

**Ю.Д. Філатов, В.І. Сидорко**, доктори технічних наук,  
**С.В. Ковальов, А.М. Панова<sup>1</sup>, В.А. Ковальов<sup>2</sup>,**  
**Н.О. Балицька<sup>3</sup>**, кандидати технічних наук; **В.В. Гаращенко<sup>1</sup>**, канд. фіз.-мат. наук

<sup>1</sup>Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України,  
вул. Автозаводська 2, 04074 м. Київ, e-mail: [filatov@ism.kiev.ua](mailto:filatov@ism.kiev.ua)

<sup>2</sup>Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім.  
Ігоря Сікорського», пр. Перемоги 37, 03056 м. Київ, e-mail: [urchyshynoks@ukr.net](mailto:urchyshynoks@ukr.net)

<sup>3</sup>Державний університет «Житомирська політехніка», вул. Чуднівська 103, 10005  
м. Житомир, e-mail: [balytskanataliia@gmail.com](mailto:balytskanataliia@gmail.com)

## **ВПЛИВ ДИСПЕРСНОЇ СИСТЕМИ НА ПОКАЗНИКИ ПОЛІРУВАННЯ СКЛА, СИТАЛІВ ТА ОПТИЧНИХ І НАПІВПРОВІДНИКОВИХ КРИСТАЛІВ**

*Метою даного дослідження є вивчення закономірностей впливу властивостей дисперсної системи на показники полірування оптичного скла, ситалів та оптичних і напівпровідникових кристалів. На основі кластерної моделі зняття оброблюваного матеріалу під час полірування показано, що продуктивність полірування та висотні параметри шорсткості обробленої поверхні залежать від концентрації частинок шламу, що утворюються під час полірування, яка залежить від середнього значення потенціалу взаємодії зерен полірувального порошку з оброблюваною поверхнею. Врахування функції розподілу частинок шламу за площами їх поверхні та площі зони контакту зерна полірувального порошку з оброблюваною поверхнею дає можливість визначити потенціал взаємодії зерен полірувального порошку з оброблюваною поверхнею в залежності від константи Ліфшиця, яка залежить від електричних та оптичних характеристик оброблюваного матеріалу та дисперсної полірувальної системи, а також товщини проміжку між елементарними ділянками контактних поверхонь оброблюваної деталі та притиру, яка залежить від реологічних властивостей полірувальної суспензії та режимів полірування. В результаті досліджень встановлено, що властивості полірувальної дисперсної системи суттєво впливають на інтенсивність видалення оброблюваного матеріалу під час полірування оптичного скла, ситалів та оптичних і напівпровідникових кристалів, а також на шорсткість обробленої поверхні. Результати дослідження доцільно використовувати при розробці процесів нанополірування неметалевих матеріалів, а також при подальших дослідженнях закономірностей хіміко-механічного полірування надгладеньких поверхонь. Практичне значення та цінність отриманих результатів полягає в загальному підході до міжмолекулярної взаємодії конденсованих середовищ.*

**Ключові слова:** полірування, дисперсна система, шорсткість.

### **Вступ**

Відповідно до кластерної моделі зняття оброблюваного матеріалу під час полірування продуктивність полірування та шорсткість оброблених поверхонь визначаються концентрацією частинок шламу, що видаляються із оброблюваної поверхні під час полірування, яка залежить від середнього значення потенціалу взаємодії зерен полірувального порошку з оброблюваною поверхнею [1–3]. При врахуванні функції розподілу частинок шламу за площами їх поверхні та площі зони контакту зерна полірувального порошку з оброблюваною поверхнею можна визначити потенціал взаємодії зерен полірувального порошку з оброблюваною поверхнею в залежності від константи Ліфшиця, яка залежить від електричних (статичних діелектричних сталих) та оптичних (частот власних коливань, активних в ІЧ-спектрах) характеристик оброблюваного матеріалу

та дисперсної полірувальної системи, а також товщини проміжку між елементарними ділянками контактних поверхонь оброблюваної деталі та притиру, яка залежить від реологічних властивостей полірувальної суспензії (коефіцієнтів поверхневого натягу та динамічної в'язкості дисперсної системи, кутів змочування нею поверхонь оброблюваної деталі та притиру) та режимів полірування (номінального тиску притискання оброблюваної деталі до притиру та відносної швидкості їх переміщення).

