

*The results of the use of semiconductor diamond powder synthesized in the system Mg-Zn-BC for fine diamond grinding of sapphire by free abrasive are presented. It is shown that the use of this powder can improve the performance of thin diamond grinding of sapphire up to 27% and prevent formation of scratches on treated surfaces.*

**Keywords:** *free abrasive, fine diamond grinding, electrically conductive diamond.*

### Література

1. Петасюк Г.А. Системно-критеріальний метод кількісної оцінки однорідності надтвердих дисперсних матеріалів // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2003. – №5. – С. 101–105.
2. Новиков Н.В., Богатырева Г.П., Петасюк Г.А. К вопросу повышения информативности морфологических характеристик порошков из сверхтвердых материалов, определяемых на видеокомпьютерных диагностических комплексах // Сверхтвердые матер. – 2005. – № 3. – С. 73–85.
3. Сафонова М.Н., Петасюк Г.А., Сыромятникова А.С. Компьютерно-аналитические методы диагностики эксплуатационных характеристик алмазных порошков и композиционных материалов на их основе. – Новосибирск: СО РАН, 2013. – 223 с.
4. Петасюк Г.А. Экстраполяционно геометрический метод измерения внешней удельной поверхности порошков сверхтвердых материалов // Измерительная техника. – 2008. – №.1. – С. 59–64.
5. Петасюк Г.А., Сирота Ю.В. Аналитическое определение количества зерен в одном карате алмазного порошка на основе экстраполяционно-аффинной 3D модели зерна // Сверхтвердые материалы. – 2012. – № 3. – С. 70–82.
6. Петасюк Г.А. Інтерпретаційні і прикладні аспекти деяких морфологічних характеристик порошків надтвердих матеріалів // Сверхтвердые матер. – 2010. – № 2. – С. 80–95.
7. Petasyuk G. A. System and criterial method of the identification and quantitative estimation of the geometrical shape of the abrasive powder grains projection // Powder Technology. – V. 264. – 2014. – P. 78–85

*Надійшла 10.07.14*

УДК 621.371

**Ю. Д. Филатов, В. И. Сидорко**, доктора технических наук;  
**Т. А. Прихна**, член-корр. НАН Украины; **А. Ю. Филатов, А. И. Боримский,**  
**С. В. Ковалев, А. М. Куцай**, кандидаты технических наук;  
**А. Г. Ветров, В. Г. Полторацкий**

*Институт сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля НАН Украины, г. Киев*

### **ПОЛИРОВАНИЕ ПЛОСКИХ ПРЕЦИЗИОННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ЭЛЕМЕНТОВ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ ИЗ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КАРБИДА КРЕМНИЯ**

*В результате исследования закономерностей полирования монокристаллического карбида кремния и использования в качестве критерия для оценки эффективности обработки приведенной энергии переноса обоснована целесообразность последовательного применения водных полировальных суспензий из алмазных микropорошков, порошков кубического нитрида бора и МАХ-фазы  $Ti_3AlC_2$ .*

**Ключевые слова:** *монокристаллический карбид кремния, энергия переноса, эффективность полирования.*

### Введение

В теории алмазно-абразивной обработки прецизионных поверхностей элементов оптико-электронной техники успешно используют модель съема обрабатываемого материала при полировании диэлектриков, основанную на кластерной модели износа взаимодействующих при трении поверхностей твердых тел [1; 2], и физико-статистическую модель образования на обрабатываемой поверхности частиц шлама и их удаления [3]. Размеры этих частиц, их концентрация в зоне контакта инструмента и обрабатываемой детали, характер взаимодействия с частицами износа и контактирующими поверхностями определяют как производительность механической обработки неметаллических материалов и интенсивность износа инструмента на всех технологических операциях, так и состояние этих поверхностей [4–7].

