

УДК 621.623

Ю. Д. Филатов*, А. Г. Ветров, В. И. Сидорко,
А. Ю. Филатов, С. В. Ковалев, В. Д. Курилович,
М. А. Данильченко, Т. А. Прихна, А. И. Боримский,
А. М. Куцай, В. Г. Полторацкий (Киев)

**filatov@ism.kiev.ua*

Полирование элементов оптико-электронной техники из монокристаллического карбида кремния

Обоснована целесообразность применения полировальных суспензий из алмазных микропорошков, порошков нитрида бора и МАХ-фазы Ti_3AlC_2 при исследовании закономерностей полирования монокристаллического карбида кремния и использовании в качестве критериев эффективности процесса обработки приведенной величины энергии переноса, плотности энергии переноса и плотности колебательной энергии, затрачиваемой на образование частиц шлама. В результате компьютерного моделирования микро- и нанопрофиля обработанной поверхности построены профилограммы, по которым определены значения параметров шероховатости и характерные соотношения, связывающие их с наиболее вероятным размером частиц шлама.

Ключевые слова: полирование, частица шлама, энергия переноса, шероховатость.

ВВЕДЕНИЕ

Оптические детали и элементы оптико-электронной техники из стекла, оптических и полупроводниковых кристаллов, оптической керамики и других неметаллических материалов в современном производстве изготавливают методами алмазно-абразивной обработки. Операции тонкого алмазного и супертонкого шлифования их поверхностей осуществляют при помощи функционально ориентированных алмазных инструментов со специальной характеристикой и конструкцией рабочего слоя. Заключительную операцию обработки – полирование – осуществляют в один или несколько переходов в зависимости от требований, предъявляемых к обрабатываемой поверхности. Полирование оптических деталей с требованиями по точности формы $N = 3-5$ интерференционных колец, по шероховатости $Ra = 0,01$ мкм, $Rz = 0,05$ мкм (ГОСТ 2789-73) и оптической чистоте – РIII-PV (ГОСТ 11141-84) можно выполнить при помощи полировальных порошков в связанном (инструмент типа Аквапол) или в свободном состоянии на полировальниках из различных смол, пенополиуретана, металлов (олова и свинца), полимерных или металлополимерных материалов. При этом тип полировального порошка и вид материала полировальника в зависимости от физико-химических свойств обрабатываемого материала выбирают исключительно на основе экспериментальных данных. Полирование прецизионных поверхностей деталей современных оптических и оптоэлектронных элементов из оптических и полупроводниковых кристаллов, в том числе “труднообрабатываемых” мо-

© Ю. Д. ФИЛАТОВ, А. Г. ВЕТРОВ, В. И. СИДОРКО, А. Ю. ФИЛАТОВ, С. В. КОВАЛЕВ, В. Д. КУРИЛОВИЧ,
М. А. ДАНИЛЬЧЕНКО, Т. А. ПРИХНА, А. И. БОРИМСКИЙ, А. М. КУЦАЙ, В. Г. ПОЛТОРАЦКИЙ, 2015

нокристаллов сапфира, карбида кремния, нитрида алюминия и нитрида галлия, с более высокими требованиями по качеству обработанных поверхностей, которые регламентируются стандартом U.S. Military Surface Quality Specification, MIL-PRF-13830B, осуществляется, как правило, при помощи микро- и нанопорошков абразивов в свободном состоянии с последующим химико-механическим полированием.

Шероховатость обработанной поверхности является наиболее важным показателем процесса финишной обработки прецизионных поверхностей деталей электронной техники и оптических систем из неметаллических материалов [1–5]. Она характеризует производительность процесса обработки и качество обработанных деталей, устанавливает их зависимость от размеров частиц шлама и их концентрации в зоне контакта инструмента и детали [6, 7]. Улучшение качества обработки прецизионных поверхностей элементов оптико-электронной техники из монокристаллического карбида кремния может быть достигнуто только при использовании новых видов инструмента и полировальных суспензий, а также многопереходных технологических процессов, оптимизация характеристик которых является актуальной задачей.

Для определения производительности алмазно-абразивной обработки прецизионных поверхностей оптических деталей и элементов оптико-электронной техники традиционно используют модель съема обрабатываемого материала при полировании, основанную на кластерной модели износа взаимодействующих при трении поверхностей твердых тел [6–9], и физико-статистическую модель образования и удаления с обрабатываемой поверхности частиц шлама [10]. Размеры этих частиц, их концентрацию в зоне контакта инструмента и обрабатываемой детали и 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 [11, 12].

Целью исследования является изучение влияния физико-механических свойств обрабатываемого материала и полировального порошка, режимных и кинематических параметров процесса обработки на интенсивность съема обрабатываемого материала и формирование микрорельефа обрабатываемой поверхности.

