

Ю.Д. Филатов, д.т.н., проф.

С.В. Ковалев, м.н.с.

М.А. Руденко, аспир.

*Институт сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля
НАН Украины*

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФИНИШНОЙ АЛМАЗНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ ПРИРОДНОГО КАМНЯ С УЧЕТОМ Триботермоэлектрических явлений

Представлены результаты термодинамического анализа съема обрабатываемого материала при полировании с учетом триботермоэлектрических явлений. Получено уравнение для концентрации частиц шлама, образующихся в процессе полирования, которое позволяет исследовать влияние электрических свойств обрабатываемой детали, инструмента и технологической среды на производительность съема обрабатываемого материала и состояние обработанной поверхности.

Постановка проблемы. При исследовании процессов формообразования поверхностей деталей из неметаллических материалов, в том числе природного и искусственного камня, инструментами со связанными алмазными и абразивными порошками и изучении закономерностей съема обрабатываемого материала и износа инструмента в настоящее время используются обобщенная кластерная модель износа поверхностей инструмента и детали [1–3], а также физико-статистическая модель образования и удаления из обрабатываемой поверхности частиц шлама [4–5]. На основе этих моделей проведен не только теоретический анализ закономерностей съема обрабатываемого материала, а и получены закономерности износа и эволюции формы рабочей поверхности инструмента при финишной обработке, не прибегая к эмпирическому закону Престона. Кроме того, в результате исследования взаимодействия частиц шлама с частицами износа инструмента в зоне контакта инструмента и детали в процессе алмазного шлифования [6] и полирования [7] оптического стекла и природного камня установлены закономерности формирования микро- и макрорельефа обрабатываемой поверхности [8–10]. При изучении процесса дефектообразования на контактирующих поверхностях инструмента и обрабатываемой детали в процессе полирования на основе классической теории рассеяния без

учета электрического взаимодействия между частицами шлама и частицами износа [11] и статистическом анализе траекторий их перемещения в контактной зоне показано, что результаты расчетов не подтверждаются данными эксперимента: частицы, «перекатываясь» вдоль поверхностей, не попадают на них. На основе квантово-механической теории рассеяния частиц шлама и частиц износа в зоне контакта инструмента и детали в процессе полирования, благодаря учету их ван-дер-ваальсового и электрического взаимодействия [7, 12], изучены закономерности формирования макро- и микрорельефа обрабатываемой поверхности, пространственно-временные зависимости ее локальной шероховатости, а также закономерности образования и локализации налета из частиц шлама и частиц износа на поверхностях рабочего слоя инструмента и обрабатываемой детали, которые подтверждены экспериментально.

Вместе с тем, влияние потенциала электрического взаимодействия на производительность съема обрабатываемого материала и интенсивность износа инструмента практически не изучено. Исследование триботермоэлектрических явлений, которые происходят в зоне контакта инструмента и обрабатываемой детали в процессе финишной обработки указанных материалов, и изучение их влияния наряду с физико-механическими и химическими свойствами обрабатываемого материала, характеристиками и конструкциями алмазно-абразивного инструмента, режимными и кинематическими параметрами процесса механической обработки на интенсивность съема обрабатываемого материала, характер и величину износа рабочего слоя инструмента и состояние обработанных поверхностей, в частности, глубину разрушенного слоя, является необходимой предпосылкой существенного повышения производительности обработки и качества декоративно-художественных изделий из природного строительного и поделочного камня и является актуальной научно-технической проблемой.

Усовершенствованная технология финишной алмазно-абразивной обработки изделий из природного камня, обеспечивающая возможность управления процессом формообразования их обрабатываемых поверхностей путем регулирования электромеханическими параметрами, обеспечит возможность проектирования, изготовления и промышленного внедрения принципиально нового оборудования с активным контролем качества и автоматическим управлением технологическими процессами механообработки.

Термодинамический анализ взаимодействия инструмента и обрабатываемой детали. При термодинамическом равновесии в системе, то есть отсутствии градиентов температуры T и химического потенциала μ , явления переноса не происходят. Как только эти условия нарушаются, в термодинамической системе происходят необратимые процессы переноса массы, энергии и электрического заряда. При рассмотрении неравновесных процессов, обычно, вводят понятие о локальном равновесии, согласно которому при неравновесном состоянии системы в целом, ее отдельные микроскопические части находятся в квазиравновесном состоянии, которое характеризуется медленным изменением термодинамических параметров, как в пространстве, так и во времени [13–14].

