

Ю. Д. Філатов, В. І. Сидорко, С. В. Сохань, доктори технічних наук,
С. В. Ковальов, А. М. Панова¹, В. А. Ковальов², кандидати технічних наук;
В. В. Гаращенко, канд. фіз.-мат. наук, **А.Г. Вєтров**, інженер¹

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

²Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря
Сікорського», пр. Перемоги 37, 03056 м. Київ, E-mail: urchyshynoks@ukr.net

ВПЛИВ РЕОЛОГІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ДИСПЕРСНОЇ СИСТЕМИ НА ПОКАЗНИКИ ПОЛІРУВАННЯ ПІДКЛАДОК ІЗ СИТАЛУ

Метою даного дослідження є вивчення закономірностей впливу реологічних властивостей дисперсної системи на показники процесу полірування ситалових підкладок. На основі кластерної моделі зняття оброблюваного матеріалу під час полірування та теорії Дерягіна-Ландау-Фервея-Овербека показано, що середнє значення потенціалу взаємодії зерен полірувального порошку з оброблюваною поверхнею та концентрація частинок шламу в зоні контакту зерна полірувального порошку з оброблюваною поверхнею з урахуванням їх розподілу за площами поверхні суттєво залежать від товщини проміжку між елементарними ділянками контактних поверхонь оброблюваної деталі та притиру, яка визначається в залежності від режиму полірування (номінального тиску притискання оброблюваної деталі до притиру та відносної швидкості їх переміщення), коефіцієнтів поверхневого натягу та динамічної в'язкості дисперсної системи, кутів змочування дисперсною системою відповідно поверхонь оброблюваної деталі та притиру. Встановлено, що реологічні характеристики полірувальної дисперсної системи суттєво впливають на інтенсивність видалення оброблюваного матеріалу з поверхні під час полірування та несуттєво впливають на шорсткість обробленої поверхні. При поліруванні підкладок з ситалу СТ-50-1 досягається висока продуктивність зняття оброблюваного матеріалу та низька шорсткість обробленої поверхні, що задовольняє вимогам, що висуваються до ситалових підкладок.

Ключові слова: полірування, реологічні властивості, дисперсна система, шорсткість

Вступ

У відповідності до кластерної моделі зняття оброблюваного матеріалу під час полірування [1–3] продуктивність полірування та шорсткість оброблених поверхонь визначаються концентрацією частинок шламу, що видаляються із оброблюваної поверхні під час обробки, яка суттєво залежить від відстані між поверхнями оброблюваної деталі та притиру, тобто товщини проміжку між елементарними ділянками контактних поверхонь, в якому знаходиться дисперсна система (полірувальна суспензія). Ця товщина визначається реологічними властивостями та поверхневими явищами в дисперсній системі та залежить від динамічної в'язкості суспензії, коефіцієнту поверхневого натягу, кутів змочування нею поверхонь оброблюваної деталі та притиру.

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 полірувальної суспензії вивчені недостатньо, а причини впливу реологічних властивостей дисперсної системи на показники процесу полірування остаточно не з'ясовані.

Метою даного дослідження є вивчення закономірностей впливу реологічних властивостей дисперсної системи на показники полірування плоских поверхонь підкладок із ситалу.

Дослідження впливу реологічних властивостей дисперсної системи на показники полірування ситалу

Під час механічного полірування оптичних поверхонь за допомогою полірувальної суспензії на кожне зерно полірувального порошку за умови відсутності його хімічної взаємодії з оброблюваною деталлю діє результуюча сила молекулярного притягання, яка є сумою сили Ван-дер-Ваальса, сили електростатичної взаємодії, електричної сили подвійного шару, капілярної та гравітаційної сил. Кількісне порівняння сил діючих на зерна полірувального порошку, розмір яких менше 1 мкм, показує, що капілярні сили, які пов'язані з поверхневим натягом суспензії, проявляються у макроскопічному масштабі і визначають сили притягання між оброблюваною деталлю та притиром, за абсолютною величиною є найбільшими. При взаємодії полірувального порошку з оброблюваною поверхнею найбільшими за абсолютною величиною є ван-дер-ваальсові сили. Сили подвійного шару, які виникають внаслідок зарядження зерен полірувального порошку та електризації оброблюваної поверхні, приблизно на порядок величини менші, а силами електростатичної взаємодії та тяжіння можна знехтувати

