

УДК 621.623

Ю. Д. Филатов, А. Г. Ветров, В. И. Сидорко,
А. Ю. Филатов, С. В. Ковалев (г. Киев)

Закономерности финишной алмазно-абразивной обработки монокристаллического карбида кремния

В результате исследований закономерностей финишной алмазно-абразивной обработки монокристаллического карбида кремния на основе обобщенной модели образования и удаления частиц шлама и съема обрабатываемого материала показано, что использование в качестве критерия для оценки эффективности процесса обработки приведенной величины энергии переноса позволило обосновать целесообразность применения порошков карбида бора и диоксида титана для тонкого шлифования и порошков оксида хрома, оксида алюминия, диоксида церия и алмазных микропорошков АСМ 2/1 для супертонкого шлифования.

Ключевые слова: алмазно-абразивная обработка, частица шлама, энергия переноса, съем обрабатываемого материала.

ВВЕДЕНИЕ

В теории алмазно-абразивной обработки прецизионных поверхностей деталей электронной техники, оптических систем и декоративно-художественных изделий разработаны и успешно используются модель съема обрабатываемого материала при полировании диэлектриков, основанная на кластерной модели износа взаимодействующих при трении поверхностей твердых тел [1–2], и физико-статистическая модель образования и удаления с обрабатываемой поверхности частиц шлама [3]. Размеры этих частиц, их концентрация 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 [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, имеющего кристаллическую сверхструктуру, построенную из элементарных слоев, отличающихся друг от друга кристаллической упаковкой. Различные политипы отличаются электрофизическими (ширина запрещенной зоны, подвижность носителей заряда), оптическими (коэффициенты поглощения, преломления) и химическими (скорость окисления, диффузии примесей) свойствами. На основе карбида кремния формируются объекты, представляющие собой гетероструктуры в виде сочетания различных модификаций: кубической и гексагональных 3С-2Н, 3С-6Н, а также гетероструктурных наноконпозиций SiC с нитридами алюминия и галлия. В области силовой

быстродействующей электроники наибольший интерес представляют эпитаксиальные структуры на основе SiC; в СВЧ-электронике повышенной мощности – композиции GaN/AlN/SiC; в оптоэлектронике – структуры GaAlN/SiC, обеспечивающие излучение в УФ-области спектра. Для обеспечения технических требований, предъявляемых к подложкам SiC диаметром 50–100 мм, толщиной 350 ± 50 мкм и структурной политипной однородностью 4Н или 6Н, необходимо разработать технологию их финишной алмазно-абразивной обработки, в том числе заключительных операций обработки – полирования и нанополирования [8–9].

АЛМАЗНАЯ ОБРАБОТКА 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 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

$\omega_{lk} = \frac{3\omega_{01l}\omega_{02k}}{2(\omega_{01l} + \omega_{02k})}$, число молекулярных фрагментов в кластере $\xi = \left[\sum_{lk} \xi_{lk} \right]$

и энергию кластера $E_{кл} = \sum_{lk} [\omega_{01l} \hbar \xi_{lk}]$ (где \hbar – постоянная Планка). Обрабатываемый материал отделяется от поверхности в виде частицы шлама только тогда, когда энергия кластера $E_{кл}$ превысит энергию связи SiC ($E_{св} = 313$ кДж/моль $\approx 3,24$ эВ [8]).

Диэлектрические проницаемости обрабатываемого (ϵ_l) и инструментального (ϵ_k) материалов определяются на характерных частотах ω_{lk} , а константа Лифшица $\hbar\omega_{123}$ ($\hbar = 1,054 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – постоянная Планка) рассчитывается в соответствии с формулой

$$\omega_{123} = \int_{\omega_1}^{\omega_2} \frac{[\epsilon_1(\omega_{lk}) - \epsilon_3][\epsilon_2(\omega_{lk}) - \epsilon_3]}{[\epsilon_1(\omega_{lk}) + \epsilon_3][\epsilon_2(\omega_{lk}) + \epsilon_3]} d\Omega,$$

где $\Omega \in [\omega_1; \omega_2]$, ω_1 и ω_2 – минимальная и максимальная частоты в ИК-спектрах.