Свойства неравновесной системы определяются термодинамическими потенциалами, связанными с характеристическими термодинамическими параметрами при выполнении условий:

$$\nabla T \neq 0, \nabla \mu \neq 0, v_0^{\frac{1}{3}} \ll l \ll \left| \frac{1}{a_i} \cdot \frac{\partial a_i}{\partial x} \right|^{-1}, \quad (1)$$

$$\tau_i \ll \tau_0 \ll \tau_L,$$

где l^3 – элементарный объем, v_0 – объем одной частицы, a_i – макроскопические термодинамические параметры системы, x – координата, τ_0 , τ_i – время изменения термодинамических параметров и время релаксации (время перехода в равновесное состояние) в физически малых равновесных частях, τ_L – время, в течение которого система в целом переходит в равновесное состояние. В этом случае в качестве характеристических переменных выбираются локальная плотность внутренней энергии $U(\vec{r}, \tau)$, локальная плотность массы $\rho(\vec{r}, \tau)$ и локальные концентрации $c_i(\vec{r}, \tau)$ различных компонентов (частиц шлама или износа) [14].

Состояние элементарного объема в момент времени τ в точке с координатами \vec{r} описывается локальной энтропией $s = s[U, \rho, c_i, \vec{r}, \tau]$, которая описывается основным уравнением неравновесной термодинамики Гиббса [14]:

$$Tds = dU + p \cdot dv - \sum_i \mu_i \cdot dc_i. \quad (2)$$

При этом энтропия неравновесной системы и скорость производства энтропии определяются уравнениями [14–15]:

$$S = \int_V \rho \cdot s \cdot dV, \quad \sigma = \sum_i J_i \cdot X_i, \quad (3)$$

где $X_i = \frac{\partial(\rho s)}{\partial a_i}$ – термодинамические силы, $J_i = \frac{\partial a_i}{\partial \tau}$ –

термодинамические потоки.

Термодинамические силы и потоки связаны между собой линейным законом $J_i = \sum_k L_{ik} \cdot X_k$, в котором кинетические коэффициенты L_{ik} в области линейности неравновесных процессов удовлетворяют соотношениям взаимности Онсагера $L_{ik} = L_{ki}$ [15]. При необходимости учета инерционности массопереноса, как в случае процесса выщелачивания стекла [16], или решении задач массопереноса с реакцией и адсорбцией [17] пользуются нелинейным законом связи между потоками и силами. Кинетические коэффициенты L_{ik} при $i=k$ определяют прямые явления переноса, а при $i \neq k$ – сопряженные. К сопряженным процессам относятся такие, при которых градиент одной термодинамической силы обуславливает возникновение нескольких термодинамических потоков, или термодинамический поток определяется несколькими градиентами термодинамических сил [14].

Процесс съема материала с обрабатываемой поверхности при взаимодействии с инструментом можно рассматривать по аналогии с известными процессами, такими как термодиффузия, термоэлектрические явления, термомеханический и механокалорический эффекты. Съем материала с обрабатываемой поверхности твердого тела происходит в результате деформации его поверхности и сопровождается отрывом частиц шлама (потеря массы), генерацией и распространением в контактирующих телах тепла (теплопроводность), трибоэлектрическими (эмиссия электронов), трибооптическими (триболюминесценция), механохимическими (разрыв химических связей, образование свободных радикалов и дефектов структуры) и другими явлениями [13].

При анализе термодинамических сил, которые при необратимых процессах выражаются через градиенты температуры (при теплопроводности $X = -\frac{\nabla T}{T}$), электрического потенциала (при электропроводности $X = -\nabla \varphi$) и давления (при механической обработке, т.е. при съеме материала с обрабатываемой поверхности:

$$X = -\frac{1}{\rho} \cdot \nabla P \quad (\rho - \text{плотность обрабатываемого материала, свертка}$$

тензора давления $P = \sum_{j=k} P_k^j$).

С учетом вышеуказанного для термодинамического описания процесса съема материала с обрабатываемой поверхности соответственно для потоков энергии \vec{J}_1 , частиц \vec{J}_2 и заряда \vec{J}_3 с учетом определения потоков и сил можно записать:

$$\begin{aligned} \vec{J}_1 &= -\frac{1}{T} L_{11} \nabla T - \frac{1}{\rho} \cdot L_{12} \nabla P - L_{13} \nabla \varphi, \\ \vec{J}_2 &= -\frac{1}{T} L_{21} \nabla T - \frac{1}{\rho} \cdot L_{22} \nabla P - L_{23} \nabla \varphi, \\ \vec{J}_3 &= -\frac{1}{T} L_{31} \nabla T - \frac{1}{\rho} \cdot L_{32} \nabla P - L_{33} \nabla \varphi. \end{aligned} \quad (4)$$

Из соотношений Онсагера следует, что из 9 коэффициентов L_{ik} в (1) – 6 являются независимыми. Для их нахождения рассмотрим следующие процессы.