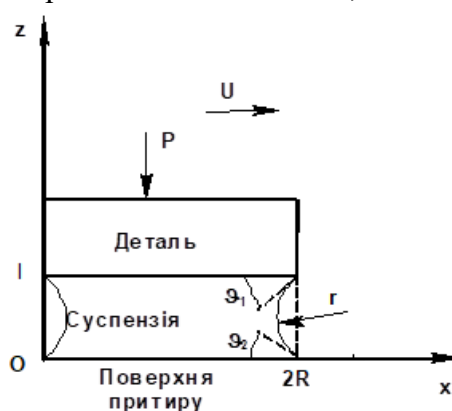


Рис. 1. Схема контакту поверхонь оброблюваної деталі та притиру

[4–6]. У відповідності до кластерної моделі зняття оброблюваного матеріалу під час полірування [1–3] та теорії Дерягіна-Ландау-Фервея-Овербека [6, 7–10] середнє значення потенціалу взаємодії зерен полірувального порошку з оброблюваною поверхнею та концентрація частинок шламу в зоні контакту зерна полірувального порошку з оброблюваною поверхнею з урахуванням їх розподілу за площами поверхні суттєво залежать від товщини проміжку між елементарними ділянками контактних поверхонь оброблюваної деталі та притиру/

Розглядаючи гідродинамічну схему (рис. 1) контакту поверхонь притиру та оброблюваної деталі [1], можна визначити величину проміжку l між елементарними ділянками контактних поверхонь, яка визначається формулою:

$$l = \frac{1}{p_a} [\sigma(\cos \vartheta_1 + \cos \vartheta_2) - 2\eta U], \quad (1)$$

де: p_a – номінальний тиск притиснення оброблюваної деталі до притиру; σ – коефіцієнт поверхневого натягу; η – динамічна в'язкість дисперсної системи; U – відносна швидкість переміщення деталі та притиру; ϑ_1, ϑ_2 – кути змочування дисперсною системою відповідно поверхонь оброблюваної деталі та притиру.

В'язкість суспензії при різних концентраціях дисперсної фази визначалась за допомогою віскозиметра мод. ВЗ-246, густина – за допомогою «Density Meter DMA 35N», коефіцієнт поверхневого натягу – крапельним методом та за висотою підняття рідини у капілярі, кути змочування дисперсним середовищем поверхонь оброблюваної деталі та притиру – за допомогою мікроскопу «Мир-12».

Залежність густини дисперсної системи від концентрації дисперсної фази (рис. 2) є лінійною функцією, що має вигляд $\rho = \rho_0(\alpha_1 k + \beta_1)$ (де $\rho_0 = 1,028 \text{ г/см}^3$ — густина дисперсного середовища; $\alpha_1 = 1,582 \cdot 10^{-3}$, $\beta_1 = 1,017 \approx 1$ — коефіцієнти, які визначено методом найменших квадратів, похибка апроксимації — 0,5 %). Залежність кінематичної в'язкості дисперсної системи від концентрації дисперсної фази (рис. 3) можна апроксимувати лінійною функцією вигляду $\nu = \nu_0(\alpha_2 k + \beta_2)$ (де $\nu_0 = 0,93 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ – коефіцієнт кінематичної в'язкості дисперсного

середовища; $\alpha_2 = 0,018$, $\beta_2 = 0,857$ – коефіцієнти, які визначено методом найменших квадратів, похибка апроксимації менше 1 %).