Площадь поверхности i -й частицы шлама определяется как $S_i = S_0(i + 1)$, где S_0 – площадь поверхности кластера, которая зависит от структуры обрабатываемого материала и определяется в зависимости от числа молекулярных фрагментов ξ . Для политипа 6Н-SiC расстояния между соседними поверхностными молекулами и между молекулярными слоями определяются постоянными решетки $a = 0,3073$ нм и $c = 1,511$ нм [8]. Распределение частиц шлама по размерам описывается распределением Пуассона с параметром $\nu = E_{св}/E_{кл}$, а вероятность образования частиц шлама пропорциональна $\nu \exp(-\nu)$ [1, 2].

Рассмотрим процесс полирования плоской поверхности детали (блока диаметром 60 мм – 19 пластинок общей площадью $S_{п} = 10,21$ см²) из карбида

кремния (политипа 6H-SiC) при помощи суспензий из микропорошков синтетического алмаза марки АСМ 2/1 на оловянном полировальнике диаметром $D = 100$ мм. Полирование пластинок из карбида кремния (плотность $\rho = 3,21$ г/см³, коэффициент теплопроводности $\lambda = 490$ Вт/(м·К), статическая диэлектрическая проницаемость – 6,5 [8]) осуществляли на шлифовально-полировальном станке мод. 2ШП-200М при частоте вращения полировальника 90 об/мин, давлении прижима детали к инструменту 49,5 кПа, смещении штриха $e_c = 30$ мм, длине штриха $L = 50$ мм, максимальном расстоянии между центрами инструмента и детали $e_0 = \sqrt{e_c^2 + (L/2)^2} = 39$ мм, средней температуре в зоне контакта 300 К и продолжительности цикла полирования 15 мин.

Частоты собственных колебаний молекулярных фрагментов, определяемые по спектрам инфракрасного поглощения или комбинационного рассеяния, составляют для SiC $\omega_{01} = 15,0 \cdot 10^{13}$ с⁻¹ (794 см⁻¹) и $18,9 \cdot 10^{13}$ с⁻¹ (1000 см⁻¹) [10, 11] и алмаза $\omega_{02} = 21,4 \cdot 10^{13}$ с⁻¹ (1135 см⁻¹) и $25,1 \cdot 10^{13}$ с⁻¹ (1332 см⁻¹) [12] соответственно. Число фрагментов SiC в кластере $\xi_0 = 15$. Энергия кластера $E_{cl0} \approx 1,8$ эВ, что почти вдвое меньше, чем энергия связи $E_{св}$. Для превращения кластера в частицу шлама, т. е. для его отделения с обрабатываемой поверхности, он должен перейти в возбужденное состояние, совершив $\mu = [E_{св}/E_{кл0}] = 2$ квантовых перехода, в результате чего число фрагментов SiC в кластере $\xi = \mu \xi_0 = 30$, а его энергия достигнет значения $E_{cl} = 3,65$ эВ. Исходя из параметров структуры политипа 6H-SiC [8] с учетом соотношения $k_1 k_2 k_3 = \xi$ ($k_1 = 2$, $k_2 = 3$, $k_3 = 5$), через постоянные решетки можно определить площадь поверхности кластера $S_0 = 2k_1 k_2 a^2 + 2k_1 k_3 ac + 2k_2 k_3 ac \approx 24,4 \cdot 10^{-18}$ м² и соответственно размеры частиц шлама $S_i = S_0 (i + 1)$ (где $i = 0, N - 1$, $N = 4$ – число выборок). Частицы шлама подчиняются распределению Пуассона $P(i, \nu)$ по площадям поверхности с параметром $\nu = 1,0$ и имеют размеры $d_i(i) \approx [S_i/\pi]^{1/2} \approx 2,8, 3,9, 4,8, 5,6$ нм и наиболее вероятный размер $a_\nu = 3,7$ нм. С учетом значения статической диэлектрической постоянной алмаза 5,7 [12] было определено значение константы Лифшица – $2,0 \cdot 10^{-21}$ Дж (13 мэВ) на частоте $\omega_{123} = 1,9 \cdot 10^{13}$ с⁻¹.