ЗАКОНОМЕРНОСТИ СЪЕМА ОБРАБАТЫВАЕМОГО МАТЕРИАЛА ПРИ ПОЛИРОВАНИИ ПЛОСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ЭЛЕМЕНТОВ ИЗ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КАРБИДА КРЕМНИЯ

На основе кластерной модели износа [6, 7, 13] 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 ω_{01l} и ω_{02k} (l, k – порядковые номера частот, определяемых по ИК-спектрам поглощения), можно определить число возбужденных фрагментов (элементарных групп SiC) $\xi_{lk} = \frac{\omega_{01l}^4}{(\omega_{01l}^2 - \omega_{02k}^2)^2}$, характерные частоты $\omega_{lk} = \frac{3\omega_{01l}\omega_{02k}}{2(\omega_{01l} + \omega_{02k})}$, чис-

ло молекулярных фрагментов в кластере $\xi = \left[\sum_{lk} \xi_{lk} \right]$ и энергию кластера

$E_c = \sum_{lk} [\omega_{0l} \hbar \xi_{lk}]$ (где $\hbar = 1,054 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – постоянная Планка). Обрабатываемый материал отделяется от поверхности в виде частицы шлама только тогда,

когда энергия кластера E_c превысит энергию связи SiC ($E_b = 3,24$ эВ [14]). Распределение частиц шлама по размерам описывается распределением Пуассона с параметром $\nu = E_b/E_c$, а вероятность образования частиц шлама пропорциональна $\text{vechr}(-\nu)$ [7, 13]. Диэлектрические проницаемости ε_l обрабатываемого и ε_k инструментального материалов определяются на характерных частотах ω_{lk} , а константа Лифшица $A_L = \hbar \omega_{123}$ рассчитывается в соответствии с формулой

$$\omega_{123} = \int_{\omega_1}^{\omega_2} \frac{[\varepsilon_1(\omega_{lk}) - \varepsilon_3][\varepsilon_2(\omega_{lk}) - \varepsilon_3]}{[\varepsilon_1(\omega_{lk}) + \varepsilon_3][\varepsilon_2(\omega_{lk}) + \varepsilon_3]} d\Omega, \quad (\Omega \in [\omega_1; \omega_2], \omega_1 \text{ и } \omega_2 - \text{минимальная и}$$

максимальная частоты в ИК-спектрах).

Для политипа 6H-SiC расстояния между соседними поверхностными молекулами и между молекулярными слоями определяются постоянными решетками $a = 0,3073$ нм и $c = 1,511$ нм [14]). Площадь поверхности i -ой частицы шлама определяется как $S_i = S_0 (i + 1)$ (где $i = \overline{1, N}$, N – число выборок, S_0 – площадь поверхности кластера, которая зависит от структуры обрабатываемого материала и числа молекулярных фрагментов ξ). Необходимо отметить, что площадь поверхности кластера существенно зависит от кристаллографической ориентации плоскости монокристалла, которая подвергается полированию. Рассматривая кристаллы с гексагональной структурой, можно определить каким образом из отдельных молекулярных фрагментов складываются кластеры, которые, отрываясь от обрабатываемой поверхности, превращаются в частицы шлама. При полировании плоскости [0001] число молекулярных фрагментов определяется в проекциях на оси координат x , y и z соответствующими межплоскостными расстояниями a , a и $c/6$, число молекулярных фрагментов $\xi = k_1 k_2 k_3$, а минимальная площадь поверхности частиц $S_0 = 3\sqrt{3} a^2 k_1 k_2 + (1/2) a c k_1 k_3 + (2/3) a c k_2 k_3$.

Плоские поверхности элементов из карбида кремния (плотность $\rho = 3,21$ г/см³, коэффициент теплопроводности $\lambda = 490$ Вт/(м·К), статическая диэлектрическая проницаемость – 6,5 [14]) 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. Частоты собственных колебаний молекулярных фрагментов SiC, определяемые по спектрам инфракрасного поглощения (ИК) или комбинационного рассеяния (КР), составляют $\omega_{01} = 15,0 \cdot 10^{13}$ с⁻¹ (794 см⁻¹) и $18,9 \cdot 10^{13}$ с⁻¹ (1000 см⁻¹) [15, 16]. Закономерности съема обрабатываемого материала при полировании монокристаллического карбида кремния исследовали при использовании специально приготовленных суспензий из алмазных микропорошков (АСМ), порошков кубического нитрида бора (КМ) и порошков МАХ-фазы Ti₃AlC₂ с различным зерновым составом [13, 17].

Производительность съема обрабатываемого материала при полировании монокристаллического карбида кремния определяли через коэффициент η 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 относитель-

ного перемещения, площади контакта, коэффициента теплопроводности обрабатываемого материала и температуры в контактной зоне [13].

Частоты собственных колебаний (ω_{02} , см^{-1}) молекулярных фрагментов полировальных порошков алмаза – 1135 и 1332 [13], кубического нитрида бора – 1056 и 1304 [18] и порошков МАХ-фазы Ti_3AlC_2 – 260, 420, 605, 1320 и 1590 [19]. Статическая диэлектрическая проницаемость полировальных порошков алмаза – 5,7, сBN – 2,5 и Ti_3AlC_2 – 3,5 [20].

Анализ экспериментальных данных показал, что производительность съема монокристаллического карбида кремния зависит от числа фрагментов в кластере, энергии кластера и наиболее вероятного размера частицы шлама [13]. На рис. 1, 2 приведены зависимости производительности полирования карбида кремния от коэффициентов объемного износа η и массового износа ξ_w , характеризующих интенсивность съема обрабатываемого материала в процессах механообработки [10]. Чем меньше величина этих коэффициентов, тем меньше производительность съема обрабатываемого материала. Результаты расчета энергетических характеристик процессов образования и удаления частиц шлама и съема обрабатываемого материала, а также экспериментальные данные по производительности съема монокристаллического SiC приведены в таблице.