В последнее время разработаны новые оптоэлектронные изделия и устройства на основе подложек, эпитаксиальных структур и электронной компонентной базы из монокристаллического карбида кремния (SiC) – слоистого материала, свойства которого зависят от порядка чередования наноразмерных слоев с кристаллической сверхструктурой, построенной из элементарных слоев, различающихся кристаллической упаковкой. Политипы различаются электрофизическими, оптическими и химическими свойствами. На основе карбида кремния формируются объекты, представляющие собой гетероструктуры в виде различных модификаций: кубической и гексагональных 3С-2Н, 3С-6Н, а также гетероструктурных наноконпозиций SiC с нитридами алюминия и галлия. Для обеспечения технических требований, предъявляемых к подложкам SiC диаметром 50–100 мм; толщиной  $350 \pm 50$  мкм и структурной политипной однородностью 4Н или 6Н, необходимо разработать новую технологию их полирования [8; 9].

### Полирование элементов из монокристаллического карбида кремния

На основе кластерной модели износа [1; 2] процесс съема обрабатываемого материала при полировании карбида кремния можно рассматривать как накопление энергии в критическом объеме – кластере, т. е. переходы кластера в дискретном эквидистантном энергетическом спектре. С учетом многочастотного режима взаимодействия поверхностей обрабатываемой детали и инструмента, когда собственные колебания фрагментов происходят на частотах  $\omega_{01l}$  и  $\omega_{02k}$  ( $l, k$  – порядковые номера частот, определяемых по ИК-спектрам поглощения), можно определить количество возбужденных фрагментов

(элементарных групп SiC)  $\xi_{lk} = \frac{\omega_{01l}^4}{(\omega_{01l}^2 - \omega_{02k}^2)^2}$ , молекулярных фрагментов в кластере

$\xi = \left[ \sum_{lk} \xi_{lk} \right]$ , характерные частоты  $\omega_{lk} = \frac{3\omega_{01l}\omega_{02k}}{2(\omega_{01l} + \omega_{02k})}$  и энергию кластера

$E_{cl} = \sum_{lk} [\omega_{01l} \hbar \xi_{lk}]$  (где  $\hbar$  – постоянная Планка). Обрабатываемый материал отделяется от

поверхности в виде частицы шлама только тогда, когда энергия кластера  $E_{cl}$  превысит энергию связи SiC ( $E_b = 3,24$  эВ [8]). Распределение частиц шлама по размерам описывается распределением Пуассона с параметром  $\nu = E_b/E_{cl}$ , а вероятность образования частиц шлама пропорциональна  $\nu \exp(-\nu)$  [1; 2]. Диэлектрические проницаемости обрабатываемого  $\epsilon_l$  и инструментального  $\epsilon_k$  материалов определяют на характерных частотах  $\omega_{lk}$ , а константу Лифшица  $\hbar\omega_{123}$  ( $\hbar = 1,054 \cdot 10^{-34}$  Дж·с – постоянная Планка) рассчитывают в соответствии с

формулой  $\omega_{123} = \int_{\omega_1}^{\omega_2} \frac{[\epsilon_1(\omega_{lk}) - \epsilon_3][\epsilon_2(\omega_{lk}) - \epsilon_3]}{[\epsilon_1(\omega_{lk}) + \epsilon_3][\epsilon_2(\omega_{lk}) + \epsilon_3]} d\Omega$  ( $\Omega \in [\omega_1; \omega_2]$ , где  $\omega_1, \omega_2$  – частота в

ИК-спектрах минимальная и максимальная).

