



Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

Сайт журнала: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Вероятностная модель удаления поверхностного слоя при шлифовании хрупких неметаллических материалов

Сергей Братан^{a, *}, Станислав Рошчупкин^b, Александр Харченко^c, Анастасия Часовитина^d

Севастопольский государственный университет, ул. Университетская, 33, г. Севастополь, 299053, Россия

^a <https://orcid.org/0000-0002-9033-1174>, bratan@gmail.com, ^b <https://orcid.org/0000-0003-2040-2560>, st.roshchupkin@yandex.ru,
^c <https://orcid.org/0000-0003-1704-9380>, khaos@list.ru, ^d <https://orcid.org/0000-0001-6800-9392>, nastya.chasovitina@mail.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.923

История статьи:

Поступила: 15 марта 2021
 Рецензирование: 29 марта 2021
 Принята к печати: 14 апреля 2021
 Доступно онлайн: 15 июня 2021

Ключевые слова:

Шлифование хрупких материалов
 Абразивное зерно
 Зона контакта заготовки с инструментом
 Вероятность удаления материала
 Микрорезание
 Хрупкое скалывание
 Вероятность объемного разрушения

АННОТАЦИЯ

Введение. Окончательное качество изделий формируется на финишных операциях, к числу которых относится процесс шлифования. Известно, что при шлифовании хрупких материалов стоимость шлифовальных работ существенно возрастает. Уменьшить разброс показателей качества изделий при шлифовании хрупких материалов, а также повысить надежность и эффективность операции возможно путем выбора оптимальных параметров технологической системы на основе динамических моделей процесса. Однако для описания закономерностей удаления частиц хрупкого неметаллического материала и износа поверхности шлифовального круга в зоне контакта известные модели не позволяют учитывать особенности процесса, при котором сочетаются микрорезание и хрупкое скалывание материала. **Цель работы:** создание новой вероятностной модели удаления поверхностного слоя при шлифовании хрупких неметаллических материалов. Задачей является исследование закономерностей удаления частиц хрупкого неметаллического материала в зоне контакта. В работе удаление материала в зоне контакта в результате воздействия микрорезания и хрупкого скалывания рассмотрено как случайное событие. **Методами исследования** являются математическое и физическое моделирование с использованием основных положений теории вероятности, законов распределения случайных величин, а также теории резания и теории деформируемого твердого тела. **Результаты и обсуждение.** Разработанные математические модели позволяют проследить влияние на сьем материала наложения единичных срезов друг на друга при шлифовании отверстий керамических материалов. Предложенные зависимости показывают закономерность съема припуска в пределах дуги контакта шлифовального круга с заготовкой. Рассмотренные особенности изменения вероятности удаления материала при контакте обрабатываемой поверхности с абразивным инструментом и предложенные аналитические зависимости справедливы для широкого диапазона режимов шлифования, характеристик кругов и ряда других технологических факторов. Полученные выражения позволяют найти величину съема материала также для схем торцевого, плоского и круглого наружного шлифования, для чего необходимо знать величину приращения съема за счет хрупкого разрушения в процессе развития микротрещин в поверхностном слое. Одним из путей определения величины этого приращения является имитационное моделирование процесса трещинообразования с помощью ЭВМ. Представленные результаты подтверждают перспективность развиваемого подхода к моделированию процессов механической обработки хрупких неметаллических материалов.

Для цитирования: Вероятностная модель удаления поверхностного слоя при шлифовании хрупких неметаллических материалов / С.М. Братан, С.И. Рошчупкин, А.О. Харченко, А.С. Часовитина // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2021. – Т. 23, № 2. – С. 6–16. – DOI: 10.17212/1994-6309-2021-23.2-6-16.

Введение

Конструкционные неметаллические материалы, такие как керамика, стекло, кварц, ферриты, ситаллы находят все более широкое применение в промышленности благодаря своей высокой

твердости, прочности и износостойкости. Однако эти материалы обладают также высокой хрупкостью, что значительно усложняет их обработку. Параметры качества изделий, определяющие их функциональную пригодность и эксплуатационные характеристики, окончательно формируются на финишных операциях, к числу которых относится процесс шлифования. Известно, что при шлифовании металлов стоимость шлифовальных работ занимает в среднем 15...25 % от общих затрат на изготовление изделий [1],

*Адрес для переписки

Братан Сергей Михайлович, д.т.н., профессор
 Севастопольский государственный университет,
 ул. Университетская, 33,
 299053, г. Севастополь, Россия
 Тел.: +79787155019, e-mail: serg.bratan@gmail.com

при обработке хрупких материалов эта цифра существенно возрастает.

Процессы шлифования имеют сложную стохастическую природу [2], что приводит к разбросу показателей качества изделий, снижению надежности, производительности и экономичности технологического процесса. Уменьшить разброс показателей качества изделий при шлифовании хрупких материалов, а также повысить надежность и эффективность операции возможно путем выбора оптимальных параметров технологической системы на основе динамических моделей процесса.