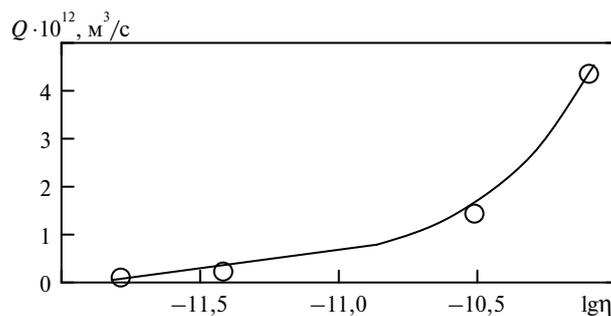


Рис. 1. Зависимость производительности полирования карбида кремния от коэффициента объемного износа: расчетные (—) и экспериментальные (○) данные.

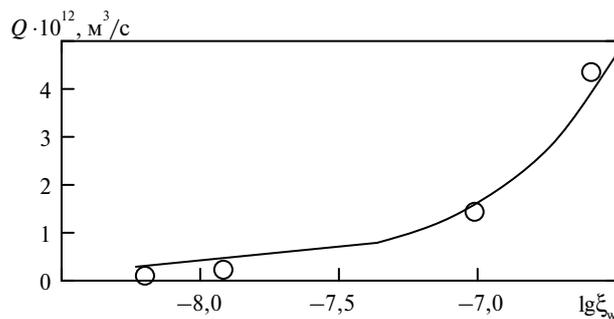


Рис. 2. Зависимость производительности полирования карбида кремния от коэффициента массового износа: расчетные (—) и экспериментальные (○) данные.

На рис. 3 приведена зависимость производительности полирования карбида кремния от энергии переноса $W = \lambda T / \xi_w$ (Дж/кг), которая характеризует энергию, переносимую частицами шлама с обрабатываемой поверхности в контактную зону. Полученная зависимость в логарифмических координатах линейная: $\lg Q = -a_1 \lg W + b_1$ ($a_1 = 0,99 \approx 1$, $b_1 = 0,31$ – коэффициенты, определенные при помощи метода наименьших квадратов). Из этого следует, что

производительность полирования монокристаллического карбида кремния обратно пропорциональна энергии переноса и может быть описана приближенной зависимостью $Q = k_1/\rho W$ ($k_1 = 6,6 \cdot 10^3$ Вт).

Результаты расчета производительности полирования и параметров шероховатости поверхностей элементов из монокристаллического карбида кремния и данные эксперимента

Параметры взаимодействия SiC с полировальным порошком	Полировальный порошок			
	АСМ (1)	КМ (2)	Ti ₃ AlC ₂ (3)	Ti ₃ AlC ₂ (4)
Наиболее вероятный	2,5	2,6	2,3	2,3
размер частицы шлама a_v , нм				
Энергия переноса W , Дж/кг	$5,9 \cdot 10^{11}$	$1,5 \cdot 10^{12}$	$1,2 \cdot 10^{13}$	$2,5 \cdot 10^{13}$
Плотность энергии переноса σ , Дж/м ²	$1,7 \cdot 10^6$	$4,4 \cdot 10^6$	$3,2 \cdot 10^7$	$6,6 \cdot 10^7$
Плотность колебательной энергии γ , Дж/м ²	$1,0 \cdot 10^{-4}$	$1,6 \cdot 10^{-5}$	$4,2 \cdot 10^{-4}$	$4,2 \cdot 10^{-4}$
Производительность обработки Q , м ³ /с	$4,39 \cdot 10^{-12}$	$1,59 \cdot 10^{-12}$	$2,1 \cdot 10^{-13}$	$1,0 \cdot 10^{-13}$
Экспериментальная величина производительности съема SiC:				
мг/мин	0,84	0,28	0,05	0,02
мкм/мин	0,26	0,01	0,015	0,006
м ³ /с	$4,38 \cdot 10^{-12}$	$1,47 \cdot 10^{-12}$	$2,4 \cdot 10^{-13}$	$9,3 \cdot 10^{-14}$
Погрешность расчета, %	0,1	8,1	14,0	10,4
Шероховатость обработанной поверхности:				
<i>Ra</i> , нм	$5,5 \pm 0,1$	$5,6 \pm 0,5$	$4,7 \pm 0,1$	$4,9 \pm 0,2$
<i>Rmax</i> , нм	$8,6 \pm 0,9$	$8,0 \pm 1,5$	$7,1 \pm 0,6$	$7,0 \pm 0,5$
<i>Rmax/Ra</i>	1,56	1,42	1,51	1,44
<i>Ra/a_v</i>	1,7	2,0	2,0	2,1
<i>Rmax/a_v</i>	3,9	3,5	3,1	3,1

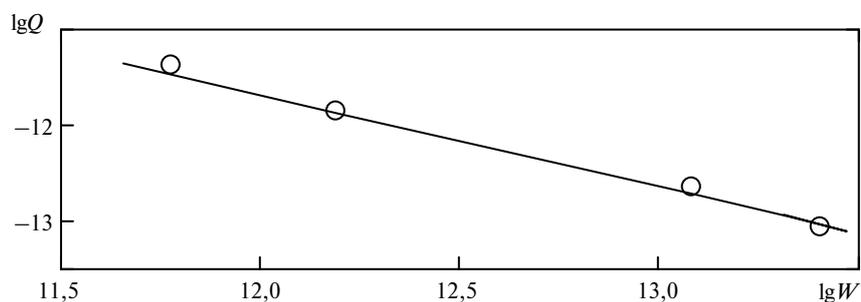


Рис. 3. Зависимость производительности полирования монокристаллического карбида кремния от энергии переноса: расчетные (—) и экспериментальные (○) данные.