Для политипа 6H-SiC расстояния между соседними поверхностными молекулами и между молекулярными слоями определяют по постоянным решетки  $a = 0,3073$  нм и  $c = 1,511$  нм [8]). Площадь поверхности  $i$ -й частицы шлама  $S_i = S_0 (i + 1)$  (где  $i = \overline{1, N}$ ,  $N$  – количество выборок,  $S_0$  – площадь поверхности кластера, зависящая от структуры обрабатываемого материала и количества молекулярных фрагментов  $\xi$ ). Необходимо отметить, что площадь поверхности кластера существенно зависит от кристаллографической ориентации плоскости монокристалла, которую полируют. Рассматривая кристаллы с гексагональной структурой, можно определить как из отдельных молекулярных фрагментов складываются кластеры, которые, отрываясь от обрабатываемой поверхности, превращаются в частицы шлама. При полировании плоскости [0001] количество молекулярных фрагментов определяют в проекциях на оси координат  $x$ ,  $y$  и  $z$  соответствующими межплоскостными расстояниями  $a$ ,  $a$  и  $c/6$ , количество молекулярных фрагментов  $\xi = k_1 k_2 k_3$ , минимальная площадь поверхности частиц  $S_{0c} = 3\sqrt{3} a^2 k_1 k_2 + a c k_1 k_3 = \xi [3\sqrt{3} a^2 k_3^{-1} + a c k_2^{-1}]$ .

Плоские поверхности элементов из карбида кремния (плотность  $\rho = 3,21$  г/см<sup>3</sup>, коэффициент теплопроводности  $\lambda = 490$  Вт/(м·К), статическая диэлектрическая проницаемость – 6,5 [8]) полировали на шлифовально-полировальном станке мод. 2ШП-200М при частоте вращения полировальника 90 об./мин., давлении прижима детали к инструменту 49,5 кПа, смещении штриха 30 мм, длине штриха 50 мм и средней температуре в зоне контакта 300 К. Частота собственных колебаний молекулярных фрагментов SiC, определяемая по спектрам инфракрасного поглощения (ИК) или комбинационного рассеяния (КР)  $\omega_{01} = 15,0 \cdot 10^{13}$  с<sup>-1</sup> (794 см<sup>-1</sup>);  $\omega_{01} = 18,9 \cdot 10^{13}$  с<sup>-1</sup> (1000 см<sup>-1</sup>) [10; 11]. Закономерности съема обрабатываемого материала при полировании монокристаллического карбида кремния исследовали с использованием специально приготовленных суспензий из алмазных микропорошков (№ 1), порошков кубического нитрида бора (№ 2) и МАХ-фазы Ti<sub>3</sub>AlC<sub>2</sub> (№ 3 и № 4) [9; 12].

Производительность съема обрабатываемого материала при полировании монокристаллического карбида кремния определяли по коэффициенту  $\eta$  объемного износа в зависимости от размеров  $d_1(i)$  частиц шлама и концентрации  $i$ -х частиц шлама на поверхности, длины пути трения элемента обрабатываемой поверхности по поверхности рабочего слоя инструмента, номинального давления прижима инструмента к детали, скорости их относительного перемещения, площади контакта, коэффициента теплопроводности обрабатываемого материала и температуры в контактной зоне.

Частота собственных колебаний молекулярных фрагментов полировальных порошков  $\omega_{02}$  составляет: алмаза 1135 и 1332 см<sup>-1</sup> [13], кубического нитрида бора – 1056 и 1304 см<sup>-1</sup> [14], порошков МАХ-фазы Ti<sub>3</sub>AlC<sub>2</sub> – 260, 420, 605, 1320 и 1590 см<sup>-1</sup> [15]. Статическая диэлектрическая проницаемость полировальных порошков: алмаза – 5,7; cBN – 2,5; Ti<sub>3</sub>AlC<sub>2</sub> – 3,5 [13; 16].

Результаты расчетов параметров обобщенной модели образования и удаления частиц шлама и съема обрабатываемого материала, а также экспериментальные данные по производительности съема монокристаллического SiC приведены в таблице.

Результаты анализа приведенных данных показали, что производительность съема монокристаллического карбида кремния зависит от количества фрагментов в кластере, энергии кластера и наиболее вероятного размера частицы шлама [2]. Зависимости производительности полирования карбида кремния от коэффициентов износа объемного  $\eta$  и массового  $\xi_w$ , характеризующих интенсивность съема обрабатываемого материала при механообработке показаны на рис. 1 и 2 [3; 9]. Чем меньше эти коэффициенты, тем ниже производительность съема обрабатываемого материала. Процесс полирования характеризуется также энергией переноса, являющейся наиболее чувствительной к производительности обработки [9].