Разом з тим, процеси взаємодії зерен полірувального порошку з оброблюваною поверхнею під час полірування деталей електронної техніки та оптичних систем із оптичного скла, кераміки, ситалів, оптичних та напівпровідникових кристалів за допомогою полірувальних дисперсних систем вивчені недостатньо, а причини впливу електричних, оптичних та реологічних властивостей дисперсної системи на показники процесу полірування остаточно не з'ясовані.

Метою даного дослідження є вивчення закономірностей впливу електричних, оптичних та реологічних властивостей дисперсної системи на показники полірування плоских поверхонь деталей та елементів із оптичного скла, кераміки, ситалів, оптичних та напівпровідникових кристалів.

### **Методика дослідження**

Фізико-хімічні властивості полірувальної дисперсної системи вивчались за допомогою традиційних методик, зокрема, густина вимірювалась за допомогою «Density Meter DMA 35N», кінематична в'язкість за різних концентрацій дисперсної фази визначалась за допомогою віскозиметра мод. ВЗ-246, коефіцієнт поверхневого натягу визначався за допомогою крапельного методу та за висотою підняття рідини у капілярі, а кути змочування дисперсною системою поверхонь оброблюваної деталі та притиру – за допомогою мікроскопу «Мир-12» [4, 5]. В якості дисперсної фази полірувальної дисперсної системи використовувався неабразивний полірувальний порошок (густина  $3,86 \text{ г/см}^3$ , статична діелектрична проникність 6,05), розмір та структура мікро- та наночастинок якого досліджувались за допомогою растрового електронного мікроскопу Zeiss-EVO50 з системою мікроаналізу AZtec. Частоти власних коливань молекулярних фрагментів в частинках дисперсної фази полірувальної суспензії та на поверхні оброблюваних матеріалів визначались за інфрачервоними спектрами поглинання, отриманими за допомогою Фур'є-спектрометру Nicolet 6700.

Дослідження закономірностей впливу властивостей дисперсного середовища на показники полірування здійснювалось при поліруванні плоских поверхонь деталей з оптичного скла марки К8, ситалу марки СТ-50-1, астроситалу марки СО-115М, оптичних (сапфір) та напівпровідникових (карбід кремнію) кристалів на верстаті мод. 2ШП-200М за допомогою притиру з пінополіуретану діаметром 100 мм при зусиллі притискання деталі до притиру – 50 Н, частоті обертання притиру – 90 об/хв., довжині штриху – 80 мм, середній температурі в зоні контакту інструмента та оброблюваної деталі – 298 К. Коефіцієнт поверхневого натягу дисперсної системи складав 56 мН/м, коефіцієнт динамічної в'язкості незначно змінювався в діапазоні  $(0,96-0,99) \cdot 10^{-3} \text{ Па}\cdot\text{с}$ , кути змочування оброблюваної поверхні змінювались від  $21,5^\circ$  до  $71^\circ$ , кут змочування поверхні притиру з пінополіуретану складав  $38,8^\circ$ .

Підготовка плоских поверхонь зразків з оптичного скла марки К8, радіотехнічного ситалу марки СТ-50-1, астроситалу марки СО-115М, сапфіру ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) та карбиду кремнію (SiC) під полірування здійснювалась за допомогою традиційних методів обробки важкооброблюваних матеріалів [1, 6] при обов'язковому застосуванні в якості завершальної операції надтонкого шліфування інструментом з алмазно-полімерного волокна [7].