Величина энергии переноса W зависит не только от режимных и кинематических параметров процесса обработки, характеристик полировального

порошка, смачивающе-охлаждающей технологической среды, а и от коэффициента теплопроводности обрабатываемого материала. Поэтому пользуются величиной приведенной энергии переноса $W_0 = (\lambda_{к8}/\lambda)W$, которая характеризует участие частиц шлама в передаче тепловой энергии при обработке карбида кремния по отношению к процессу обработки эталонного материала – оптического стекла марки К8, у которого $\lambda_{к8} = 0,95$ Вт/(м·К) [13].

На рис. 4 приведена зависимость производительности полирования карбида кремния от плотности энергии переноса $\sigma = WpV_s/S_s$ (Дж/м²), которая показывает затраты механической энергии на удаление с обрабатываемой поверхности одной частицы шлама объемом V_s с площадью поверхности S_s . Полученная зависимость в логарифмических координатах линейная: $\lg Q = a_2 \lg \sigma + b_2$ ($a_2 \approx -1$, $b_2 = -5,2$ – коэффициенты, определенные при помощи метода наименьших квадратов). Из этого следует, что производительность полирования монокристаллического карбида кремния обратно пропорциональна энергии, затрачиваемой на удаление частиц износа с обрабатываемой поверхности, и определяется формулой $Q = k_2/\sigma$ ($k = 6,2 \cdot 10^{-6}$ Вт·м). Следует отметить, что производительность полирования карбида кремния не коррелирует с плотностью колебательной энергии $\gamma = A_L/S_s$, Дж/м², которая определяется константой Лифшица A_L и показывает затраты энергии на образование одной частицы шлама с площадью поверхности S_s (см. таблицу).

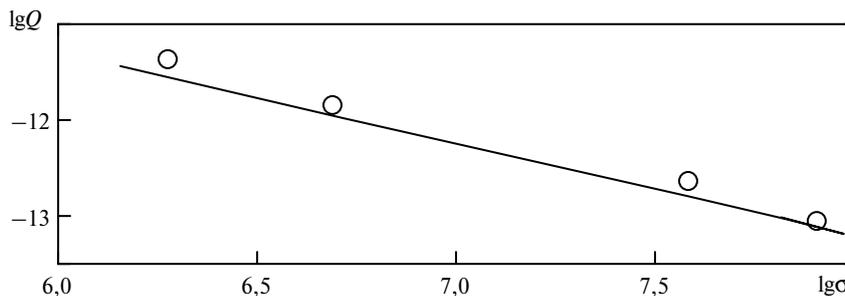


Рис. 4. Зависимость производительности полирования карбида кремния от энергии, затрачиваемой на удаление частиц шлама с обрабатываемой поверхности σ : расчетные (—) и экспериментальные (○) данные.

На рис. 5 приведена диаграмма, на которой в логарифмическом масштабе представлены значения приведенной энергии переноса, характерные для процессов полирования монокристаллического карбида кремния при помощи суспензий исследуемых порошков 1–4 (нумерация в соответствии с таблицей). Прямые линии $\lg W_0 = 10$ и $\lg W_0 = 9$, соответствующие классическому процессу полирования оптических поверхностей и процессу супертонкого шлифования, приведенные на диаграмме, позволяют выделить характерные зоны: 1 – супертонкое шлифование; 2 – полирование [13]. Приведенные величины энергии переноса, представленные на рис. 5, позволяют заключить, что полирование монокристаллического карбида кремния целесообразно осуществлять в несколько переходов, а именно: 1 – грубое полирование, соответствующее традиционному процессу супертонкого шлифования; 2 – предварительное полирование; 3 – полирование; 4 – нанополирование.

Сравнение результатов расчета производительности полирования плоских поверхностей элементов из монокристаллического карбида кремния при помощи суспензий из различных полировальных порошков с экспериментальными данными показало их хорошую сходимость (отклонение расчетных и

экспериментальных результатов составило 0,1–14,0 %, см. таблицу), что является подтверждением правомочности применения обобщенной модели образования и удаления частиц шлама и использования в качестве критерия для оценки эффективности процесса полирования приведенной величины энергии переноса.

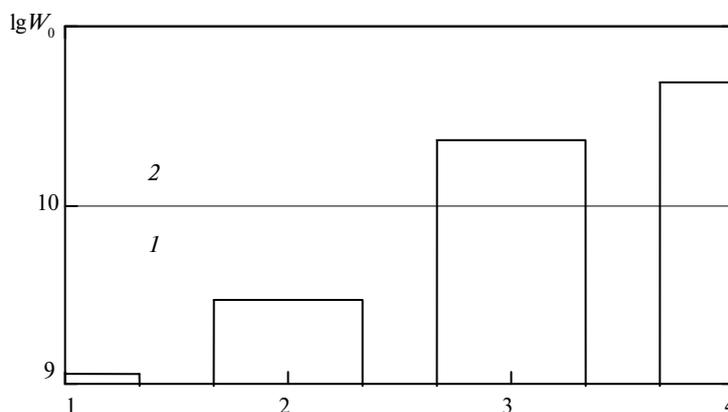


Рис. 5. Приведенная величина энергии переноса при полировании монокристаллического карбида кремния.

