

УДК 621.923

**Ю. Д. Филатов<sup>1, \*</sup>, В. И. Сидорко<sup>1</sup>, С. В. Ковалев<sup>1</sup>,  
А. Ю. Филатов<sup>1</sup>, Г. Монтей<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Институт сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля  
НАН Украины, г. Киев, Украина

<sup>2</sup>Высшая национальная школа механики и микротехники,  
г. Безансон, Франция

\*[flатов@ism.kiev.ua](mailto:flатов@ism.kiev.ua)

### **Мониторинг точности формы плоских поверхностей в процессе полирования деталей оптики и микроэлектроники**

*Показана возможность in-process мониторинга формы поверхностей оптических деталей непосредственно в процессе полирования с использованием технологии конфокальной хроматической визуализации. Установлено, что существует линейная зависимость между отклонением формы сигнала от прямоугольной и изменением формы обрабатываемой поверхности.*

***Ключевые слова:** полирование, точность формообразования, отклонение формы.*

#### **ВВЕДЕНИЕ**

Повышение точности формообразования прецизионных поверхностей деталей оптических систем и элементов электронной техники при механическом (МП) и химико-механическом (ХМП) полировании может быть достигнуто за счет управления кинематическими и режимными параметрами процесса обработки, выбора конструкции инструмента и характеристик полировальной суспензии или коллоидной системы наночастиц. До недавнего времени существующие модели процессов механической обработки, а также методики расчета интенсивности съема материала с обрабатываемой поверхности, износа инструмента и эволюции их формы при механической обработке неметаллических материалов базировались на уравнении износа Престона (Preston) [1–3] и применялись при допущениях и ограничениях, которые можно использовать лишь в определенных условиях. В настоящее время для моделирования процесса формообразования прецизионных поверхностей оптических деталей и элементов оптоэлектронной техники из керамики, оптических и полупроводниковых кристаллов используется обобщенная модель съема обрабатываемого материала [4–6], основанная на кластерной модели полирования [7–9] и физико-статистической модели образования частиц шлама и их удаления с обрабатываемой поверхности [10]. Для мониторинга качества обработки непосредственно в процессе полирования разработаны *in situ* методы лазерной эллипсометрии [11] и рефлектометрии [12, 13], которые позволяют контролировать изменения параметров шероховатости и коэффициента отражения, являющиеся следствием образования налета продуктов износа на обрабатываемой поверхности [14–16]. До по-

следнего времени традиционный метод контроля точности формообразования обработанных поверхностей осуществлялся путем измерений в статических условиях после завершения процесса обработки, поэтому его применение для *in-process* мониторинга значения отклонения формы поверхности от заданной не было возможным.

Целью работы была разработка метода мониторинга точности геометрической формы плоских прецизионных поверхностей деталей оптики и микроэлектроники в процессе полирования и устройства для его осуществления.

### **IN-PROCESS КОНТРОЛЬ ФОРМЫ ПЛОСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ПОЛИРОВАНИИ**

Для *in-process* контроля формы обрабатываемой поверхности нами предложено непосредственно в процессе полирования фиксировать взаимное расположение ее отдельных участков с помощью датчика, который использует технологию конфокальной хроматической визуализации (STIL S.A., France, OP 300 VM) [17]. При полировании образцов диаметром 60 мм датчик мод. OP300VM фиксирует относительную высоту элементарного участка обрабатываемой поверхности, который расположен в заданной круговой зоне радиуса  $R_c$ . Эта высота изменяется за время каждого оборота детали и ее зависимость от времени обработки описывается периодической функцией. Интервал изменения этой величины составляет  $\sim 100$  мкм и зависит от торцевого биения держателя образца и клиновидности детали (отклонения высоты образца на диаметре  $2R_c$ ). Из этого следует, что при вращении детали без эксцентриситета использование стационарно установленного датчика позволяет определять значение отклонения высоты образца в заданной круговой зоне и на всем диаметре, т. е. контролировать клиновидность обрабатываемой детали. При этом невозможно получение какой-либо информации о форме обрабатываемой поверхности и ее отклонении от плоскостности. Для устранения этого недостатка необходимо либо осуществлять сканирование поверхности при перемещении датчика по радиусу обрабатываемой поверхности, либо устанавливать обрабатываемые детали эксцентрично по отношению к оси их вращения.