1. Процесс, при котором $\nabla \varphi = 0$ (механокалорический процесс). Из уравнений (4) следует, что в результате деформации твердого тела возникает градиент температур, а между кинетическими коэффициентами существует связь $\frac{L_{11}}{L_{21}} = \frac{L_{12}}{L_{22}}$.

2. Процессы, при которых $\nabla T = 0$. Из уравнений (4) следует, что в результате деформации твердого тела возникает градиент электрического потенциала (механоэлектрический процесс), а между кинетическими коэффициентами существуют связи:

$$\begin{aligned} \frac{J_1}{J_2} &= \frac{L_{12}}{L_{22}} = U^* \quad \text{и} \\ \frac{J_3}{J_2} &= \frac{L_{33}}{L_{23}} = Q^* \end{aligned} \quad (5)$$

где U^* и Q^* – энергия и заряд переноса (энергия и заряд, переносимые единицей массы при изотермическом процессе, Дж/кг).

С другой стороны, при действии электрического поля напряженностью E происходит деформация материала (обратный пьезоэффект), тензор напряжений и соответственно градиент давления выражаются в соответствии с формулой $\nabla P = \frac{d_{jk} C}{z_0} E_i$ (d_{jk} – тензор пьезоэлектрического модуля, C – модуль упругости обрабатываемого материала, z_0 – координата, соответствующая границе обрабатываемой

поверхности). При $\vec{J}_2 = 0$, $\frac{L_{22}}{L_{23}} = -\rho \frac{\nabla\varphi}{\nabla P}$, откуда следует, что

кинетические коэффициенты определяются выражениями:

$$L_{23} = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\nabla P}{\nabla\varphi} \cdot L_{22} = \frac{d_{jk} C}{\rho z_0} \cdot \frac{\xi}{U^*}.$$

3. Процессы, при которых $\nabla P = 0$. Это термоэлектрические явления – эффекты Зеебека, Пельтье и Томсона [14, 15, 18]. При $T = \text{const}$ согласно дифференциальному закону Ома $J_3 = J_q = \sigma \cdot E = -\sigma \cdot \nabla\varphi$, из чего с учетом соотношений Онсагера следует, что кинетические коэффициенты L_{33} выражаются через электропроводность твердого тела σ .

Для термоэлектрических явлений термодинамические потоки тепла и электрического тока связаны с термодинамическими силами – напряженностью электрического поля $E = -\nabla\varphi$ и градиентом температуры ∇T известными соотношениями:

$$\begin{aligned} \vec{J}_1 &= -\lambda \left(1 + \frac{\sigma\alpha^2}{\lambda} T\right) \nabla T - \sigma\alpha T \nabla\varphi \\ \vec{J}_3 &= -\sigma\alpha \nabla T - \sigma \nabla\varphi \end{aligned} \quad (6)$$

где α – коэффициент термоэдс обрабатываемого материала.

Исходя из этого, определяются кинетические коэффициенты:

$$L_{11} = \lambda \left(1 + \frac{\sigma\alpha^2}{\lambda} T\right) T, \quad L_{13} = L_{31} = \alpha\sigma T.$$

4. Процесс, при котором $\nabla\varphi = 0, \nabla T = 0$. Это износ (без учета тепловых и электрических явлений). Произведение $\frac{1}{\rho} \cdot L_{12} = -\frac{J_1}{\nabla P}$, как и коэффициент диффузии имеет размерность $[\text{м}^2/\text{с}]$. Целесообразно положить $L_{12} = \xi$ (ξ – массовый коэффициент износа ($\text{кг}/\text{м}\cdot\text{с}$), определяющий убыль массы тела на пути трения в 1 метр за время 1 с [13]).