Разработке динамических моделей для различных процессов абразивной обработки посвящено большое количество исследований [3–15]. Однако для описания закономерностей удаления частиц хрупкого неметаллического материала и износа поверхности шлифовального круга в зоне контакта известные модели не позволяют учитывать особенности процесса, при котором сочетаются микрорезание-скалывание и хрупкое объемное разрушение материала. В этой связи целью работы является создание новой вероятностной модели удаления поверхностного слоя при шлифовании хрупких неметаллических материалов. Задачей служит исследование закономерностей удаления частиц хрупкого неметаллического материала в зоне контакта.

Методика исследований

Моделирование процесса

Для получения зависимостей, позволяющих рассчитывать съем материала при шлифовании отверстий в заготовках из хрупких неметаллических материалов, рассмотрим представленную на рис. 1 схему.

В рассматриваемый период времени t_0 через уровень y поверхности заготовки проходят наиболее выступающие вершины абразивных зерен, которые при контакте с обрабатываемой поверхностью оставляют на ней следы в виде царапин. При этом вероятность их наложения может быть полной или частичной. В большинстве случаев преимущественно наблюдается неполный контакт. Часть зерен абразивного инструмента может попадать в след предшествующих зерен, не оставляя царапин.

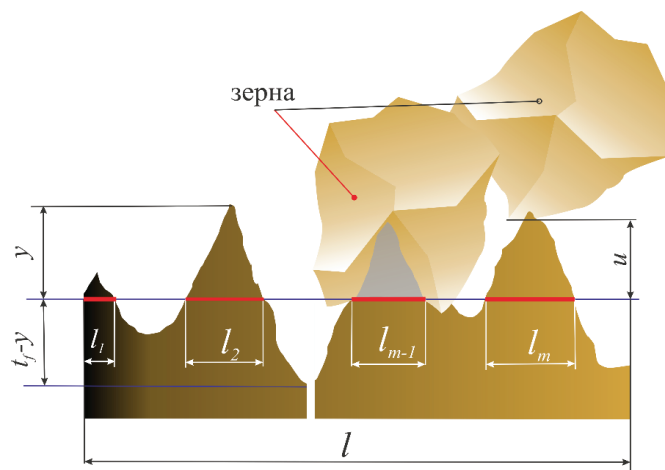


Рис. 1. Схема к расчету вероятности удаления поверхностного слоя при шлифовании материала

Fig. 1. Scheme for calculating the probability of removing the surface layer when grinding the material

Анализ исследования механизмов удаления материала единичным зерном показывает, что при прохождении зоны контакта зерно может срезать материал при попадании на выступ шероховатости поверхности, а может не срезать указанный материал при прохождении через впадину шероховатой поверхности. Исходя из анализа контакта вершины абразивного зерна с материалом в работе [16] предложена теоретико-вероятностная модель, позволяющая рассчитывать величину удаления материала при шлифовании пластичных материалов. Вероятность определяется отношением не удаленной части

металла $\sum_{i=1}^n l_i$ к общей длине рассматриваемого участка l (рис. 1):

$$P_k = \lim_{l \rightarrow \infty} \frac{\sum_{i=1}^n l_i}{l} = 1 - P(M) = \exp(-a_0 - a), \quad (1)$$

где a_0 – показатель, характеризующий исходное состояние поверхности заготовки в данном сечении перед началом процесса шлифования; a – показатель, характеризующий изменение площади впадин, формируемых суммой профилей абразивных зерен, проходящих через рассматриваемое сечение заготовки; $P(M)$ – вероятность удаления материала.

Для описания закономерностей удаления материала и износа поверхности инструмента в зоне контакта в работе [17] предложены понятия

вероятности удаления $P(M)$ и вероятности не-удаления $P(\bar{M})$ материала. Первый показатель $P(M)$ определяется вероятностью события, при котором материал в точке обрабатываемой поверхности удален. Вторым показателем $P(\bar{M})$ – вероятностью события, при котором материал с обрабатываемой поверхности не удален. Сумма вероятностей, как вероятностей событий противоположных, равна единице, а их значения зависят от положения точки в зоне контакта. Для процессов обработки заготовок абразивными инструментами вероятность удаления материала вычисляется по зависимости

$$P(M) = 1 - e^{-(a_0 + a_1 + \dots + a_k + \dots + a_j)}, \quad (2)$$

где a_1, \dots, a_j – показатели, характеризующие изменение площадей впадин, формируемых суммой профилей абразивных зерен, проходящих через рассматриваемое сечение заготовки после соответствующих контактов зерен с поверхностью заготовки.

В общем случае при чистовом и тонком шлифовании отверстий в заготовках из хрупких неметаллических материалов (стекло, керамика, кварц, ферриты, ситаллы и др.), а также в заготовках с керамическими покрытиями съем материала осуществляется за счет комбинации процессов микрорезания-скалывания и хрупкого объемного разрушения материала.