Число частиц шлама, которые отделяются с единицы площади обрабатываемой поверхности за единицу времени, определяется по формуле [1, 2]

$$n_1 = \frac{\omega_{123}}{4\pi^3 l_0^2} \nu \exp(-\nu) \quad (\text{где } l_0 - \text{расстояние между поверхностями инструмента и}$$

обрабатываемой детали, которое зависит от реологических свойств суспензии и размеров абразивных зерен) и составляет $2,5 \cdot 10^{22}$ м⁻²с⁻¹. Число всех частиц шлама, которые образуются на площади обрабатываемой поверхности за время контакта абразивного зерна с обрабатываемой поверхностью $t_k = d_a/u$ (время прохождения элементом обрабатываемого материала пути, равного размеру d_a одного абразивного зерна) с учетом их распределения $P(i, \nu)$ по площадям поверхности, определяется формулой $N(i) = n_1 S_\pi t_k P(i, \nu)$ (S_π – площадь обрабатываемой поверхности). Толщину зазора между поверхностями инструмента и детали, заполненного водной суспензией алмазных микропорошков, принимали равной среднему размеру их зерен $l_0 = 1,5$ мкм.

Объем удаленного при полировании материала в соответствии с обобщенной моделью съема можно определить через коэффициент η объемного износа [3, 6, 7], зависящий от размера $d_1(i)$ частиц шлама и времени t_k их контакта с поверхностью инструмента в соответствии с формулой

$$\eta = \sum_i \frac{d(i)^2}{4\beta(i)t_k}, \quad (1)$$

в которой величины $\beta(i)$ являются решениями N трансцендентных уравнений

$$\frac{\exp(-\beta(i)^2)}{\sqrt{\pi} \operatorname{erf}(\beta(i))} = \frac{1}{N(i) S_i} \sqrt{L_T d_a S_{\Pi} \vartheta}, \quad (2)$$

где $N(i)$ – количество i -х частиц шлама на обрабатываемой поверхности; S_i – площадь поверхности i -й частицы; $L_T = 2\pi e_0$ – длина пути трения элемента обрабатываемой поверхности по поверхности рабочего слоя инструмента; d_a – средний размер зерен полировального порошка; $S_k = S_{\Pi}$ – площадь контакта поверхностей инструмента и детали; $\vartheta = \frac{\lambda T L_T}{p_a u S_{\Pi}}$ – безразмерный параметр; λ – коэффициент теплопроводности обрабатываемого материала; T – температура в контактной зоне; p_a – номинальное давление прижима инструмента к детали; $u = \omega_{12} e_c$ – скорость относительного перемещения инструмента и детали; ω_{12} – угловая скорость вращения детали.

В результате решения уравнений (2) при значении безразмерного коэффициента $\vartheta = 2,5 \cdot 10^3$ по формуле (1) рассчитан коэффициент объемного износа $\eta = 1,5 \cdot 10^{-11} \text{ м}^2/\text{с}$, по которому определена величина производительности полирования поверхности монокристаллического карбида кремния $Q = \eta L_T = 3,6 \cdot 10^{-12} \text{ м}^3/\text{с}$, а также коэффициент массового износа $\xi_w = 4,8 \cdot 10^{-8} \text{ кг}/(\text{мс})$ и энергия переноса $W = 3,1 \cdot 10^{12} \text{ Дж}/\text{кг}$ [3]. При экспериментальном определении производительности съема обрабатываемого материала при полировании карбида кремния суспензией алмазных микропорошков АСМ 2/1 с помощью весового метода было показано, что она составляет 0,87 мг/мин, это соответствует линейному съему равному 0,27 мкм/мин и объемному съему – $4,5 \cdot 10^{-12} \text{ м}^3/\text{с}$. Погрешность расчетов при этом составила 19 %.

