

УДК 621.371

DOI: 10.33839/2708-731X-24-1-355-362

Ю.Д. Філатов¹, В.І. Сідорко¹, А.Ю. Бояринцев², доктори технічних наук;
С.В. Ковальов¹, В.Г. Кулич¹, В.А. Ковальов³, О.Я. Юрчишин³, кандидати технічних наук

¹Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України,
вул. Автозаводська 2, 04074 м. Київ, e-mail: filatov@ism.kiev.ua

²Інститут сцинтиляційних матеріалів НАН України, пр. Науки 60, 61072 м. Харків,
e-mail: boyarintsev@isma.kharkov.ua

³Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», пр. Перемоги 37, 03056 м. Київ, e-mail: urchyshynoks@ukr.net

ПОЛІРУВАННЯ ОПТИЧНИХ ПОВЕРХОНЬ ДЕТАЛЕЙ З ПОЛІСТИРОЛУ

Метою даного дослідження є вивчення закономірностей впливу фізичних властивостей оброблюваного матеріалу та дисперсної системи на показники полірування оптичних деталей з полістиролу. В результаті дослідження механізму полірування оптичних деталей з полістиролу за допомогою дисперсної системи з мікро- та наночастинок полірувального порошку встановлено, що утворення наночастинок шлама оброблюваного матеріалу і наночастинок зносу полірувального порошку є наслідком FRET між енергетичними рівнями частинок полірувального порошку і оброблюваного матеріалу в чотирьохмодовому режимі, яке відбувається у відкритому резонаторі, утвореному двома паралельними поверхнями оброблюваного матеріалу і притира. Показано, що швидкість зняття оброблюваного матеріалу та інтенсивність зношування полірувального порошку під час полірування полістиролу визначаються сумарними за всіма модами коефіцієнтами об'ємного зносу, сумарними значеннями часу життя збудженого стану кластерів оброблюваної поверхні і частинок полірувального порошку і результуючою добротністю резонатора на всіх можливих частотах дискретного спектру. Встановлено, що результати теоретичного розрахунку швидкості зняття оброблюваного матеріалу під час полірування оптичних деталей з полістиролу добре узгоджується з даними експериментального визначення продуктивності полірування за відхилення до 3 %. Показано, що шорсткість полірованої поверхні залежить від добротності резонатора на всіх дозволених частотах і характеризується параметрами R_a , R_q і R_{max} , які є суперпозицією цих параметрів, характерних для кожної з можливих мод. Встановлено, що швидкість зняття оброблюваного матеріалу і шорсткість полірованих поверхонь задовольняють вимогам, що висуваються до процесу полірування оптичних поверхонь. Результати дослідження доцільно використовувати при розробці процесів полірування полімерних оптичних матеріалів.

Ключові слова: полірування, дисперсна система, наночастинки, швидкість зняття матеріалу, шорсткість.

Вступ

На теперішній час полірування оптичних поверхонь деталей з полістиролу, які використовуються для виготовлення пластмасових сцинтиляторів, здійснюється за допомогою полірувальних дисперсійних систем з неабразивних мікро- та нанопорошків [1–3]. Швидкість зняття оброблюваного матеріалу, інтенсивність зносу полірувального порошку та шорсткість оптичних поверхонь залежать від реологічних властивостей дисперсної системи, структури оброблюваного матеріалу, а також діелектричних та спектроскопічних характеристик оброблюваного матеріалу та дисперсної системи [4–6]. Незадовільна якість полірованих поверхонь оптичних деталей з полістиролу пов'язана з недосконалістю технології їх механічної

обробки та відсутністю полірувальних дисперсійних систем, які б забезпечували високі продуктивність та якість обробки полірованих поверхонь за мінімальної інтенсивності зношення полірувального порошку. Саме тому дослідження впливу фізико-хімічних властивостей оброблюваного матеріалу та дисперсної системи на швидкість зняття оброблюваного матеріалу, інтенсивність зносу полірувального порошку і шорсткість оброблених поверхонь під час полірування оптичних деталей з полістиролу є актуальним. Метою даного дослідження є вивчення закономірностей впливу фізичних властивостей оброблюваного матеріалу та дисперсної системи на показники полірування оптичних деталей з полістиролу.