Для получения математической модели, позволяющей рассчитывать съем при шлифовании хрупких неметаллических материалов, рассмотрим процесс контактирования инструмента с заготовкой на уровне y .

В результате воздействия режущих и колющих зерен на поверхность заготовки происходит удаление материала в зоне контакта путем микрорезания и хрупкого скалывания, которое можно рассматривать как случайное событие. Оно характеризуется совместной вероятностью удаления материала заготовки процессом микрорезания или скалывания. Таким образом, вероятность удаления при шлифовании хрупких неметаллических материалов вычисляется по формуле

$$P(M) = P_1(\bar{M}) \cdot P_2(\bar{M}), \quad (3)$$

где $P_1(\bar{M})$ – вероятность события, при котором обрабатываемый материал не удаляется за счет процесса микрорезания; $P_2(\bar{M})$ – вероятность события, при котором обрабатываемый материал не удаляется за счет процесса хрупкого скалывания.

Аналогично уравнению (1) зависимость (3) может быть описана следующим выражением:

$$P(M) = 1 - \exp(-a_0 - a_1(y, \tau) - a_2(y, \tau)), \quad (4)$$

где a_0 – показатель, характеризующий исходное состояние поверхности заготовки в данном сечении перед началом процесса шлифования; $a_1(y, \tau)$ – показатель, характеризующий изменение площади впадин, формируемых за счет процесса механического резания; $a_2(y, \tau)$ – показатель, характеризующий изменение площади впадин, формируемых за счет процесса хрупкого скалывания; y – расстояние от наружной поверхности заготовки до текущего уровня; τ – момент времени происходящего события.

Для каждого оборота (прохода) изменение приращения показателя Δa_1 определяется выражением [16]

$$\Delta a_1(y, \tau) = k_c b_z \Delta \lambda, \quad (5)$$

где k_c – коэффициент стружкообразования; $b_z(y, \tau)$ – ширина зерна на уровне y ; $\Delta \lambda$ – число абразивных зерен, прошедших через рассматриваемое сечение.

При шлифовании хрупких материалов коэффициент стружкообразования k_c равен 1, так как процессы пластической деформации отсутствуют. Для расчета показателя Δa_1 , характеризующего изменение площади впадин, формируемых за счет процесса механического резания, учитываются зерна, срезающие материал (колющие зерна при этом не рассматриваются). На основании этого с учетом уравнения (5) показатель Δa_1 может быть рассчитан следующим образом:

$$\Delta a_1(y, \tau) = b_z \Delta \lambda (1 - P_{ck}), \quad (6)$$

где P_{ck} – вероятность хрупкого скалывания материала заготовки.

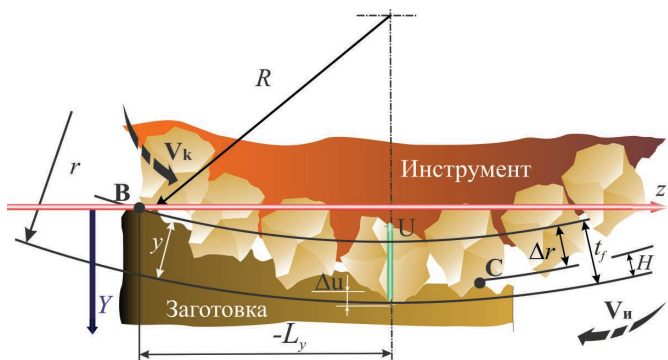


Рис. 2. Схема к расчету количества вершин абразивных зерен, проходящих через единичный участок поверхности толщиной инструмента за единицу времени

Fig. 2. Scheme for calculating the number of tops of abrasive grains, passing through a unit surface area by the thickness of the tool per unit of time

Через единичный участок поверхности толщиной Δu (рис. 2), за время $\Delta \tau$ пройдет $\Delta \lambda$ вершин абразивных зерен. Количество вершин абразивных зерен может быть рассчитано по плотности их распределения в рабочем слое инструмента $f(u)$ по координате u :

$$\Delta \lambda = n_z f(u) \Delta u (V_k \pm V_u) \Delta \tau, \quad (7)$$

где n_z – число зерен в единице площади рабочего слоя инструмента; V_k – окружная скорость инструмента (круга); V_u – окружная скорость заготовки.

Распределение режущих кромок по глубине рабочей поверхности инструмента изучено в работах [2, 15, 18]. При аналитическом описании кривых распределения Ж. Кассен принимает допущение, что число режущих кромок на поверхности круга пропорционально квадрату расстояния внутри круга [19]. Кривая плотности вероятности распределения режущих кромок моделируется их прямолинейной зависимостью $f(u) = C_f u$. По утверждению автора, моделирование кривой распределения прямолинейной зависимостью справедливо для участка круга, непосредственно лежащего вблизи поверхности. Для описания плотности распределения вершин абразивных зерен О. Койл предложил использовать зависимость вида [17]

$$f(u) = C_h u^{\chi-1}, \quad (8)$$

где C_h – коэффициент пропорциональности кривой распределения:

$$C_h = \frac{\chi}{H_u^\chi},$$

где H_u – толщина слоя рабочей поверхности инструмента, контактирующего с заготовкой.