ФИНИШНАЯ АБРАЗИВНАЯ ОБРАБОТКА МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КАРБИДА КРЕМНИЯ

Исследование закономерностей съема обрабатываемого материала при полировании монокристаллического карбида кремния осуществлялось также при использовании суспензий из порошков суперабразива FR-Remillox фирмы “Fujimi Kenmazai” (Япония) на основе диоксида церия (CeO_2) со средним размером зерен 1 мкм, оксида алюминия (Al_2O_3) с размером зерен 1–2 мкм, оксида хрома (Cr_2O_3) с максимальным размером зерен 1–5 мкм, диоксида титана (TiO_2) и карбида бора (B_4C) с максимальным размером зерен 3 мкм при описанных выше условиях. Частоты собственных колебаний молекулярных фрагментов составляют (в см^{-1}): CeO_2 – 467; Al_2O_3 – 465, 615 и 655; Cr_2O_3 – 417, 445 и 625; TiO_2 – 435, 839 и 1100; B_4C – 470, 700, 790, 805 и 1100, а статические диэлектрические проницаемости полировальных порошков характеризуются величинами: CeO_2 – 21,2; Al_2O_3 – 11,5; Cr_2O_3 – 6,2; TiO_2 – 80,0 и B_4C – 5,2 [1, 2, 13–17].

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. Анализ приведенных данных показал, что производительность съема обрабатываемого материала (монокристаллического карбида кремния) зависит от числа фрагментов в кластере, энергии кластера и наибо-

более вероятного размера частицы шлама, что согласуется с зависимостью шероховатости обработанной поверхности от этих параметров [18]. На рис. 1, 2 приведены зависимости производительности финишной обработки карбида кремния от коэффициентов объемного износа η и массового износа ξ_w , характеризующих интенсивность съема обрабатываемого материала в процессах механообработки [3, 19]. Чем меньше величина этих коэффициентов, тем меньше производительность съема обрабатываемого материала при финишной обработке карбида кремния каждой из суспензий рассматриваемых порошков. Процессы тонкого и супертонкого шлифования, а также полирования неметаллических материалов характеризуются коэффициентами объемного и массового износа, а также интенсивностью износа, которая наиболее широкое применение находит в триботехнике, и энергией переноса, являющейся наиболее чувствительной к производительности процесса обработки [19].

Результаты расчета и экспериментальные данные по производительности финишной обработки монокристаллического карбида кремния при помощи суспензий из алмазных и абразивных порошков

Параметры контактного взаимодействия SiC с абразивным порошком	Полировальный порошок					
	ACM 2/1 (1)	CeO ₂ (2)	Cr ₂ O ₃ (3)	Al ₂ O ₃ (4)	TiO ₂ (5)	B ₄ C (6)
Число фрагментов ξ	30	32	32	25	119	6670
Энергия кластера $E_{кл}$, эВ	3,3	3,2	3,6	2,7	12,7	660,1
Параметр распределения Пуассона ν	1,0	1,0	0,9	1,2	0,26	0,005
Наиболее вероятный размер частицы шлама a_v , нм	3,7	4,1	4,1	3,4	5,3	20,1
Коэффициент объемного износа η , м ² /с	$1,5 \cdot 10^{-11}$	$1,1 \cdot 10^{-11}$	$2,3 \cdot 10^{-11}$	$3,5 \cdot 10^{-11}$	$1,1 \cdot 10^{-10}$	$3,2 \cdot 10^{-10}$
Коэффициент массового износа ξ_w , кг/(м·с)	$4,8 \cdot 10^{-8}$	$3,5 \cdot 10^{-8}$	$7,3 \cdot 10^{-8}$	$1,1 \cdot 10^{-7}$	$3,6 \cdot 10^{-7}$	$1,0 \cdot 10^{-6}$
Энергия переноса W , Дж/кг	$3,1 \cdot 10^{12}$	$4,2 \cdot 10^{12}$	$2,0 \cdot 10^{12}$	$1,3 \cdot 10^{12}$	$4,0 \cdot 10^{11}$	$1,4 \cdot 10^{11}$
Производительность обработки Q , м ³ /с	$3,6 \cdot 10^{-12}$	$2,7 \cdot 10^{-12}$	$5,6 \cdot 10^{-12}$	$8,6 \cdot 10^{-12}$	$2,8 \cdot 10^{-11}$	$7,9 \cdot 10^{-11}$
Экспериментальная величина производительности съема:						
мг/мин	0,87	0,64	0,93	2,00	4,5	13,0
мкм/мин	0,27	0,20	0,29	0,61	1,4	4,0
м ³ /с	$4,5 \cdot 10^{-12}$	$3,3 \cdot 10^{-12}$	$4,8 \cdot 10^{-12}$	$1,0 \cdot 10^{-11}$	$2,3 \cdot 10^{-11}$	$6,8 \cdot 10^{-11}$
Погрешность расчета, %	19	20	15	17	19	17

