

Другой путь реакции приводит к ускоренному гидролизу с преимущественным образованием тугоплавкого соединения BPO_4 . Такие системы не пригодны для использования в качестве связующих. Для предотвращения нежелательного пути в качестве реакционной среды использовали гидроксилсодержащие олигомеры, в частности, полиэтиленгликоль. Молекулярно-массовое распределение и конфигурацию получаемых олигомеров регулировали путем подбора оптимального химического состава и количества вводимых солей, ввода в реакционную среду органических активаторов – алкиламинов с алкильной цепочкой различной длины, а также регулирования температурного интервала синтеза, времени выдержки и скорости охлаждения расплава.

Розкрито методу отримання неорганічних олігомерів на основі похідних фосфорної та борної кислот, придатних для використання як зв'язуючих для НТМ-вмісних композитів. Показано способи регулювання молекулярно-масового розподілу і конфігурації отриманих олігомерів шляхом варіювання хімічного складу та вмісту компонентів, температурного режиму синтезу, часу витримання, швидкості охолодження, введення до реакційного середовища органічних активаторів з алкільним ланцюгом різної довжини.

Ключові слова: борофосфатні олігомери, керамічні зв'язуючі, полімероподібні неорганічні речовини, енергозберігаюча технологія.

FORMATION A MOLECULAR WEIGHT DISTRIBUTION OF OLIGOMERS B-P-O SYSTEMS TO BONDING MATRIX OF SHM-CONTAINING COMPOSITES

The data on the method of receiving of inorganic oligomers based on derivatives of phosphoric and boric acids suitable for use as binders for STM-containing composites are presented. The effect of regulation of the molecular weight distribution and configuration of obtained oligomers by varying the chemical composition and contents of components, the temperature of synthesis, holding time and cooling rate, introducing of organic activators with different alkyl chain lengths are shown.

Key words: borofosfatnye oligomers, ceramic binders, polymer-inorganic materials, energy-saving technology.

Поступила 06.06.16

УДК 621.713

Ю. Д. Филатов¹, В. И. Сидорко¹, доктора технических наук; **С. В. Ковалев¹,
В. А. Ковалев², О. Я. Юрчишин²**, кандидаты технических наук; **А. Г. Ветров¹**

¹Институт сверхтвёрдых материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины, г. Киев

²НТУУ «Киевский политехнический институт», Украина

ТОЧНОСТЬ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ПЛОСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ ОПТИКИ И МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ ПРИ ПОЛИРОВАНИИ

Исследованы закономерности образования формы обрабатываемой поверхности прецизионной детали при полировании. На основе обобщенной физико-статистической модели образования и удаления частиц шлама, а также метода усреднения относительной скорости перемещения инструмента и детали получены зависимости съема обрабатываемого материала, характеризующие эволюцию формы полированной поверхности и отклонение от плоскостности.

Ключевые слова: формообразование, полирование, плоскостность.

Введение

Точности формообразования прецизионных поверхностей деталей оптики и микроэлектроники достигают посредством выбора оптимальных кинематических и режимных параметров полирования, а также наиболее рациональной конструкции и характеристик полировальника. До сих пор моделирование образования формы прецизионных поверхностей и применение экспериментально-теоретических методов определения показателей формообразования зачастую осуществляют на основе уравнения Престона (Preston) [1–3] при допущениях и ограничениях, правомерных лишь в определенных условиях. Последнее время для изучения закономерностей формообразования полированных поверхностей оптических деталей из стекла и кварца, а также элементов оптоэлектроники из сапфира (Al_2O_3), нитридной керамики (AlN), кристаллов карбида кремния (SiC) и нитрида галлия (GaN) все чаще используют обобщенную модель съема обрабатываемого материала [4–7], основанную на кластерной модели износа [4] и физико-статистической модели [5] образования и удаления с обрабатываемой поверхности частиц шлама.

Цель настоящего исследования – изучить влияние кинематических параметров настройки станка на точность формообразования плоских поверхностей деталей оптики и микроэлектроники при полировании методами притира и жестких осей, а также определение их наиболее рациональных значений, при которых достигается требуемая точность формы полированных поверхностей.

Закономерности формообразования плоских поверхностей.