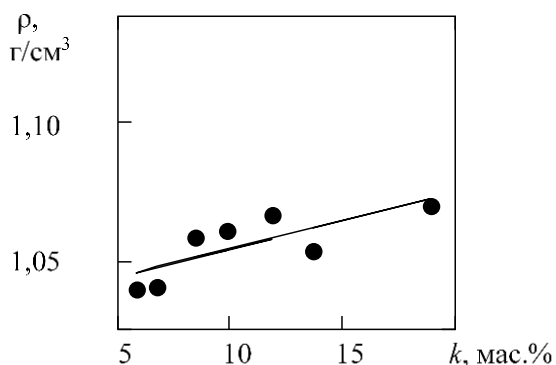


Рис. 2. Залежність густини дисперсної системи від концентрації дисперсної фази

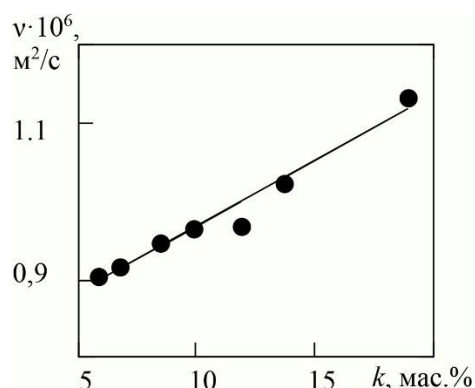


Рис. 3. Залежність кінематичної в'язкості дисперсної системи від концентрації дисперсної фази

Залежність динамічної в'язкості дисперсної системи $\eta(k) = \nu(k) \cdot \rho(k)$ від концентрації дисперсної фази (рис. 4) можна апроксимувати лінійною функцією вигляду $\eta = \eta_0(\alpha_3 k + \beta_3)$ (де $\eta_0 = 0,956 \cdot 10^{-3}$ Па·с — коефіцієнт динамічної в'язкості дисперсного середовища; $\alpha_3 = 0,02$, $\beta_3 = 0,87$ — коефіцієнти, які визначено методом найменших квадратів, похибка апроксимації менше 1 %).

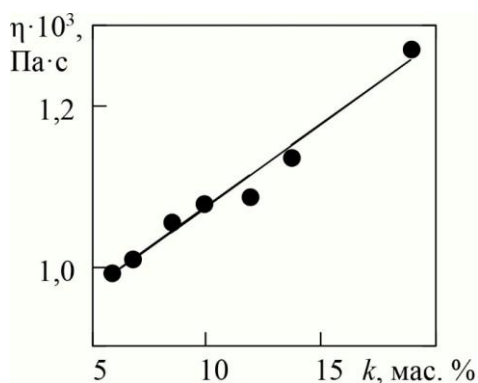


Рис. 4. Залежність в'язкості дисперсної системи від концентрації дисперсної фази

Залежність динамічної в'язкості дисперсної системи від об'ємної долі частинок дисперсної фази може бути представлена у відповідності до рівняння $\eta = \eta_0(\beta_4 + \alpha_4 \phi)$ (де $\alpha_4 = 7,28$, $\beta_4 = 0,87$ — коефіцієнти, що визначені методом найменших квадратів, похибка апроксимації – 1 %). Це рівняння значно відхиляється від рівняння Ейнштейна для колоїдних систем ($\beta \neq 1$), яке дає завищенні приблизно на 10 % результати розрахунку по відношенню до даних експерименту, а коефіцієнт форми $\alpha_4 > 2,5$ свідчить про значне відхилення

форми порошку від сферичної. За формулою Куна коефіцієнт форми для частинок полірувального порошку, що мають вигляд еліпсоїдів обертання з осями $a = 556$ нм та $b = 262$ нм, складає $\alpha_k = 2,5 + (a/b)^2/16 = 7,68$, що практично співпадає з $\alpha_4 = 7,28$ (відхилення не перевищує 5%).