**Результаты расчета и экспериментальные данные по производительности полирования монокристаллического карбида кремния с помощью суспензий из алмазных и полировальных порошков**

Параметр контактного взаимодействия SiC с полировальным порошком	Значения для полировального порошка			
	АСМ (№ 1)	cBN (№ 2)	Ti <sub>3</sub> AlC <sub>2</sub> (№ 3)	Ti <sub>3</sub> AlC <sub>2</sub> (№ 4)
Наиболее вероятный размер частиц шлама $a_v$ , нм	2,45	2,62	2,30	2,30
Коэффициент объемного износа $\eta$ , м <sup>2</sup> /с	$7,8 \cdot 10^{-11}$	$3,0 \cdot 10^{-11}$	$3,8 \cdot 10^{-12}$	$1,9 \cdot 10^{-12}$
Коэффициент массового износа $\xi_w$ , кг/(мс)	$2,5 \cdot 10^{-7}$	$9,6 \cdot 10^{-8}$	$1,2 \cdot 10^{-8}$	$5,9 \cdot 10^{-9}$
Энергия переноса $W$ , Дж/кг	$5,9 \cdot 10^{11}$	$1,5 \cdot 10^{12}$	$1,2 \cdot 10^{13}$	$2,5 \cdot 10^{13}$
Производительность обработки $Q$ , м <sup>3</sup> /с	$4,39 \cdot 10^{-12}$	$1,59 \cdot 10^{-12}$	$2,1 \cdot 10^{-13}$	$1,0 \cdot 10^{-13}$
Экспериментальная производительность съема SiC: мг/мин мкм/мин м <sup>3</sup> /с	0,84 0,26 $4,38 \cdot 10^{-12}$	0,28 0,01 $1,47 \cdot 10^{-12}$	0,05 0,015 $2,4 \cdot 10^{-13}$	0,02 0,006 $9,3 \cdot 10^{-14}$
Погрешность расчета, %	0,1	8,1	14,0	10,4

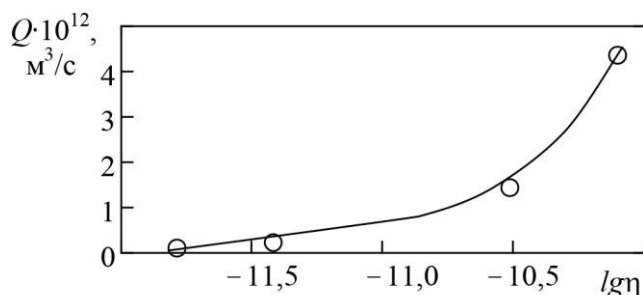


Рис. 1. Зависимость производительности полирования карбида кремния от коэффициента объемного износа (— — теория; ○ — эксперимент)

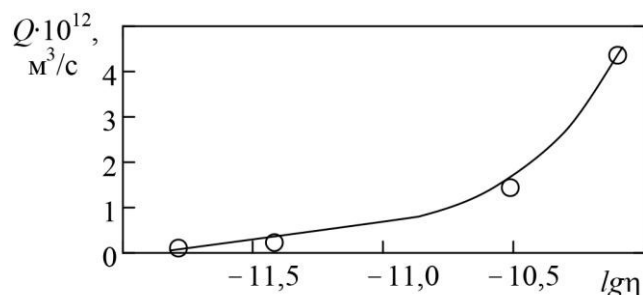


Рис. 2. Зависимость производительности полирования карбида кремния от коэффициента массового износа (— — теория; ○ — эксперимент)

Зависимость производительности полирования карбида кремния от энергии переноса  $W = \lambda T / \xi_w$  (Дж/кг), показывающая часть механической энергии, которая переносится частицами шлама единичной массы с обрабатываемой поверхности в контактную зону, показана на рис. 3. Полученная зависимость в логарифмических координатах линейная:  $lg Q = -a lg W + b$  ( $a = 0,99 \approx 1$ ;  $b = 0,31$  – коэффициенты, определенные методом наименьших квадратов). Из этого следует, что производительность полирования монокристаллического карбида кремния обратно пропорциональна энергии переноса и может быть описана приближенной зависимостью  $Q = k / \rho W$  ( $k = 6,6 \cdot 10^3$  Вт).