С учетом вышеизложенного зависимость (8) может быть представлена в виде

$$f(u) = \frac{\chi}{H_u^\chi} u^{\chi-1}, \quad (9)$$

где χ – параметр функции плотности распределения.

Сопоставление значений плотности вероятности распределения для различных моделей (рис. 3) свидетельствует, что наиболее значительное отличие от динамического распределения имеет прямолинейная зависимость. Лучшее приближение обеспечивает степенная зависимость модифицированной функцией Γ -распределения.

Степенные зависимости в настоящее время широко применяются не только для математи-

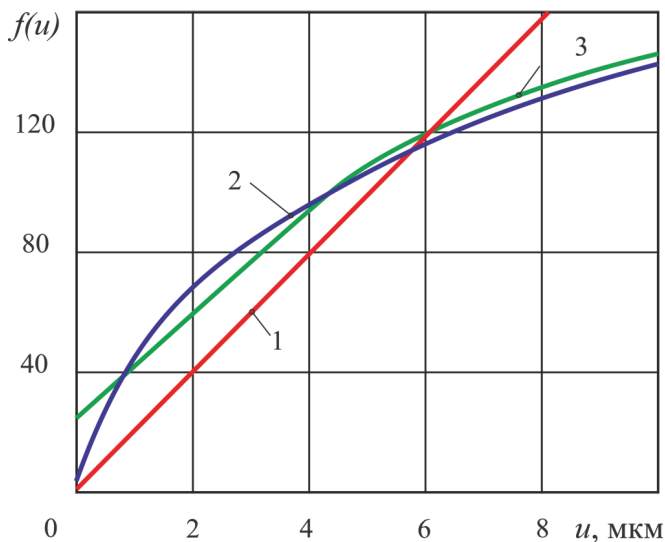


Рис. 3. Моделирование плотности вероятности распределения вершин зерен при аппроксимации их профиля:

1 – прямолинейной зависимостью; 2 – параболой; 3 – модифицированной функцией Γ -распределения

Fig. 3. Simulation of the probability density of the distribution of the tops of grains when approximating its profile:

1 – straight-line dependence; 2 – a parabola; 3 – modified function Γ -distributions



где P_0 – вероятностная характеристика скалывания хрупкого неметаллического материала; β – показатель степени в уравнении вероятности. Указанные параметры зависимости (17) могут быть рассчитаны по методике, предложенной в работе [21].

При подстановке в уравнение (15) полученных выражений b_z и $f(u)$ из уравнений (13) и (9) оно принимает вид

$$\begin{aligned}
 a_1(y, z) &= \frac{k_c C_b (V_k \pm V_u) n_z \chi}{V_u H_u^\chi} \times \\
 &\times \int_{-L_y}^z \int_0^{t(z)-y} \left(t_f - y - u - \frac{z^2}{D_e} \right)^m \times \\
 &\times u^{\chi-1} dudz - \frac{k_c C_b (V_k \pm V_u) n_z \chi P_0}{V_u H_u^\chi} \times \\
 &\times \int_{-L_y}^z \int_0^{t(z)-y} \left(t_f - y - u - \frac{z^2}{D_e} \right)^m \times \\
 &\times u^{\chi-1} dudz + \frac{k_c C_b (V_k \pm V_u) n_z \chi P_0}{V_u H_u^\chi} \times \\
 &\times \int_{-L_y}^z \int_0^{t(z)-y} \left(t_f - y - u - \frac{z^2}{D_e} \right)^m \times \\
 &\times u^{\chi-1} \left(\frac{u}{t_f} \right)^\beta dudz. \tag{18}
 \end{aligned}$$

Результаты и их обсуждение

Принятые ранее модели вершин зерен и плотностей их распределения по глубине позволяют перейти к установлению функциональных связей вероятности неудаления материала с технологическими факторами. После интегрирования полученного уравнения по u получим

$$\begin{aligned}
 a_1(y, z) &= \\
 &= \frac{k_c C_b (V_k \pm V_u) n_z \chi \Gamma(\chi) \Gamma(m+1) (1 - P_0)}{\Gamma(m + \chi + 1) V_u H_u^\chi} \times
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &\times \int_{-L}^z \left(t_f - y - \frac{z^2}{D_e} \right)^{m+\chi} dz + \\
 &+ \frac{k_c C_b (V_k \pm V_u) n_z \chi \Gamma(\chi + \beta) \Gamma(m+1)}{\Gamma(m + \chi + \beta + 1) V_u H_u^\chi t_f^\beta} \times \\
 &\times \int_{-L}^z \left(t_f - y - \frac{z^2}{D_e} \right)^{m+\chi+\beta} dz, \tag{19}
 \end{aligned}$$

где $\Gamma(\dots)$ – соответствующие гамма-функции.