Вивчення закономірностей впливу реологічних властивостей дисперсної системи на показники полірування здійснювалось при поліруванні плоских поверхонь підкладок із ситалу марки СТ-50-1 розмірами $60 \times 48 \times 0,5$ мм на верстаті мод. 2ШП-200М на притирі з поліуретану діаметром 150 мм за традиційною технологією при зусиллі притискання деталі до притиру – 70 Н, частоті обертання притиру – 90 об/хв., довжині штриху – 80 мм, середній температурі в зоні контакту інструмента та оброблюваної деталі 300 К. Коефіцієнт поверхневого натягу дисперсної системи при концентрації дисперсної фази 18 мас. % складав 51 мН/м, а кути змочування поверхонь притиру з пінополіуретану та ситалу марки СТ-50-1 склали відповідно 39° і 51° . Величина проміжку l між елементарними ділянками контактних поверхонь оброблюваної деталі і притиру визначалась у відповідності до формули (1) і складала 2,9 мкм.

Полірування ситалу марки СТ-50-1 (склокерамічного матеріалу зі складом: SiO_2 – 60,5%, Al_2O_3 – 13,5%, CaO – 8,5%, MgO – 7,5%, TiO_2 – 10%, густина 2,65 г/см³, коефіцієнт теплопровідності 1,4 Вт/(м·К), статична діелектрична проникність 8,5, енергія зв'язку 3,9 еВ, частоти власних коливань молекулярних фрагментів (за спектрами ІЧ-поглинання, Фур'є-спектрометр Nicolet 6700): 640,96; 719,40; 848,86; 892,17; 1001,89; 1037,99 см⁻¹) характеризувалось наступними параметрами і характеристиками процесу утворення та видалення з оброблюваної поверхні частинок шламу. Енергія взаємодії мікро- і наночастинок полірувального порошку з поверхнею, що полірується, характеризується сталою Ліфшиця – 62 меВ, сталою Гамакера – 2,35 зДж, параметр розподілу частинок шламу за площами поверхні (розподіл Пуассона) – 0,5, кількість молекулярних фрагментів в частинці шламу – 123, найбільш ймовірний розмір частинок шламу – 3,9 нм, площа їх поверхні – 51 нм², середнє значення потенціалу взаємодії між зернами полірувального порошку (середній розмір 0,4 мкм) та оброблюваною поверхнею 0,12 зДж. Теоретично розрахована величина продуктивності полірування ситалу марки СТ-50-1 за таких умов складає $1,9 \cdot 10^{-12}$ м³/с (2,55 мкм/год.) і знаходиться у відповідності до експериментально визначеної величини, яка відповідає величині лінійного зняття оброблюваного матеріалу 2,0 мкм/год. (відхилення результатів розрахунку від експериментальних даних складає 5 %).

Аналіз впливу реологічних характеристик полірувальної дисперсної системи на продуктивність полірування ситалових підкладок показав, що при збільшенні концентрації дисперсної фази в'язкість дисперсної системи підвищується приблизно на 10–25 %, що призводить до зменшення величини проміжку між елементарними ділянками контактуючих поверхонь. В той же час коефіцієнт поверхневого натягу дисперсної системи несуттєво зменшується, що не призводить до зміни товщини її прошарку між поверхнями оброблюваної деталі та притиру. Сумарне зменшення величини проміжку між поверхнями притиру і оброблюваної поверхні не приводить до підвищення ефективності їх взаємодії, внаслідок чого продуктивність зняття оброблюваного матеріалу під час полірування практично не змінюється.

Реологічні характеристики полірувальної дисперсної системи несуттєво впливають на формування нанорельєфу обробленої поверхні, що знаходиться у повній відповідності до кластерної моделі зняття оброблюваного матеріалу під час полірування. Шорсткість обробленої за даних умов поверхні підкладки з ситалу марки СТ-50-1 визначалась за модельними профілографами, що отримані за допомогою методу комп'ютерного моделювання [1, 2]. Параметри шорсткості склали: $Ra = 5,9 \pm 0,2$ нм, $Rq = 6,1 \pm 0,2$ нм, $R_{\text{max}} = 10,1 \pm 0,9$ нм. Цим параметрам шорсткості відповідає $Rz = 0,029$ мкм.