В процессе полирования плоских оптических поверхностей по классической технологии (методом притира) детали, расположенные на блоке в различных круговых зонах, вращаются вокруг оси, совпадающей с центром блока, а притир вращается и совершает возвратно-поступательное перемещение по поверхности обрабатываемых деталей с обязательным “выходом за край”. При этом образуется, в общем случае, сферическая поверхность большого радиуса, отклонение от плоскостности которой характеризуется предельно допустимым отклонением стрелки кривизны блока деталей  $h$  и отдельной детали  $h_1 = (D_1/D_0)^2 h$  от идеальной плоскости ( $D_1$  и  $D_0$  – диаметры детали и блока соответственно). Такая же ситуация возникает при полировании одиночной детали по методу жестких осей, при котором ее горизонтальное перемещение осуществляется за счет эксцентричного расположения относительно оси вращения.

На рис. 1 представлена схема, показывающая перемещение обрабатываемой детали (нижнее звено), которая эксцентрично вращается вокруг оси  $O'$ , относительно датчика, установленного на расстоянии  $R_c$  от этой оси. Расстояние между осью вращения детали (блока деталей) и геометрическим центром обрабатываемой поверхности в общем случае определяется межцентровым расстоянием (ПМЦ)  $O'O'' - e_0 = [e_1^2 + e_2^2]^{1/2}$  ( $e_1, e_2$  – проекции ПМЦ на

оси  $x$  и  $y$  соответственно). При вращении детали стационарно установленный датчик фиксирует относительное положение точек обрабатываемой поверхности, координаты которых описываются пространственной кривой  $z(x, y)$ , являющейся линией пересечения цилиндрической поверхности, на образующей которой находится датчик, и сферической обрабатываемой поверхности (рис. 2).

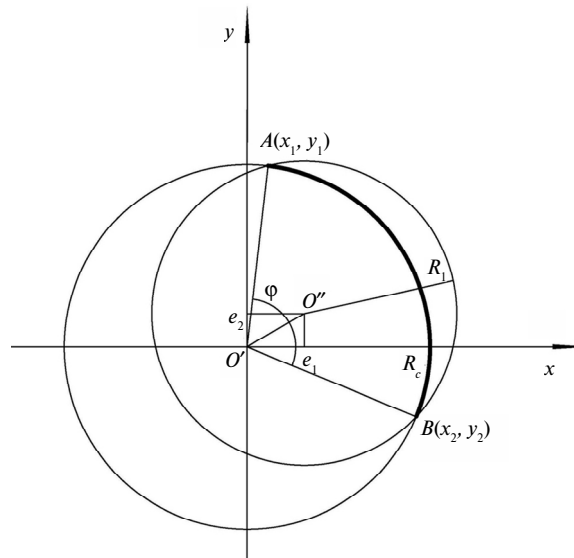


Рис. 1. Схема перемещения обрабатываемой детали относительно датчика.

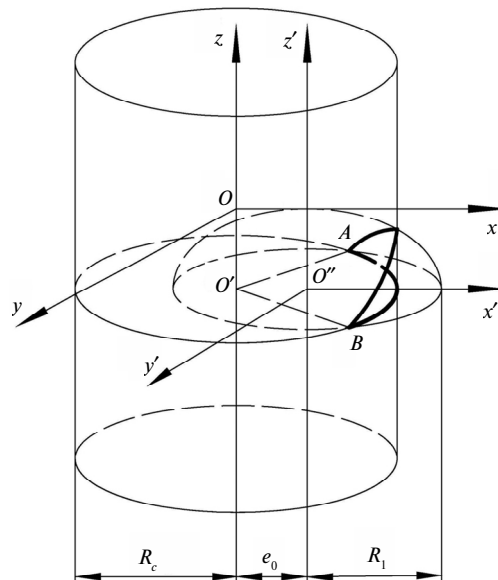


Рис. 2. Пространственная кривая  $z(x, y)$  на выпуклой сферической поверхности.