На рис. 3 приведена зависимость производительности финишной обработки карбида кремния от энергии переноса $W = \lambda T / \xi_w$ (Дж/кг), показывающая какая часть механической энергии переносится частицами шлама единичной массы с обрабатываемой поверхности в контактную зону. Полученная зависимость линейная и может быть аппроксимирована зависимостью $\lg Q = -$

$a \lg W + b$, в которой определенные при помощи метода наименьших квадратов коэффициенты составляют: $a = 0,89$, $b = -0,33$. Из этого следует, что производительность финишной алмазно-абразивной обработки монокристаллического карбида кремния обратно пропорциональна энергии переноса и может быть аппроксимирована гиперболической зависимостью $Q = k/\rho W$ ($k = 3,2 \cdot 10^4$ Вт, погрешность аппроксимации – 16 %).

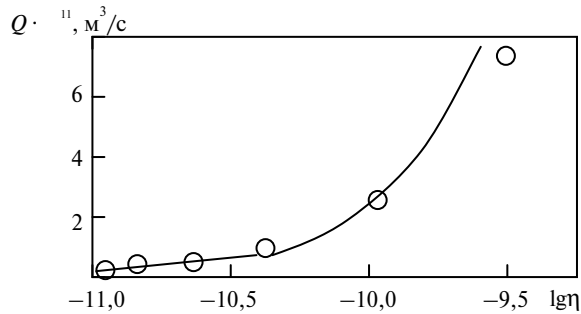


Рис. 1. Зависимость производительности финишной обработки карбида кремния от коэффициента объемного износа: теория (—), эксперимент (○).

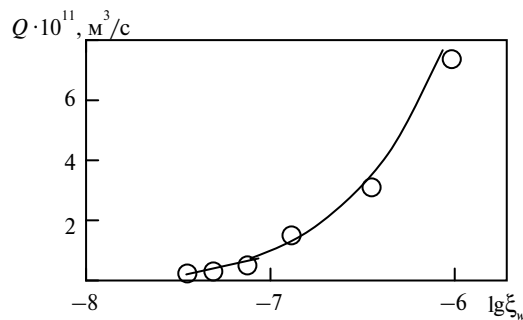


Рис. 2. Зависимость производительности финишной обработки карбида кремния от коэффициента массового износа: теория (—), эксперимент (○).

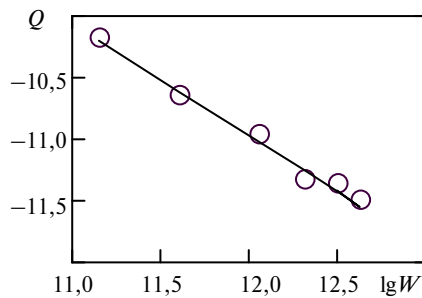


Рис. 3. Зависимость производительности финишной обработки карбида кремния от энергии переноса: теория (—), эксперимент (○).

Величина энергии переноса на операциях обработки: тонкое шлифование–супертонкое шлифование–полирование изменяется на три порядка [19] и может быть принята в качестве критерия при разделении процесса финишной алмазно-абразивной обработки неметаллических материалов на отдельные операции. В связи с тем, что энергия переноса W зависит не только от условий процесса обработки (режимных и кинематических параметров, характеристик абразивного материала, условий подачи и вида смачивающе-охлаждающей технологической среды), а и от коэффициента теплопроводности

сти обрабатываемого материала, целесообразно воспользоваться величиной приведенной энергии переноса $W_0 = [\lambda_{K8}/\lambda]W$, которая характеризует процесс обработки карбида кремния относительно процесса обработки оптического стекла марки К8 (эталон), коэффициент теплопроводности которого $\lambda_{K8} = 0,95 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$.