### Закономірності впливу дисперсної системи на показники полірування оптичних деталей зі скла, ситалів та оптичних і напівпровідникових кристалів

В результаті аналізу впливу властивостей дисперсної системи на показники процесу полірування оптичного скла, ситалів та оптичних і напівпровідникових кристалів показано, що на товщину проміжку між поверхнями оброблюваної деталі та притиру суттєво впливають коефіцієнти поверхневого натягу та динамічної в'язкості полірувальної дисперсної системи, а також кути змочування нею контактуючих поверхонь інструмента та деталі. Ефективність взаємодії частинок дисперсної фази полірувальної системи з оброблюваною поверхнею та інтенсивність видалення із неї частинок шламу залежить від коефіцієнту об'ємного зносу, який змінюється з концентрацією частинок шламу, що утворюються під час полірування, а також суттєво залежить від потенціалу міжмолекулярної взаємодії зерен полірувального порошку з оброблюваною поверхнею, що визначається статичними діелектричними сталими та частотами власних коливань молекулярних фрагментів в оброблюваному матеріалі, частинках полірувального порошку та дисперсному середовищі полірувальної суспензії (константа Ліфшиця). Критичними для вибору полірувальної дисперсної системи для полірування конкретного матеріалу є залежності константи Ліфшиця від функції діелектричних проникностей та частотної функції [1], які визначають характер та ефективність взаємодії між частинками полірувального порошку та оброблюваною поверхнею. Запропонована дисперсна система дозволяє збалансувати зміни продуктивності зняття оброблюваного матеріалу та параметрів шорсткості оброблених поверхонь, які зазвичай знаходяться у протиріччі, тобто досягти мінімальної шорсткості, характерної для оптичних поверхонь, при прийнятній продуктивності полірування. Для цієї дисперсної системи досліджено вплив товщини проміжку між елементарними ділянками контактних поверхонь оброблюваної деталі та притиру на середнє значення потенціалу взаємодії частинки дисперсної фази з оброблюваною поверхнею.

Параметри взаємодії оброблюваної поверхні з дисперсною системою під час полірування оптичного скла марки К8, ситалу марки СТ-50-1, астроситалу марки СО-115М, кристалів сапфіру та карбїду кремнію, визначені за допомогою розрахункових та експериментальних методів, наведено в табл. 1.

Таблиця 1. Параметри взаємодії оброблюваної поверхні з дисперсною системою при поліруванні скла, ситалів, оптичних та напівпровідникових кристалів

Параметри взаємодії оброблюваної поверхні з полірувальною дисперсною системою	Оброблюваний матеріал				
	К8	СТ-50-1	СО-115М	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiC
Товщина проміжку між оброблюваною поверхнею та притиром, мкм	5,3	3,2	4,0	1,8	1,3
Константа Ліфшиця, зДж	0,42	0,50	0,37	0,85	1,10
Потенціал взаємодії частинки дисперсної фази з оброблюваною поверхнею, зДж	0,052	0,064	0,046	0,106	0,145
Концентрація частинок шламу, 10 <sup>14</sup> м <sup>-2</sup> ·с <sup>-1</sup>	0,75	0,94	1,32	1,6	6,8

Аналіз даних, наведених в табл. 1, показав, що при поліруванні скла, ситалів, оптичних та напівпровідникових кристалів за використання полірувальної суспензії з концентрацією дисперсної фази 6,7–8,5 мас. % товщина прошарку суспензії між поверхнями оброблюваної деталі і притиру змінюється в діапазоні 1,3–5,3 мкм і суттєво впливає на величину потенціалу взаємодії частинок дисперсної фази з оброблюваною поверхнею всередині дисперсійного середовища. При цьому константа Ліфшиця  $A_L$  змінюється в межах 0,37–1,10 зДж, а середнє значення потенціалу взаємодії частинки дисперсної фази з оброблюваною поверхнею  $W$  змінюється від 0,046 до 0,145 зДж. Встановлено, що при збільшенні товщини проміжку між поверхнями оброблюваної деталі та притиру концентрація частинок шламу, що утворюються під час полірування, гіперболічно зменшується.

Показники процесу полірування оптичних деталей та елементів з оптичного скла марки К8, ситалу марки СТ-50-1, астроситалу СО-115М та оптичних ( $Al_2O_3$ ) і напівпровідникових (SiC) кристалів характеризуються даними, наведеними в табл. 2.