В системе координат  $XYZ$  с началом координат в точке  $O$ , расположенной на оси вращения детали (блока деталей) на расстоянии, приблизительно равном радиусу кривизны выпуклой (вогнутой) сферической поверхности обра-

батываемой детали, уравнения цилиндрической и сферической поверхностей в общем виде представляются следующим образом (см. рис. 2):

$$\begin{cases} x^2 + y^2 = R_c^2; \\ (x - e_1)^2 + (y - e_2)^2 + [z \pm R(h)]^2 = R(h)^2, \end{cases} \quad (1)$$

где  $R(h) = \frac{D_1}{8h} - \frac{h}{2}$  – радиус кривизны поверхности детали.

Решая систему уравнений (1) для случая выпуклой сферической поверхности, можно получить уравнение  $z(x, y)$  в виде

$$z(x, y) = -R(h) + \sqrt{R(h)^2 - R_c^2 - e_0^2 + 2e_1x + 2e_2y} \quad (2)$$

и выразить его в полярной системе координат формулой

$$z(h, \varphi) = -R(h) + \sqrt{R(h)^2 - R_c^2 - e_0^2 + 2R_c e_1 \cos \varphi + 2R_c e_2 \sin \varphi}. \quad (3)$$

Функции  $z(x, y)$  и  $z(h, \varphi)$ , выражаемые в соответствии с формулами (2) и (3), описывают участок пространственной кривой – дугу АВ (см. рис. 2), проекция которой на горизонтальную плоскость является дугой окружности радиуса  $R_c$ , ограниченной точками  $A(x_1, y_1)$  и  $B(x_2, y_2)$  (см. рис. 1). Решая систему уравнений

$$\begin{cases} x^2 + y^2 = R_c^2; \\ (x - e_1)^2 + (y - e_2)^2 = R_1^2, \end{cases}$$

и вводя обозначение  $a = R_c^2 - R_1^2 + e_0^2$ , можно определить координаты точек

$$A(x_1, y_1) \text{ и } B(x_2, y_2): y_{1,2} = \frac{ae_2}{2e_0^2} \left[ 1 \pm \sqrt{1 + \left(\frac{e_0}{e_2}\right)^2 \left(\frac{4e_1^2 R_c^2}{a^2} - 1\right)} \right], \quad x_{1,2} = \sqrt{R_c^2 - y_{1,2}^2} \text{ и}$$

$$\text{значения полярных углов } \varphi_{1,2} = \arcsin\left(\frac{y_{1,2}}{R_c}\right).$$

Рассмотрим процесс полирования одиночной детали диаметром 40 мм, установленной со смещением относительно оси вращения (см. рис. 1), которое характеризуется параметрами  $e_1 = 10$  мм,  $e_2 = 5$  мм и  $e_0 = 11,2$  мм. При вращении детали датчик, установленный на расстоянии  $R_c = 25$  мм от оси вращения, фиксирует относительное положение пространственной кривой  $z(x, y)$ , область определения которой ограничивается координатами точек  $A(x_1, y_1)$  и  $B(x_2, y_2)$ :  $x_1 = 5,3$  мм;  $y_1 = 24,4$  мм;  $x_2 = 22,7$  мм;  $y_2 = -10,4$  мм, и углами  $\varphi_1 = 77,8^\circ$  (1,358 рад),  $\varphi_2 = -24,7^\circ$  (-0,431 рад). Кривая  $z(x, y)$ , являющаяся линией пересечения цилиндра диаметром  $2R_c$  и сферы с радиусом кривизны  $R(h)$ , в системе координат  $XYZ$  представляется в общем виде уравнением

$$F(\varphi) = \begin{pmatrix} R_c \cos \varphi \\ R_c \sin \varphi \\ z(h, \varphi) \end{pmatrix}.$$

Эта кривая является частным случаем сечения сферической поверхности цилиндрической, аналогичной известным кривой Вивиани и гиппопеде Евдокса.

При повороте детали на угол  $(\varphi_1 - \varphi_2) = 102,5^\circ$  длина проекции дуги  $AB$  на плоскость  $XU$  составляет 44,7 мм и определяет длительность сигнала, который формируется датчиком на каждом обороте детали. Форма сигнала определяется в соответствии с формулой (рис. 3)

$$Z(h, \varphi) = \begin{cases} h_0, \varphi < \varphi_2; \\ z(h, \varphi), \varphi_2 \leq \varphi \leq \varphi_1; \\ h_0, \varphi > \varphi_1, \end{cases} \quad (4)$$

где  $h_0$  – относительное положение обрабатываемой поверхности по высоте.

