випадку традиційної електронної літографії дає $\rho_V \ll 10^9 \text{ Ом}\cdot\text{см}$. Тобто, якщо матеріал пластини має питомий опір $\rho_V \ll 10^9 \text{ Ом}\cdot\text{см}$, то заряд у ній практично не накопичується, і його вплив на електронний потік можна не враховувати.

Об'ємний заряд у ДШ буде накопичуватись за умови виконання нерівності: $R_{\text{пот}} \ll R_p$, де $R_{\text{пот}}$ – електричний опір електронного потоку; R_p – електричний опір поверхневого ДШ (опір розтікання).

II СЕД наступає із моменту, коли зменшення електричного опору матеріалу до $(17,8 \dots 7,6) \cdot 10^2 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ забезпечує умови для ефективної взаємодії іншої частини потоку (вершини гауса та її задньої частини) із поверхнею матеріалу. Водночас, параметри мікрообробки ($P_{\text{пит}}$, $t_{\text{обр}}$, k_e – коефіцієнт зосередженості потоку) та теплофізичні характеристики матеріалу (a , λ) визначають характер розповсюдження тепла вглиб матеріалу.

На рис. 3 представлена картина поверхні скла К8 після електронно-променевої мікрообробки його ДШ із наступним травленням у суміші HF+ гліцерин (1:9). Видно, що продукти, які заповнюють дефектний шар, активно розчиняються.

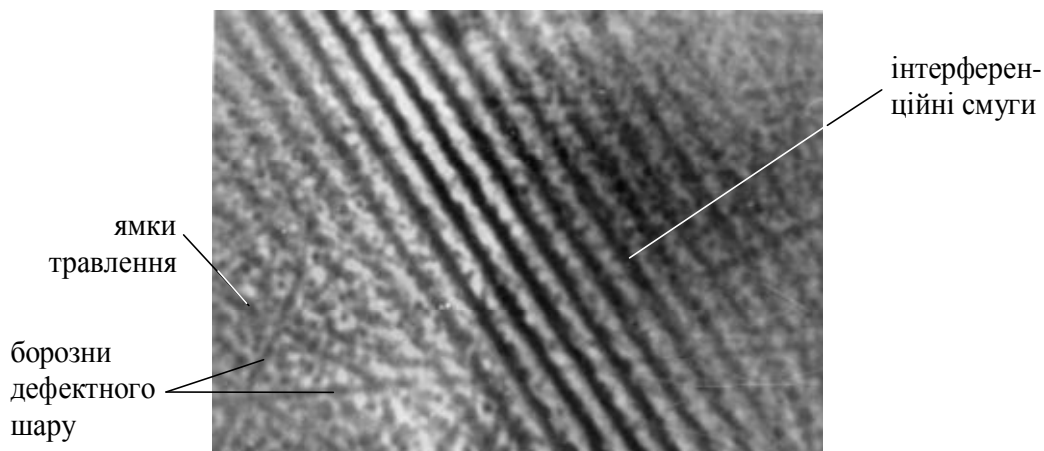


Рис. 3. Дефектний шар поверхні скла К8, який зафіксовано вибірковою дією електронного потоку (I СТД) з наступним травленням у розчині HF+ гліцерин (1:9), МИИ-4, зб. $\times 500$

Окремі дані з виявлення дефектного шару в оптичному силікатному склі шляхом впливу на нього електронного потоку та вибіркової дії травника HF+ гліцерин представлені в таблиці 1.

Таблиця 1. Наявність дефектного шару у склі К108 та глибина його залягання після його електронно-променевої мікрообробки

Зразок №	Питома потужність електронного потоку, Вт/см ²	Швидкість руху потоку, см/с	Наявність дефектного шару; глибина його залягання, мкм
239	$0,5 \cdot 10^2$	4	Виявлено борозни дефектного шару; $h_g = 1,5$
240	$1 \cdot 10^2$	5	Виявлено борозни дефектного шару; $h_g = 2$
242	$2 \cdot 10^2$	4	Дефектний шар переплавляється
243	$3 \cdot 10^2$	4	Дефектний шар переплавляється
244	$4 \cdot 10^2$	5	Дефектний шар переплавляється
245	$5 \cdot 10^2$	5	Дефектний шар переплавляється

Зразки №239-245 є представниками однієї партії, які шліфувалися та полірувалися в одних технологічних умовах.