Методика дослідження

Дослідження закономірностей зняття оброблюваного матеріалу, зносу полірувального порошку та формування нанопрофілю полірованої поверхні здійснювалось при поліруванні плоских поверхонь деталей з полістиролу діаметром 60 мм на верстаті мод. 2ШП-200М за допомогою притира з пінополіуретану діаметром 100 мм за тиску притискання деталі до притира 17,7 кПа, частоти обертання притира 90 об/хв., зміщення штриха 30 мм та довжини штриха 80 мм, середньої температури в зоні контакту оброблюваної деталі та притира 298 К. Для полірування сцинтиляторів з полістиролу (густина 1,06 г/см³, коефіцієнт теплопровідності 0,12 Вт/(м·К)) використовувалась дисперсна система з мікро- та нанопорошків, яка характеризувалась частотами власних коливань молекулярних фрагментів частинок полірувального порошку, визначеними за спектрами ІЧ-поглинання (Фур'є-спектрометр Nicolet 6700): 550, 597, 604, 638, 670, 733, 777, 850, 873, 943, 984, 996, 1084, 1119 (см⁻¹). Для полістиролу характерними є частоти: 537, 694, 753, 905, 1027 (см⁻¹). Розміри частинок полірувального порошку визначались за зображеннями, отриманими за допомогою растрового електронного мікроскопу Zeiss-EVO50 з системою мікроаналізу AZtec, з яких видно, що їх максимальна довжина складає $l_m = 5,1$ мкм, товщина змінюється від 262,0 нм до 555,9 нм, маючи середній розмір частинок полірувального порошку $d_2 = 409$ нм, а значення еліптичності, оцінене за величиною кута кривини твірної лінії $\alpha_k = 2(\pi - 2\arctg(d_2/l_m))$, знаходиться в інтервалі від 333,4° до 341,6°, що свідчить про їх голкоподібну форму. Зняття оброблюваного матеріалу визначалось ваговим методом за допомогою аналітичних терезів АД-200 в мг/30 хв. Параметри шорсткості полірованих поверхонь визначали за допомогою методів комп'ютерного моделювання, рефлектометрії, інтерферометрії та профілометрії та контролювали за допомогою безконтактного інтерференційного 3D профілографа Micron-alpha. Довжина шляху тертя частинки полірувального порошку по оброблюваній поверхні $L_t = 188$ мм, а швидкість відносного переміщення деталі і притира, усереднена за кінематичними параметрами полірування $u = 0,47$ м/с. Час контакту частинки полірувального порошку з оброблюваною поверхнею складав $t_c = d_2/u = 0,88$ мкс.

Механізм утворення частинок шламу і частинок зносу полірувального порошку під час полірування

У відповідності до сучасних уявлень про механізм взаємодії між складовими частинами гібридних наносистем енергія збудженого стану донора переходить до акцептора в результаті диполь-дипольної взаємодії між ними і відбувається без проміжного випромінювання фотонів (Ферстеровське резонансне перенесення енергії, FRET) [7–8]. Зняття оброблюваного матеріалу, зношування робочої поверхні притира та частинок полірувального порошку є наслідком FRET між частинками дисперсної фази полірувальної дисперсної системи, оброблюваною поверхнею та поверхнею притира, який відбувається у відкритому резонаторі, що утворюється двома паралельними поверхнями оброблюваного матеріалу і притира. Завдяки цьому стає можливим

