

в.6, с.56. 6. Крылов В.И., Бобков В.В., Монастырский Н.М. Вычислительные методы. – М.: Наука, 1976, т.2, 671с.

Сдано в редакцию 15.04.05  
Рекомендовано д.т.н., проф. Прутяну О.

## ЗАКОНОМЕРНОСТИ ОБРАЗОВАНИЯ НАРУШЕННОГО СЛОЯ ПРИ ФИНИШНОЙ ОБРАБОТКЕ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

**Сидорко В.И., Филатов Ю.Д.**

(ИСМ им. В.Н. Бакуля НАН Украины, г. Киев, Украина)

*The link between depth of defect layer of processed surface and the most probable size of the wear particles is determined on the basis of physical and chemical model of wear. It is shown that in case of grinding, depth of defect layer of the surface linearly depends on average size of diamond grits in tool and their roughness.*

Глубина нарушенного слоя поверхности детали из неметаллического материала, обработанной при алмазном шлифовании или полировании, зависит от свойств инструмента и обрабатываемой детали [1, 2]. Уменьшение зернистости шлифовальных и полировальных порошков в инструменте приводит к уменьшению глубины нарушенного слоя [2]. Однако, характер этой зависимости и вид функции ее описывающей (линейная, квадратичная и т.п.) не исследованы в полной мере, поскольку не существует моделей, описывающих механизм образования нарушенного слоя поверхностей в процессе их финишной обработки.

В связи с указанным целью работы являлось исследование закономерностей образования нарушенного слоя поверхностей деталей из неметаллических материалов при шлифовании и полировании.

Исходя из физико-статистической и кластерной моделей износа [3, 4], образование нарушенного слоя поверхности можно рассматривать как движение кластеров вглубь обрабатываемого материала. Распределение концентрации кластеров вдоль координаты  $z$  (нормальной к обрабатываемой поверхности) выражается уравнением [4]:

$$c(z, t) = n_0 \cdot \left[ 1 - \frac{\operatorname{erf}\left(\frac{z}{2\sqrt{\eta \cdot t}}\right)}{\operatorname{erf}\left(\frac{\alpha}{2\sqrt{\eta}}\right)} \right], \quad (1)$$

где:  $n_0$  - концентрация кластеров на поверхности обрабатываемой детали,

$\eta$  - коэффициент объемного износа,

$t$  - время обработки,

$\alpha$  - коэффициент, определяющий закон движения границы раздела  $\zeta = \alpha\sqrt{t}$ ,

$\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \int_0^x e^{-t^2} \cdot dt$  - интеграл ошибок [5].

При  $z < 0$  формула (1) описывает концентрацию образующихся кластеров в глубине обрабатываемого материала, то есть образование нарушенного слоя.

Анализ формулы (1) относительно процесса тонкого алмазного шлифования (ТАШ) стекла марки К8 позволил установить следующее. При обработке деталей инструментом из алмазных порошков АСМ 20/14 образуются частицы износа, наиболее вероятный размер  $a_v$ , которых составляет 5,35 мкм. Время контакта элемента обрабатываемой поверхности с рабочим слоем инструмента при обработке деталей в данных условиях составляет 55 мс, коэффициент  $\alpha$  составляет  $2,28 \cdot 10^{-5} \text{ м/с}^{-1/2}$ , коэффициент объемного износа  $\eta$  равен  $3,76 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2/\text{с}$  [4]. На рис. 1 представлена функция

$$F(z) = \begin{cases} c(z,t), & z \geq 0 \\ c(-z,t), & z < 0 \end{cases}, \text{ характеристная для ТАШ стекла марки К8 в данных условиях.}$$