Величина энергии переноса  $W$  зависит не только от режимных и кинематических параметров обработки, характеристик полировального порошка, смачивающе-охлаждающей технологической среды, но и коэффициента теплопроводности обрабатываемого материала. В этой связи используют приведенную энергию переноса  $W_0 = [\lambda_{к8}/\lambda]W$ , которая характеризует участие частиц шлама в передаче тепловой энергии при обработке карбида кремния относительно

обработки эталонного материала – оптического стекла марки К8 с  $\lambda_{к8} = 0,95$  Вт/(м·К).

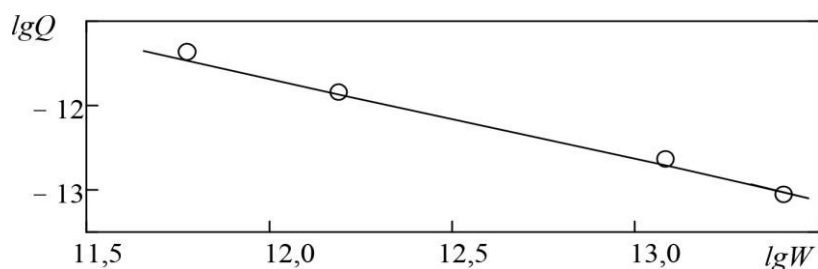


Рис. 3. Зависимость производительности полирования монокристаллического карбида кремния от энергии переноса (— – теория; ○ – эксперимент)

Диаграмма, на которой в логарифмическом масштабе даны значения приведенной энергии переноса, характерные для полирования монокристаллического карбида кремния с помощью суспензий исследуемых порошков № 1–4 (нумерация в соответствии с таблицей) показана на рис. 4. Приведенные на диаграмме прямая  $lgW_0 = 10$ , соответствующая классическому полированию оптических поверхностей деталей из стекла марки К8, и прямая  $lgW_0 = 9$ , соответствующая супертонкому шлифованию, позволяют выделить две характерные зоны: 1 – супертонкое шлифование; 2 – полирование. Это означает, что монокристаллический карбид кремния целесообразно полировать в несколько переходов: 1 – традиционное супертонкое шлифования водной суспензией алмазных микропорошков; 2 – предварительное полирование с помощью суспензии из порошков кубического нитрида бора; 3 – полирование с помощью порошков МАХ-фазы  $Ti_3AlC_2$ ; 4 – нанополірование с помощью порошков МАХ-фазы  $Ti_3AlC_2$ .

Сравнение результатов расчета производительности полирования плоских поверхностей элементов из монокристаллического карбида кремния с помощью суспензий из различных полировальных порошков с экспериментальными данными показало их хорошую сходимость (отклонение расчетных и экспериментальных результатов составляло 0,1–14,0 %, см. табл.), что подтверждает эффективность применения обобщенной модели образования и удаления частиц шлама и съема обрабатываемого материала для полирования.

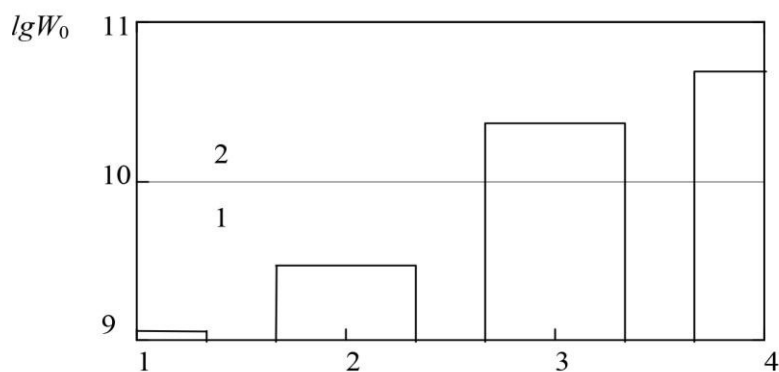


Рис. 4. Приведенная энергия переноса при полировании монокристаллического карбида кремния

