

# Исследование процессов обработки

УДК 621.623

**Ю. Д. Филатов, В. И. Сидорко, А. Ю. Филатов,  
С. В. Ковалев** (г. Киев)  
**У. Хайзель, М. Сторчак** (г. Штуттгарт, Германия)

## **Шероховатость поверхностей при финишной алмазно-абразивной обработке**

*Показано, что шероховатость полированной поверхности зависит от отношения частот собственных колебаний молекулярных фрагментов на поверхностях инструмента и обрабатываемой детали. На шероховатость обработанной поверхности наибольшее влияние оказывают число молекулярных фрагментов, из которых состоят частицы шлама, их наиболее вероятный размер, частоты собственных колебаний фрагментов обрабатываемого материала и инструмента, теплопроводность обрабатываемого материала и режимы обработки.*

***Ключевые слова:** шероховатость поверхности, полирование, частицы шлама.*

**Введение.** Основными показателями, характеризующими эффективность процесса финишной обработки поверхностей деталей электронной техники и оптических систем, декоративно-художественных изделий и архитектурных форм из природного и синтетического камня, а также прецизионных деталей из функциональных материалов различного назначения — металлов, полупроводников и диэлектриков различных форм и конструкций, являются шероховатость, оптическая чистота, отражающая способность и дефектность. Указанные показатели обработанных поверхностей зависят от размеров частиц износа и шлама и их поведения в зоне контакта инструмента и детали. Актуальность рассматриваемой проблемы обусловлена тем, что улучшение качества обработки прецизионных деталей возможно лишь на основе изучения влияния физико-механических свойств обрабатываемого материала и полировального порошка в инструменте, характеристики и конструкции алмазно-абразивного инструмента, режимных и кинематических параметров процесса обработки на формирование микрорельефа обрабатываемой поверхности.

Результаты исследования механизма полирования неметаллических материалов [1—7] и основные положения кластерной модели износа твердых тел [1, 5, 7] позволили подтвердить активационный характер съема обрабатываемой

© Ю. Д. ФИЛАТОВ, В. И. СИДОРКО, А. Ю. ФИЛАТОВ, С. В. КОВАЛЕВ, У. ХАЙЗЕЛЬ, М. СТОРЧАК, 2009

мого материала, описать статистически распределение частиц шлама по площадям поверхности при помощи распределения Пуассона с параметром  $\nu = E_b/E_{cl}$  ( $E_{cl}$  — энергия кластера,  $E_b$  — энергия связи обрабатываемого материала) и оценить вероятность их образования пропорциональную  $\exp(-\nu)$  [6—8]. Анализ закономерностей образования и удаления частиц шлама при финишной обработке неметаллических материалов в рамках физико-статистической модели [9] позволил установить, что удаление обрабатываемого материала (массоперенос) при полировании является результатом процессов диспергирования микро- и наночастиц.

Размеры частиц шлама зависят от числа образующих их молекулярных фрагментов и определяют как производительность процесса полирования, так и шероховатость обработанной поверхности [1, 10]. При этом корреляции интенсивности съема обрабатываемого материала с механическими характеристиками обрабатываемого материала и полировального инструмента не наблюдается [2, 7]. Шероховатость полированных поверхностей (среднее квадратичное отклонение профиля  $rms$ ) деталей из оптического стекла не зависит от его микротвердости [3].