Отклонение формы сигнала от прямоугольной определяется как  $\delta = \pm[z(h, \varphi_m) - z(h, \varphi_1)]$  ( $\varphi_m = (\varphi_1 + \varphi_2)/2$  – среднее значение угла, а знаки  $(\pm)$  соответствуют выпуклой и вогнутой поверхности детали) и зависит от неплоскостности поверхности детали (стрелки кривизны  $h$ ). При анализе формы поверхности детали, которая характеризуется значениями стрелки кривизны  $h$ , лежащими в пределах [0,5 мкм; 5,0 мкм], и радиусами кривизны, соответствующими диапазону [40 м; 400 м], показано, что зависимость отклонения формы сигнала от неплоскостности детали является линейной (рис. 4), что позволяет по значению отклонения сигнала от прямоугольной формы  $\delta$  определить значение неплоскостности  $h$  поверхности детали. Для рассматриваемого варианта процесса полирования при значении отклонения формы сигнала  $\delta = 0,25, 1,0, 2,5$  мкм, неплоскостность выпуклой поверхности детали составляет  $h = 0,5, 2,0, 5,0$  мкм, что соответствует расчетной формуле  $h = k\delta$  ( $k \approx 2,0$  – коэффициент пропорциональности).

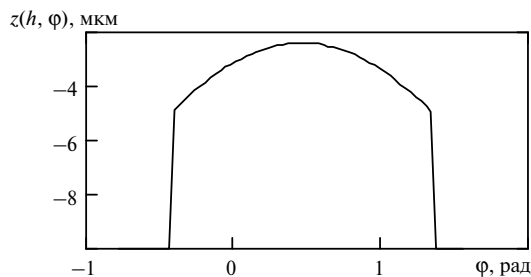


Рис. 3. График функции  $z(h, \varphi)$ , которая определяет форму сигнала датчика.

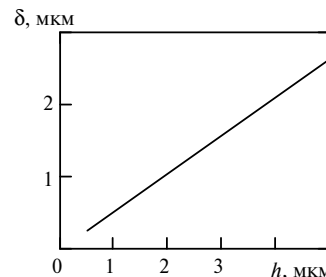


Рис. 4. Зависимость отклонения формы сигнала от неплоскостности детали.

Рассматривая процесс полирования детали из кварца диаметром 36 мм, установленной со смещением  $e_1 = e_0 = 10$  мм, на экспериментальной установке с датчиком мод. ОР300VM ( $R_c = 25$  мм), можно определить область определения кривой  $z(x, y)$ :  $x_1 = x_2 = 20,1$  мм,  $y_1 = 14,9$  мм,  $y_2 = -14,9$  мм,  $\varphi_1 = 36,7^\circ$ ,  $\varphi_2 = -36,7^\circ$ . На рис. 5 приведена зависимость относительной высоты элементарного участка поверхности детали от угла поворота для трех оборотов детали на холостом ходу. Амплитуда изменения этой величины равна значению отклонения формы сигнала от прямоугольной  $\delta = +3,0$  мкм, по которой можно определить неплоскостность поверхности детали  $h = k_1\delta \approx 10$  мкм ( $k_1 \approx 3,3$  – коэффициент пропорциональности). Полученное значение неплоскостности детали из кварца согласуется с экспериментальными данными, полученными при помощи оптической измерительной системы ALICONA в статических условиях [9].

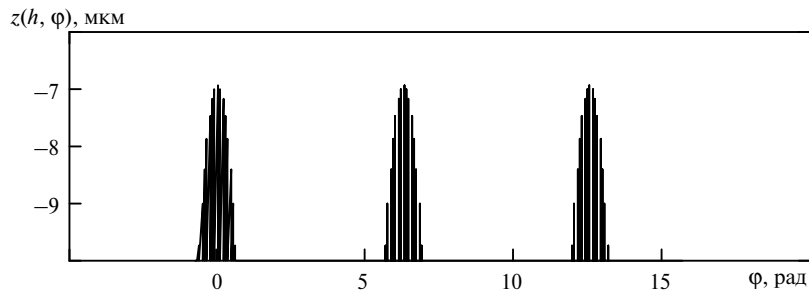


Рис. 5. Зависимость относительной высоты элементарного участка поверхности от угла поворота обрабатываемой детали.