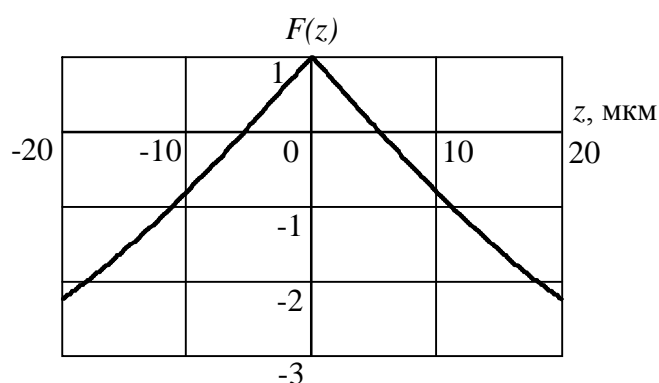


Рис. 1. Зависимость  $F(z)$  для процесса ТАШ стекла

Точка пересечения функции  $F(z)$  с абсциссой (при  $z < 0$ ) дает значение глубины нарушенного слоя обработанных поверхностей  $h$ . Для данных условий решение уравнения  $F(z) = 0$ , полученное графически или численными методами, дает величину  $h = 5,35$  мкм, которая в точности совпадает со значением наиболее вероятного размера частиц износа. Очевидно, что этот же результат следует из самого вида функции распределе-

ния концентрации кластеров (1). Равенство  $c(z,t) = 0$  выполняется при условии  $z = \alpha\sqrt{t}$ , которое представляет собой закон движения границы раздела  $\zeta = \alpha\sqrt{t}$ . В работе [4] показано, что для процессов шлифования и полирования неметаллических материалов величины  $\zeta$  совпадают с размерами частиц износа, исходя из чего можно сделать вывод, что глубина нарушенного слоя  $h = a_v$ .

Исходя из полученного равенства, и учитывая соотношения между параметрами шероховатости обработанной поверхности и величиной наиболее вероятного размера частиц износа  $Ra = 0,04 \cdot a_v$  и  $R_{\max} = 0,29 \cdot a_v$  [6], можно рассчитать глубину нарушенного слоя поверхностей стекла марки К8 при супертонком алмазном шлифовании (СТАШ), ТАШ и полировании. При финишной обработке стекла инструментами из алмазов АСМ 60/40, 40/28, 20/14 и 10/7 и полировальным инструментом со связанным полировальным порошком на основе диоксида церия обработанные поверхности характеризуются параметрами шероховатости  $Ra$  и  $R_{\max}$ , приведенными в таблице 1 [1, 6, 7]. В этой же таблице приведены результаты расчета глубины нарушенного слоя ( $h = \frac{R_{\max}}{0,29}$ ) обработанных поверхностей.

Результаты расчета согласуются с данными экспериментальных измерений глубины нарушенного слоя при шлифовании [1] и толщины поверхностного слоя при полировании (45 нм) стекла марки К8 [8]. Кроме того, зависимость глубины нарушенного слоя от зернистости алмазного микропорошка в инструменте для ТАШ и СТАШ стекла (рис. 2) может быть аппроксимирована формулой  $h = 0,34 \cdot d + 1$  ( $d$  - средний размер алмазных зерен в мкм, погрешность аппроксимации - 14 %). Это подтверждает вывод

автора [1] о связи глубины нарушенного слоя при шлифовании неметаллических материалов с высотой выступа алмазных зерен из связки инструмента (относительная критическая глубина задела алмазных зерен  $(0,31 - 0,44) d$ ). Полученная формула может быть использована для оценки глубины нарушенного слоя при шлифовании стекла, превосходящей 1 мкм. Для определения толщины поверхностного слоя при полировании данная формула абсолютно неприемлема, из-за существенных различий в механизмах удаления обрабатываемого материала при шлифовании и полировании.

Таблица 1. Шероховатость и глубина нарушенного слоя обработанных поверхностей деталей из стекла

Параметры шероховатости	ТАШ			СТАШ (10/7)	Полирование
	60/40	40/28	20/14		
$Ra$ , мкм	0,68	0,54	0,22	0,15	0,003
$R_{max}$ , мкм	4,76	4,58	1,59	1,10	0,012
Глубина нарушенного слоя, $h$ , мкм	16,4	15,8	5,5	3,8	0,041