Интегрирование уравнения (19) возможно только при частных значениях коэффициентов. При $\chi = 1,5$, $m = 0,5$, $\beta = 2$ и $C_b = 2\sqrt{2\rho_z}$ получим

$$\begin{aligned}
 a_1(y, z) &= \\
 &= \frac{3k_c C_b (V_k \pm V_u) n_z \Gamma\left(\frac{3}{2}\right) \Gamma\left(\frac{3}{2}\right) (1 - P_0) (t_f - y)^2}{2\Gamma(3) V_u H_u^{\frac{3}{2}}} \times \\
 &\times \left(z - \frac{2z^3}{3\sqrt{L_y}} + \frac{z^5}{5L_y} + \frac{8}{15} L_y \right) + \\
 &+ \frac{3k_c C_b (V_k \pm V_u) n_z \Gamma\left(\frac{7}{2}\right) \Gamma\left(\frac{3}{2}\right) (t_f - y)^4}{2\Gamma(5) V_u H_u^{\frac{3}{2}} t_f^2} \times \\
 &\times \left(z + \frac{z^9}{9L_y^2} - \frac{4z^7}{7L_y^{\frac{3}{2}}} + \frac{6z^5}{5L_y} - \frac{4z^3}{3\sqrt{L_y}} + \frac{8}{20} L_y \right). \tag{20}
 \end{aligned}$$

После подстановки значений гамма-функций получим

$$\begin{aligned}
 a_1(y, z) &= \\
 &= \frac{3\pi k_c \sqrt{2\rho_z} (V_k \pm V_u) n_z (1 - P_0) (t_f - y)^2}{8V_u H_u^{\frac{3}{2}}} \times \\
 &\times \left(z - \frac{2z^3}{3\sqrt{L_y}} + \frac{z^5}{5L_y} + \frac{8}{15} L_y \right) + \\
 &+ \frac{3\pi k_c \sqrt{2\rho_z} (V_k \pm V_u) n_z (t_f - y)^4}{16V_u H_u^{\frac{3}{2}} t_f^2} \times
 \end{aligned}$$

$$\times \left(z + \frac{z^9}{9L_y^2} - \frac{4z^7}{7L_y^2} + \frac{6z^5}{5L_y} - \frac{4z^3}{3\sqrt{L_y}} + \frac{8}{20}L_y \right). \quad (21)$$

Расчет показателя $a_2(y, z)$, характеризующее изменение площади впадин, формируемых за счет процесса хрупкого скалывания, в любой области зоны контакта при известном исходном состоянии поверхности рассчитывается аналогично показателю $a_1(y, z)$.

Для расчета показателя $a_2(y, z)$ необходимо учитывать, что протекание процесса хрупкого скалывания сопровождается увеличением ширины единичной риски b_z до значения b_x (рис. 4). Для аппроксимации b_x использована степенная зависимость

$$b_x = C_{bx} \left(t_f - y - u + \Delta r_x - \frac{z^2}{D_e} \right)^{m_x}, \quad (22)$$

где Δr_x – величина приращения съема материала в процессе хрупкого скалывания хрупкого неметаллического материала; m_x – показатель степени в уравнении, моделирующем профиль скалывающего зерна параболоидом вращения. Плотность распределения скалывающих зерен по глубине может быть рассчитана по формуле

$$f(u) = \frac{\chi_x}{H_u^{\chi_x}} u^{\chi_x - 1}, \quad (23)$$

где χ_x – параметр функции плотности распределения скалывающих зерен.

Зависимость для расчета показателя $a_2(y, z)$, входящего в состав выражения для расчета вероятности удаления материала за счет объемного хрупкого разрушения, аналогично решению, приведенному выше (18), запишется как

$$a_2(y, z) = \frac{k_c C_b (V_k \pm V_u) n_z \chi}{V_u H_u^\chi} \times \int_{-L_y}^z \int_0^{t(z)-y} \left(t_f - y - u - \frac{z^2}{D_e} \right)^m u^{\chi-1} dudz - \frac{k_c C_b (V_k \pm V_u) n_z \chi P_0}{V_u H_u^\chi} \times$$

$$\times \int_{-L_y}^z \int_0^{t(z)-y} \left(t_f - y - u - \frac{z^2}{D_e} \right)^m u^{\chi-1} dudz + \frac{k_c C_b (V_k \pm V_u) n_z \chi P_0}{V_u H_u^\chi} \times \int_{-L_y}^z \int_0^{t(z)-y+\Delta r_x} \left(t_f - y - u - \frac{z^2}{D_e} + \Delta r_x \right)^{m_x} \times u^{\chi-1} \left(\frac{u}{t_f} \right)^\beta dudz. \quad (24)$$