На основе этого, с учетом полученных соотношений и, исходя из соотношений Онсагера, получены уравнения для кинетических коэффициентов, а также энергии и заряда переноса

$$\begin{aligned} U^* &= \frac{\lambda T}{\xi} \left(1 + \frac{\sigma\alpha^2}{\lambda} T\right), \\ Q^* &= \frac{U^* \sigma \rho z_0}{\xi d_{jk} C}. \end{aligned} \quad (7)$$

Уравнения для потоков энергии, массы и заряда принимают вид:

$$\begin{aligned} \bar{J}_1 &= -\lambda\left(1 + \frac{\sigma\alpha^2}{\lambda}T\right)\nabla T - \frac{\xi}{\rho}\nabla P - \alpha\sigma T\nabla\varphi, \\ \bar{J}_2 &= -\frac{\xi}{T}\nabla T - \frac{\xi}{U^*\rho}\nabla P - \frac{\sigma}{Q^*}\nabla\varphi, \\ \bar{J}_3 &= -\alpha\sigma\nabla T - \frac{\sigma}{Q^*\rho}\nabla P - \sigma\nabla\varphi. \end{aligned} \quad (8)$$

Подставляя величину потока массы \bar{J}_2 в уравнение переноса массы частиц шлама при $\sigma_i = 0$, можно получить (Δ – оператор Лапласа):

$$\rho \frac{\partial c_i}{\partial \tau} - \frac{\xi}{T} \Delta T - \frac{\xi}{U^* \rho} \Delta P - \frac{\sigma}{Q^*} \Delta \varphi = 0 \quad (9)$$

Кроме того, принимая допущения, что в элементарном акте съема обрабатываемого материала изменения температуры системы незначительны, а на i -ю частицу шлама действует сила, определяемая концентрацией c_i и давлением $P = f \cdot c_i$, а ее электрический потенциал

$\varphi = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 z_0} c_i$, уравнение (9) можно преобразовать к виду:

$$\frac{\partial c_i}{\partial \tau} - \frac{1}{\rho} \left(\frac{\xi}{U^* \rho} f + \frac{\gamma \sigma}{Q^*} \right) \Delta c_i = 0 \quad (10)$$

где $\gamma = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 z_0}$.

По аналогии с [13], вводя в качестве коэффициента объемного износа обобщенный параметр $\kappa = \frac{1}{\rho} \left(\frac{\xi}{U^* \rho} f + \frac{\gamma \sigma}{Q^*} \right)$ (размерность m^2/c), можно привести уравнение (10) к традиционному виду:

$$\frac{\partial c_i}{\partial \tau} - \kappa \Delta c_i = 0 \quad (11)$$

Решение уравнения (11) при начальных и граничных условиях $c(0, \tau) = n_{0i}$, $c(z, 0) = 0$ (n_{0i} – концентрация частиц шлама на поверхности обрабатываемой детали) имеем в виде [13, 19]

$$c_i(z, \tau) = n_{0i} \cdot \operatorname{erfc} \left(\frac{z}{2\sqrt{\kappa \cdot \tau}} \right) \quad (12)$$

где $\operatorname{erfc}(x) = 1 - \operatorname{erf}(x)$, $\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \int_x^{\infty} e^{-t^2} \cdot dt$ – интегралы ошибок.

Величина съема обрабатываемого материала (по объему) V за время τ определяется в соответствии с формулой:

$$V(\tau) = \sum_i V_{0i} \cdot c_i(z, \tau) \Big|_{z=z_0} \quad (13)$$

где V_{0i} – объем i -тых частиц шлама; $z_0 = R \max$ – координата, соответствующая границе обрабатываемой поверхности.

Таким образом, для определения износа поверхности твердого тела в процессе полирования необходимо знать концентрацию i -тых частиц шлама на поверхности обрабатываемого материала n_{0i} , их объемы V_{0i} , общее число, функцию их распределения по размерам, а также величину обобщенного параметра объемного износа κ , который в отличие от коэффициента объемного износа [13] зависит от электрических свойств обрабатываемой детали, инструмента и технологической среды.

Выводы. На основе результатов термодинамического анализа взаимодействия поверхностей обрабатываемой детали и рабочего слоя инструмента с учетом триботермоэлектрических явлений, происходящих в зоне их контакта, получено уравнение для концентрации частиц шлама, образующихся в процессе полирования, которое позволяет исследовать влияние электрических свойств обрабатываемой детали, инструмента и технологической среды на производительность съема обрабатываемого материала и состояние обработанной поверхности.