Таблиця 2. Показники процесу полірування оптичних деталей зі скла, ситалів та оптичних і напівпровідникових кристалів

Оброблюваний матеріал	К8	СТ-50-1	СО-115М	$Al_2O_3$	SiC
Продуктивність полірування, $10^{-13}$ м <sup>3</sup> /с мкм/год.	6,4	4,6	13,5	4,6	2,3
	0,8	0,6	2,4	1,0	0,8
Шорсткість поверхні $Ra$ , нм	6,3	5,9	6,8	5,7	4,9

Аналіз показників процесу полірування оптичних деталей та елементів з оптичного скла, ситалів та оптичних і напівпровідникових кристалів показав, що продуктивність полірування скла і ситалів  $(4,6–13,5) \cdot 10^{-13}$  м<sup>3</sup>/с в 2–6 разів перевищує продуктивність полірування кристалів  $(2,3–4,6) \cdot 10^{-13}$  м<sup>3</sup>/с, а шорсткість їх полірованих поверхонь (за параметром  $Ra$ ) зменшується від 5,9–6,8 нм до 4,9–5,7 нм.

### Висновки

Таким чином, в результаті аналізу впливу електричних, оптичних та реологічних властивостей дисперсної системи на показники процесу полірування деталей та елементів з оптичного скла, ситалів та оптичних і напівпровідникових кристалів встановлено, що використання запропонованої дисперсної системи забезпечує досягнення високої продуктивності зняття оброблюваного матеріалу та низької шорсткості оброблених поверхонь, що задовольняє вимогам, які висуваються до деталей оптичних систем та оптоелектронних елементів у відповідності до міжнародних стандартів.

**Y.D. Filatov, V.I. Sidorko, S.V. Kovalev, A.N. Panova<sup>1</sup>,  
V.A. Kovalev<sup>2</sup>, N.O. Balytska<sup>3</sup>, V.V. Garaschenko<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*N :V :Bakul Institut for Superhard Materials of the National Academy of Sciences of Ukraine*

<sup>2</sup>*National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Ukraine*

<sup>3</sup>*Zhytomyr Polytechnic State University, Ukraine*

## **THE INFLUENCE OF THE DISPERSED SYSTEM ON POLISHING INDICATORS OF GLASS, SITALS AND OPTICAL AND SEMICONDUCTOR CRYSTALS**

*The aim of this study is to study the laws of the influence of the properties of a disperse system on the polishing indices of optical glass, sital, optical and semiconductor crystals. Based on the cluster model of removal of the processed material during polishing, it is shown that the polishing performance and the height roughness parameters of the treated surface depend on the concentration of sludge particles formed during polishing, which depends on the average value of the interaction potential of the grains of the polishing powder with the treated surface. Taking into account the distribution function of sludge particles over their surface areas and the contact area of the polishing powder grain with the treated surface makes it possible to determine the interaction potential of the polishing powder grains with the treated surface depending on the Lifshitz constant, which depends on the electrical and optical characteristics of the processed material and the dispersed polishing system, and also the thickness of the gap between the elementary sections of the contact surfaces of the workpiece and lapping, which depends on the rheological properties of the polishing slurry and processing conditions. As a result of studies, it was found that the properties of the dispersed polishing system significantly affect the removal rate of the processed material when polishing optical glass, sital, optical and semiconductor crystals, as well as the surface roughness. It is advisable to use the results of the study when developing the processes of nanopolishing non-metallic materials, as well as in subsequent studies of the laws of chemical-mechanical polishing of ultra-smooth surfaces. The practical significance and value of the results obtained lies in the general approach to the intermolecular interaction of condensed matters.*

**Key words:** *polishing, disperse system, roughness.*

**Ю.Д. Филатов, В.И. Сидорко, С.В. Ковалев, А.Н. Панова<sup>1</sup>,  
В.А. Ковалев<sup>2</sup>, Н.А. Балицкая<sup>3</sup>, В.В. Гаращенко<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Інститут сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины*