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ МИКРО- И НАНОПРОФИЛЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ ЭЛЕМЕНТОВ ИЗ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КАРБИДА КРЕМНИЯ

Анализ закономерностей образования и удаления частиц шлама при финишной обработке неметаллических материалов в рамках физико-статистической модели [7, 10] показал, что размеры частиц, образующихся в процессе полирования, удовлетворяют неравенству $d_i < R_{max}$, в отличие от частиц, образующихся при шлифовании, размер которых $d_i > R_{max}$. На основе этого можно считать, что удаление обрабатываемого материала при шлифовании и полировании неметаллических материалов является результатом процессов диспергирования микрочастиц и наночастиц соответственно. Размеры этих частиц, их концентрация в контактной зоне и характер взаимодействия с частицами износа и контактирующими поверхностями инструмента и детали определяют шероховатость обработанных поверхностей.

При исследовании влияния частиц шлама на формирование микрорельефа поверхности при алмазном шлифовании показано, что микрорельеф поверхности формируется в два этапа: на первом – в результате хрупкого разрушения поверхностного слоя образуется поверхность с равновесной шероховатостью, на втором – изнашиваются наибольшие выступы шероховатой поверхности под действием потока частиц шлама. Параметры микропрофиля уменьшаются на величину эрозионного износа в направлении от периферийных зон к центральной (Ra уменьшается в 1,5 раза) [21]. При исследовании закономерностей рассеяния частиц износа инструмента в процессе полирования установлено, что вероятность их рассеяния на частицах шлама и частицах износа максимальна при рассеянии вперед на центральных участках контактной зоны, а координатная зависимость высоты микропрофиля обрабатываемой поверхности определяется дифференциальным сечением и телесным углом рассеивания, размером частиц износа инструмента и наиболее вероятным размером частиц шлама [8, 22], а также показано, что частицы шлама и

частицы износа образуют фрагменты налета на обрабатываемой поверхности [11, 12].

На основе результатов исследования механизма формирования шероховатости обрабатываемой поверхности при алмазном шлифовании [23] разработан метод компьютерного моделирования ее микропрофиля [24], который обеспечивает хорошую сходимость результатов расчета высоты микронеровностей с данными эксперимента. При условии $d_i > R_{\max}$ высота микронеровностей обработанной поверхности определяется по отношению к средней линии профилограммы и пропорциональна поверхностной плотности частиц шлама, т. е. квадрату модуля функции состояния кластера $|\psi|^2$, м^{-1} , в соответствии с формулой $z(x) = k|\psi|^2$ [23, 24], а коэффициент пропорциональности определяется квадратом половины размера частицы шлама $(d_i/2)^2$.

Для расчета высоты неровностей профиля обрабатываемой поверхности при условии $d_i \leq R_{\max}$, когда линии выступов и впадин практически совпадают со средней линией профилограммы, коэффициент пропорциональности в формуле для расчета микропрофиля $z(x)$ следует определять как d_i^2 . Тогда функция, определяющая высоту микронеровностей поверхности в процессе полирования (при условии $d_i > R_{\max}$) в зависимости от координаты (вдоль базовой линии), выражается формулой

$$z(x) = d(k_0)\Phi_{k_0}^2\left(\frac{z}{d(k_0)}\right) + \sum_{i \geq 1}^{G-1} C_{k_i}^2 d(k_i)\Phi_{k_i}^2\left(\frac{z-y_i}{d(k_i)}\right), \quad (1)$$

где $C_{k_i} = \frac{\Phi_{k_0}(\sqrt{2k_0+1})}{\Phi_{k_i}(\sqrt{2k_i+1})} \sqrt{\frac{d(k_i)}{d(k_0)}}$ – постоянные, обеспечивающие “сшивку”

функций состояния кластеров; $y_i = \frac{d(k_0)}{2} + \sum_{i \geq 1}^i \sqrt{2k_i+1} \frac{d(k_i)}{2}$ – смещение

функций состояния кластера; $k_i = \overline{1, M}$ – индексы, определяющие случайную последовательность образования частиц шлама размером d_i , M – число групп

частиц шлама; $\Phi_k(x) = [k!2^k \sqrt{\pi}]^{-1/2} e^{-x^2/2} H_k(x)$ – функции параболического цилиндра, $H_k(x)$ – полиномы Эрмита.

Для расчета микропрофиля обрабатываемой поверхности по формуле (1) необходимо и достаточно определить размеры частиц шлама $d(k_i) = [S_0(k_i + 1)/\pi]^{1/2}$ и функцию их распределения по размерам (распределение Пуассона $P(i, \nu)$). Метод компьютерного моделирования микрорельефа поверхностей деталей из неметаллических материалов при полировании включает следующие процедуры. Сначала определяется число групп частиц шлама M , исходя из условия, что содержание наиболее крупных из них не превышает 1 %. Затем, полагая, что в группе M только одна частица шлама с максимальным размером, определяется число частиц в каждой группе $k(k_i) = \text{dpois}(k_i, \nu) / \text{dpois}(M, \nu)$ и общее число частиц шлама $G = \text{round} \sum_{k_i} k(k_i)$.