Интенсивность съема обрабатываемого материала при полировании в зависимости от радиуса ρ круговых зон обрабатываемой поверхности определяют по формуле [6] $Q(\rho) = \eta(\rho) \cdot L_t$ (где $\eta(\rho)$ – коэффициент объемного износа [5]). Коэффициент объемного износа $\eta(\rho)$ рассчитывают методом компьютерного моделирования [6; 7], исходя из параметров процесса полирования, а также характеристик обрабатываемого материала и полировального инструмента. Согласно размерам $d(i)$ и площади поверхности i -й частицы шлама S_i , количеству i -х частиц на обрабатываемой поверхности $N(i)$, продолжительности контакта с поверхностью зерна полировального порошка t_c , среднему размеру зерен полировального порошка d_a , коэффициенту теплопроводности обрабатываемого материала λ , температуре в контактной зоне T , номинальному давлению прижима полировальника к детали p_a , площади обрабатываемой поверхности S , длины L_t пути трения элемента обрабатываемой поверхности по поверхности полировальника, скорости относительного перемещения $u(\rho)$ находят безразмерный параметр $\vartheta(\rho) = \frac{\lambda T L_t}{p_a u(\rho) S}$, корни $\beta(\rho, i)$ системы m трансцендентных

уравнений $\frac{\exp(-\beta(\rho, i)^2)}{\sqrt{\pi} \operatorname{erf}(\beta(\rho, i))} = \frac{1}{N(i) S_i} \sqrt{L_t d_a S \vartheta(\rho)}$ и коэффициент объемного износа

$$\eta(\rho) = \sum_{i=1}^m \frac{d(i)^2}{4\beta(\rho, i)t_c} \quad [6].$$

Плоские поверхности элементов микроэлектроники из кварца, нитрида алюминия и нитрида галлия полировали традиционным методом притира суспензией алмазного микропорошка АСМ 2/1 на шлифовально-полировальном станке модели 2ШП-200М при следующих режимных и кинематических параметрах: частоте вращения полировальника диаметром 100 мм – 90 об./мин, усилие прижима блока деталей диаметром 60 мм к полировальнику – 50,5 Н, средней температуре в зоне контакта – 300 К, смещении штриха 30 мм, длине штриха $L \in [10, 40]$ и несимметрии $e_0 \in [30, 50]$.

Кристаллы кварца (плотность – 2,65 г/см³, энергия связи – 5,29 эВ, коэффициент теплопроводности – 10,7 Вт/(м·К), статическая диэлектрическая проницаемость – 4,34, постоянные решетки $a = 0,4913$ нм, $c = 0,5404$ нм, частота собственных колебаний молекулярных фрагментов SiO₂ – 440, 605, 800 и 1060 см⁻¹ [8; 9]) характеризовались константой Лифшица (12 мэВ) и средним безразмерным параметром $\mathfrak{Q} \approx 28$. Образцы керамики AlN (плотность – 3,26 г/см³, энергия связи – 6,2 эВ, коэффициент теплопроводности – 200 Вт/(м·К), статическая диэлектрическая проницаемость – 8,5, постоянные решетки $a = 0,3112$ нм, $c = 0,4982$ нм, частота собственных колебаний молекулярных фрагментов AlN – 248,6; 611,0; 657,4; 670,8; 890,0 и 912,0 см⁻¹ [10; 11]) характеризовались константой Лифшица (9,4 мэВ) и средним безразмерным параметром $\mathfrak{Q} \approx 590$. Монокристаллы нитрида галлия GaN (плотность – 6,15 г/см³, энергия связи – 5,4 эВ, коэффициент теплопроводности – 130 Вт/(м·К), статическая диэлектрическая проницаемость – 9,5, постоянные решетки $a = 0,3189$ нм, $c = 0,5185$ нм, частота собственных колебаний молекулярных фрагментов GaN – 144,0; 531,8; 558,8; 567,6; 734,0 и 741,0 см⁻¹ [8, 10–13]) характеризовались константой Лифшица (17,0 мэВ) и средним безразмерным параметром $\mathfrak{Q} \approx 214$.