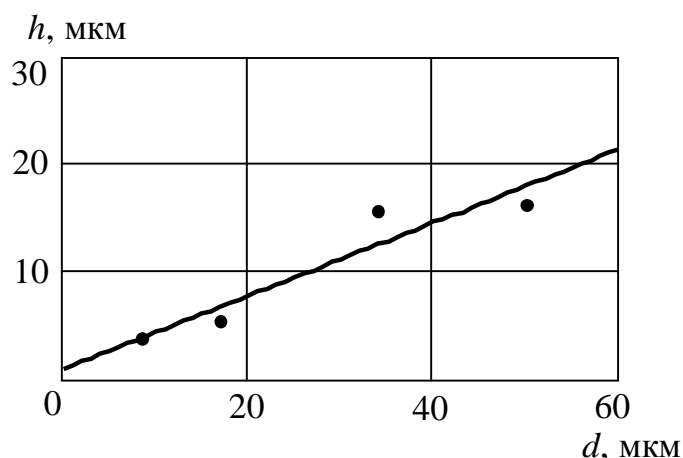


Рис. 2. Зависимость глубины нарушенного слоя от зернистости алмазов в инструменте

Изучение нарушенного слоя после алмазного шлифования таких неметаллических материалов, как оптические кристаллы  $CaF_2$ ,  $BaF_2$ ,  $ZnSe$ ,  $LiF$  и др., свидетельствует о существенных различиях в механизме образования нарушений в изотропных аморфных и анизотропных кристаллических материалах. При алмажном шлифовании кристаллов глубина нарушенного слоя их поверхностей имеет большую величину, чем при алмазной обработке стекла (табл. 2).

Таблица 2. Глубина нарушенного слоя и шероховатость поверхности образцов кристаллов после алмазного шлифования

Материал	$Rz$ , мкм	Глубина нарушенного слоя, мкм
$CaF_2$	2,30	14,1
$BaF_2$	2,00	15,4
$ZnSe$	3,20	16,2
$LiF$	1,68	12,6

На рис. 3. представлены теоретическая (1) и экспериментальная (2) зависимости глубины нарушенного слоя кристаллических материалов от шероховатости.

Экспериментальная зависимость может быть аппроксимирована формулой  $h(Rz) = 1,9 \cdot Rz + 10,2$  ( $h$  и  $Rz$  - в мкм, погрешность аппроксимации – до 5 %) и показывает, что реальные значения глубины нарушенного слоя превосходят расчетные значения, особенно при малых шероховатостях. Это объясняется тем, что в реальных кристаллах на глубину нарушенного слоя существенное влияние оказывает наличие дефектов в поверхностном слое.

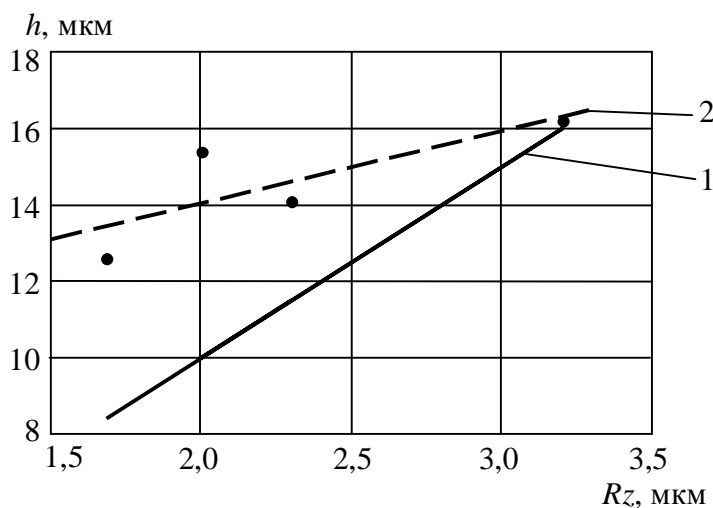


Рис. 3. Зависимость глубины нарушенного слоя от шероховатости поверхности

материала, воспользовавшись формулой:

$$h = h_0 \cdot \left( \frac{H_1}{H_2} \right)^{1/4} \cdot \left( \frac{K_{1c,1}}{K_{1c,2}} \right)^{1/3}, \quad (2)$$

где:  $H$  – микротвердость,  $K_{1c}$  – коэффициент трещиностойкости.

При обработке оптических материалов, в частности стекла, в качестве эталонного обычно используют стекло марки К8. В таблице 3 приведены значения глубины нарушенного слоя различных неметаллических материалов (природного камня, кварца и оптического стекла), обработанных при ТАШ инструментом из алмазных порошков АСМ 20/14.