Базовая длина для моделирования профилограммы определяется как $L = \sum_{k_i} k(k_i)d(k_i)$. При применении метода Монте-Карло в качестве входной слу-

чайной величины используется последовательность чисел $k_i = \text{grois}(G, \nu)$, которая генерируется компьютером в программе Mathcad в соответствии с

распределением $P(i, v)$. По формуле (1) определяется высота микронеровностей профиля поверхности $Z(x)$ на участке $x \in [0, L]$, которые возникают вследствие образования частиц шлама $j = \overline{1, G}$. На рис. 6 приведена модельная профилограмма плоской поверхности элемента из монокристаллического карбида кремния после полирования суспензией из алмазного микропорошка АСМ 2/1.

По модельным профилограммам, полученным методом компьютерного моделирования микро- и нанорельефа полированной поверхности, определяли высотные параметры шероховатости: среднее арифметическое отклонение профиля $Ra = \frac{1}{L} \int_0^L Z(x) dx$ и наибольшую высоту профиля $Rmax$. В результате компьютерного моделирования при усреднении параметров шероховатости по пяти модельным профилограммам получены значения Ra , $Rmax$, величины их отношения $Rmax/Ra$, а также коэффициенты $k_a = Ra/a_v$ и $k_m = Rmax/a_v$ (см. таблицу).

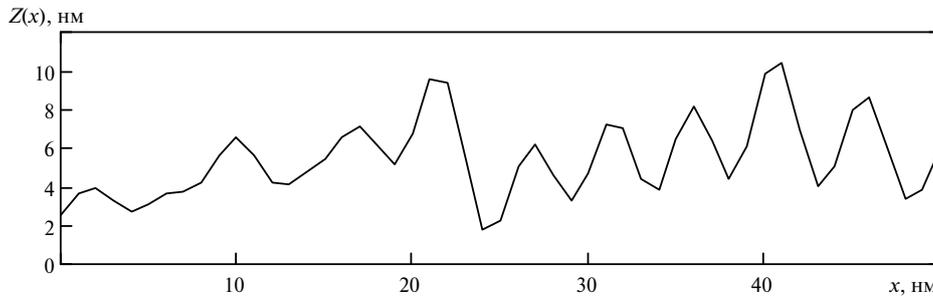


Рис. 6. Профилограмма поверхности элемента из монокристаллического карбида кремния.

На рис. 7 приведена зависимость наиболее вероятного размера частиц шлама от плотности колебательной энергии, затрачиваемой на образование частиц износа γ . Полученная зависимость может быть аппроксимирована линейной функцией $a_v = -\gamma/a_3 + b_3$ ($a_3 \approx 1,4 \cdot 10^6$ Дж/м³, $b_3 \approx 2,6$ нм – коэффициенты, определенные методом наименьших квадратов, погрешность аппроксимации – 1,2 %). Из этого следует, что чем меньше площадь поверхности S_s и наиболее вероятный размер частиц шлама, тем больше энергии необходимо затратить на их образование.

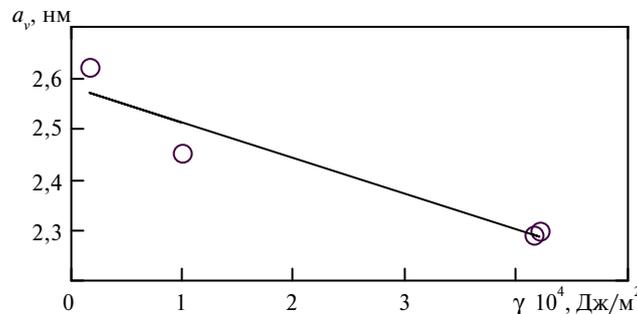


Рис. 7. Зависимость наиболее вероятного размера частиц шлама от энергии, затрачиваемой на образование частиц износа γ : экспериментальные (o) данные и их аппроксимация (—).

На рис. 8 представлены зависимости параметров шероховатости R_{\max} и R_a от наиболее вероятного размера частиц шлама a_v . Эти зависимости могут быть аппроксимированы линейными функциями $R_{\max} = k_m a_v + b_4$ ($k_m \approx 3,4$, $b_4 \approx 0,6$ нм – коэффициенты, погрешность аппроксимации 4,9 %, прямая 1) и $R_a = k_a a_v + b_5$ ($k_a \approx 2,0$, $b_5 \approx 0,2$ нм – коэффициенты, погрешность аппроксимации 3,2 %, прямая 2). Из этого следует, что при удалении с обрабатываемой поверхности элемента из карбида кремния более мелких частиц шлама ее высотные параметры шероховатости уменьшаются. Идеальная атомно-гладкая поверхность монокристаллического карбида кремния, которая не подвергается механическому или химико-механическому полированию (из которой не удаляются частицы шлама), характеризуется параметрами шероховатости $R_a \approx 0,2$ нм и $R_{\max} \approx 0,6$ нм, величины которых соответствуют 1–2 межплоскостным расстояниям кристалла политипа 6H-SiC кристаллографической ориентации [0001]. Следует также отметить, что при полировании карбида кремния на 3–4 переходах (см. рис. 5) отношение коэффициентов k_m и k_a характеризуется величиной 1,48. Величина отношения R_{\max}/R_a , определенная как частное от деления функции (2) на функцию (1) (см. рис. 7), практически не зависит от наиболее вероятного размера частиц шлама и имеет такое же значение $1,5 \pm 0,1$ (6,7 %).

