

## ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ ИЗ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ПОЛИРОВАНИИ

**Сидорко В.И., Филатов Ю.Д.**

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

Механическая обработка (точение, фрезерование, шлифование, полирование) поверхностей деталей из неметаллических материалов обязательно сопровождаются износом, то есть всегда существует отличная от нуля величина убыли их массы. При полировании образуются частицы износа, имеющие конечные размеры и массу. Анализ известных закономерностей износа при обработке различных материалов [1] показывает, что только при контакте поверхностей деталей из неметаллических материалов и их взаимном перемещении происходит износ поверхностей.

Экспериментальные исследования и теоретический анализ функции распределения частиц износа, образовавшихся в процессе полирования стекла и других кремнеземсодержащих материалов, по размерам осуществлен в рамках кластерной модели износа в работах [2 - 3].

Статистический подход к проблеме истирания поверхностей деталей в процессе полирования, предложенный в [4], исходя из современного состояния трибологии, теории резания и механической обработки материалов, может найти свое дальнейшее развитие при использовании подхода, согласно которому износ следует рассматривать как явление переноса. В последнее время такой подход активно развивается [5 – 6]. Поток частиц износа через границу раздела фаз (через поверхность контакта: деталь – инструмент, или деталь – СОТС) при механической обработке с физической точки зрения ничем не отличается от потоков частиц, энергии, импульса в известных явлениях переноса.

В связи с указанным целью работы являлось исследование закономерностей съема обрабатываемого материала, исходя из аналогии с известными явлениями переноса [7].

Феноменологический подход к указанным явлениям позволяет сформулировать основные законы явлений переноса (табл. 1) [7].

Таблица 1. Феноменологические законы переноса

№	Процесс	Поток	Градиент	Коэффициент переноса	Закон
1.	Диффузия	Частицы	$\frac{dn}{dz}$	Коэффициент диффузии $D$	$J_n = -D \cdot grad(n)$
2.	Теплопроводность	Энергия	$\frac{du}{dz}$	Коэффициент теплопроводности $\lambda$	$J_u = -\lambda \cdot grad(T)$
3.	Вязкость	Поперечный импульс	$m \frac{dv}{dz}$	Коэффициент вязкости $\eta$	$f = J_p = -\eta \cdot grad(v)$
4.	Электропроводность	Заряд	$-\frac{d\varphi}{dz} = E_z$	Проводимость $\sigma$	$J_q = -\sigma \cdot grad(\varphi)$
5.	Износ	Масса	$\frac{d\vec{T}_n}{dz}$	Коэффициент износа $i$	$J_m = -i \cdot grad(\vec{T}_n)$

Обозначения:  $n$  – число частиц в единице объема,  $u$  – средняя тепловая энергия единицы объема,  $m$  – масса частицы,  $T$  – температура,  $z$  – координата,  $v$  – скорость,  $p$  – импульс,  $\varphi$  – электростатический потенциал,  $E$  – напряженность электрического поля,  $q$  – электрический заряд,  $f$  – касательная сила, отнесенная к единице площади,  $J_n, J_u, J_p, J_q, J_m$  – потоки частиц, энергии, импульса, заряда и массы соответственно.

Стандартная запись явления переноса следующая[7]:

$$\text{Поток} = (\text{коэффициент}) \bullet (\text{движущая сила}).$$

Определение потока физической величины  $A$  при этом записывается следующим образом:

*Поток  $A$*  = результирующее количество  $A$ , переносимое через единицу площади в единицу времени.

Исходя из общих соображений, приведенную таблицу можно дополнить, записав для процесса износа (табл. 1, п. 5) закон изменения потока массы, согласно которому он изменяется пропорционально градиенту тензора напряжений, поскольку сам факт возникновения частицы износа обусловлен силами деформации поверхности обрабатываемой детали. Коэффициент пропорциональности  $i$  является коэффициентом износа.