**Влияние физико-механических свойств обрабатываемого материала, характеристик инструмента и режимов обработки на формирование микрорельефа поверхности.** Параметры шероховатости поверхностей деталей из поделочного, строительного природного и синтетического камня (амазонита, обсидиана, чаройта, яшмы, базальта, габбро, гранита, керамического гранита фирм “Kentaur” (Чехия), “Mirage” (Италия), “Pamesa Ceramica” (Испания)), а также оптического стекла марки К8, полированных инструментом со связанным полировальным порошком диоксида церия или оксида алюминия, определяли при помощи профилографа “Mitutoyo” (Япония). На основе результатов исследования влияния строения и структуры обрабатываемого материала на шероховатость обработанной поверхности установлено, что среднеарифметическое отклонение профиля линейно зависит от числа  $\xi$  молекулярных фрагментов (рис. 1). На рис. 2 приведена линейная зависимость параметра  $Ra$  шероховатости от наиболее вероятного размера  $a_v$  частиц шлама, введенного проф. Л. С. Цеснеком, которая может быть аппроксимирована линейной функцией  $Ra = \alpha_1 a_v + \beta_1$ , где  $\alpha_1 = 4,2$ ,  $\beta_1 = -0,012$  мкм — коэффициенты, определенные при помощи метода наименьших квадратов; погрешность аппроксимации — 16 %. Исходя из условия  $Ra > 0$ , можно оценить минимально допустимое значение наиболее вероятного размера  $a_v$  частиц шлама, образующихся в процессе полирования. Это значение составляет  $a_{v, \min} \approx 3$  нм (для стекла марки К8  $a_v = 3,2$  нм [7]).

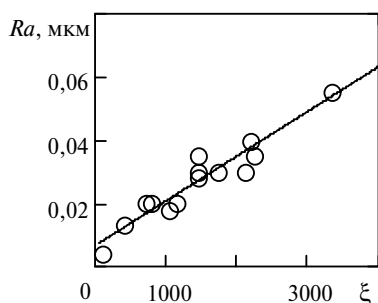


Рис. 1. Зависимость шероховатости от числа молекулярных фрагментов в частице шлама.

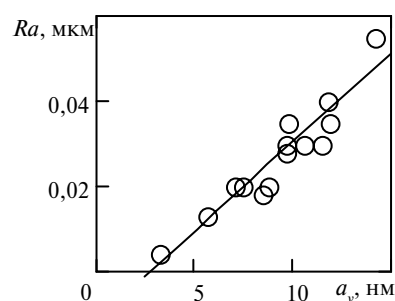


Рис. 2. Зависимость шероховатости от наиболее вероятного размера частиц шлама.

Анализируя полученные зависимости, можно заключить, что чем больше число молекулярных фрагментов (т. е., чем меньше отличаются частоты собственных колебаний молекулярных фрагментов  $\omega_{01}$  и  $\omega_{02}$ , наиболее близко расположенные в ИК спектрах поглощения), тем выше значение высотных параметров шероховатости. Кроме того, установлено, что высотные параметры шероховатости полированной поверхности зависят от координаты исследуемой зоны на обработанной поверхности, что не может быть объяснено с точки зрения размеров частиц шлама и их распределения по площадям поверхности. Координатная зависимость шероховатости может быть обусловлена концентрационными зависимостями частиц, траекториями их перемещения, характером их взаимодействия между собой, а также с частицами износа инструмента, с поверхностями рабочего слоя инструмента и обрабатываемой детали в контактной зоне и механизмом образования налета [10—11] на контактирующих поверхностях. По аналогии с координатной зависимостью шероховатости поверхностей деталей из оптического стекла при тонком алмазном шлифовании [12], которая описывается периодической функцией, указанные зависимости могут быть объяснены на основе результатов исследования динамики столкновений и рассеяния частиц шлама в контактной зоне. Однако при исследовании состояния полированных поверхностей нельзя ограничиться лишь рассмотрением потока частиц шлама с учетом эрозионного износа обрабатываемой поверхности, как при шлифовании, а необходимо исследовать поведение частиц шлама и частиц износа полировального инструмента в контактной зоне, определить их концентрации, смоделировать траектории их перемещения с учетом зарядового состояния, а также особенностей столкновения и рассеяния наночастиц, оценить потенциалы их взаимодействия и эффективные дифференциальные сечения рассеяния.

Согласно физико-статистической модели образования и удаления частиц шлама с обрабатываемой поверхности, их концентрация  $c_i(z, \tau)$  в зависимости от координат и времени обработки определяется по формуле [9, 12]

$$c_i(z, \tau) = n_{0i} \left[ 1 - \frac{\operatorname{erf}\left(\frac{z}{2\sqrt{\eta_i \tau}}\right)}{\operatorname{erf}\left(\frac{\alpha}{2\sqrt{\eta_i}}\right)} \right],$$

где  $n_{0i}$  — концентрация  $i$ -х частиц шлама на поверхности;  $\eta = \xi_m/\rho$  — коэффициент объемного износа;  $\xi_m$  — коэффициент массового износа;  $\rho$  — плотность обрабатываемого материала;  $\alpha$  — коэффициент пропорциональности в законе движения границы раздела инструмент—обрабатываемая поверхность  $z = \alpha\sqrt{\tau}$ ;  $\operatorname{erf}(\cdot)$  — интеграл ошибок.