реверсування *FRET*, коли донор і акцептор міняються місцями (ефект карнавала), або коли молекулярні фрагменти частинок дисперсної фази та оброблюваної поверхні є і донорами, і акцепторами одночасно [5–6]. В результаті *FRET* за мінімального спектрального і просторового розділення між ними на характерних частотах ν_1 і ν_2 утворюються частинки шламу оброблюваного матеріалу і частинки зносу полірувального порошку. Під час полірування в системі оброблювана поверхня – дисперсна система – поверхня притира на відміну від *FRET* лазерів, які генерують фотони, відбувається генерація наночастинок шламу, зносу полірувального порошку і зносу притира, які рухаються в резонаторі та характеризуються відповідними частотами як квантові частинки. Час життя τ_1 збудженого стану кластерів оброблюваної поверхні обернено пропорційний ймовірності дипольних переходів з рівнів енергії кластерів частинок полірувального порошку на частоті ν_2 , а час життя τ_2 кластерів поверхні частинок полірувального порошку у збудженому стані обернено пропорційний ймовірності дипольних переходів з рівнів енергії кластерів оброблюваної поверхні на частоті ν_1 [5].

Потужність генерації наночастинок шламу і наночастинок зносу полірувального порошку, яка залежить від спектрального розділення $\delta\nu_{1,2} = |\nu_1 - \nu_2|$ і добротності резонатора $Q_{1,2} = \nu_{1,2}/|\nu_2 - \nu_1|$, визначає швидкість зняття оброблюваного матеріалу та інтенсивність зношування полірувального порошку, для розрахунку яких використовуються формули [5]

$$MRR = \eta_1 L_t \frac{\tau_1}{t_c} Q_1 \quad \text{і} \quad WP = \eta_2 L_t \frac{\tau_2}{t_c} Q_2 \quad (1)$$

де η_1, η_2 – коефіцієнти об'ємного зносу оброблюваної поверхні і полірувального порошку [1, 3].

В результаті дослідження закономірностей впливу фізико-хімічних властивостей оброблюваного матеріалу та дисперсної системи на показники полірування оптичних деталей з полістиролу встановлено, що наночастинки шламу утворюються в результаті *FRET* від частинок полірувального порошку до оброблюваної поверхні, який відбувається в чотирьохмодовому режимі під час квантових переходів між енергетичними рівнями, які

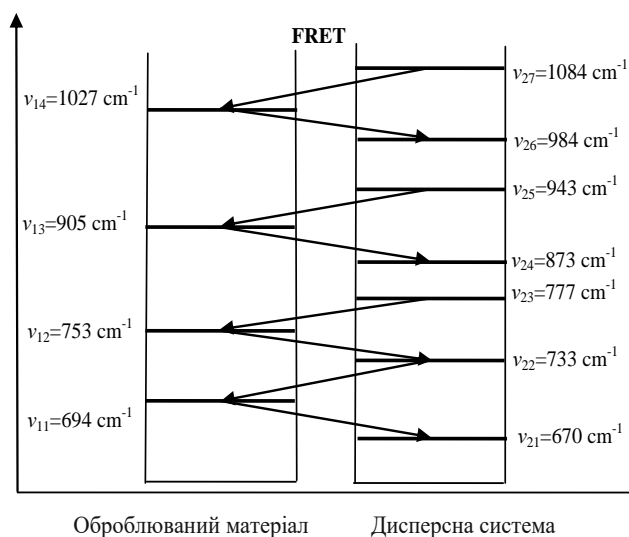


Рис. 1. Схема квантових переходів між енергетичними рівнями частинок полірувального порошку та оброблюваного матеріалу