Рассмотрим процесс полирования деталей диаметром 60 мм, закрепленных на блоке диаметром 300 мм (16 штук). Детали, установленные в крайней круговой зоне, смещены относительно оси вращения на расстояния  $e_0 = 120$  мм, а датчик установлен на расстоянии  $R_c = 130$  мм. При вращении блока детали датчик фиксирует относительное положение точек обрабатываемой поверхности на деталях, установленных на краю блока, область определения кривой  $z(x, y)$  ограничивается координатами  $x_1 = x_2 = 137,9$  мм,  $y_1 = 24,1$  мм,  $y_2 = -24,1$  мм и углами  $\varphi_1 = 9,9^\circ$  (0,173 рад),  $\varphi_2 = -9,9^\circ$  (-0,173 рад). При полировании оптических деталей в данном случае процесс формообразования происходит, преимущественно, с образованием вогнутой поверхности, когда съем обрабатываемого материала в центральных зонах больше, чем в крайних зонах блока деталей. Уравнение пространственной кривой  $z(h, \varphi)$  определяется формулой (3) при замене знака на противоположный. При повороте блока деталей на угол  $(\varphi_1 - \varphi_2) = 19,8^\circ$  длина проекции дуги, по которой перемещается датчик относительно детали, составляет 48,4 мм и определяет длительность сигнала, который формируется датчиком на каждом обороте детали. Форма сигнала описывается формулой (4) и приведена на рис. 6.

При анализе формы поверхности блока деталей, которая характеризуется значениями стрелки кривизны  $h$ , лежащими в пределах [1 мкм; 25 мкм], и радиусами кривизны [18 м; 450 м], пользуясь линейной зависимостью, приведенной на рис. 7, можно по значению отклонения сигнала от прямоугольной формы  $\delta$  определить значение неплоскостности  $h$  поверхности детали.

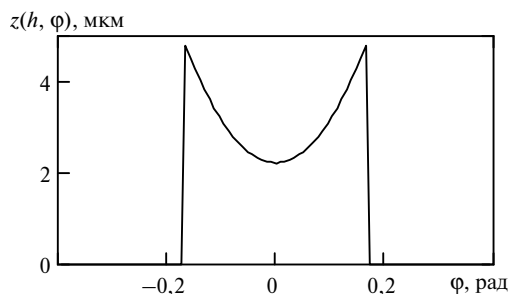


Рис. 6. График функции  $z(h, \varphi)$ , определяющий форму сигнала датчика для вогнутой поверхности.

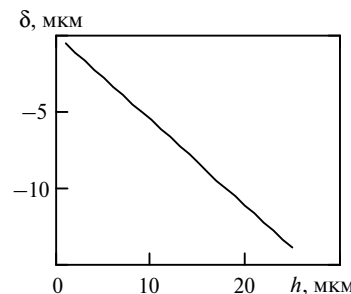


Рис. 7. Зависимость отклонения формы сигнала от неплоскостности вогнутой поверхности детали.

Анализ влияния неплоскостности  $h$  поверхности блока деталей на значение отклонения сигнала от прямоугольной формы  $\delta$  показал, что зависимость  $h = k_2 \delta$  является линейной ( $k_2 \approx 1,8$  – расчетное значение коэффициента про-

порциональности). Экспериментально определенные значения отклонения формы сигналов  $\delta = -3, -6, -9, -12$  и  $-14$  мкм позволили рассчитать значения отклонения от плоскостности блока деталей –  $h = 5, 11, 16, 22$  и  $25$  мкм, и отдельной детали –  $h_1 = (60/300)^2 h = 0,2, 0,4, 0,6, 0,9$  и  $1,0$  мкм. Именно такой точностью формы исполнительных поверхностей характеризуются оптические детали типа светофильтров и пластин при полировании по традиционной технологии методом притира.

## ВЫВОДЫ

В результате анализа соответствия между геометрическими параметрами сферической поверхности шарового сегмента (обрабатываемой детали) и пересекающей его цилиндрической поверхности, на образующей которой находится датчик, установлена связь между высотой детали (значением стрелки кривизны  $h$ ) и максимальной высотой кругового сечения (отклонения сигнала от прямоугольной формы  $\delta$ ).