Для анализа процесса износа воспользуемся кластерной моделью износа [2 – 3, 8], согласно которой можно считать, что поверхность твердого тела состоит из набора кластеров (будущих частиц износа), и результатами работы [9]. В поверхностном слое обрабатываемой детали выделяем область  $D_1$ , которая деформируется при взаимодействии с инструментом и перемещается в пространстве со скоростью  $\vec{w}_i$ , совпадающей по величине и направлению со скоростью  $i$  – го кластера.

При перемещении и деформации этой области в пространстве за промежуток времени  $\Delta \tau$ , она трансформируется в область  $D_2$  (рис. 1). Соответственно деформируется и система координат  $X_1 Y_1 Z_1$ , связанная с этой областью, в  $X_2 Y_2 Z_2$ . Объемы этой области в системах координат  $X_1 Y_1 Z_1$  и  $X_2 Y_2 Z_2$  определяются формулами:

$$V_1 = \iiint_{D_1} dx_1 dy_1 dz_1 \quad \text{и} \quad V_2 = \iiint_{D_2} dx_2 dy_2 dz_2 .$$

Преобразование координат осуществляется при помощи уравнений:  $\vec{r}_2 = \vec{r}_1 + w_i(\vec{r}_1) \cdot \Delta \tau$ , а якобиан этого преобразования при пренебрежении величинами второго порядка малости по  $\Delta \tau$ , определяется согласно формуле:

$$\frac{D(x_2, y_2, z_2)}{D(x_1, y_1, z_1)} = 1 + \Delta \tau \cdot \text{div}(\vec{w}_i) . \quad (1)$$

Для вывода уравнения переноса кластеров определялось изменение массы с учетом якобиана преобразования (1):

$$\frac{d}{d\tau} \iiint_D \rho dx dy dz = \iiint_D \left\{ \frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \text{div}(\rho \vec{w}) \right\} dx dy dz . \quad (2)$$

где  $\rho$  – плотность обрабатываемого материала.

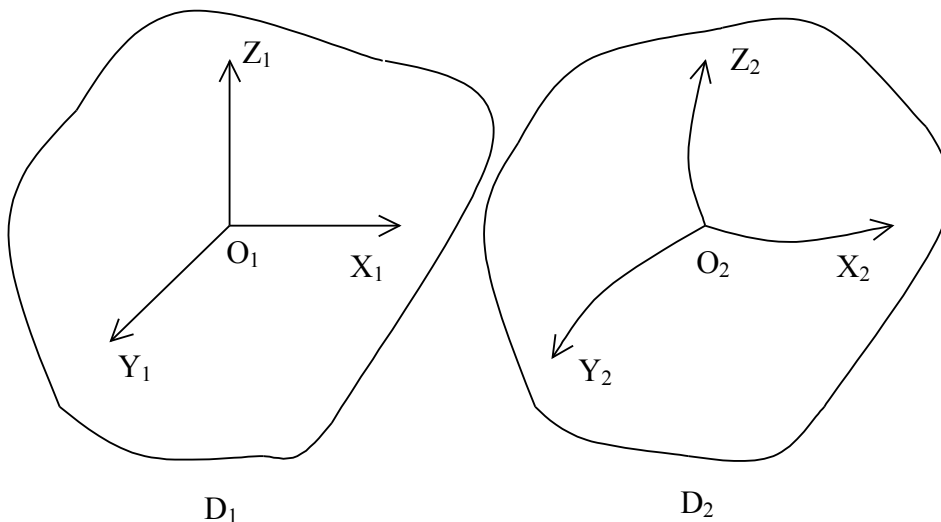


Рис. 1. Деформация области  $D$  при перемещении в пространстве

Область  $D$  поверхностного слоя обрабатываемой детали перемещается в пространстве, деформируется в процессе взаимодействия с поверхностью инструмента, и в результате этого изнашивается. Величина ее износа характеризуется убылью массы, которая равна массе кластеров, которые покидают выделенный объем в единицу времени и превращаются в частицы износа. Обозначив через  $\sigma_i$  – массу кластеров, образующихся в единице объема за единицу времени за счет химических реакций (интенсивность источника массы), для изменения массы  $\Sigma$  можно записать уравнение:

$$\Sigma = \iiint_D \sigma_i(x, y, z, \tau) dx dy dz .$$

Записав уравнение баланса массы и, исходя из выражений для потока и плотности  $i$  – тых кластеров, с учетом уравнения неразрывности, можно получить:

$$\rho \frac{\partial c_i}{\partial \tau} + \operatorname{div} \vec{J}_i = \sigma_i . \quad (3)$$

где  $c_i$  – массовое содержание в выделенном объеме  $i$  – тых кластеров (концентрация),

$\vec{J}_i$  – вектор потока кластеров.