характеризуються частотами: $\nu_{27} = 1084 \text{ см}^{-1} \rightarrow \nu_{14} = 1027 \text{ см}^{-1}$, $\nu_{25} = 943 \text{ см}^{-1} \rightarrow \nu_{13} = 905 \text{ см}^{-1}$, $\nu_{23} = 777 \text{ см}^{-1} \rightarrow \nu_{12} = 753 \text{ см}^{-1}$ і $\nu_{22} = 733 \text{ см}^{-1} \rightarrow \nu_{11} = 694 \text{ см}^{-1}$, а наночастинки зносу полірувального порошку утворюються в результаті *FRET* від оброблюваної поверхні до частинок полірувального порошку під час переходів між енергетичними рівнями на частотах: $\nu_{14} = 1027 \text{ см}^{-1} \rightarrow \nu_{26} = 984 \text{ см}^{-1}$, $\nu_{13} = 905 \text{ см}^{-1} \rightarrow \nu_{24} = 873 \text{ см}^{-1}$, $\nu_{12} = 753 \text{ см}^{-1} \rightarrow \nu_{22} = 733 \text{ см}^{-1}$ і $\nu_{11} = 694 \text{ см}^{-1} \rightarrow \nu_{21} = 670 \text{ см}^{-1}$ (рис. 1).

Результати розрахунку параметрів взаємодії оброблюваної поверхні з полірувальною дисперсною системою та показники полірування оптичних поверхонь деталей з

полістиролу наведено в таблицях 1, 2.

Таблиця 1. Параметри взаємодії оброблюваної поверхні з дисперсною системою при поліруванні оптичних деталей з полістиролу

Переходи FRET	$v_{27} \rightarrow v_{14}$	$v_{25} \rightarrow v_{13}$	$v_{23} \rightarrow v_{12}$	$v_{22} \rightarrow v_{11}$	Переходи FRET	$v_{14} \rightarrow v_{26}$	$v_{13} \rightarrow v_{24}$	$v_{12} \rightarrow v_{22}$	$v_{11} \rightarrow v_{21}$
Номер моди i	1	2	3	4	Номер моди j	1	2	3	4
$\delta v_1, \text{см}^{-1}$	57	38	24	39	$\delta v_2, \text{см}^{-1}$	43	32	20	24
Q_1	18,0	23,8	31,4	17,8	Q_2	22,9	27,3	36,7	27,9
$a_m, \text{нм}$	4,5	5,6	6,6	4,5	$a_p, \text{нм}$	6,3	7,2	8,7	7,2
$N_1, 10^{14} \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$	1,8	1,2	0,8	1,2	$N_2, 10^{14} \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$	1,4	1,0	0,6	0,8
$\eta_1, 10^{-12} \text{ м}^2/\text{с}$	1,2	1,8	2,6	1,3	$\eta_2, 10^{-12} \text{ м}^2/\text{с}$	2,6	3,4	5,1	3,6
$\tau_1, \text{нс}$	113	141	158	112	$\tau_2, \text{нс}$	70	102	122	103
$MRR, 10^{-13} \text{ м}^3/\text{с}$	42,0				$PWR, 10^{-13} \text{ м}^3/\text{с}$	88,0			

Таблиця 2. Показники полірування оптичних деталей з полістиролу

Швидкість зняття оброблюваного матеріалу				
Експеримент: мг/30 хв.(мкм/год.) $10^{-13} \text{ м}^3/\text{с}$ Похибка розрахунку, %	7,8±0,3 (5,2±0,2) 40,9±1,6 3			
Параметри шорсткості полірованої поверхні, нм				
Ra_i	9,1±0,2	11,2±0,1	12,8±0,5	8,8±0,3
Rq_i	9,6±0,3	12,4±0,3	13,6±0,7	9,6±0,4
$Rmax_i$	15,5±2,4	21,0±1,5	22,7±2,9	16,8±1,6
$Ra = 10,1 \pm 0,2 \text{ нм}; Rq = 10,9 \pm 0,4 \text{ нм}; Rmax = 18,2 \pm 2,1 \text{ нм}$				

Швидкість зняття оброблюваного матеріалу MRR та інтенсивність зношування полірувального порошку PWR під час полірування полістиролу, що відбувається у відкритому резонаторі, для чотирьохмодової системи з дискретним спектром власних частот визначені за формулами (1), в яких сумарні коефіцієнти об'ємного зносу $\eta_1 = \sum_{i=1}^4 \eta_{1i} = 7,0 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2/\text{с}$ і