С учетом того, что модуль вектора скорости относительного перемещения элементарного участка обрабатываемой поверхности по поверхности инструмента выражается формулой $V(\rho, r, l_k) = [(\omega_2 - \omega_1)(\omega_2 r^2 - \omega_1 \rho^2) + \omega_1 \omega_2 l_k^2]^{1/2}$, скорость относительного перемещения $u(\rho)$ элементарного участка обрабатываемой поверхности, усредненная по координатным переменным – радиусу круговых зон инструмента $r \in [l_k - \rho, l_k + \rho]$ и расстоянию между центрами полировальника и детали $l_k \in [e_0 - L/2, e_0 + L/2]$, выражалась формулой

$$u(\rho) = \frac{1}{2\rho L} \int_{e_0-L/2}^{e_0+L/2} dl_k \int_{l_k-\rho}^{l_k+\rho} V(\rho, r, l_k) dr, \quad (1)$$

где ω_1, ω_2 – угловая скорость вращения соответственно блока деталей и полировальника.

В результате расчетов показано, что при полировании SiO₂, AlN и GaN коэффициент объемного износа увеличивается при переходе от центральной зоны к периферийной и составляет ($\eta \cdot 10^{11}$): 1,83–1,86; 1,32–1,34 и 2,60–2,66 м²/с. Зависимости интенсивности съема обрабатываемого материала $Q(\rho)$,

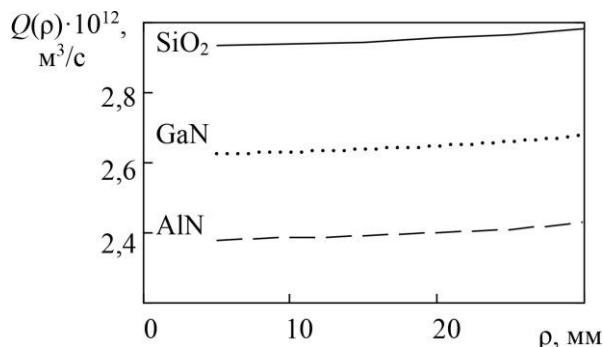


Рис. 1. Зависимости производительности полирования обрабатываемых материалов от радиуса круговых зон детали

характерные для полирования кварца, нитридной керамики на основе AlN и полупроводниковых кристаллов GaN, показаны на рис. 1. При любых значениях кинематических параметров настройки станка по длине и несимметрии штриха в крайних зонах обрабатываемой поверхности съем больше, чем в центральных, т.е. форма обработанной поверхности выпуклая («бугор»);

отклонение от плоскостности $\delta = \frac{Q(D_1/2) - Q(\rho=0)}{S} t$ (D_1 – диаметр детали; t – продолжительность полирования).

При моделировании формообразования плоских прецизионных поверхностей и исследовании влияния кинематических параметров настройки станка (длины L и несимметрии штриха e_0) на производительность полирования и точность формы обработанных поверхностей оптоэлектронных элементов установлено, что объем удаленного материала достигает максимума при увеличении несимметрии e_0 и длины L штриха, а форма обрабатываемой поверхности остается выпуклой при произвольной настройке кинематических параметров. В соответствии с данными приведенной ниже таблицы зависимости максимального и минимального отклонения от плоскостности обработанных поверхностей от коэффициента заполнения блока деталей ($K = 4S/\pi D_1^2$) при полировании SiO₂, AlN и GaN линейно убывающие. Из этого следует, что чем больше площадь обрабатываемой поверхности относительно размеров блока, тем точнее формообразование элементов.

Результаты расчета интенсивности съема обрабатываемого материала и экспериментального определения производительности полирования

Показатель	Значения для обрабатываемого материала		
	SiO ₂	AlN	GaN
Площадь обрабатываемой поверхности S , см ²	20,5	26,0	8,1
Коэффициент заполнения блока деталей K	0,72	0,92	0,29
Интенсивность съема материала в центральной круговой зоне, м ³ /с	$2,9 \cdot 10^{-12}$	$2,4 \cdot 10^{-12}$	$2,6 \cdot 10^{-12}$
Экспериментальная производительность съема:			
мг/мин	0,4	0,4	1,0
мкм/ч	4,8	3,1	12,0
м ³ /с	$2,7 \cdot 10^{-12}$	$2,2 \cdot 10^{-12}$	$2,7 \cdot 10^{-12}$
Погрешность расчета, %	8	8	3

При увеличении параметра e_0 отклонение от плоскостности обрабатываемой поверхности уменьшается при любом значении L . Зависимости неплоскостности элементов из кварца, нитрида алюминия и нитрида галлия от несимметрии штриха при $L = 10$ мм $\delta = \delta(e_0)|_{L=\text{const}}$ (составляют 0,02–0,4 мкм/ч) показаны на рис. 2; зависимости неплоскостности обрабатываемых поверхностей от длины штриха при $e_0 = 40$ мм $\delta = \delta(L)|_{e_0=\text{const}}$ (составляют 0,05–0,2 мкм/ч) монотонно возрастающие (рис. 3).