Полученное уравнение переноса массы  $i$  – тых кластеров, записанное для их массового содержания, характеризует изменение массы за счет перемещения обрабатываемой детали относительно инструмента, износа ее поверхности и наличия источника.

Импульс кластеров на поверхности твердого тела зависит от действующих в процессе износа на выделенную область  $D$  объемных и поверхностных сил. Объемная сила, действующая на выделенную область, определяется уравнением:

$$\vec{F}_v(\tau) = \iiint_D \sum_i \rho_i \cdot \vec{F}_i \cdot dx dy dz ,$$

где  $\vec{F}_i$  – внешняя сила, действующая на единицу массы  $i$  – го кластера.

Результирующая всех поверхностных сил может быть определена из выражения:

$$\vec{F}_s(\tau) = \iint_S \vec{t}_n(\vec{r}, \tau) dS,$$

где  $\vec{t}_n(\vec{r}, \tau) = \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{F}}{\Delta S} = \vec{n} \cdot \vec{T}_n(\vec{r}, \tau)$  – вектор напряжений,

$\vec{n}$  – единичный вектор нормали к поверхности,

$\Delta \vec{F}$  – поверхностная сила, действующая на элементарной площадке  $\Delta S$ ,

$$\vec{T}_n(\vec{r}, \tau) = \begin{pmatrix} t_{xx} & t_{xy} & t_{xz} \\ t_{yx} & t_{yy} & t_{yz} \\ t_{zx} & t_{zy} & t_{zz} \end{pmatrix} \text{ – тензор напряжений.}$$

Уравнение движения выделенной области обрабатываемой поверхности может быть представлено в виде:

$$\rho \frac{d\vec{w}}{d\tau} = \sum_i \rho_i \cdot \vec{F}_i + \text{div}(\vec{T}_n) \quad (4)$$

и описывает перенос импульса. Тензор напряжений характеризует величину потока импульса ( $\vec{J}_p = -\vec{T}_n$ ), а результирующая объемных сил ( $\sum_i \rho_i \cdot \vec{F}_i$ ) определяет источник импульса  $\sigma_p$ . В связи с этим уравнение (4) может быть записано в виде:

$$\rho \frac{d\vec{w}}{d\tau} + \text{div}\vec{J}_p = \sigma_p. \quad (5)$$

Величина полной энергии, выделенной области, описывается уравнением [9]:

$$\rho \frac{dE}{d\tau} + \text{div}\vec{J}_e = \sigma_e, \quad (6)$$

где  $\vec{J}_e$  – плотность потока энергии, проходящей через единицу площади в единицу времени,  $\sigma_e$  – плотность источника энергии.

В общем случае плотность потока энергии, проходящей через единицу площади в единицу времени, в соответствии с [9] определяется уравнением:  $\vec{J}_e = \vec{J}_q - \vec{T}_n \cdot \vec{w} + \sum_i \psi_i \cdot \vec{J}_i$ , согласно которому плотность полного потока энергии складывается из плотностей потоков энергии, обусловленной теплопроводностью ( $\vec{J}_q$ ), энергии, выделяемой при работе поверхностных сил ( $-\vec{T}_n \cdot \vec{w}$ ) и потенциальной энергии переноса  $i$  – тых кластеров в поле объемных сил  $\vec{F}_i = -\nabla \psi_i$  ( $\psi_i$  – потенциал объемной силы).

Для решения системы уравнений (3), (5) и (6), ее необходимо дополнить уравнением неразрывности и уравнениями для потоков, которые могут быть получены методами неравновесной термодинамики.