При експериментальній оцінці шорсткості оброблених за даних умов поверхонь за допомогою безконтактного інтерференційного 3D профілографу «Micron-alpha» (рис. 5) були отримані наступні значення параметрів шорсткості (усереднені за 10 вимірами): $Ra = 6,2$ нм, $Rq = 8,2$ нм, $Rz = 0,031$ мкм, які незначно відрізняються від розрахункових значень (середня величина відхилення результатів розрахунку параметрів шорсткості від експериментальних даних менше 10 %).

Слід зауважити, що підкладки з ситалу СТ-50-1, які застосовуються в радіоелектронній техніці при виробництві плівкових інтегральних мікросхем, характеризуються підвищеними вимогами за шорсткістю робочої поверхні, що регламентуються за параметром шорсткості $Rz \leq 0,032$ мкм, які є більш жорсткі у порівнянні з оптичними поверхнями, для яких $Rz \leq 0,05$ мкм.

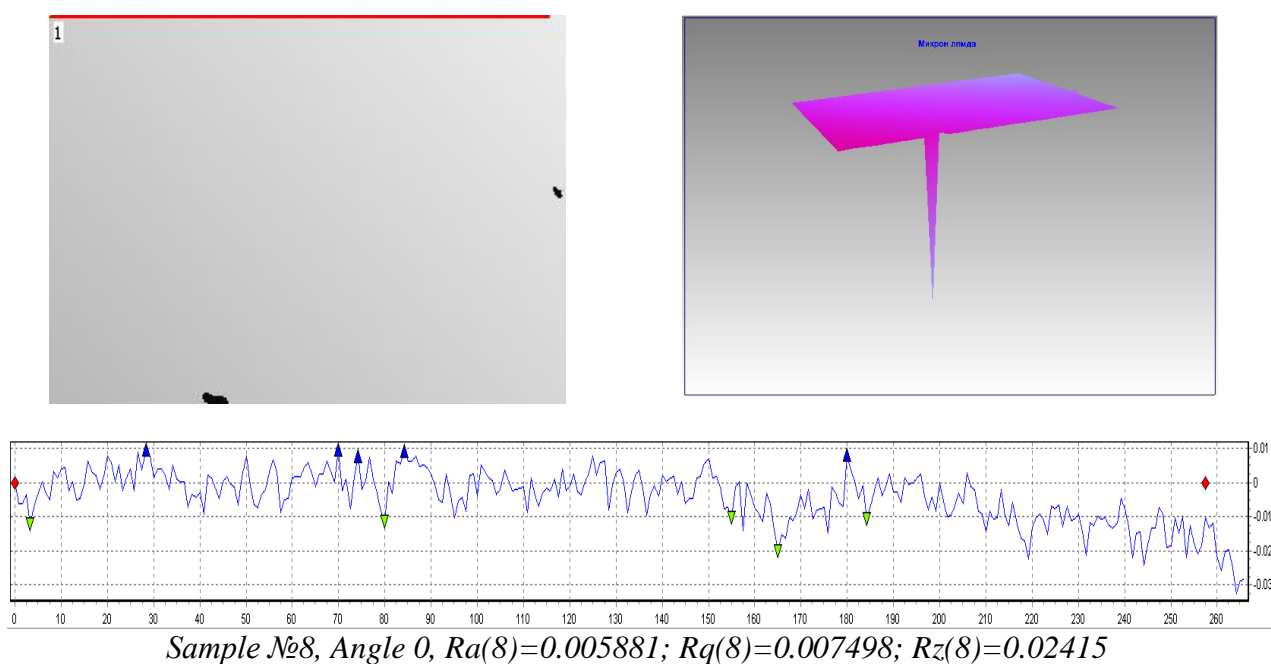


Рис. 5. Параметры шерсткости полированной поверхности подкладки з ситалу марки СТ-50-1

Висновки

Таким чином, в результаті аналізу впливу реологічних властивостей дисперсної системи на показники процесу полірування ситалових підкладок встановлено, що коефіцієнти поверхневого натягу та динамічної в'язкості полірувальної дисперсної системи несуттєво впливають на інтенсивність видалення оброблюваного матеріалу з поверхні під час полірування. Показано також, що реологічні характеристики полірувальної дисперсної системи несуттєво впливають на шерсткість обробленої поверхні. При поліруванні підкладок з ситалу СТ-50-1 за допомогою запропонованої дисперсної системи досягається висока продуктивність зняття оброблюваного матеріалу та низька шерсткість обробленої поверхні, що задовольняє вимогам, що висуваються до ситалових підкладок згідно міжнародних стандартів.