$\eta_2 = \sum_{j=1}^4 \eta_{2j} = 14,9 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2/\text{с}$, сумарний час життя збудженого стану кластерів оброблюваної

поверхні $\tau_1 = \sum_{i=1}^4 \tau_{1i} = 524 \text{ нс}$ і частинок полірувального порошку $\tau_2 = \sum_{j=1}^4 \tau_{2j} = 397 \text{ нс}$,

результуюча добротність резонатора $Q_1 = \left[\sum_{i=1}^4 Q_{1i}^{-1} \right]^{-1} = 5,4$ і $Q_2 = \left[\sum_{j=1}^4 Q_{2j}^{-1} \right]^{-1} = 7,0$, складали

відповідно $MRR = 42 \cdot 10^{-13} \text{ м}^3/\text{с}$ і $PWR = 88 \cdot 10^{-13} \text{ м}^3/\text{с}$.

Розрахована величина швидкості зняття оброблюваного матеріалу під час полірування полістиролу ($42,0 \cdot 10^{-13} \text{ м}^3/\text{с}$) добре узгоджується з даними експериментального визначення продуктивності полірування: ($7,8 \pm 0,3$) мг/30 хв, або ($5,2 \pm 0,2$) мкм/год, або ($40,9 \pm 1,6$) $\cdot 10^{-13} \text{ м}^3/\text{с}$) за відхилення до 3 %, що свідчить про правомірність розгляду процесу утворення і видалення наночастинок шламу з оброблюваної поверхні як наслідку FRET в чотирьохмодовому режимі. Слід зауважити, що розрахована величина інтенсивності зношування полірувального порошку, яка вдвічі перевищує швидкість зняття оброблюваного матеріалу ($PWR / MRR \approx 2$) і не може бути кількісно порівняна з експериментальними даними з-за принципової відсутності останніх, є якісною характеристикою утворення і локалізації нальоту з наночастинок зносу полірувального порошку на поверхні притира.

Параметри шорсткості полірованої поверхні (середнє арифметичне Ra і середнє квадратичне Rq відхилення профілю, найбільша висота профілю $Rmax$), які визначаються за допомогою методу комп'ютерного моделювання [3] і залежать від розміру a_m і концентрації N_1 наночастинок шламу (табл. 1), а також функції їх розподілу Пуассона за площами поверхні, пропорційно збільшуються у разі підвищення спектрального розділення між оброблюваним матеріалом і частинкою полірувального порошку і добротності резонатора, що утворюється поверхнями оброблюваного матеріалу і притира [9]. У зв'язку з цим можна вважати, що в результаті FRET від частинок полірувального порошку до оброблюваної поверхні, який відбувається при переходах між енергетичними рівнями, які характерні для кожної з мод, утворюються наночастинки шламу з різними розмірами, внаслідок видалення з оброблюваної поверхні яких її шорсткість характеризується параметрами Ra_i , Rq_i і $Rmax_i$. Результуюча шорсткість полірованої поверхні визначається параметрами $Ra = \frac{1}{\sum_i N_{1i}} \sum_i N_{1i} Ra_i = 10,1 \text{ нм}$,

$Rq = \frac{1}{\sum_i N_{1i}} \sum_i N_{1i} Rq_i = 10,9 \text{ нм}$ і $Rmax = \frac{1}{\sum_i N_{1i}} \sum_i N_{1i} Rmax_i = 18,2 \text{ нм}$, а похибки їх визначення

$\delta R = \frac{1}{\sum_i N_{1i}} \sum_i N_{1i} \delta R_i$ складають 0,2 нм, 0,4 нм і 2,1 нм відповідно. Таким чином, поліровані

поверхні оптичних деталей з полістиролу, шорсткість яких характеризується параметрами $Ra = 10,1 \pm 0,2 \text{ нм}$, $Rq = 10,9 \pm 0,4 \text{ нм}$ і $Rmax = 18,2 \pm 2,1 \text{ нм}$, задовольняють вимогам, що висуваються до оптичних поверхонь.