<sup>2</sup>*Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут  
ім. Ігоря Сікорського»*

<sup>3</sup>*Державний університет «Житомирська політехніка»*

## **ВЛИЯНИЕ ДИСПЕРСНОЙ СИСТЕМЫ НА ПОКАЗАТЕЛИ ПОЛИРОВКИ СТЕКЛА, СИТАЛЛОВ И ОПТИЧЕСКИХ И ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ КРИСТАЛЛОВ**

*Целью данного исследования является изучение закономерностей влияния свойств дисперсной системы на показатели полирования оптического стекла, ситаллов, оптических и полупроводниковых кристаллов. На основе кластерной модели съема обрабатываемого материала при полировании показано, что производительность полирования и высотные параметры шероховатости обработанной поверхности зависят от концентрации частиц шлама, образующихся при полировании, которая зависит от среднего значения потенциала взаимодействия зерен полировального порошка с обрабатываемой поверхностью. Учет функции распределения частиц шлама по площадям их поверхности и площади контакта зерна полировального порошка с обрабатываемой поверхностью дает возможность определить потенциал взаимодействия зерен полировального порошка с обрабатываемой поверхностью в зависимости от константы Лифшица, которая зависит от электрических и оптических характеристик обрабатываемого материала и дисперсной полировальной системы, а также толщины промежутка между элементарными*

участками контактных поверхностей обрабатываемой детали и притира, которая зависит от реологических свойств полировальной суспензии и режимов обработки. В результате исследований установлено, что свойства полировальной дисперсной системы существенно влияют на интенсивность удаления обрабатываемого материала при полировании оптического стекла, ситаллов, оптических и полупроводниковых кристаллов, а также на шероховатость обработанной поверхности. Результаты исследования целесообразно использовать при разработке процессов нанополірования неметаллических материалов, а также при последующих исследованиях закономерностей химико-механического полирования сверхгладких поверхностей. Практическое значение и ценность полученных результатов заключается в общем подходе к межмолекулярному взаимодействию конденсированных сред.

**Ключевые слова:** полирование, дисперсная система, шероховатость.

### Література

1. Філатов Ю.Д., Сідорко В.І., Філатов О.Ю., Ковальов С.В. Фізичні засади формоутворення прецизійних поверхонь під час механічної обробки неметалевих матеріалів: Монографія. – К.: Наукова думка, 2017. – 248 с.
2. Filatov Yu.D., Modeling and experimental study of surfaces optoelectronic elements from crystal materials in polishing / Simulation and Experiments of Material-Oriented Ultra-Precision Machining; J. Zhang et al. (eds.). – Springer Tracts in Mechanical Engineering, Springer Nature Singapore Pte Ltd., 2019. – P. 129–165.
3. Філатов Ю.Д. Полірування прецизійних поверхонь елементів оптоелектронної техніки зі скла, ситалів та оптичних і напівпровідникових кристалів. Огляд // Сверхтв. материалы. – 2020. – № 1. – С. 73–98.
4. Філатов Ю.Д., Сідорко В.І., Сохань С.В., Ковальов С.В., Панова А.М., Ковальов В.А., Гаращенко В.В., Ветров А.Г. Вплив реологічних властивостей дисперсної системи на показники полірування підкладок із ситалу // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения. Вып. 22. – К.: ИСМ им. В.Н. Бакуля НАН Украины, 2019. – С. 462–468.
5. Філатов Ю.Д., Сідорко В.І., Ковальов В.А., Ковальов С.В. Полірування оптичних поверхонь деталей зі скла та ситалів / Зб. наук. праць X Всеукраїнської наук.-техн. конф. з міжнарод. участю «Процеси механічної обробки, верстати та інструмент», 6–9 листопада 2019 р. – Житомир: Держ. ун-т «Житомирська політехніка», 2019. – 211 с. – С. 190–192.
6. Балицька Н.О. Рекомендації для забезпечення якісних показників плоских поверхонь деталей торцевим фрезеруванням / Зб. наук. праць X Всеукраїнської наук.-техн. конф. з міжнарод. участю «Процеси механічної обробки, верстати та інструмент», 6–9 листопада 2019 р. – Житомир: Держ. ун-т «Житомирська політехніка», 2019. – 211 с. – С. 49–50.
7. Філатов Ю.Д., Курілович В.Д., Ковальов В.А. Підвищення ефективності фінішної обробки виробів з природного каменю інструментом із алмазно-полімерного волокна // Сверхтв. материалы. – 2014. – № 1. – С. 49–58.