Функциональная связь производительности обработки и шероховатости обработанных поверхностей с параметрами физико-статистической модели ( $L_f, \lambda, T, p_a, u, n_{0i}, S_i$ ) выражается их зависимостями от безразмерного параметра  $\theta = \frac{\lambda T L_f}{p_a u S_c}$ , концентрации и размеров частиц шлама ( $L_f$  — длина пути трения элемента рабочего слоя инструмента по обрабатываемой поверхности детали,  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности обрабатываемого материала,

$T$  — температура,  $p_a$  — номинальное давление прижима инструмента к обрабатываемой поверхности,  $u$  — скорость относительного перемещения инструмента и детали,  $S_c$  — площадь контакта инструмента и детали,  $S_i$  — площадь поверхности  $i$ -й частицы).

Влияние физико-механических свойств обрабатываемого материала на параметры микропрофиля обработанной поверхности иллюстрирует зависимость параметра шероховатости  $Ra$  поверхностей деталей из неметаллических материалов (стекла, хрусталя, природного и синтетического камня) от безразмерного параметра  $\theta$ . При полировании оптического стекла марок ТФ110, ТК21, БФ12, ТФ101, ТФ102, ТК116, К8 и хрусталя шероховатость поверхностей оценивают параметром  $Ra \approx 0,01$  мкм, она практически не зависит от их физико-механических свойств (рис. 3, зона 1). При полировании природного и синтетического камня возрастание параметра  $Ra$  при увеличении параметра  $\theta$  (рис. 3, зона 2) объясняется следующим. При обработке материалов с большей теплопроводностью (с большим значением параметра  $\theta$ ) согласно уравнению  $\xi_m U^* = \lambda T$  [13] ( $U^*$  — энергия переноса) возрастает  $\xi_m$ , т. е. размеры частиц шлама увеличиваются и, соответственно, ухудшается шероховатость. Физический смысл безразмерного параметра (коэффициента переноса)  $\theta$  состоит в том, что он показывает, какая часть механической энергии  $W_m$ , затрачиваемой на процесс обработки, переносится частицами шлама при их удалении с поверхности, а его отношение к коэффициенту трения  $k_f$

может быть выражено как  $\frac{\theta}{k_f} = \frac{U_\Sigma^*}{W_m}$  ( $U_\Sigma^*$  — полная энергия переноса). При

его увеличении увеличивается энергия переноса и уменьшается энергия диспергирования, что приводит к уменьшению производительности съема обрабатываемого материала и ухудшению качества обработанной поверхности.