Целью данной работы является изучение закономерностей влияния реологических свойств дисперсной системы на параметры процесса полирования ситалловых подложек. На основе кластерной модели удаления обработанного материала при полировании и теории Дерягина-Ландау-Фервея - Овербека показано, что среднее значение потенциала взаимодействия зерен полировального порошка с обрабатываемой поверхностью и концентрация частиц шлама в зоне контакта зерна полировального порошка с обрабатываемой поверхностью с учетом их распределения по площади поверхности существенно зависит от толщины зазора между элементарными участками контактных поверхностей детали и притира, которая определяется в зависимости от режима полирования (номинальное давление прижима детали к притиру и относительная скорость их перемещения), коэффициентов поверхностного натяжения и динамической вязкости дисперсной системы, углов смачивания дисперсной системой соответственно поверхности детали и притира. Установлено, что реологические характеристики полирующей дисперсной системы несуттєво влияют на интенсивность удаления обработанного материала с поверхности при полировании и незначительно влияют на шероховатость обработанной поверхности. При полировании подложек из ситалла СТ-50-1 достигается высокая производительность удаления обрабатываемого материала и низкая шероховатость обработанной поверхности, что удовлетворяет требованиям для ситалловых подложек.

Ключевые слова: полирование, реологические свойства, дисперсная система, шероховатость

Y.D. Filatov, V.I. Sidorko, S.V. Sokhan, S.V. Kovalev, A.N. Panova¹,
V.A. Kovalev², V.V. Garaschenko, A.G. Vetrov¹

¹V. N. Bakul Institute for superhard materials of NAS of Ukraine

²National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic"

INFLUENCE OF RHEOLOGICAL PROPERTIES OF THE DISPERSE SYSTEM ON POLISHING INDICATORS SUBSTRATE FROM SITALL

The purpose of this study is to study the laws of the influence of the rheological properties of the dispersed system on the parameters of the polishing process of the sitall substrates. On the basis of the cluster model of removal of the treated material during polishing and the Derjaguin–Landau–Verwey–Overbeek theory, it is shown that the average value of the interaction potential of the grains of the polishing powder with the treated surface and the concentration of the slurry particles in the contact area of the grain of the polishing powder with the treated surface, taking into account their distribution for the surface depends essentially on the thickness of the gap between the elemental sections of the contact surfaces of the workpiece and the tool, which is determined depending on the mode of polishing (the nominal pressure of pressing the workpiece to the tool and relative speed of their movement), the coefficients of surface tension and the dynamic viscosity of the dispersed system, the angles of wetting by a dispersed system, respectively, surfaces of the workpiece and tool. It has been established that the rheological characteristics of the polishing dispersion system significantly affect the intensity of removal of the treated material from the surface during polishing and insignificantly affect the roughness of the treated surface. When polishing the substrates from the sitall ST-50-1, high productivity of removing the treated material is achieved and the low roughness of the treated surface, which satisfies the requirements for the sitall substrates.