После интегрирования выражения (24) по u получим

$$a_2(y, z) = \frac{k_c C_b (V_k \pm V_u) n_z \chi \Gamma(\chi) \Gamma(m+1) (1-P_0)}{\Gamma(m+\chi+1) V_u H_u^\chi} \times \int_{-L}^z \left(t_f - y - \frac{z^2}{D_e} \right)^{m+\chi} dz + \frac{k_c C_b (V_k \pm V_u) n_z \chi \Gamma(\chi+\beta) \Gamma(m_x+1)}{\Gamma(m_x+\chi+\beta+1) V_u H_u^\chi t_f^\beta} \times \int_{-L}^z \left(t_f - y - \frac{z^2}{D_e} + \Delta r_x \right)^{m_x+\chi+\beta} dz. \quad (25)$$

После подстановки значений гамма-функций при частных значениях $\chi = 1, 3$, $m_x = 0, 7$ и $\beta = 2$ в выражение (25) получим

$$a_2(y, z) = \frac{6k_c \sqrt{2\rho_z} (V_k \pm V_u) n_z \Gamma\left(\frac{3}{2}\right) \Gamma\left(\frac{3}{2}\right) (1-P_0)}{2\Gamma(3) V_u H_u^2} \times \int_{-L}^z \left(t_f - y - \frac{z^2}{D_e} \right)^2 dz + \frac{13k_c \sqrt{2\rho_z} (V_k \pm V_u) n_z \Gamma(3, 3) \Gamma(1, 7)}{5\Gamma(5) V_u H_u^{1,3} t_f^2} \times \int_{-L}^z \left(t_f - y - \frac{z^2}{D_e} + \Delta r_x \right)^4 dz. \quad (26)$$

После подстановки значений гамма-функций окончательно получим:

$$\begin{aligned}
 a_2(y, z) = & \\
 = & \frac{3\pi k_c \sqrt{2\rho_z} (V_k \pm V_u) n_z (1 - P_0) (t_f - y)^2}{8V_u H_u^{\frac{3}{2}}} \times \\
 & \times \left(z - \frac{2z^3}{3\sqrt{L_y}} + \frac{z^5}{5L_y} + \frac{8}{15} L_y \right) + \\
 & + \frac{0,05k_c \sqrt{2\rho_z} (V_k \pm V_u) n_z (t_f - y + \Delta r_x)^4}{V_u H_u^{1,3} (t_f + \Delta r_x)^2} \times \\
 & \times \left(z + \frac{z^9}{9L_y^2} - \frac{4z^7}{7L_y^{\frac{3}{2}}} + \frac{6z^5}{5L_y} - \frac{4z^3}{3\sqrt{L_y}} + \frac{8}{20} L_y \right). \quad (27)
 \end{aligned}$$

Выводы

Разработанные математические модели позволяют проследить влияние на съем материала наложения единичных срезов друг на друга при шлифовании отверстий керамических материалов. Предложенные зависимости показывают закономерность съема припуска в пределах дуги контакта шлифовального круга с заготовкой. Рассмотренные особенности изменения вероятности удаления материала при контакте обрабатываемой поверхности с абразивным инструментом и предложенные аналитические зависимости справедливы для широкого диапазона режимов шлифования, характеристик кругов и ряда других технологических факторов [20, 22].

Полученные выражения позволяют найти величину съема материала также для схем торцевого, плоского и круглого наружного шлифования, для чего необходимо знать величину приращения съема за счет хрупкого разрушения в процессе развития микротрещин в поверхностном слое. Одним из путей определения величины этого приращения является имитационное моделирование процесса трещинообразования с помощью ЭВМ.