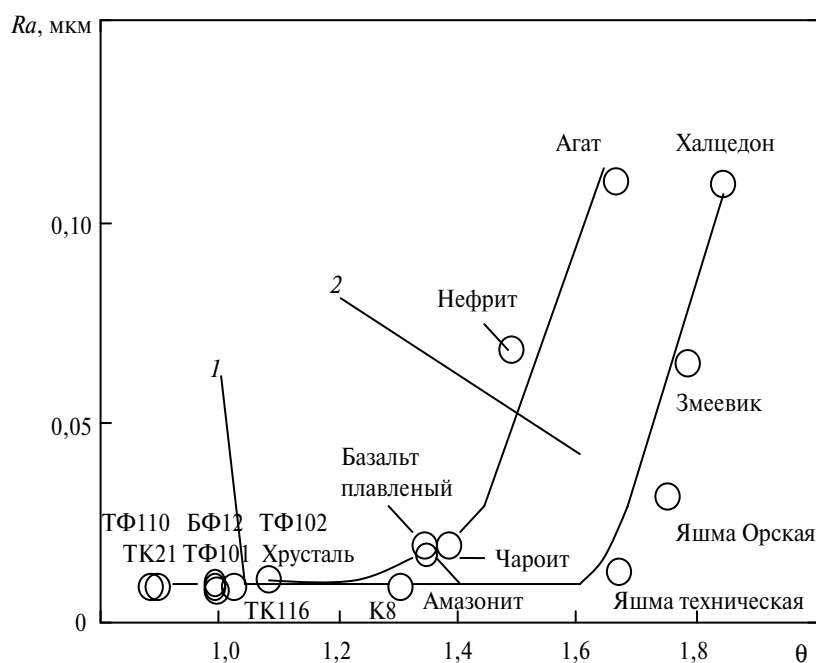


Рис. 3. Зависимость параметра шероховатости  $Ra$  от параметра  $\theta$ .

Влияние характеристики и конструкции алмазно-абразивного инструмента на шероховатость обработанной поверхности проявляется через параметры физико-статистической модели ( $n_{0i}$ ,  $L_f$ ,  $S_i$ ). Согласно *ad hoc* предположению о пропорциональной зависимости шероховатости обработанной поверхности от концентрации  $n_{0i}$  и площади поверхности  $S_i$  частиц шлама, которые увеличиваются одновременно с размером алмазных или абразивных зерен в рабочем слое инструмента, параметр шероховатости  $Ra$  пропорционален зернистости алмаза или абразивного порошка в инструменте.

Из физико-статистической модели также следует, что  $Ra$  зависит от  $L_f$  (пропорционально) и от площади  $S_c$  контакта инструмента с поверхностью детали (обратнопропорционально), которые определяются размерами и количеством отдельных элементов рабочего слоя инструмента, а влияние концентрации алмазного или абразивного порошка и материала связующего инструмента на шероховатость обработанной поверхности не может быть выявлено.

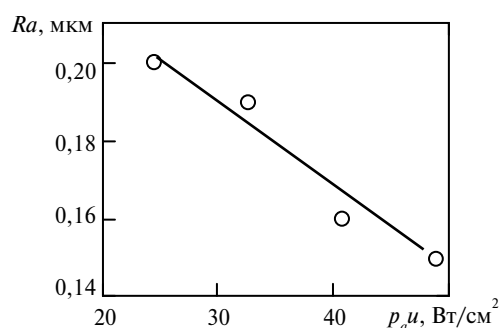


Рис. 4. Зависимость шероховатости обработанной поверхности от удельной мощности.

Влияние режимных и кинематических параметров процесса обработки на шероховатость обработанной поверхности иллюстрирует зависимость параметра  $Ra$  поверхности детали из стекла марки К8 от удельной мощности, потребляемой в процессе ее тонкого алмазного шлифования (рис. 4). При увеличении произведения  $p_a u$ , значение параметра  $\theta$  уменьшается и, соответственно, снижается шероховатость обработанной поверхности.

Исходя из приведенных закономерностей, для полирования конкретного материала можно не только оценить целесообразность применения того или иного абразива (полировального порошка), определить оптимальный состав абразивной массы инструмента, а и установить режимы, при которых достигается необходимое качество обработанных поверхностей. Для высококачественной обработки различных материалов, требования к шероховатости которых выражаются неравенством  $Ra \leq 0,02$  мкм, необходимо, чтобы с обрабатываемой поверхности удалялись наночастицы шлама с наиболее вероятным размером  $a_v \leq 10$  нм (см. рис. 2), что может быть достигнуто при использовании полировального инструмента из нанопорошков ультрадисперсных алмазов (УДА) на основе специального связующего, например кремний-органического [14]. В результате экспериментальных исследований состояния полированных поверхностей различных материалов (диэлектриков, полупроводников и металлов), обработанных указанным инструментом, установлено, что величина их параметра шероховатости  $Ra$  находится в диапазоне  $0,01 \text{ мкм} \leq Ra \leq 0,02 \text{ мкм}$ . Полированные поверхности оптических деталей из стекла марки К8 характеризуются уровнем шероховатости  $Ra = 0,01$  мкм и наличием отдельных микроскопических дефектов, число и площадь которых регламентируется соответствующими стандартами на оптическую чистоту. Полированные поверхности подложек для устройств ИК техники из антимоноида индия (InSb) характеризуются уровнем шероховатости  $Ra \leq 0,01$  мкм и для обеспечения требуемого для них качества обработки требуют дополнительного полирования специальными суспензиями нанопорошков, обеспечи-

вающими практически полное отсутствие дефектов на обработанной поверхности. При полировании прецизионных элементов пресс-форм для изготовления световозвращающих устройств из стали 95X18Y8 обеспечивается практически бездефектная обработка их рабочих поверхностей, что приводит к существенному возрастанию износостойкости пресс-форм и улучшению качества изделий, изготовленных с их помощью.