Висновки

В результаті дослідження механізму полірування оптичних деталей з полістиролу за допомогою дисперсної системи з мікро- та наночастинок полірувального порошку встановлено, що утворення наночастинок шламу оброблюваного матеріалу і наночастинок зносу полірувального порошку є наслідком FRET між енергетичними рівнями частинок полірувального порошку і оброблюваного матеріалу в чотирьохмодовому режимі, що відбувається у відкритому резонаторі, утвореному двома паралельними поверхнями оброблюваного матеріалу і притира. Показано, що швидкість зняття оброблюваного матеріалу та інтенсивність зношування

полірувального порошку під час полірування полістиролу визначаються сумарними за всіма модами коефіцієнтами об'ємного зносу, сумарними значеннями часу життя збудженого стану кластерів оброблюваної поверхні і частинок полірувального порошку і результуючою добротністю резонатора на всіх можливих частотах дискретного спектру. Встановлено, що результати теоретичного розрахунку швидкості зняття оброблюваного матеріалу під час полірування оптичних деталей з полістиролу добре узгоджується з даними експериментального визначення продуктивності полірування за відхилення до 3 %. Показано, що шорсткість полірованої поверхні залежить від добротності резонатора на всіх дозволених частотах і характеризується параметрами R_a , R_q і R_{max} , які є суперпозицією цих параметрів, характерних для кожної з можливих мод. Встановлено, що під час полірування оптичних деталей з полістиролу за допомогою дисперсної системи з мікро- і наночастинок досягаються швидкості зняття оброблюваного матеріалу і шорсткість полірованих поверхонь, які задовольняють вимогам, що висуваються до процесу полірування оптичних поверхонь.

Y. Filatov, V. Sidorko¹, A. Boyarintsev², S. Kovalev, V. Kulich¹, V. Kovalev, O. Yurchyshyn³

¹*N.V. Bakul Institute for Superhard Materials of the National Academy of Sciences of Ukraine,*

²*Institute for Scintillation Materials of the National Academy of Sciences of Ukraine,*

³*National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Ukraine*

POLISHING OF OPTICAL SURFACES OF DETAILS MADE OF POLYSTYRENE

The purpose of this study is to study the influence of the physical properties of the processed material and the dispersion system on the polishing performance of optical parts made of polystyrene. As a result of the study of the polishing mechanism of optical parts made of polystyrene using a dispersed system of micro- and nano-particles of polishing powder, it was established that the formation of sludge nanoparticles of the processed material and wear nanoparticles of the polishing powder is a consequence of FRET between the energy levels of the particles of the polishing powder and the processed material in the four-mode mode, which takes place in an open resonator formed by two parallel surfaces of the processed material and the lapping. It is shown that the removal speed of the processed material and the intensity of polishing powder wear during polishing of polystyrene are determined by the total volumetric wear coefficients for all modes, the total lifetime values of the excited state of clusters of the treated surface and polishing powder particles, and the resulting Q factor of the resonator at all possible frequencies of the discrete spectrum. It was established that the results of the theoretical calculation of the speed of removal of the processed material during the polishing of optical parts made of polystyrene are in good agreement with the data of the experimental determination of the polishing performance with a deviation of up to 3%. It is shown that the roughness of the polished surface depends on the Q factor of the resonator at all allowed frequencies and is characterized by the parameters R_a , R_q and R_{max} , which are the superposition of these parameters characteristic of each of the possible modes. It was established that the speed of removal of the processed material and the roughness of the polished surfaces satisfy the requirements for the process of polishing optical surfaces. The research results should be used in the development of processes for polishing polymer optical materials.