Установлено, что зависимость  $h$  от  $\delta$  является линейной функцией, что позволяет по значению отклонения сигнала от прямоугольной формы для выпуклой (“бугор”) и вогнутой (“яма”) поверхностей обрабатываемых деталей судить об отклонении от плоскостности блока деталей и отдельной детали.

Показано, что при полировании плоских поверхностей оптических деталей по традиционной технологии при зарегистрированном отклонении формы сигнала датчика от прямоугольной в пределах  $3-15$  мкм, точность формы обработанных поверхностей характеризуются значениями отклонения от плоскостности блока деталей от  $5$  до  $25$  мкм, что соответствует неплоскостности поверхностей оптических деталей  $0,2-1,0$  мкм ( $1-4$  интерференционных кольца).

Анализ результатов экспериментальной проверки соответствия между расчетными данными и реальными значениями отклонения от плоскостности обработанных поверхностей показал возможность и целесообразность осуществления *in-process* мониторинга формы поверхностей оптических деталей непосредственно в процессе полирования при помощи датчика, использующего технологию конфокальной хроматической визуализации.

*Показано можливість in-process моніторингу форми поверхонь оптичних деталей безпосередньо в процесі полірування з використанням технології конфокальної хроматичної візуалізації. Встановлено, що існує лінійна залежність між відхиленням форми сигналу від прямокутної та зміною форми оброблюваної поверхні.*

**Ключові слова:** полірування, точність формотворення, відхилення форми.

*The possibility of in-process monitoring form surfaces of optical components directly in the process of polishing using a chromatic confocal imaging technology. It is found that a linear relationship exists between the deviation of form signal from the rectangular waveform and change of shape the machined surface.*

**Keywords:** polished, precision forming, deviation form.

1. Fahnle O. W., Wons T., Koch E. et al. ITIRM as a tool for qualifying polishing processes // Appl. Optics. – 2002. – **41**, N 19/1. – P. 4036–4038.
2. Ouma D. O., Boning D. S., Chung J. E. et al. Characterization and modeling of oxide chemical-mechanical polishing using planarization length and pattern density concepts // 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. Филатов А. Ю., Сидорко В. И., Ковалев С. В. и др. Производительность полирования анизотропных монокристаллических материалов для оптоэлектроники // Сверхтв. материалы. – 2016. – № 2. – С. 65–76.
5. Филатов А. Ю., Ветров А. Г., Сидорко В. И. и др. Закономерности финишной алмазно-абразивной обработки монокристаллического карбида кремния // Там же. – 2013. – № 5. – С. 63–71.
6. Филатов Ю. Д., Ветров А. Г., Сидорко В. И. и др. Полирование элементов оптоэлектронной техники из монокристаллического карбида кремния // Там же. – 2015. – № 1. – С. 63–74.
7. Филатов Ю. Д., Рогов В. В. Кластерная модель механизма усталостного износа SiO<sub>2</sub>-содержащих материалов при их полировании инструментом со связанным полировальным порошком на основе диоксида церия. Часть 1 // Там же. – 1994. – № 3. – С. 40–43.
8. Филатов Ю. Д. Механизм образования микрорельефа поверхности при обработке стекла // Там же. – 1991. – № 5. – С. 61–65.
9. Filatov Yu. D., Filatov O. Yu., Monteil G. et al. Bound-abrasive grinding and polishing of surfaces of optical materials // 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. 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.
12. 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.
13. Filatov Yu. D., Filatov O. Y., Heisel U. et al. In situ control of roughness of processed surfaces by reflectometric method // Proc. of SPIE. – 2010. – **7718**, art. 77181J.
14. Филатов А. Ю., Сидорко В. И. Локализация фрагментов налета на обрабатываемой поверхности при полировании неметаллических материалов // Сверхтв. материалы. – 2011. – № 5. – С. 73–87.
15. Filatov Yu. D., Monteil G., Sidorko V. I., Filatov O. Yu. Formation of a deposit on workpiece surface in polishing nonmetallic materials // Proc. of SPIE. – 2013. – **8763**, art. 8763361.
16. 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.
17. Rakhmatullina E., Bossen A., Höschele C. et al. Application of the specular and diffuse reflection analysis for *in vitro* diagnostics of dental erosion: correlation with enamel softening, roughness, and calcium release // J. Biomed. Opt. – 2011. – **16**, N 10, art. 107002.

Поступила 13.07.16