### Выводы

В результате проведенных исследований обобщены закономерности влияния физико-механических свойств обрабатываемого материала и полировального порошка в инструменте на эффективность процесса полирования. Показано, что определенные кластерной моделью износа поверхностей и физико-статистической моделью образования и удаления частиц шлама при полировании зависимости шероховатости обработанной поверхности от размеров частиц соответствуют экспериментальным данным. Они позволяют осуществить оптимальный выбор полировального порошка для изготовления рабочего слоя инструмента, при использовании которого достигается требуемое качество полированной поверхности применительно к конкретному обрабатываемому материалу.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Украины (проект № М/55-2008).

1. *Филатов Ю. Д., Rogov B. B.* 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 // Сверхтв. материалы. — 1994. — № 3. — С. 40—43.
2. *Kotanduri R., Lucca D. A., Tani Y.* Technological advances in fine abrasive processes // CIRP Ann. — 1997. — 46, N 2. — P. 545—596.
3. *Gillman B.E and Jacobs S.D.* Bound-abrasive polishers for optical glass // Appl. Opt. — 1998. — 37, N 16. — P. 3498—3505.
4. *Fahle O. W., van Brug H.* Novel approaches to generate aspherical optical surfaces // Part of the SPIE Conf. on Optical Manufacturing and Testing, Denver, CO, USA, 18—23 July, 1999. — SPIE, 1999. — Vol. 3782. — P. 170—176.
5. *Филатов Ю. Д.* Полирование алюмосиликатных материалов инструментом со связанным полировальным порошком // Сверхтв. материалы. — 2001. — № 3. — С. 36—49.
6. *Rogov V. V., Filatov Y. D., Kottler W., Sobol V. P.* New technology of precision polishing of glass optic // Opt. Eng. — 2001. — 40, N 8. — P. 1641—1645.
7. *Филатов Ю. Д.* Полирование прецизионных поверхностей деталей из неметаллических материалов инструментом со связанным полировальным порошком // Сверхтв. Материалы. — 2008. — № 1. — С. 59—66.
8. *Скрябин В. В., Филатов Ю. Д., Сидорко В. И.* Закономерности полирования деталей из алюмосиликатных материалов инструментом со связанным полировальным порошком // Там же. — 2004. — № 6. — С. 73—78.
9. *Филатов Ю. Д., Сидорко В. И.* Статистический подход к износу поверхностей деталей из неметаллических материалов при полировании // Там же. — 2005. — № 1. — С. 58—66.
10. *Поперенко Л. В., Филатов Ю. Д.* Технологія обробки оптичних поверхонь. Навчальний посібник для студентів фізичного факультету. — Київ: Вид.-поліграф. центр “Київський ун-т”. — 2004. — 165 с.
11. *Филатов Ю. Д., Rogov B. B.* Особенности процесса полирования стекла инструментом со связанным полировальным порошком // Оптика и спектроскопия. — 1993. — 74, вып. 6. — С. 1229—1235.
12. *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.

13. Сидорко В. И., Філатов Ю. Д. Закономерности образования нарушенного слоя при финишной обработке неметаллических материалов // Прогресивні технології і системи машинобудування. — Донецьк: ДонНТУ, 2005. — Вип. 30. — С. 181—185.
14. Пат. 15433 Україна, МПК В 24 D3/20. Маса для виготовлення робочого шару абразивного інструмента / М. В. Новіков, Ю. Д. Філатов, В. І. Сідорко та ін. — Заявл. 14.10.2005; Опубл. 17.07.2006, Бюл. № 7.

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

Поступила 20.11.08