Таблица 3. Расчетные значения глубины нарушенного слоя

№ п\п	Материал	$H$ , ГПа	$K_{1c}$ , МН/м <sup>3/2</sup>	$h$ , мкм
1	Гранит	11,45	1,01	4,17
2	Кварц	11,0	1,00	4,23
3	Мрамор	1,35	0,58	8,6
4	Стекло марки К8	5,85	0,73	5,5
5	Стекло марки ЛК5	6,75	0,57	5,76
6	Стекло марки ТФ10	4,1	0,54	6,65
7	Стекло марки СТК9	7,7	0,5	5,83
8	Стекло марки БК10	7,1	0,67	5,40

Исследование состояния поверхностей деталей из неметаллических материалов после тонкого алмазного шлифования показывает, что глубина нарушенного слоя поверхностей зависит от их физико-механических свойств – микротвердости и трещиностойкости. При обработке этих материалов в одинаковых условиях по известным данным глубины нарушенного слоя для эталонного материала можно определить глубину нарушенного слоя  $h$  для другого

Для образцов из гранитов, мрамора и оптического стекла были измерены эллиптические параметры - разность фаз колебаний взаимно перпендикулярных компонент электрического вектора  $\Delta$  и соотношение амплитуд этих компонент  $\Psi$  поляризованного света при отражении от поверхностей образцов. Эллиптические параметры определялись при помощи эллипсометра мод. «ЛЭФ-3М» при постоянном значении угла падения лазерного луча (на длине волны  $\lambda=632,8$  нм) на поверхность образца  $\varphi = 70^\circ$  [9]. Рассчитанные по значениям эллипсометрических параметров  $\Delta$  и  $\Psi$  оптические постоянные (показатели поглощения и преломления и коэффициент отражения) зависят от глубины нарушенного слоя обработанных поверхностей и могут быть использованы для оценки их качества.

Таким образом, в результате исследований механизма образования нарушенного слоя поверхностей деталей из неметаллических материалов (природного камня, оптических кристаллов и стекла) при финишной обработке показано, что его глубина линейно зависит от шероховатости обработанных поверхностей и зернистости алмазов в инструменте. Установлено, что теоретический расчет глубины нарушенного слоя поверхностей деталей из кристаллических материалов дает заниженные значения по сравнению с экспериментом. Показано, что глубина нарушенного слоя обработанных поверхностей зависит от микротвердости и трещиностойкости обрабатываемого материала.

**Список литературы:** 1. Рогов В.В. Финишная алмазно-абразивная обработка неметаллических деталей.-Киев: Наук. думка.-1985.-264 с. 2. Обработка полупроводниковых материалов/Карбань В.И., Кой П., Рогов В.В. и др./Под ред. Новикова Н.В., Бертольди В.- Киев: Наук. думка.- 1882.- 256 с. 3. Филатов Ю.Д. Полирование алюмосиликатных материалов инструментом со связанным полировальным порошком//Сверхтвердые материалы.-2001.-№ 3.-С. 36-49. 4. Филатов Ю.Д., Сидорко В.И. Статистический подход к износу поверхностей деталей из неметаллических материалов при полировании//Сверхтвердые материалы. – 2005.- № 1.- С. 58 – 66. 5. Фарлоу С. Уравнения с частными производными для научных работников и инженеров. – М.: Мир– 1985. – 383 с. 6. Филатов Ю. Д. Механизм образования микрорельефа поверхности при обработке стекла // Сверхтвердые материалы. —1991. — № 5. — С. 61—65. 7. New technology of precision polishing of glass optic / Rogov V.V., Filatov Yu.D., Kottler W., Sobol V.P.// Optical Engineering. – V. 40, august 2001.- p. 1641-1645. 8. Склеенкова Ж.В. Оценка качества обработки поверхности стекла эллипсометрическим методом // Эллипсометрия в науке и технике. – Вып. 2. – Новосибирск, 1990. – С. 117 – 121. 9. Дослідження якості поверхонь деталей з неметалевих матеріалів оптичними методами/Сідорко В.І., Філатов О.Ю., Поперенко Л.В. та ін.// Наук. праці конф., присвяч. 100-річчю з дня народження проф. Шишловського О.А., 30 березня-1 квітня 2005, К.: ВПЦ „Київський університет”, 2005. – С. 152 – 164.

Сдано в редакцию 22.04.05

Рекомендовано д.т.н., проф. Калафатова Л.П.