При термодинамическом равновесии в системе, то есть отсутствии градиентов температуры  $T$  и химического потенциала  $\mu$ , 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 [10].

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

$$\nabla T \neq 0, \nabla \mu \neq 0,$$

$$v_0^{\frac{1}{3}} \ll l \ll \left| \frac{1}{a_i} \cdot \frac{\partial a_i}{\partial x} \right|^{-1},$$

$$\tau_l \ll \tau_0 \ll \tau_L,$$

где:  $l^3$  – элементарный объем,  $v_0$  – объем одной частицы,  $a_i$  – макроскопические термодинамические параметры системы,  $x$  – координата,  $\tau_0, \tau_l$  – время изменения термодинамических параметров и время релаксации (время перехода в равновесное состояние) в физически малых равновесных частях,  $\tau_L$  – 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 износа) [10].

Состояние элементарного объема в момент времени  $\tau$  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 [9 - 10]:

$$Tds = dU + p \cdot dv - \sum_i \mu_i \cdot dc_i.$$

При этом энтропия неравновесной системы  $s$  и скорость производства энтропии  $\sigma$  определяются уравнениями [9 - 11]:

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

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

$$J_i = \sum_k L_{ik} \cdot X_k, \quad (7)$$

в котором кинетические коэффициенты  $L_{ik}$  в области линейности неравновесных процессов удовлетворяют соотношениям взаимности Онсагера  $L_{ik} = L_{ki}$  [9, 11]. При необходимости учета инерционности массопереноса, как в случае процесса выщелачивания стекла [12], или решении задач массопереноса с реакцией и адсорбцией [13] пользуются нелинейным законом связи между потоками и силами.

Кинетические коэффициенты  $L_{ik}$  (формула (7)) при  $i = k$  определяют прямые явления переноса (таблица 1), 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 [10].

Процесс износа поверхностей деталей из неметаллических материалов при взаимодействии с инструментом в условиях механической обработки можно рассматривать по аналогии с известными процессами, такими как термодиффузия, термоэлектрические явления (эффекты Зеебека, Пельтье и Томсона), термомеханический и механокалорический эффекты [10 - 11]. Износ поверхности твердого тела происходит в результате деформации его поверхности и сопровождается отрывом частиц износа (потеря массы), генерацией и распространением в контактирующих телах тепла (теплопроводность), трибоэлектрическими (эмиссия электронов), трибооптическими (трибололюминисценция), механохимическими (разрыв химических связей, образование свободных радикалов и дефектов структуры) и другими явлениями [8].

При анализе термодинамических сил, которые при необратимых процессах выражаются через градиенты температуры  $T$  (теплопроводность –  $X = -\frac{\nabla T}{T}$ ), электрического потенциала  $\varphi$  (электропроводность –  $X = -\nabla \varphi$ ) и электрохимического потенциала  $\mu$  (диффузия, поток частиц –  $X = -T \cdot \nabla (\frac{\mu}{T})$ ) [10, 11], можно считать, что при износе соответствующие термодинамические силы пропорциональны градиенту тензора напряжений  $\vec{T}_n$ , то есть  $X = -\alpha \cdot \nabla \vec{T}_n$  ( $\alpha$  – некоторый коэффициент). Исходя из принципа Кюри о сохранении симметрии причины в симметрии следствий [10, 14], согласно которому термодинамическая сила не может вызвать потоки, имеющие другую тензорную размерность, можно заключить, что в результате скалярных процессов (механохимические явления и трибололюминисценция) не могут возникать потоки частиц (износ).