Key words: polishing, rheological properties, disperse system, roughness

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 / J. Zhang et al. (eds.), Simulation and Experiments of Material-Oriented Ultra-Precision Machining, Springer Tracts in Mechanical Engineering, Springer Nature Singapore Pte Ltd. 2019. – P. 129–165.
3. Образование частиц шлама и износа полировального порошка при полировании нитрида алюминия / Ю. Д. Филатов, В. И. Сидорко, С. В. Ковалев и др. // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения. Сб. науч. тр. – Вып. 20. – Киев: ИСМ им.В.Н.Бакуля, НАН Украины, 2017. – С. 516–522.
4. Suratwala T. I., Materials Science and Technology of Optical Fabrication. – New York: Wiley–VCH, 2018. – 416 p.
5. Yao J., Han H., Hou Y., Gong E., Yin W., A Method of Calculating the Interaction Energy between Particles in Minerals Flotation // Mathematical Problems in Engineering. – 2016. – V. 2016. – Article ID 8430745. – 13 p.; doi: 10.1155/2016/8430745
6. Chen G., Ni Z., Bai Y., Li Q., Zhao Y., The role of interactions between abrasive particles and the substrate surface in chemical-mechanical planarization of Si-face 6H-SiC // RSC Adv. – 2017. – N 7. – P. 16938–16952.
7. Филатов Ю. Д. Взаимодействие частиц шлама с частицами износа полировального порошка при полировании оптоэлектронных элементов // Сверхтв. материалы. – 2018. – № 4. – С. 71–81.
8. Дерягин Б. В., Абрикосова И. И., Лифшиц Е. М. Молекулярное притяжение конденсированных тел. // Успехи физ. наук. – 2015. – Т. 185. – № 9. – С. 981–1001.

9. Sato N., Aoyama Y., Yamanaka J., Toyotama A., Okuzono T., Particle Adsorption on Hydrogel Surfaces in Aqueous Media due to van der Waals Attraction // *Scientific Reports*. – 2017. – V. 7. – N 6099. – P. 1–10.
10. Lin G., Guo D., Xie G., Jia Q., Pan G., In situ observation of colloidal particle behavior between two planar surfaces // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. – 2015. – V. 482. – P. 656–661.

Надійшла 28.05.19

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 precision surfaces forming 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, Y. D., Sidorko, V. I., Kovalev, S. V. et al. (2017). Obrazovanie chastits shlama i iznosa polirovalnogo poroshka pri polirovanii nitrid aliuminiia [The formation of particles of sludge and deterioration of the polishing powder when polishing aluminum nitride]. *Porodorazrushaiushchii i metalloobrabatyvaiushchii instrument – tekhnika i tekhnologiia ego izgotovleniia i primeneniia – Rock Destruction and Metal-Working Tools – Techniques and Technology of the Tool Production and Applications*, 20, 516–522 [in Russian].
4. Suratwala, T. I. (2018). *Materials Science and Technology of Optical Fabrication. Lawrence Livermore National Lab, The American Ceramic Society*. New York: Wiley–VCH.
5. Yao, J., Han, H., Hou, Y., Gong, E., Yin, W. (2016). A Method of Calculating the Interaction Energy between Particles in Minerals Flotation. *Mathematical Problems in Engineering*. 2016, 8430745, 13.
6. Chen, G., Ni, Z., Bai, Y., Li, Q., Zhao, Y. (2017). The role of interactions between abrasive particles and the substrate surface in chemical-mechanical planarization of Si-face 6H-SiC. *RSC Adv.*, 7, 16938–16952.
7. Filatov, Yu. D. (2018). Interaction between Debris Particles and Polishing Powder Wear Particles in Polishing Optoelectronic Components. *Journal of Superhard Materials*, 40, 4, 71–81.
8. Deriahin, B. V., Abrykosova, I. I., Lifshyts, E. M. (2015). Molekuliarnoe prytyazhenie kondensirovannykh tel. *Uspekhy fizicheskikh nauk – Advances in Physical Sciences*, 185, 9, 981–1001 [in Russian].
9. Sato, N., Aoyama, Y., Yamanaka, J., Toyotama, A., Okuzono, T. (2017). Adsorption on Hydrogel Surfaces in Aqueous Media due to van der Waals Attraction. *Scientific Reports*, 7, 6099, 1–10.
10. Lin, G., Guo, D., Xie, G., Jia, Q., Pan, G. (2015). In situ observation of colloidal particle behavior between two planar surfaces. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects.*, 482, 656–661.