### Выводы

В результате теоретических и экспериментальных исследований закономерностей полирования плоских поверхностей оптико-электронных элементов из монокристаллического карбида кремния, а также использования в качестве критерия эффективности полирования приведенной энергии переноса, показана целесообразность осуществления полирования в несколько переходов при последовательном применении специально приготовленных водных суспензий из алмазных микропорошков для супертонкого шлифования, порошков кубического нитрида бора для предварительного

полирования и порошков МАХ-фазы  $Ti_3AlC_2$  для полирования и нанополирования.

*У результаті дослідження закономірностей полірування монокристалічного карбїду кремнію і використання як критерію для оцінювання ефективності обробки приведеної енергії перенесення обґрунтовано доцільність послідовного застосування водних полірувальних суспензій з алмазних мікропорошків, порошків кубічного нітриду бору та МАХ-фазы  $Ti_3AlC_2$ .*

**Ключові слова:** монокристалічний карбід кремнію, енергія перенесення, ефективність полірування.

*As a result of studies of regularities polishing single-crystal silicon carbide and used as a criterion for assessing the effectiveness of the treatment given amount of energy transfer expedience consistent application of water-shaft polishing slurries of diamond micron powders, cubic boron nitride powders, MAX-phase powders  $Ti_3AlC_2$ .*

**Key words:** single crystal silicon carbide, the energy transfer, efficiency of polishing.

### Литература

1. Филатов Ю.Д. Полирование алюмосиликатных материалов инструментом со связанным полировальным порошком // Сверхтвердые матер. – 2001. – № 3. – С. 36–49.
2. Филатов Ю.Д. Полирование прецизионных поверхностей деталей из неметаллических материалов инструментом со связанным полировальным порошком // Сверхтвердые матер.–2008. – № 1. – С. 59–66.
3. Филатов Ю.Д., Сидорко В.И. Статистический подход к износу поверхностей деталей из неметаллических материалов при полировании // Сверхтвердые матер. – 2005. – № 1. – С. 58–66.
4. Filatov O.Yu., Poperenko L.V. In situ ellipsometry of surface layer of nonmetallic transparent materials during its finish processing // Applied Surface Sci. – 2006. – V. 253. – Is. 1. – P. 163–166.
5. In situ control of roughness of processed surfaces by reflectometric method / Yu.D. Filatov, O.Yu. Filatov, U. Heisel et al. // Optical Micro- and Nanometrology III, Proc. of SPIE. – 2010. – V. 7718. – P. 77181J–9.
6. Bound-abrasive grinding and polishing of surfaces of optical materials / Y.D. Filatov, O.Yu. Filatov, G. Monteil et al. // Optical Engineering. – 2011. – V. 50. – Is. 6. – P. 063401–063401–7.
7. Филатов А.Ю., Сидорко В.И. Локализация фрагментов налета на обрабатываемой поверхности при полировании неметаллических материалов // Сверхтвердые матер. – 2011. – № 5. – С. 73–87.
8. Properties of Silicon Carbide edited by Gary Lynn Harris / INSPEC, Institution of Electrical Engineers. – London, United Kingdom, 1995. – 289 p.
9. Закономерности финишной алмазно-абразивной обработки монокристаллического карбида кремния / Ю.Д. Филатов, А.Г. Ветров, В.И. Сидорко и др. // Сверхтвердые матер. – 2013. – № 5. – С. 63–71.
10. Золотарев В.М. Высокотемпературная спектральная излучательная способность SiC в ИК области // Оптика и спектроскопия. – 2007. – № 4. – Т. 103. – С. 609–619.
11. Тарала В.А. Влияние условий осаждения на состав и структуру пленок карбида кремния // Конденсированные среды и межфазные границы. – 2011. № 3. – Т. 13. – С. 348–357.
12. Исследование стойкости к окислению, механических характеристик материалов на основе МАХ-фаз систем Ti–Al–(C,N) и возможности их использования в качестве инструментальных связок и для полирования / Т.А. Прихна, А.В. Старостина, Д. Лицендорф и др. // Сверхтвердые матер. – 2014. – № 1. – С. 14–26.
13. Физические свойства алмаза: Справочник / под ред. Н.В. Новикова. – К.: Наукова думка, 1987. – 188 с.