Key words: *polishing, dispersed system, nanoparticles, material removal rate, roughness.*

Література

1. Filatov Yu.D. Polishing of Precision Surfaces of Optoelectronic Device Elements Made of Glass, Sital, and Optical and Semiconductor Crystals: A Review. *J. Superhard Mater.* 2020. Vol. 42, N 1. P. 30–48.
2. Філатов Ю.Д., Сідорко В.І., Філатов О.Ю., Ковальов С.В. Фізичні засади формоутворення прецизійних поверхонь під час механічної обробки неметалевих матеріалів. К.: Наук. думка, 2017. 248 с.

3. Filatov Yu.D. Modeling and experimental study of surfaces optoelectronic elements from crystal materials in polishing / eds. J. Zhang et al. *Simulation and Experiments of Material-Oriented Ultra-Precision Machining*. Springer Tracts in Mechanical Engineering. Springer Nature Singapore Pte Ltd., 2019. P. 129–165.
4. Filatov Yu.D., Sidorko V.I., Kovalev S.V., Kovalev V.A. Effect of the Rheological Properties of a Dispersed System on the Polishing Indicators of Optical Glass and Glass Ceramics. *J. Superhard Mater.* 2021. Vol. 43, N 1. P. 65–73.
5. Filatov Y.D., Sidorko V.I., Boyarintsev A.Y. et al. Performance Efficiency of the Polishing of Polymer Optical Materials. *J. Superhard Mater.* 2022. Vol. 44, N 5. P. 358–367.
6. Filatov Y.D. New Patterns of Polishing Surfaces of Parts Made of Nonmetallic Materials. *J. Superhard Mater.* 2023. 4Vol. 5, N 2. P. 140–149.
7. Dovzhenko D., Lednev M., Mochalov K. et al. Polariton-assisted manipulation of energy relaxation pathways: donor–acceptor role reversal in a tuneable microcavity. *Chem. Sci.* 2021. Vol. 12. P. 12794–12805.
8. Nabiev I. Strong light-matter coupling for optical switching through the fluorescence and FRET control. *PhysBioSymp 2019. J. Physics: Conference Series*. 2021. Vol. 2058, N 012001. P. 1–7.
9. Filatov Y.D., Sidorko V.I., Sokhan' S.V. et al. Roughness of Polished Surfaces of Optoelectronic Components Made of Polymeric Optical Materials. *J. Superhard Mater.* 2023. Vol. 45, N 1. P. 54–64.

Надійшла 02.06.23

References

1. Filatov, Yu. D. (2020). Polishing of Precision Surfaces of Optoelectronic Device Elements Made of Glass, Sital, and Optical and Semiconductor Crystals: A Review. *J. Superhard Mater.*, 42(1), 30–48.
2. Filatov, Yu. D., Sidorko, V. I., Filatov, O. Yu., et al., *Fizychni zasady formoutvorennia pretsyziinykh poverkhon pid chas mekhanichnoi obrobky nemetalevykh materialiv [Physical principles of forming precision surfaces during machining of non-metallic materials]*. Naukova dumka [in Ukrainian].
3. Filatov, Yu. D. (2019). Modeling and experimental study of surfaces optoelectronic elements from crystal materials in polishing. J. Zhang et al. (Eds.). *Simulation and Experiments of Material-Oriented Ultra-Precision Machining*. Springer Tracts in Mechanical Engineering.
4. Filatov, Yu. D., Sidorko, V. I., Kovalev, S. V., et al. (2021). Effect of the Rheological Properties of a Dispersed System on the Polishing Indicators of Optical Glass and Glass Ceramics. *J. Superhard Mater.*, 43(1), 65–73.
5. Filatov, Y. D., Sidorko, V. I., Boyarintsev, A. Y. et al. (2022). Performance Efficiency of the Polishing of Polymer Optical Materials. *J. Superhard Mater.*, 44(5), 358–367.
6. Filatov, Y. D. (2023). New Patterns of Polishing Surfaces of Parts Made of Nonmetallic Materials. *J. Superhard Mater.*, 45(2), 140–149.
7. Dovzhenko, D., Lednev, M., Mochalov, K. et al. (2021). Polariton-assisted manipulation of energy relaxation pathways: donor–acceptor role reversal in a tuneable microcavity. *Chem. Sci.*, 12, 12794–12805.
8. Nabiev, I. (2021). Strong light-matter coupling for optical switching through the fluorescence and FRET control. *PhysBioSymp 2019. J. Physics: Conference Series.*, 2058,

(012001), 1–7.