Отклонение от плоскостности обработанных поверхностей оптоэлектронных элементов из нитрида галлия, кварца и нитрида алюминия в случае различного заполнения блока деталей $\delta \approx 0,2$ мкм при кинематических параметрах $e_0 = 30$ –50 мм, $L = 10$ –50 мм. При этом средняя производительность съема обрабатываемых материалов составляет: кварца – 4,8 мкм/ч; нитрида алюминия – 3,1 мкм/ч; нитрида галлия – 12,0 мкм/ч, что позволяет долго механически полировать оптоэлектронные элементы при отклонении от плоскостности до 0,25 мкм. При этом точность формы $N \approx 1$ (интерференционных колец) соответствует требованиям, предъявляемым к оптическим поверхностям высокой точности.

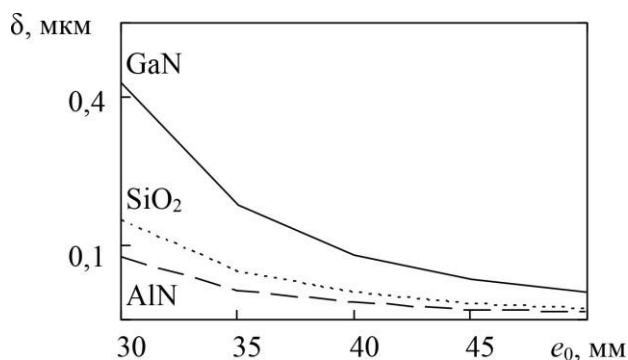


Рис. 2. Зависимости неплоскостности обработанных поверхностей от несимметрии штриха ($L = 10$ мм)

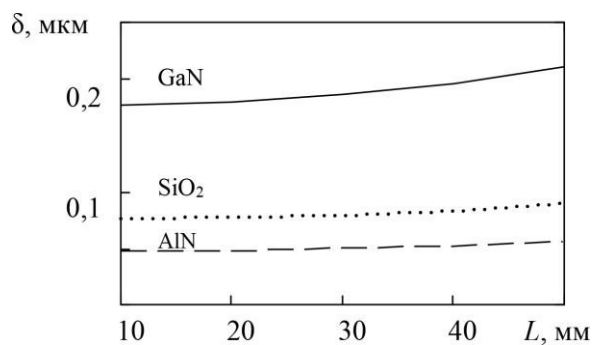


Рис. 3. Зависимости неплоскостности обработанных поверхностей от длины штриха ($e_0 = 40$ мм)

Плоские поверхности оптических деталей из кварца полировали также на шлифовально-полировальном устройстве, оснащённом системой мониторинга качества полированной поверхности [14; 15]. Детали из кварца диаметром 60 мм полировали по традиционной технологии (методом жестких осей) полировальным инструментом диаметром 60 мм, рабочий слой которого выполнен из 15 элементов «Аквапол» диаметром 10 мм, при следующих режимах: частота вращения детали – 800 об./мин; усилие прижима инструмента к детали – 10 Н; продолжительность полирования – 5–6 мин. При принудительном вращении детали (нижнего звена) инструмент (верхнее звено) вращался в том же направлении за счет сил трения между их притирающимися поверхностями: угловая скорость их вращения составляла $\omega_1 = 83,8 \text{ с}^{-1}$ и $\omega_2 = 78,5 \text{ с}^{-1}$ при отсутствии возвратно-поступательного перемещения ($L = 0$) и несимметрии штриха $e_0 \in [2,5; 15]$. При полировании плоских поверхностей деталей из кварца также использовали нетрадиционный метод обработки [16], при котором для взаимного перемещения инструмента и детали использовали не устройство станка, а эксцентричное вращение нижнего звена, за счет которого изменяли расстояние между их центрами.