На рис. 4 приведена диаграмма, на которой в логарифмическом масштабе представлены значения приведенной энергии переноса, характерные для процессов финишной алмазно-абразивной обработки карбида кремния при помощи суспензий исследуемых порошков 1–6 (нумерация в соответствии с таблицей). Приведенные на диаграмме прямая $\lg W_0 = 10$, соответствующая классическому процессу полирования оптических поверхностей деталей из стекла марки К8, и прямая $\lg W_0 = 9$, соответствующая процессу супертонкого алмазного шлифования корунда, позволяют выделить три характерные зоны: тонкое и супертонкое шлифование, полирование. Это означает, что при финишной алмазно-абразивной обработке монокристаллического карбида кремния водной суспензией порошков карбида бора (B_4C , образец 6) или диоксида титана (TiO_2 , образец 5) происходит процесс тонкого шлифования, а при помощи суспензий из порошков оксида алюминия (Al_2O_3 , образец 4), оксида хрома (Cr_2O_3 , образец 3) и диоксида церия (CeO_2 , образец 2) – процесс супертонкого шлифования. Рассматриваемый процесс “алмазного полирования”, осуществляемый в описанный выше условиях при помощи суспензии из алмазных микропорошков АСМ 2/1, фактически является супертонким шлифованием. Из всех исследуемых порошков ни один не может быть использован в качестве абразива для полирования, а тем более нанополирования карбида кремния.

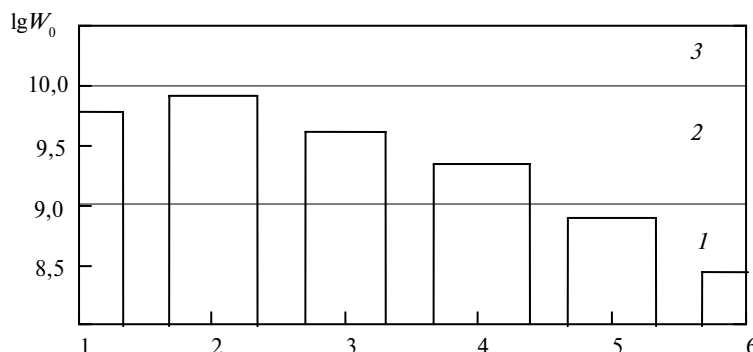


Рис. 4. Приведенная величина энергии переноса при финишной алмазно-абразивной обработке монокристаллического карбида кремния: тонкое (1) и супертонкое (2) шлифование, полирование (3).

Сравнение результатов расчета производительности тонкого и супертонкого шлифования монокристаллического карбида кремния при помощи суспензий из различных алмазных и абразивных порошков с экспериментальными данными показало их хорошую сходимость (отклонение расчетных и экспериментальных результатов не превышало 20 % (см. таблицу)), что является подтверждением эффективности применения обобщенной модели образования и удаления частиц шлама и съема обрабатываемого материала.

ВЫВОДЫ

В результате теоретических исследований закономерностей процесса финишной алмазно-абразивной обработки плоских поверхностей деталей из

монокристаллического карбида кремния на основе обобщенной модели образования и удаления частиц шлама и съема обрабатываемого материала и использования для оценки эффективности процесса обработки приведенной величины энергии переноса показана целесообразность применения абразивных порошков карбида бора, диоксида титана на операции тонкого шлифования и порошков оксида хрома, оксида алюминия, диоксида церия, алмазных микропорошков марки АСМ 2/1 – на операции супертонкого шлифования.

Описанные закономерности съема обрабатываемого материала при финишной алмазно-абразивной обработке монокристаллического карбида кремния подтверждаются экспериментальными данными.

В результаті досліджень закономірностей фінішної алмазно-абразивної обробки монокристалічного карбід кремнію на основі узагальненої моделі утворення та видалення частинок шламу і зняття оброблюваного матеріалу показано, що використання в якості критерію для оцінки ефективності процесу обробки приведеної величини енергії переносу дозволило обґрунтувати доцільність застосування порошків карбід бору і двооксиду титану для тонкого шліфування та порошків оксиду хрому, оксиду алюмінію, двооксиду церію і алмазних мікропорошків АСМ 2/1 для надтонкого шліфування.

Ключові слова: алмазно-абразивна обробка, частинка шламу, енергія переносу, зняття оброблюваного матеріалу.