С учетом вышеуказанного для термодинамического описания процесса износа деталей из неметаллических материалов на основе феноменологических уравнений (8) соответственно для потоков энергии  $J_1$ , частиц  $J_2$ , заряда  $J_3$  и импульса  $J_4$  в общем виде (с учетом определения потоков и сил) можно записать:

$$\begin{aligned} J_1 &= -\frac{1}{T} L_{11} \nabla T - \alpha \cdot L_{12} \nabla \vec{T}_n - TL_{13} \nabla \left(\frac{\mu}{T}\right) - L_{14} \nabla \varphi, \\ J_2 &= -\frac{1}{T} L_{21} \nabla T - \alpha \cdot L_{22} \nabla \vec{T}_n - TL_{23} \nabla \left(\frac{\mu}{T}\right) - L_{24} \nabla \varphi, \end{aligned} \quad (8)$$

$$J_3 = -\frac{1}{T} L_{31} \nabla T - \alpha \cdot L_{32} \nabla \vec{T}_n - TL_{33} \nabla \left(\frac{\mu}{T}\right) - L_{34} \nabla \varphi ,$$

$$J_4 = -\frac{1}{T} L_{41} \nabla T - \alpha \cdot L_{42} \nabla \vec{T}_n - TL_{43} \nabla \left(\frac{\mu}{T}\right) - L_{44} \nabla \varphi .$$

Исходя из соотношений Онсагера, можно заключить, что из 16 кинетических коэффициентов  $L_{ik}$  в (8) - 10 являются независимыми. Для их нахождения рассмотрим следующие процессы:

1. Процесс, при котором  $\nabla \mu = 0, \nabla \varphi = 0$  (механокалорический процесс),
2. Процесс, при котором  $\nabla \mu = 0, \nabla T = 0$  (механоэлектрический процесс),
3. Процесс, при котором  $\nabla \varphi = 0, \nabla T = 0$ . Этот процесс является чистым износом (без учета тепловых и электрических явлений). При  $\nabla \mu = 0$  произведение коэффициентов

$\alpha \cdot L_{12} = -\frac{J_1}{\nabla \vec{T}_n}$ . Положив, что  $\alpha = \frac{1}{\rho}$ , для описания процесса износа введен параметр

$\xi$  – массовый коэффициент износа (размерность – кг/м·с), как величина, определяющая убыль массы твердого тела на пути трения в 1 метр за время 1 с:

4. Процесс, при котором  $\nabla \varphi = 0, \nabla \vec{T}_n = 0$  (термодиффузия). При  $\nabla T = 0$  он характеризуется величиной энергии переноса  $\frac{L_{11}}{L_{21}} = U^*$  [10], а кинетический коэффициент  $L_{11}$

в соответствии с законом Фурье для теплопроводности ( $J_1 = -\lambda \cdot \nabla T$ ) выражается уравнением  $L_{11} = \lambda \cdot T$ .

5. Процесс, при котором  $\nabla \mu = 0, \nabla \vec{T}_n = 0$  (термоэлектрические явления – эффекты Зеебека, Пельтье и Томсона) [10 - 11].

6. Процесс, при котором  $\nabla T = 0, \nabla \vec{T}_n = 0$  (явление возникновения электрического тока без разложения вещества) [10].

Рассмотренные процессы являются сопряженными и соответствуют сочетаниям из четырех термодинамических сил по две ( $C_4^2 = 6$ ). Для получения дополнительных соотношений, связывающих кинетические коэффициенты, необходимо рассмотрение сопряженных процессов, в которых градиент только одной из термодинамических сил равен нулю.

На основе этого, исходя из соотношений Онсагера, получено уравнение, связывающее параметр  $\xi$  с коэффициентом теплопроводности, температурой и энергией переноса:

$$\xi \cdot U^* = \lambda \cdot T , \tag{9}$$

а также уравнения для потоков энергии и массы в виде:

$$J_1 = -\lambda \cdot \nabla T - \frac{\xi}{\rho} \cdot \nabla \vec{T}_n , \tag{10}$$

$$J_2 = -\frac{\xi}{T} \nabla T - \frac{\xi}{\rho \cdot U^*} \nabla \vec{T}_n . \tag{11}$$

Уравнения (10) и (11) выдержаны по размерностям физических величин и могут быть использованы для решения задачи об износе поверхностей деталей из неметаллических материалов при полировании. Подставляя величину потока массы (11) в уравнение переноса массы кластеров (3) с учетом, что интенсивностью источника массы можно пренебречь, получим:

$$\rho \frac{\partial c_i}{\partial \tau} - \frac{\xi}{T} \cdot \Delta T - i \cdot \Delta \vec{T}_n = 0, \quad (12)$$

где  $\Delta$  – оператор Лапласа.