14. Файнер Н.И., Косинова М.Л., Румянцев Ю.М. Тонкие пленки карбонитридов кремния и бора: синтез, исследование состава и структуры. – Рос. хим. журн. Рос. хим. об-ва им. Д.И. Менделеева. – 2001. – № 3. – Т. XLV. – С. 101–108.
15. Lohse B.H., Salka A., Wexlerl D. Raman spectroscopy as a tool to study TiC formation during controlled ball milling // J. of Appl. Phys. – 2005. – V. 97. – P. 114912–7.
16. Dielectric properties of Ti<sub>2</sub>AlC and Ti<sub>2</sub>AlN MAX phases: The conductivity anisotropy / N. Haddad, E. Garcia-Caurel, L. Hultman et al. // J. of Appl. Phys. – 2008. – V. 104. – P. 023531–10.

Поступила 02.06.2014

УДК 621.623

**Ю. Д. Філатов, В. І. Сідорко**, доктори технічних наук; **В. Д. Курілович, А. Г. Ветров<sup>1</sup>, М. А. Данильченко<sup>2</sup>; В. А. Ковальов<sup>2</sup>**, канд. техн. наук

<sup>1</sup>Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України, м. Київ

<sup>2</sup>Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»

### **ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ ОБРОБЛЕННЯ ДЕКОРАТИВНО-ХУДОЖНІХ ВИРОБІВ З ПРИРОДНОГО КАМЕНЮ ІНСТРУМЕНТОМ З КАЛІБРОВАНОГО ЗА ДІАМЕТРОМ АЛМАЗНО-ПОЛІМЕРНОГО ВОЛОКНА**

*Описано вплив реологічних характеристик розплаву, технологічних параметрів витягування волокна та конструктивних параметрів філь'єри на діаметр алмазно-полімерного волокна. Встановлено, що діаметр волокна суттєво залежить від діаметра каналу філь'єри, рівня розплаву та швидкості витягування волокна. Показано, що при калібруванні волокна за діаметром необхідно враховувати розміри зерен абразивного порошку.*

**Ключові слова:** алмазно-полімерне волокно, якість оброблення, природний камінь.

#### **Вступ**

Одним з визначальних чинників впливу на якість і продуктивність фінішного оброблення виробів з природного каменю є характеристика робочого шару інструменту. Марка, зернистість і концентрація алмазного порошку у зв'язці та фізико-механічні властивості останньої відіграють важливу роль у забезпеченні ефективного зняття оброблюваного матеріалу та формуванні високоякісної поверхні виробу. Крім того, від зазначених характеристик залежить рівномірність розподілу алмазних або абразивних зерен у зв'язці та можливість утворення їх конгломератів. Для запобігання утворенню конгломератів зерен доцільно використовувати інструмент, робочий шар якого сформований з окремих волокон [1–3]. При витягуванні через філь'єру алмазно-полімерного волокна з розплаву шихти, до якої входять полімерний матеріал – поліетилентерефталат (ПЕТФ) та абразивний порошок, зерна розташовуються всередині волокна, не контактуючи між собою.

#### **Аналіз виготовлення алмазно-полімерних волокон**

У результаті аналізу витягування алмазно-полімерних волокон (АПВ) з розплаву через філь'єру встановлено закономірності впливу діаметра філь'єри, швидкості витягування, висоти рівня розплаву, його густини, в'язкості та поверхневого натягу на витрати розплаву і діаметр волокна [2].

Діаметр волокна, що витягується з розплаву, визначаємо формулою [2]