При полировании плоских поверхностей по традиционной технологии модуль вектора скорости относительного перемещения элементарного участка обрабатываемой поверхности по рабочей поверхности инструмента выражался формулой $V_1(\rho, r, e_0) = [(\omega_2 - \omega_1)(\omega_2 r^2 - \omega_1 \rho^2) + \omega_1 \omega_2 e_0^2]^{1/2}$, ее усредненное по $r \in [e_0 - \rho, e_0 + \rho]$ значение определяли по формуле

$$u_1(\rho) = \frac{1}{2\rho} \int_{e_0 - \rho}^{e_0 + \rho} V_1(\rho, r, e_0) dr \quad (2)$$

При полировании плоских поверхностей при эксцентричном вращении нижнего звена периодически изменяли расстояние между центрами инструмента и детали O_1O_2 . В отличие от классического формообразования радиус дуги, по которой двигался центр верхнего звена по поверхности нижнего, определялся эксцентриситетом e_1 (расстоянием между осью вращения и геометрическим центром поверхности детали) и расстоянием e_2 между осями вращения детали и инструмента. Возвратно-поступательное перемещение детали относительно поверхности инструмента характеризовалось следующими параметрами: $e_1 \in [1 \text{ мм}; 10 \text{ мм}]$ и $e_2 \in [1 \text{ мм}; 3 \text{ мм}]$.

В полярной системе координат $O_1O_2 = e_2 \{ \cos\varphi + [(e_1/e_2)^2 - \sin^2\varphi]^{1/2} \}$, модуль вектора скорости относительного перемещения элементарного участка обрабатываемой поверхности детали по поверхности инструмента $V_2(\rho, r, e_1, e_2, \varphi) = [(\omega_2 - \omega_1)[\omega_2 r^2 - \omega_1(\rho^2 + e_1^2 + 2\rho e_1 \cos\varphi) + \omega_1 \omega_2 e_2^2]^{1/2}$, усредненная по $r \in [e_2 - e_1, e_2 + e_1]$ и $\varphi \in [0, \pi]$ относительная скорость перемещения в зависимости от радиуса ρ круговых зон

$$u_2(\rho) = \frac{1}{2\pi e_1} \int_0^\pi d\varphi \int_{e_2 - e_1}^{e_2 + e_1} V_2(\rho, r, e_1, e_2, \varphi) dr \quad (3)$$

Зависимости скорости относительного перемещения элементарного участка обрабатываемой поверхности по поверхности инструмента от радиуса круговых зон при полировании по традиционной технологии показаны на рис. 4, а, при эксцентричном вращении детали – на рис. 4, б.

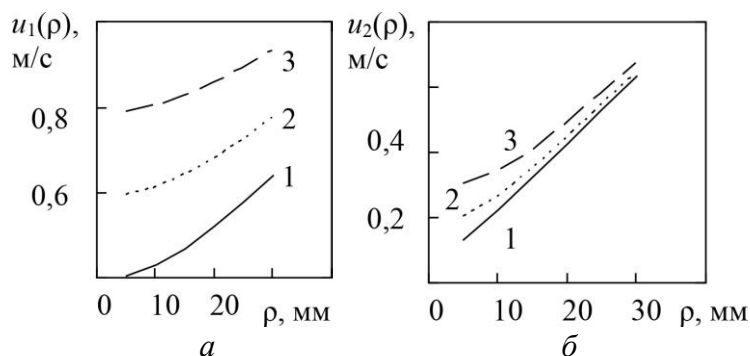


Рис. 4. Зависимость скорости относительного перемещения элементарного участка обрабатываемой поверхности по поверхности инструмента от радиуса круговых зон: а – $e_0 = 2,5$ мм (1); $e_0 = 7,5$ мм (2); $e_0 = 10$ мм (3); б – $e_1 = 1$ мм, $e_2 = 1$ мм (1); $e_1 = 5$ мм, $e_2 = 2$ мм (2); $e_1 = 10$ мм, $e_2 = 3$ мм (3)

$u_2(\rho) \rightarrow u_1(\rho)$. Действительно, рассчитанные по формулам (2) и (3) значения скорости в центральной зоне детали ($\rho \rightarrow 0$), например при $e_1 = 0$, $e_2 = e_0 = 7,5$ мм, полностью совпадают: $u_2(0) = u_1(0) = 0,59$ м/с.