As a result of researches of laws of finishing diamond and abrasive processing of monocrystal carbide of silicon on the basis of the generalised model of formation and removal of slime particles and removal a processed material it is shown, that use as criterion for an estimation of efficiency of process of processing of the resulted size of energy of carrying over has allowed to prove expediency of application of powders of boron carbide and titanium dioxide for thin grinding and powders chrome oxide, aluminium oxide, ceric oxide and diamond micropowders ACM 2/1 for superthin grinding.

Keywords: diamond and abrasive processing, slime particles, energy of carrying over, removal a processed material.

1. Филатов Ю. Д. Полирование алюмосиликатных материалов инструментом со связанным полировальным порошком // Сверхтв. материалы. – 2001. – № 3. – С. 36–49.
2. Филатов Ю. Д. Полирование прецизионных поверхностей деталей из неметаллических материалов инструментом со связанным полировальным порошком // Там же. – 2008. – № 1. – С. 59–66.
3. Филатов Ю. Д., Сидорко В. И. Статистический подход к износу поверхностей деталей из неметаллических материалов при полировании // Там же. – 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 // Appl. Surf. Sci. – 2006. – 253, Issue 1. – P. 163–166.
5. Filatov Yu. D., Filatov O. Yu., Heisel U. et al. In situ control of roughness of processed surfaces by reflectometric method // Proc. of SPIE: Optical Micro- and Nanometrology III. – 2010. – 7718. – P. 77181J–9.
6. Filatov Y. D., Filatov O. Y., Monteil G. et al. Bound-abrasive grinding and polishing of surfaces of optical materials // Optical Engineering. – 2011. – 50, N 6, art. 063401(7).
7. Филатов А. Ю., Сидорко В. И. Локализация фрагментов налета на обрабатываемой поверхности при полировании неметаллических материалов // Сверхтв. материалы. – 2011. – № 5. – С. 73–87.
8. Properties of silicon carbide / Ed. by G. L. Harris. – London, United Kingdom: INSPEC, Institution of Electrical Engineers, 1995. – 289 p.
9. Пат. 2345442 Россия, МПК H01L21/304. Способ изготовления нанополированных пластин из карбида кремния / В. М. Каневский, Е. О. Тихонов, А. Н. Дерябин. – Заявл. 06.12.06; Опубл. 27.01.09.
10. Золотарев В. М. Высокотемпературная спектральная излучательная способность SiC в ИК области // Оптика и спектроскопия. – 2007. – 103, № 4. – С. 609–619.

11. *Тарала В. А.* Влияние условий осаждения на состав и структуру пленок карбида кремния // Конденсированные среды и межфазные границы. – 2011. – **13**, № 3. – С. 348–357.
12. *Физические свойства алмаза:* Справ. / Под ред. Н. В. Новикова. – Киев: Наук. думка, 1987. – 188 с.
13. *Юрченко Э. Н., Кустова Т. Н., Бацанов С. С.* Колебательные спектры неорганических соединений. – Новосибирск: Наука, 1981. – 144 с.
14. *Лямкина Н. Э., Чиганова Г. А., Зеер Г. М.* Применение ультрадисперсных порошков $Al_2O_3-Cr_2O_3$ ударно-волнового синтеза для получения корундовой керамики // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2007. – **4**, № 2. – С. 87–89.
15. *Астапенко В. А., Суханов Л. П.* Влияние адсорбции воды на структурные и оптические свойства нанокластеров диоксидов кремния и титана // Российские нанотехнологии. – 2011. – **6**, № 1. – С. 109–117.
16. *Лифшиц Е. В., Шевякова Э. П., Остапенко И. Т. и др.* ИК-спектроскопия карбидов бора различной стехиометрии // Вопросы атомной науки и техники. – 2004. – № 3. – С. 19–22.
17. *Шельх А. И., Мелех Б. Т.* Кристаллы $SeAlO_3$: получение, электрические и оптические характеристики // Физика твердого тела. – 2003. – **45**, вып. 2. – С. 238–242.
18. *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.
19. *Сидорко В. И., Филатов Ю. Д.* Энергетические соотношения в физико-статистической модели процессов финишной обработки неметаллических материалов // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения. – Киев: ИСМ им. В. Н. Бакуля, 2005. – Вып. 8. – С. 285–287.

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

Поступила 24.07.13