Виявлення змін у структурі ДШ пластин із оптичного скла марок К8, К108, К208 проводилося їх травленням у розчинах з HF та HF + гліцерин (C₃H₈O₃), взятих у співвідношенні 1:9. Вибір даного травника обумовлений тим, що оксиди, які входять до складу скла, мають іонно-ковалентний тип зв'язку між атомами. Вибіркове травлення проходить розчиненням активних центрів поверхні, тобто внаслідок переходу в розчин комплексних з'єднань із SiFe₆²⁻. Схему взаємодії скла із HF можна представити наступною реакцією:



Частина скла з модифікованим електронами ДШ є незахищеною, а інші частини зразка необхідно захистити парафіном, або воском перед розміщенням їх у розчин з HF. Травлення проводиться за нормальних умов при температурі +18...+22 °С на протязі 1,5... 2.5 хвилин.

Отже, процесу модифікації ДШ силікатного скла низькоенергетичним електронним потоком властива взаємообумовленість двох механізмів: теплової та електричної дії, які проявляються у накопиченні негативного заряду на поверхні та його стіканні за напрямками мінімального електричного опору при підви-

щенні температури ДШ.

Отримані результати дозволили розширити існуючі технологічні можливості термічної електронно-променевої обробки діелектричних матеріалів і використати електронний потік стрічкової форми в якості інструмента для мікрообробки та модифікування дефектного шару оптичного скла за хімічними властивостями. Стрічковий електронний потік може використовуватися для ідентифікування дефектного шару деталей із оптичного скла, які пройшли фінішну обробку поліруванням в умовах оптичного виробництва. Розвитком даної роботи буде пошук фізичних умов створення регулярних наноструктур на поверхні і у поверхневому шарі пластин з оптичного матеріалу із використанням електронного потоку. Область застосування: приладобудування, мікрооптика, нанооптика, волоконна оптика.

Висновки

1. Фізичною умовою для вибіркового впливу стрічкового електронного потоку на дефектний шар оптичного силікатного скла марок К8, К108, К208 є зменшення електричного опору поверхні скла до значень $18 \cdot 10^3$ Ом·м. Це досягається, і попереднім нагрівом скла до температур $(T_g - 100) \dots (T_g - 20)^\circ\text{C}$ (T_g – температура розм'якшення скла), і термоелектричним (температура ДШ від переднього фронту підвищується на $280 \dots 300^\circ\text{C}$, а електричний струм переднього фронту потоку складає $47 \dots 50$ мА) впливом переднього фронту електронного потоку із гаусовим розподілом енергії електронів.

2. Фізичною межею для електронного потоку, до якої змінюються властивості ДШ силікатного скла марок К8, К108, К208, є його питома потужність, що складає величину $P_{\text{пит}} \leq 1 \cdot 10^2$ Вт/см². При $P_{\text{пит}} \geq 1 \cdot 10^2$ Вт/см² ДШ скла переплавляється, що можна охарактеризувати, як другу стадію термічної дії (II СТД).

3. Вперше термоелектричний вплив електронного потоку, з енергією електронів $E \leq 5$ кеВ, використано для спрямованих якісних змін оптичного матеріалу на глибину до 2 мкм.

4. Для розчинення та вивільнення продуктів співполірування із дефектного шару оптичного скла після його електронно-променевого модифікування, розроблено та запропоновано суміш HF + гліцерин (1:9) з терміном дії до 3 хвилин у нормальних умовах при температурі повітря $+18 \dots +22^\circ\text{C}$.