ЛИТЕРАТУРА:

1. *Филатов Ю.Д.* Полирование алюмосиликатных материалов инструментом со связанным полировальным порошком / Сверхтвердые материалы. – 2001. – № 3. – С. 36–49.
2. *Rogov V.V., Filatov Y.D., Kottler W., Sobol V.P.* New technology of precision polishing of glass optic / Optical Engineering. – Vol. 40, august 2001. – P. 1641–1645.
3. *Филатов Ю.Д.* Полирование прецизионных поверхностей деталей из неметаллических материалов инструментом со связанным полировальным порошком // Сверхтвердые материалы. – 2008. – № 1. – С. 59–66.
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. *Filatov Yu., and Sidorko V.*, Formation of Flat Optical Surfaces in Polishing, *Jemna mehanika a optika.*– 2009.– N 9.– P. 239–243.
 6. *Novikov M., Sidorko V., Filatov Y.D.* Diamond-abrasive finishing non-metallic materials // Conference Proceedings of International Conference «Advanced Processing for Novel Functional Materials – APNFM 2008». – 23–25 January 2008. – pp. 141–143.
 7. Bound-abrasive grinding and polishing of surfaces of optical materials / *Filatov Y.D., Filatov O.Y., Monteil G., Heisel U., Storchak M.G.* // Optical Engineering. Vol. 50, Issue 6, pp. 063401–063401–7 (2011).
 8. *Filatov Yu.D., Sidorko V.I., Filatov A.Yu., Yashuk V.P., Heisel W., Storchak M.* Surface quality control in diamond abrasive finishing // Optical Measurement Systems for Industrial Inspection VI. – Proceedings of SPIE, Vol. 7389, pp. 73892O–73892O–9 (2009).
 9. *Filatov O.Y., Poperenko L.V.* In situ ellipsometry of surface layer of nonmetallic transparent materials during its finish processing // Applied Surface Science, Vol. 253, Issue 1, 31 October 2006, pp. 163–166.
 10. *Filatov Y.D., Filatov O.Y., Heisel U., Storchak M.G., Monteil G.* In situ control of roughness of processed surfaces by reflectometric method // Optical Micro- and Nanometrology III. – Proceedings of SPIE. – Vol. 7718, pp. 77181J–9 (2010).
 11. *Філатов Ю.Д.* Взаємодія частинок шламу та зносу в зоні контакту деталі та інструменту при поліруванні неметалевих матеріалів / Процеси механічної обробки в машинобудуванні: Зб. наук. пр. – Житомир: ЖДТУ, 2009. – Вип. 7. – С. 247–256.
 12. Образование налета продуктов износа на поверхности рабочего слоя полировального инструмента / *А.Ю. Филатов, Л.В. Поперенко, В.П. Яцук, В.И. Сидорко, У. Хайзель, М. Сторчак* // Сверхтвердые материалы, 2011, № 1. – С. 59–71.
 13. *Сидорко В.И., Филатов Ю.Д.* Производительность обработки деталей из неметаллических материалов при полировании / Наукові праці Донецького національного технічного університету, Серія: Машинобудування і машинознавство, Вип. 92. – Донецьк: Дон НТУ, 2005.– С. 99–108.
 14. *Базаров И.П.* Термодинамика: Учеб. для вузов. – М.: Высш. шк. – 1991. – 376 с.
 15. *Ансельм А.И.* Основы статистической физики и термодинамики. – М.: Наука. – 1973. – 423 с.

16. *Сиренек В.А.* Расчет процесса выщелачивания стекла на основе уравнения волновой диффузии / Физика и химия стекла. – 2001. – Т. 27. – № 1. – С. 91 – 100.
17. *Сидоренко С.И., Березовский А.А., Волошко С.М.* Нелинейные задачи массопереноса. – Киев.: Наукова думка. – 2002. – 449 с.
18. Термодинамика необратимых процессов. Лекции в летней международной школе физики им. Энрико Ферми. – М.: Изд-во иностранной лит. – 1962. – 426 с.
19. *Фарлоу С.* Уравнения с частными производными для научных работников и инженеров. – М.: Мир– 1985. – 383 с.

ФИЛАТОВ Юрий Данилович – доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией Института сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля Национальной академии наук Украины.

Научные интересы:

– физико-химия финишной обработки неметаллических материалов.

Тел.: (044) 379-11-09.

E-mail: filatov@ism.kiev.ua

КОВАЛЕВ Сергей Викторович – младший научный сотрудник Института сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля Национальной академии наук Украины.

Научные интересы:

- финишная алмазно-абразивная обработка природного камня.

Тел.: (044) 379-11-09.

E-mail: filatov@ism.kiev.ua

РУДЕНКО Мария Андреевна – аспирант Института сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля Национальной академии наук Украины.

Научные интересы:

- финишная алмазно-абразивная обработка природного камня.

Тел.: (044) 379-11-09.

E-mail: rudenko_m@i.ua

Подано 26.08.2011