9. Filatov, Y. D., Sidorko, V. I., Sokhan S. V. et al. (2023). Roughness of Polished Surfaces of Optoelectronic Components Made of Polymeric Optical Materials. *J. Superhard Mater.*, 45(1), 54–64.

УДК 539.216:621.762

DOI: 10.33839/2708-731X-24-1-362-369

В.В. Івженко, канд. техн. наук; **Т.О. Косенчук**; **І.П. Фесенко**, д-р техн. наук

*Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України, вул. Автозаводська, 2,
04074, м. Київ, E-mail: ivv@ism.kiev.ua*

ВПЛИВ ДОМІШКИ НІТРИДУ БОРУ НА ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ТА ЗНОСОСТІЙКІСТЬ СІАЛОНУ

Досліджена кінетика спікання під тиском 10 МПа β -сіалонів зі складом $Z=2,0$; $3,0$ з домішкою 3% нітриду бору. Встановлено, що домішка BN зменшує швидкість ущільнення матеріалів на початковій стадії спікання (в інтервалі 0-15 хв) на 20-25%. При ізотермічній витримці 60 хв відносно ущільнення зменшується з 0,98-0,99 до 0,95-0,96. Досліджені пористість, тріщиностійкість, твердість і зносостійкість β -сіалонів зі складом $Z=2,0$; $3,0$ з домішкою 1, 2, 3% нітриду бору, отриманих спіканням при 1750°C під тиском 10 МПа на протязі 30-60 хв. Встановлено, що найменшу зносостійкість при закритій пористості матеріалу мають сіалони складом $Z=2,0$ з домішкою 1% BN, отримані спіканням під тиском на протязі 60 хв, і складом $Z=3,0$ з домішкою 1% BN, отримані спіканням під тиском на протязі 30 хв. Розроблено процес отримання виробів з сіалону методом гарячого пресування при тиску 10 МПа, які працюють в парі тертя з деталями з жароміцної сталі при температурах до 1200°C.

Ключові слова: нітрид кремнію, нітрид алюмінію, сіалон, нітрид бору, спікання під тиском, ущільнення, структура, тріщиностійкість, твердість, зносостійкість.

Нітрид кремнію має значний потенціал для виготовлення високотемпературних, зносостійких та корозійностійких матеріалів внаслідок високої твердості, міцності, високого опору повзучості та значної стійкості до окислення [1].

Технологія спікання під тиском (гарячого пресування) широко використовується в порошковій металургії тугоплавких сполук для отримання матеріалів з мінімальною пористістю. Змінюючи параметри процесу, а саме температуру, тиск, тривалість витримки, можна отримувати матеріали з різною структурою.

Мета роботи полягає у вивченні закономірностей формування структури та властивостей матеріалів з порошкової системи $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-AlN-Al}_2\text{O}_3\text{-BN}$ і у розробці процесу отримання виробів з сіалону методом гарячого пресування при тиску 10 МПа, які працюють в парі тертя з металами при температурах до 1200 °C. Робота є продовженням раніше проведених досліджень зносостійкості матеріалів на основі нітриду кремнію і карбіду кремнію [2–4].

Для дослідження використовували порошок нітриду кремнію з вмістом α -фази 79%, середнім розміром часток 12,5 мкм; порошок AlN, середнім розміром часток 5,0 мкм, синтезований прямим азотуванням алюмінієвого порошку в атмосфері азоту; та порошок оксиду алюмінію розміром часток 0,3 мкм. В якості домішки використовували гексагональний нітрид бору. Хімічний склад і дисперсність вихідних порошків Si_3N_4 ; AlN надані в табл.1.