Література

1. Дудко Г.В. Проблема формирования особоочистых и бездефектных поверхностей / Г.В. Дудко, В.Н. Лисоченко // Материалы краткосрочного семинара. Ленинград. – 1985. – С. 13 – 16.
2. Кравченко А.А. Электронно-лучевая обработка плат фотоэмитирующих структур: автореф. дис... канд. техн. наук: 05.27.01 / Кравченко А.А. – М., 1989. – 19 с.
3. А.С. 1443682 СССР. Способ электронно-лучевой обработки / В.Н. Лисоченко, Г. В. Дудко, Л.Г. Магаев и др. Опубл. 1986. Бюл. № 9.
4. Лохов Ю.Н. Модификация поверхности оптических стекол при электронно-лучевой обработке в вакууме / Ю.Н. Лохов, А.А. Углов, Д.И. Чередниченко // Физика и химия обработки материалов. – 1997. – № 1. – С. 56 – 62.

5. Кравченко А.А. О формировании предельно гладких поверхностей стекол / А.А. Кравченко, Ю.Н. Лохов, Д.И. Чередниченко // Физика и химия стекла. – 1990. – Т.16. – № 6. – С. 923 – 927.
6. Ващенко В.А. Научные основы управления качеством электронно-лучевой обработки изделий из специальных оптических материалов: автореферат дис. докт. техн. наук: 05.03.07 / Ващенко В.А. – Киев, 1996. – 32 с.
7. Ващенко В.А. Высокотемпературные технологические процессы взаимодействия концентрированных источников энергии с материалами: монография / Ващенко В.А.; Черкассы: ВИНТИ, 1994, №35-Х94. – 493 с.
8. Котельников Д.И. Изменение свойств оптического стекла после электронно-лучевой обработки / Д.И. Котельников, Г.В. Канашевич, Г.Н. Дубровская // Тез. докл. II Всесоюзной конференции "Модификация свойств конструкционных материалов пучками заряженных частиц". Уральское отделение академии наук СССР, Институт электрофизики, г. Свердловск, 1991, С. 86 – 88.
9. Борисов Н.А. Полировка кремниевых пластин электронным лучом / Н.А. Борисов, Г.В. Дудко // Электронная обработка материалов, №5(29), 1969. – С. 18 – 21.
10. Электронно-лучевая обработка фотокатодных стекол / Г.В. Дудко, А.А. Кравченко, Д.И. Чередниченко [и др.] // Электронная техника. – Сер. 4. «Электроракуумные и газоразрядные приборы». – Вып.1. – С. 294. – М.: Электроника. – 1989. – С. 60 – 63.
11. Kanashevich G.V. Cooling of plates from optical glass after electronic micro-treatment / Kanashevich G.V. // Электронная обработка материалов (Кишинев). – 2005. – №4 (234). – С. 79 – 83.
12. Kanashevich G.V. Micro-treatment of surfaces of plates made of optical glass with a low-power electronic stream of a band form / Kanashevich G.V. // The 7th World Congress on Recovery, Recycling and Reintegration & China International 3R Exhibition, Beijing, China, 25-29 Sept. 2005. – P. 7.
13. 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.

*Надійшла до редакції
26 квітня 2013 року*

© Канашевич Г. В., 2013

УДК 620.192.63

АКУСТИЧНО-МЕХАНІЧНИЙ МЕТОД КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ ВИРОБІВ ПОРОШКОВОЇ МЕТАЛУРГІЇ ТА ПРУЖНИХ ЕЛЕМЕНТІВ

Бабченко О.В., Румбешта В.О., Мишук Н.М.

*Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут",
м. Київ, Україна*

Запропоновано ефективний акустично-механічний метод контролю виробів із композитних матеріалів, кераміки, пружних елементів.

Оцінка використання даного методу передбачає необхідність виконання наступних етапів досліджень: аналізу особливостей досліджуваного об'єкта, опису закономірностей формування акустичного поля за допомогою фізичного навантаження на об'єкт контролю,