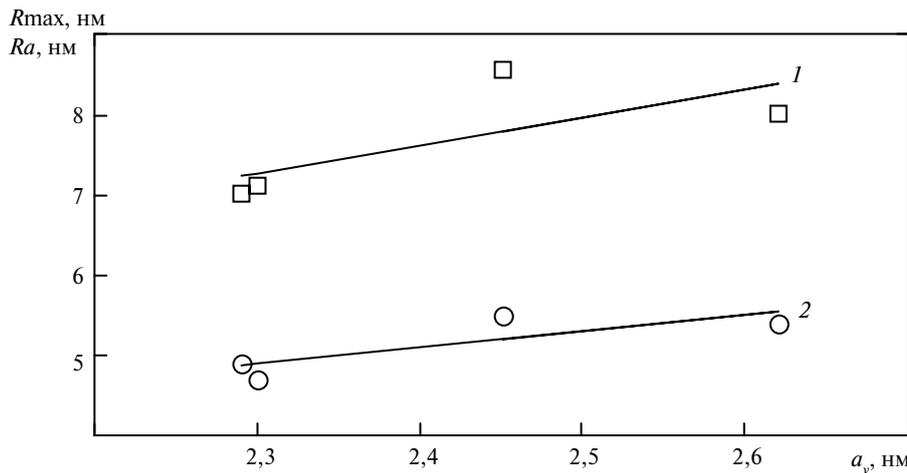


Рис. 8. Зависимости параметров шероховатости R_{\max} (1) и R_a (2) от наиболее вероятного размера частиц шлама: экспериментальные (\square , \circ) данные и их аппроксимация (—).

Для процесса полирования монокристаллического карбида кремния (при условии $d_i \leq R_{\max}$) можно использовать приближенные соотношения, характеризующие процессы формирования микро- и нанопрофиля обработанной поверхности: $R_a = 2,0a_v$; $R_{\max} = 3,4a_v$ и $R_{\max}/R_a = 1,5$. Для процессов шлифования неметаллических материалов (при условии $d_i > R_{\max}$) эти характерные соотношения имеют следующий вид [23]: $R_a = 0,04a_v$, $R_{\max} = 0,29a_v$ и $R_{\max}/R_a = 7,25$. Сравнивая эти соотношения для процессов шлифования и полирования, можно заключить, что коэффициенты k_m и k_a уменьшаются в 10–50 раз, что позволяет говорить о принципиальных отличиях в механизмах съема обрабатываемого материала и формирования микро- и нанорельефа обрабатываемой поверхности.

Шероховатость обрабатываемой поверхности в процессе полирования формируется вследствие образования и удаления частиц шлама, наиболее вероятный размер которых зависит от плотности колебательной энергии,

определяемой диэлектрическими и спектроскопическими характеристиками не только обрабатываемого материала, а и полировального порошка и технологической жидкости. Причем, чем больше энергии затрачивается на образование частиц шлама, тем меньше их размеры и тем меньше значения параметров шероховатости R_{\max} и R_a .

ВЫВОДЫ

В результате теоретических и экспериментальных исследований закономерностей процесса полирования монокристаллического карбида кремния показано, что в качестве критериев эффективности процесса полирования целесообразно использовать приведенную величину энергии переноса, плотность энергии переноса и плотность колебательной энергии, затрачиваемой на образование частиц шлама.

Полировать плоские поверхности элементов оптико-электронной техники из монокристаллического карбида кремния следует в несколько переходов, последовательно выполняя процессы грубого полирования, предварительного полирования, полирования и нанополирования.

В результате компьютерного моделирования микро- и нанопрофиля обработанной поверхности построены профилограммы, по которым определены значения высотных параметров шероховатости R_a и R_{\max} . Для процесса полирования монокристаллического карбида кремния выполняются приближенные соотношения, характеризующие процессы формирования микро- и нанопрофиля обработанной поверхности: $R_a = 2,0a_v$, $R_{\max} = 3,4a_v$ и $R_{\max}/R_a = 1,5$.

Обґрунтовано доцільність використання полірувальних суспензій з алмазних мікропорошків, порошоків нітриду бору та МАХ-фази Ti_3AlC_2 при дослідженні закономірностей полірування монокристалічного карбиду кремнію та використанні в якості критеріїв ефективності процесу обробки приведеної величини енергії переносу, густини енергії переносу та густини коливальної енергії, що витрачається на утворення частинок шламу. В результаті комп'ютерного моделювання мікро- і нанопрофілю обробленої поверхні побудовано профілограми, за якими визначено значення параметрів шорсткості та характерні співвідношення, що зв'язують їх з найбільш імовірним розміром частинок шламу.

Ключові слова: полірування, частинка шламу, енергія переносу, шорсткість.

As a result of studies of regularities polishing monocrystal silicon carbide and use as criteria efficient processing of the presented energy transfer, the energy density and density transfer vibration energy expended on the formation of particles of sludge proved the feasibility of applying diamond polishing suspensions of micron powders, powders of boron nitride and MAX-phase Ti_3AlC_2 . As a result of computer simulation surface of micro- and nanoprofile built profilograms, which values of roughness parameters and characteristic relations connecting them with the most probable size of sludge particles.

Keywords: polishing, slime particles, energy transfer, roughness.