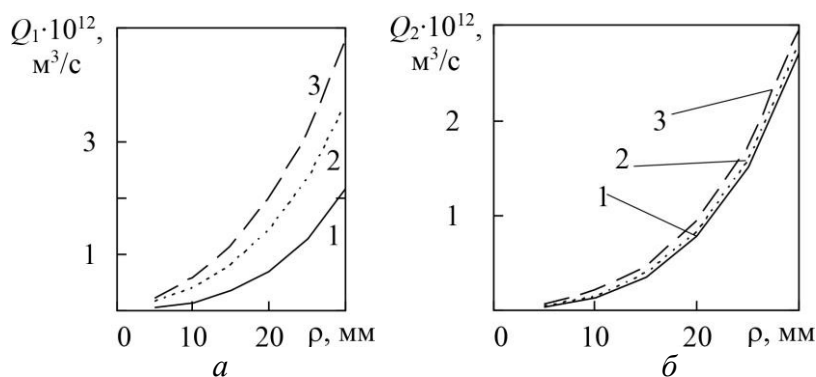


Рис. 5. Зависимости интенсивности съема обрабатываемого материала от радиуса круговых зон обрабатываемой поверхности: а – $e_0 = 2,5$ мм (1); $e_0 = 7,5$ мм (2); $e_0 = 10$ мм (3); б – $e_1 = 1$ мм, $e_2 = 1$ мм (1); $e_1 = 5$ мм, $e_2 = 2$ мм (2); $e_1 = 10$ мм, $e_2 = 3$ мм (3)

При увеличении кинематических параметров e_0 , e_1 и e_2 относительная скорость для рис. 4, а, б повышается. При предельном переходе $b \rightarrow a$ ($e_1 \rightarrow 0$, $e_2 \rightarrow e_0$) модуль скорости относительного перемещения элементарного участка обрабатываемой поверхности детали по поверхности инструмента для каждого радиуса круговых зон удовлетворяет условию

Зависимости расчетных значений интенсивности съема обрабатываемого материала от радиуса круговых зон детали, характерные для рис. 4, а, б, при различных параметрах настройки e_0 , e_1 , e_2 показаны на рис. 5. При переходе $a \rightarrow b$ ($e_1 \rightarrow 0$, $e_2 \rightarrow e_0 = 7,5$ мм), расчетные значения интенсивности съема обрабатываемого материала в средней зоне обрабатываемой поверхности ($\rho = 20$ мм)

удовлетворяет условию

составляют $Q_1 = 1,45 \cdot 10^{-12}$ м³/с и $Q_2 = 1,57 \cdot 10^{-12}$ м³/с и незначительно отличаются от экспериментально измеренных: $(1,4 \pm 0,2)$ мг и $(1,5 \pm 0,2)$ мг при $t = 6$ мин (отклонение – до 15%).

Монотонно возрастающие зависимости интенсивности съема обрабатываемого материала от радиуса круговых зон детали (рис. 5) свидетельствуют о том, что форма обработанной поверхности детали выпуклая («бугор»); эволюция формы обработанной поверхности детали характеризуется скоростью изменения отклонения от плоскостности при полировании $u = \delta/t$. На рис. 5, а скорость увеличения отклонения от плоскостности u зависит от несимметрии штриха e_0 и изменяется от 0,05 до 0,15 мкм/мин, при $t = 30$ мин и среднем значении $e_0 = 7,5$ мм отклонение от плоскостности обработанной поверхности детали $\delta = 2,0$ мкм. На рис. 5, б скорость увеличения отклонения от плоскостности обработанной поверхности зависит от кинематических параметров e_1 и e_2 . При увеличении e_1 отклонение от плоскостности детали незначительно возрастает при $\forall e_2$ и изменяется от 0,054 мкм/мин (при $e_2 = 1$ мм) до 0,059 мкм/мин (при $e_2 = 3$ мм). При увеличении e_2 неплоскостность обрабатываемой поверхности незначительно возрастает (рис. 6) при $\forall e_1$ и изменяется от 0,054 мкм/мин (при $e_1 = 1$ мм) до 0,059 мкм/мин (при $e_1 = 10$ мм). В течение $t = 30$ мин при средних значениях кинематических параметров $e_1 = 5,0$ мм и $e_2 = 2,0$ мм отклонение от плоскостности обработанной поверхности детали достигает 1,5–2,0 мкм.