Список литературы

1. Malkin S., Guo C. Grinding technology: theory and applications of machining with abrasives. – New York: Industrial Press, 2008. – 372 p. – ISBN 978-0-8311-3247-7.
2. Hou Z.B., Komanduri R. On the mechanics of the grinding process. Pt. 1. Stochastic nature of the grinding process // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2003. – Vol. 43. – P. 1579–1593. – DOI: 10.1016/S0890-6955(03)00186-X.
3. Lajmert P., Sikora V., Ostrowski D. A dynamic model of cylindrical plunge grinding process for chatter phenomena investigation // MATEC Web of Conferences. – 2018. – Vol. 148. – P. 09004. – DOI: 10.1051/mateconf/20181480900.
4. A time-domain surface grinding model for dynamic simulation / M. Leonesio, P. Parenti, A. Cassinari, G. Bianchi, M. Monn // Procedia CIRP. – 2012. – Vol. 4. – P. 166–171. – DOI: 10.1016/j.procir.2012.10.030.
5. Sidorov D., Sazonov S., Revenko D. Building a dynamic model of the internal cylindrical grinding process // Procedia Engineering. – 2016. – Vol. 150. – P. 400–405. – DOI: 10.1016/j.proeng.2016.06.739.
6. Zhang N., Kirpitchenko I., Liu D.K. Dynamic model of the grinding process // Journal of Sound and Vibration. – 2005. – Vol. 280. – P. 425–432. – DOI: 10.1016/j.jsv.2003.12.006.
7. Estimation of dynamic grinding wheel wear in plunge grinding / M. Ahrens, J. Damm, M. Dagen, B. Denkena, T. Ortmaier // Procedia CIRP. – 2017. – Vol. 58. – P. 422–427. – DOI: 10.1016/j.procir.2017.03.247.
8. Garitaonandia I., Fernandes M.H., Albizuri J. Dynamic model of a centerless grinding machine based on an updated FE model // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2008. – Vol. 48. – P. 832–840. – DOI: 10.1016/j.ijmactools.2007.12.001.
9. Tawakolia T., Reinecke H., Vesali A. An experimental study on the dynamic behavior of grinding wheels in high efficiency deep grinding // Procedia CIRP. – 2012. – Vol. 1. – P. 382–387. – DOI: 10.1016/j.procir.2012.04.068.
10. Dynamic modeling and simulation of a nonlinear, non-autonomous grinding system considering spatially periodic waviness on workpiece surface / J. Jung, P. Kim, H. Kim, J. Seok // Simulation Modelling Practice and Theory. – 2015. – Vol. 57. – P. 88–99. – DOI: 10.1016/j.simpat.2015.06.005.
11. Yu H., Wang J., Lu Y. Modeling and analysis of dynamic cutting points density of the grinding wheel with an abrasive phyllotactic pattern // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2016. – Vol. 86. – P. 1933–1943. – DOI: 10.1007/s00170-015-8262-0.
12. Guo J. Surface roughness prediction by combining static and dynamic features in cylindrical traverse grinding // The International Journal of Advanced

Manufacturing Technology. – 2014. – Vol. 75. – P. 1245–1252. – DOI: 10.1007/s00170-014-6189-5.

13. A new approach for dynamic modelling of energy consumption in the grinding process using recurrent neural networks / A. Arriandiaga, E. Portillo, J.A. Sanchez, I. Cabanes, I. Pombo // Neural Computing and Applications. – 2016. – Vol. 27. – P. 1577–1592. – DOI: 10.1007/s00521-015-1957-1.

14. Soler Ya.I., Le N.V., Si M.D. Influence of rigidity of the hardened parts on forming the shape accuracy during flat grinding // MATEC Web of Conferences. – 2017. – Vol. 129. – P. 01076. – DOI: 10.1051/mateconf/201712901076.

15. Солер Я.И., Хоанг Н.А. Влияние глубины резания на высотные шероховатости инструментов из стали У10А при плоском шлифовании кругами из кубического нитрида бора // Авиамашиностроение и транспорт Сибири: сборник материалов IX Всероссийской научно-практической конференции / Иркутский национальный исследовательский технический университет. – Иркутск, 2017. – С. 250–254.

16. Calculation of surface roughness parameters for external cylindrical grinding / Yu. Novoselov, S. Bratan, V. Bogutsky, Yu. Gutsalenko // Fiabilitate si

Durabilitate = Fiability and Durability. – 2013. – Suppl. 1. – P. 5–15.

17. Новоселов Ю.К. Динамика формообразования поверхностей при абразивной обработке. – Севастополь: СевНТУ, 2012. – 304 с. – ISBN 978-617-612-051-3.

18. Лобанов Д.В., Янюшкин А.С., Архипов П.В. Напряженно-деформированное состояние твердосплавных режущих элементов при алмазном затачивании // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. – 2015. – № 3-1 (33-1). – С. 85–91. – DOI: 10.18323/2073-5073-2015-3-85-91.

19. Kassen G., Werner G. Kinematische Kenngrößen des Schleifvorganges // Industrie-Anzeiger. – 1969. – N 87. – P. 91–95.

20. Identification of removal parameters at combined grinding of conductive ceramic materials / S. Bratan, S. Roshchupkin, A. Kolesov, V. Bogutsky // MATEC Web of Conferences. – 2017. – Vol. 129. – P. 01079. DOI: 10.1051/mateconf/201712901079.

21. Гусев В.В., Мусеев Д.А. Износ алмазного шлифовального круга при обработке керамики // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. – 2019. – № 4 (67). – С. 25–29.