Для решения уравнения (12) примем допущения, состоящие в том, что в элементарном акте износа изменения температуры системы незначительны, а отрыв кластеров происходит в результате действия поверхностных сил  $f$  (действующих на единицу площади изнашиваемой поверхности), направленных вдоль нормали  $\vec{n}$ . Тогда на  $i$  – тый кластер действует сила  $f_i = f \cdot c_i$ , определяемая тензором напряжений  $\vec{T}_n$ , а уравнение (12) может быть представлено в виде ( $\eta = \frac{i \cdot f}{\rho}$  – объемный коэффициент износа):

$$\frac{\partial c_i}{\partial \tau} - \eta \cdot \Delta c_i = 0. \quad (13)$$

Решение уравнения (13) при начальных и граничных условиях  $c(0, \tau) = n_{oi}$ ,  $c(z, 0) = 0$  ( $n_o$  – концентрация кластеров на поверхности изнашиваемой детали) имеем в виде [15]:

$$c_i(z, \tau) = n_{oi} \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{z}{2\sqrt{\eta \cdot \tau}}\right). \quad (14)$$

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

$$V(\tau) = \sum_i V_{oi} \cdot c_i(z, \tau)|_{z=z_0}, \quad (15)$$

где  $V_{oi}$  – объем  $i$  – тых кластеров,

$z_0 = R \max$  – координата, соответствующая границе изнашиваемого тела.

Таким образом, для определения износа поверхности твердого тела в процессе полирования необходимо знать концентрацию  $i$  – тых кластеров на поверхности изнашиваемого тела  $n_{oi}$ , их объемы  $V_{oi}$ , общее число кластеров, функцию их распределения по размерам, а также величину коэффициента  $\eta$ .

Для процесса полирования деталей из стекла и кремнеземсодержащих материалов инструментом на основе диоксида церия, концентрацию кластеров и их объемы можно рассчитать, исходя из кластерной модели [3]. Модельные расчеты для случая обработки плоской поверхности детали из кварца диаметром 60 мм на станке типа ШП инструментом «Аквапол» при частоте вращения 200 об/мин и номинальном давлении прижима 80 кПа показали, что распределение частиц износа по размерам – пуассо-



новское с параметром  $\nu = 0,247$ , а число кластеров  $n_{oi}$ , образующихся за 1 с, и их объемы  $V_{oi}$  ( $i = 1, 2, \dots, 5$ ) соответствуют данным таблицы 2.

Таблица 2. Концентрация и объем кластеров

№ п.п	Номер кластера, $i$	Концентрация кластеров, $n_{oi}$ , $10^{13}$	Объем кластера, $V_{oi} \cdot 10^{27}$ , $m^3$
1	1	723,7	1,9
2	2	172,0	5,3
3	3	20,4	9,8
4	4	1,48	15,1
5	5	0,08	21,1

Величина коэффициента  $\eta$ , рассчитанная на основе уравнения (10), составляет  $2 \cdot 10^{-11}$   $m^2/c$ . Экспериментальное значение шероховатости обработанной поверхности кварца  $R_{max} = 0,11$   $\mu m$ . Расчетная величина производительности съема обрабатываемого материала при полировании кварца составляет  $1,37 \cdot 10^{-11}$   $m^3/c$ . Ее отклонение от экспериментально измеренной величины (по весовому съему – 1,75  $mg/min$ , по линейной величине съема – 0,234  $\mu m/min$ , по объему снятого за единицу времени материала –  $1,1 \cdot 10^{-11}$   $m^3/c$ ) оценивается на уровне 21 %.