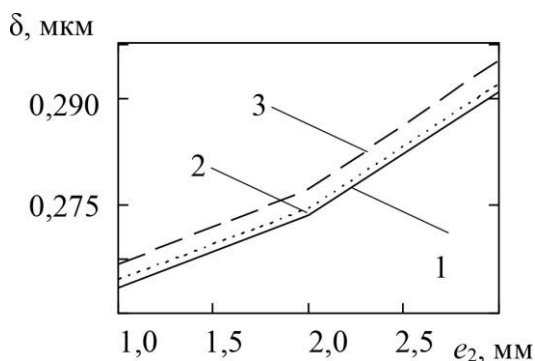


Рис. 6. Зависимости скорости изменения неплоскостности обработанной поверхности от параметра e_2 : 1 – $e_1 = 1$ мм, 2 – $e_1 = 5$ мм, 3 – $e_1 = 10$ мм

изменения формы обработанной поверхности (на «бугор») соответствует увеличению выпуклости независимо от кинематических параметров настройки станка. Это обусловлено тем, что при принятых значениях кинематических параметров настройки использовали обычный инструмент, рабочий слой которого состоял из полировальных элементов «Аквапол» с приблизительно постоянным коэффициентом заполнения поверхности и изнашивался неравномерно.

Выводы

Исследованы закономерности образования формы обрабатываемой плоской поверхности прецизионных оптоэлектронных элементов из кварца, нитридной керамики на основе AlN и полупроводниковых кристаллов GaN при алмазном полировании методом притира и оптических деталей из кварца при полировании инструментом со связанным полировальным порошком методом жестких осей. На основе обобщенной физико-

Результаты сравнительного анализа формообразования плоских поверхностей при полировании оптических деталей показали, что точность формы обработанных поверхностей, достигаемая при использовании обеих схем (рис.5, а, б) одинакова и оценивается отклонением от плоскостности 1,5–2,0 мкм. Это позволяет обрабатывать оптические детали низкой точности с плоскостностью поверхности $\sim 2,0$ мкм. Следует отметить, что для этого соотношения диаметров инструмента и обрабатываемой детали характер

статистической модели образования и удаления частиц шлама, расчета скорости относительного перемещения элементарного участка обрабатываемой поверхности по рабочей поверхности инструмента, усредненной по кинематическим параметрам, получены зависимости интенсивности съема обрабатываемого материала от радиуса круговых зон, характеризующие эволюцию формы полированной поверхности и отклонение от плоскостности. В результате исследования влияния кинематических параметров на точность геометрической формы обрабатываемой поверхности определили их наиболее рациональные значения, при которых достигается требуемая точность формообразования плоских поверхностей при полировании. Результаты расчета отклонения формы поверхностей деталей оптики и микроэлектроники подтверждены экспериментально.

Досліджено закономірності утворення форми оброблюваної поверхні прецизійної деталі при поліруванні. На основі узагальненої фізико-статистичної моделі утворення та видалення частинок шламу, а також методу усереднення відносної швидкості переміщення інструмента і деталі отримано залежності знімання оброблюваного матеріалу, що характеризують еволюцію форми полірованої поверхні та відхилення від площинності.

Ключові слова: *формування, полірування, площинність.*

PRECISION SHAPING FLAT SURFACES DETAILS OF OPTICS AND MICROELECTRONICS WHEN POLISHING

The regularities of formation forms a surface machined precision detail in the process of polishing. On the basis of the generalized physical-statistical model of the formation and removal of particles slime, and the method of averaging the relative speed of movement of the tool and workpiece are obtained depending removal of the processed material, characterizing the evolution of the shape of the polished surface and the deviation from flatness.