Надійшла 09.07.20

### References

1. Filatov, Yu.D., Sidorko, V.I., Filatov, O.Yu., Kovalov S.V. (2017). Fizychni zasady formoutvorennia pretsyziinykh poverkhon pid chas mekhanichnoi obrobky nemetalevykh materialiv [Physical principles of forming precision surfaces during machining of non-metallic materials]. Kyiv: Naukova dumka [in Ukrainian].
2. Filatov Yu.D. (2019). Modeling and experimental study of surfaces optoelectronic elements from crystal materials in polishing. *Simulation and Experiments of Material-*

- Oriented Ultra-Precision Machining*. J. Zhang et al. (eds.). Springer Tracts in Mechanical Engineering, Springer Nature Singapore Pte Ltd.
3. Filatov Yu.D. (2020). Poliruvannya precyziinykh poverkhon elementiv optoelektronnoi tekhniky zi skla, sitaliv ta optychnykh i napivprovodnykovykh krystaliv. Ogliad [Polishing of precision surfaces of elements of optoelectronic equipment from glass, sieves and optical and semiconductor crystals. Review]. *Sverxtverdye materialy – Superhard materials*, 1. 73–98 [in Ukrainian].
  4. Filatov, Yu.D., Sidorko, V.I., Soxan, S.V., et al. (2019). Vplyv reolohichnykh vlastyvostei dyspersnoi systemy na pokaznyky poliruvannya pidkladok iz sytalu [Influence of rheological properties of dispersed system on polishing parameters of sieve substrates]. *Porodorazrushaiushchii i metalloobrabatyvaiushchii instrument – tekhnika i tekhnologiya ego izgotovleniia i primeneniia – Rock Destruction and Metal-Working Tools – Techniques and Technology of the Tool Production and Applications*, 22, 462–468 [in Ukrainian].
  5. Filatov, Yu.D., Sidorko, V.I., Kovalov, V.A., Kovalov, S.V. (2019). Poliruvannya optychnykh poverkhon detalej zi skla ta sytaliv [Polishing of optical surfaces of glass parts and sieves]. Proceedings from Machining processes, machines and tools '19: *X Vseukrainska naukovotexnichna konferentsiia z mizhnarodnoiu uchastiu (6–9 lystopada 2019 roku) – 10nd All-Ukrainian scientific and technical conference with international participatio*. (pp. 190–192). Zhytomir: Derzh. un-t «Zhytomyr'ska politexnika» [in Ukrainian].
  6. Balytska, N.O. (2019). Rekomendacii dlia zabezpechennia yakisnykh pokaznykiv ploskykh poverkhon detalei torcevyym frezeruvanniam [Recommendations for ensuring the quality of flat surfaces of parts by end milling]. Proceedings from Machining processes, machines and tools '19: *X Vseukrainska naukovotexnichna konferentsiia z mizhnarodnoiu uchastiu (6–9 lystopada 2019 roku) – 10nd All-Ukrainian scientific and technical conference with international participatio*. (pp. 49–50). Zhytomir: Derzh. un-t «Zhytomyr'ska politexnika» [in Ukrainian]. [in Ukrainian].
  7. Filatov, Yu.D., Kurilovych, V.D., & Kovalov V.A. (2014). Pidvyshchennia efektyvnosti finishnoi obrobky vyrobiv z pryrodnoho kameniu instrumentom iz almazno-polimernogo volokna [Improving the efficiency of finishing natural stone products with a tool made of diamond-polymer fiber]. *Sverxtverdye materialy – Superhard materials*, 1, 49–58. [in Ukrainian].