Таким образом, представление процесса съема обрабатываемого материала как явления переноса позволяет описать закономерности этого процесса и с достаточной степенью точности рассчитать величину производительности его полирования (на примере кварца). Описанный подход к проблеме износа обрабатываемых поверхностей является перспективным как в плане расширения объектов для экспериментальной проверки, так и в плане обобщения на все виды механической обработки материалов и процессы трения.

**Список литературы:** 1. Рогов В.В. Финишная алмазно-абразивная обработка неметаллических деталей. – Киев: Наукова думка, 1985. – 264 с. 2. Филатов Ю.Д. Механизм образования микрорельефа поверхности при обработке стекла//Сверхтвердые материалы. – 1991.– № 5. – С. 61-65. 3. Филатов Ю.Д. Полирование алюмосиликатных материалов инструментом со связанным полировальным порошком // Сверхтвердые материалы. – 2001.– № 3.– С. 36-49. 4. Цеснек Л.С. Механика и микрофизика истирания поверхностей. – М.: Машиностроение, 1979. – 264 с. 5. Кім В.О., Якубов Ф.Я. Энергетика процесу самоорганізації при терті та зношуванні // Вісник ЖІТІ. – 2001/ Спеціальний випуск/ Технічні науки. – С. 172-175. 6. Кухта С.В., Пешкун С.В., Хейфец М.Л. Системные основы технологической подготовки высокоэффективного производства // Вісник ЖІТІ. – 1999. – № 10 / Технічні науки. – С. 63-65. 7. Киттель Ч. Статистическая термодинамика. – М.: Наука, 1977. – 336 с. 8. Філатов Ю.Д. Наукові основи прецизійного полірування поверхонь деталей з кремнеземвміщуючих матеріалів. – Автореферат дис...докт. техн. наук.– Київ, 1996.– 35 с. 9. Протодьяконов И.О., Марцулевич Н.А., Марков А.В. Явления переноса в процессах химической технологии. – Л.: Химия, 1981. – 264 с. 10. Базаров И.П. Термодинамика: Учеб. для вузов. – М.: Высшая школа, 1991. – 376 с. 11. Ансельм А.И. Основы статистической физики и термодинамики. – М.: Наука, 1973. – 423 с. 12. Сиренек В.А. Расчет процесса выщелачивания стекла на основе уравнения волновой диффузии / Физика и химия стекла. – 2001. – Т. 27. – № 1. – С. 91-100. 13. Сидоренко С.И., Березовский А.А., Волошко С.М. Нелинейные задачи

массопереноса. – Киев.: Наукова думка, 2002. – 449 с. **14.** Термодинамика необратимых процессов. Лекции в летней международной школе физики им. Энрико Ферми. – М.: Изд-во иностранной лит, 1962. – 426 с. **15.** Фарлоу С. Уравнения с частными производными для научных работников и инженеров. – М.: Мир, 1985. – 383 с.

#### ПРОДУКТИВНІСТЬ ОБРОБКИ ДЕТАЛЕЙ З НЕМЕТАЛЕВИХ МАТЕРІАЛІВ ПРИ ПОЛІРУВАННІ

Сідорко В.І., Філатов Ю.Д.

Наведено результати теоретичного аналізу зняття оброблюваного матеріалу при поліруванні як процесу масопереносу. Отримано рівняння для концентрації частинок зносу, що утворюються в процесі полірування, яке дозволило розрахувати продуктивність полірування деталей з кварцу.

#### ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ ИЗ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ПОЛИРОВАНИИ

Сидорко В.И., Филатов Ю.Д.

Представлены результаты теоретического анализа съема обрабатываемого материала при полировании как процесса массопереноса. Получено уравнение для концентрации частиц износа, образующихся в процессе полирования, которое позволило рассчитать производительность полирования деталей из кварца.

#### PRODUCTIVITY OF MACHINING DETAILS FROM NON-METALLIC MATERIALS WHEN POLISHING

Sidorko V.I., Filatov Y.D.

The results of theoretical analysis of material removal when polishing as the mass transfer process are presented. The equation for concentration of wear fragments that are formed in the process of polishing, which allowed calculation of productivity of polishing quartz is obtained.

Рецензент: д.т.н., проф. Калафатова Л.П.