Key words: *shaping, polishing, flatness.*

Литература

1. ITIRM as a tool for qualifying polishing processes / O. W. Fahnle, T. Wons, E. Koch et al. // Applied Optics, July 2002. – 41. – N 19/1. – P. 4036–4038.
2. Characterization and Modeling of Oxide Chemical-Mechanical Polishing Using Planarization Length and Pattern Density Concepts / D. O. Ouma, D. S. Boning, J. E. Chung et al. // IEEE Transactions on semiconductor manufacturing. – 2002. – 15. – N 2. – P. 232–243.
3. Vukkadala P., Turner K.T., Sinha J.K. Impact of Wafer Geometry on CMP for Advanced Nodes // J. Electrochem. Soc. – 2011. – 158. – N 10. – P. 1002–1009.
4. Bound-abrasive grinding and polishing of surfaces of optical materials / Y. D. Filatov, O. Y. Filatov, G., Monteil et al. // Optical Engineering. – 2011. – 50. – N 6. – P. 063401–063401-7.
5. Filatov Y. D., Sidorko V. I. Statistical approach to wear of nonmetallic workpiece surfaces in polishing // J. of Superhard Mater. – 2005. – 27. – N 1. – P. 53–60.
6. Polishing substrates of single crystal silicon carbide and sapphire for optoelectronics / O. Y. Filatov, V. I. Sidorko, S. V. Kovalev et al. // Funct. mater. – 2016. – 23. – N 1. – P. 104–110.
7. Производительность полирования анизотропных монокристаллических материалов для оптоэлектроники / А. Ю. Филатов, В. И. Сидорко, С. В. Ковалев и др. // Сверхтвердые матер. – 2016. – № 2. – С. 65–76.

8. Galashev A. Y. Computer study of the Raman spectra and infrared optical properties of gallium nitride and gallium arsenic nanoparticles with SiO₂ core and shell // J. Nanopart. Res. – 2014. – N 16. – P. 2351–2368.
9. Режим доступа: <http://www.almazoptics.com/Quartz.htm>. Quartz, crystal quartz, crystalline quartz - Almaz Optics, Inc.
10. Режим доступа: <http://www.semiconductors.co.uk/nitrides.htm>. Properties of the III-nitride semiconductors.
11. Phonon dispersion and Raman scattering in hexagonal GaN and AlN / V.Yu. Davydov, Yu.E. Kitaev, I.N. Goncharuk et al. // Phys. Rev. – V. 58. – N 19. – P. 12899–12907.
12. Harima H. Properties of GaN and related compounds studied by means of Raman scattering // J. Phys.: Condens. Matter. – 2002. – 14. – P. 967–993.
13. Куэй Р. Электроника на основе нитрида галлия. – М.: Техносфера, 2011. – 592 с.
14. In situ control of roughness of processed surfaces by reflectometric method / O. Yu. Filatov, O. Y. Filatov, U. Heisel et al. // Optical Micro- and Nanometrology III, Proc. SPIE. – 2010. – V. 7718. – P. 77181J–77181J-9.
15. Filatov O. Y., Poperenko L. V. In situ ellipsometry of surface layer of nonmetallic transparent materials during its finish processing // Applied Surface Sci. – 2006. – 253. – N. 1. – P. 163–166.
16. Филатов Ю. Д., Юрчишин О.Я. Моделирование процесса прецизионного формообразования плоских поверхностей // Вісн. Нац. техн. ун-ту України «Київський політехнічний інститут». Сер. Машинобудування. – К. – 2010. – № 58. – С. 241–244.

Поступила 30.05.16

УДК 621. 922. 34: 666. 233: 620.178.16.

Ю. П. Линенко-Мельников, канд. техн. наук¹, **И. Ю. Агеева**, канд. физ.-мат. наук,
С. Е. Агеев, канд. техн. наук²

¹ *Институт сверхтвёрдых материалов им. В. Н. Бакуля НАН Украины, г. Киев*

² *Национальный авиационный университет, г. Киев, Украина*

МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ КИНЕТИКИ БЫСТРОПРОТЕКАЮЩИХ ПРОЦЕССОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВОЛОКОННОЙ ОПТИКИ

Предложен метод исследования контактного взаимодействия в системе инструмент – заготовка при шлифовании, основанный на применении волоконной оптики. Приведена схема измерительной системы, описана аппаратура и созданные устройства, приведены результаты исследования. Показано, что предложенный метод позволяет фиксировать биение рабочей поверхности алмазного инструмента на холостом ходу и под нагрузкой, наблюдать за состоянием алмазных зёрен при шлифовании. Разработанные устройства обладают высокой чувствительностью к фиксации быстропротекающих процессов в зоне контакта алмазных кругов с заготовкой на созданном экспериментальном стенде для исследования врезного шлифования.

Ключевые слова: алмазный инструмент, шлифование, устройство с использованием волоконной оптики, измерительная система, труднодоступное место, быстрое контактное взаимодействие, экспериментальный стенд.