1. Филатов Ю. Д., Сидорко В. И., Филатов А. Ю. и др. Шероховатость поверхностей при финишной алмазно-абразивной обработке // Сверхтв. материалы. – 2009. – № 3. – С. 68–74.
2. Filatov Y. D., Sidorko V. I., Filatov O. Yu. et al. Surface quality control in diamond abrasive finishing // Optical Measurement Systems for Industrial Inspection VI., Proc. SPIE. – 2009. – 7389, art. 73892O.
3. Филатов Ю. Д., Яцук В. П., Филатов А. Ю. и др. Оценка шероховатости и отражательной способности поверхностей изделий из неметаллических материалов при финишной алмазно-абразивной обработке // Сверхтв. материалы. – 2009. – № 5. – С. 70–81.

4. *Filatov Yu. D., Filatov O. Yu., Heisel U. et al.* In situ control of roughness of processed surfaces by reflectometric method // Optical Micro- and Nanometrology III, Proc. of SPIE. – 2010. – **7718**, art. 77181J.
5. *Filatov O. Yu., Poperenko L. V.* In situ ellipsometry of surface layer of nonmetallic transparent materials during its finish processing // Appl. Surf. Sci. – 2006. – **253**, N 1. – P. 163–166.
6. *Филатов Ю. Д.* Полирование алюмосиликатных материалов инструментом со связанным полировальным порошком // Сверхтв. материалы. – 2001. – № 3. – С. 36–49.
7. *Филатов Ю. Д.* Полирование прецизионных поверхностей деталей из неметаллических материалов инструментом со связанным полировальным порошком // Там же. – 2008. – № 1. – С. 59–66.
8. *Filatov Y. D., Filatov O. Y., Monteil G. et al.* Bound-abrasive grinding and polishing of surfaces of optical materials // Optical Eng. – 2011. – **50**, art. 063401–063401–7.
9. *Filatov Y. D., Filatov O. Yu., Monteil G. et al.* Bound-abrasive grinding and polishing of surfaces of optical materials // Current Developments in Lens Design and Optical Engineering XI; and Advances in Thin Film Coatings VI., Proc. of SPIE. – 2010. – **7786**, art. 778613.
10. *Филатов Ю. Д., Сидорко В. И.* Статистический подход к износу поверхностей деталей из неметаллических материалов при полировании // Сверхтв. материалы. – 2005. – № 1. – С. 58–66.
11. *Филатов А. Ю., Сидорко В. И.* Локализация фрагментов налета на обрабатываемой поверхности при полировании неметаллических материалов // Там же. – 2011. – № 5. – С. 73–87.
12. *Filatov, Yu. D., Monteil G., Sidorko V. I., Filatov O. Yu.* Formation of a deposit on workpiece surface in polishing nonmetallic materials // Smart Sensors, Actuators, and MEMS VI. Proc. SPIE. – 2013. – **8763**, art. 876336.
13. *Филатов Ю. Д., Ветров А. Г., Сидорко В. И. и др.* Закономерности финишной алмазно-абразивной обработки монокристаллического карбида кремния // Сверхтв. материалы. – 2013. – № 5. – С. 63–71.
14. *Properties of silicon carbide* edited by Gary Lynn Harris. – London, UK: INSPEC, Institution of Electrical Engineers, 1995. – 289 p.
15. *Золотарев В. М.* Высокотемпературная спектральная излучательная способность SiC в ИК области // Оптика и спектроскопия. – 2007. – **103**, № 4. – С. 609–619.
16. *Тарала В. А.* Влияние условий осаждения на состав и структуру пленок карбида кремния // Конденсированные среды и межфазные границы. – 2011. – **13**, № 3. – С. 348–357.
17. *Прихна Т. А., Старостина А. В., Лицкендорф Д. и др.* 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 // Сверхтв. материалы. – 2014. – № 1. – С. 14–26.
18. *Файнер Н. И., Косинова М. Л., Румянцев Ю. М.* Тонкие пленки карбонитридов кремния и бора: синтез, исследование состава и структуры // Рос. хим. ж. об-ва им. Д. И. Менделеева. – 2001. – **XLV**, № 3. – С. 101–108.
19. *Lohse B. H., Salka A., Wexlerl D.* Raman spectroscopy as a tool to study TiC formation during controlled ball milling // J. Appl. Phys. – 2005. – **97**, art. 114912.
20. *Haddad N., Garcia-Caurel E., Hultman L. et al.* Dielectric properties of Ti₂AlC and Ti₂AlN MAX phases: The conductivity anisotropy // Ibid. – 2008. – **104**, art. 023531.
21. *Филатов А. Ю., Сидорко В. И., Филатов Ю. Д.* Особенности формирования макро- и микрорельефа плоских поверхностей деталей из неметаллических материалов при алмазном шлифовании // Сверхтв. материалы. – 2007. – № 6. – С. 48–57.
22. *Филатов Ю. Д., Филатов А. Ю., Сирота О. О. и др.* Влияние рассеяния частиц износа инструмента в контактной зоне на формирование микропрофиля обработанной поверхности при полировании кварца // Там же. – 2010. – № 6. – С. 68–77.
23. *Филатов Ю. Д.* Механизм образования микрорельефа поверхности при обработке стекла // Там же. – 1991. – № 5. – С. 61–65.
24. *Филатов Ю. Д., Рогов В. В., Громов К. С.* Шероховатость поверхности при обработке стекла // Там же. – 1993. – № 4. – С. 42–46.

Ин-т сверхтвердых материалов
им. В. Н. Бакуля НАН Украины

Поступила 13.07.14