22. Novoselov Yu., Bratan S., Bogutsky B. Analysis of relation between grinding wheel wear and abrasive grains wear // Procedia Engineering. – 2016. – Vol. 150. – P. 809–814. – DOI: 10.1016/j.proeng.2016.07.116.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2021 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

Journal homepage: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Probabilistic model of surface layer removal when grinding brittle non-metallic materials

Sergey Bratan^{a,}, Stanislav Roshchupkin^b, Alexander Kharchenko^c, Anastasia Chasovitina^d*

Sevastopol State University, 33 Universitetskaya str., Sevastopol, 299053, Russian Federation

^a  <https://orcid.org/0000-0002-9033-1174>,  bratan@gmail.com, ^b  <https://orcid.org/0000-0003-2040-2560>,  st.roshchupkin@yandex.ru,
^c  <https://orcid.org/0000-0003-1704-9380>,  khao@list.ru, ^d  <https://orcid.org/0000-0001-6800-9392>,  nastya.chasovitina@mail.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 15 March 2021
 Revised: 29 March 2021
 Accepted: 14 April 2021
 Available online: 15 June 2021

Keywords:

Sanding fragile materials
 Abrasive grain
 Contact area of the workpiece with the tool
 Likelihood of material removal
 Microcutting
 Brittle chipping
 Bulk fracture probability

ABSTRACT

Introduction. The final quality of products is formed during finishing operations, which include the grinding process. It is known that when grinding brittle materials, the cost of grinding work increases significantly. It is possible to reduce the scatter of product quality indicators when grinding brittle materials, as well as to increase the reliability and efficiency of the operation, by choosing the optimal parameters of the technological system based on dynamic models of the process. However, to describe the regularities of the removal of particles of a brittle non-metallic material and the wear of the surface of the grinding wheel in the contact zone, the known models do not allow taking into account the peculiarities of the process in which micro-cutting and brittle chipping of the material are combined. **Purpose of the work:** to create a new probabilistic model for removing the surface layer when grinding brittle non-metallic materials. The task is to study the laws governing the removal of particles of brittle non-metallic material in the contact zone. In this work, the removal of material in the contact zone as a result of microcutting and brittle chipping is considered as a random event. **The research methods** are mathematical and physical simulation using the basic provisions of the theory of probability, the laws of distribution of random variables, as well as the theory of cutting and the theory of a deformable solid. **Results and discussion.** The developed mathematical models make it possible to trace the effect on material removal of the overlap of single cuts on each other when grinding holes in ceramic materials. The proposed dependences show the regularity of stock removal within the arc of contact of the grinding wheel with the workpiece. The considered features of the change in the probability of material removal upon contact of the treated surface with an abrasive tool and the proposed analytical dependences are valid for a wide range of grinding modes, wheel characteristics and a number of other technological factors. The obtained expressions make it possible to find the amount of material removal also for schemes of end, flat and circular external grinding, for which it is necessary to know the amount of removal increment due to brittle fracture during the development of microcracks in the surface layer. One of the ways to determine the magnitude of this increment is to simulate the crack formation process using a computer. The presented results confirm the prospects of the developed approach to simulate the processes of mechanical processing of brittle non-metallic materials.

For citation: Bratan S.M., Roshchupkin S.I., Kharchenko A.O., Chasovitina A.S. Probabilistic model of surface layer removal when grinding brittle non-metallic materials. *Obrabotka metallov (tehnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2021, vol. 23, no. 2, pp. 6–16. DOI: 10.17212/1994-6309-2021-23.2-6-16. (In Russian).

References

1. Malkin S., Guo C. Grinding technology: theory and applications of machining with abrasives. New York, Industrial Press, 2008. 372 p. ISBN 978-0-8311-3247-7.
2. Hou Z.B., Komanduri R. On the mechanics of the grinding process. Pt. 1. Stochastic nature of the grinding process. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2003, vol. 43, pp. 1579–1593. DOI: 10.1016/S0890-6955(03)00186-X.
3. Lajmert P., Sikora V., Ostrowski D. A dynamic model of cylindrical plunge grinding process for chatter phenomena investigation. *MATEC Web of Conferences*, 2018, vol. 148, pp. 09004–09008. DOI: 10.1051/mateconf/20181480900.

* Corresponding author

Bratan Sergey M., D. Sc. (Engineering), Professor
 Sevastopol State University,
 33 Universitetskaya str,
 299053, Sevastopol, Russian Federation
 Tel.: +7 (978)7155019, e-mail: serg.bratan@gmail.com

4. Leonesio M., Parenti P., Cassinari A., Bianchi G., Monn M. A time-domain surface grinding model for dynamic simulation. *Procedia CIRP*, 2012, vol. 4, pp. 166–171. DOI: 10.1016/j.procir.2012.10.030.
5. Sidorov D., Sazonov S., Revenko D. Building a dynamic model of the internal cylindrical grinding process. *Procedia Engineering*, 2016, vol. 150, pp. 400–405. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.06.739.
6. Zhang N., Kirpitchenko I., Liu D.K. Dynamic model of the grinding process. *Journal of Sound and Vibration*, 2005, vol. 280, pp. 425–432. DOI: 10.1016/j.jsv.2003.12.006.
7. Ahrens M., Damm J., Dagen M., Denkena B., Ortmaier T. Estimation of dynamic grinding wheel wear in plunge grinding. *Procedia CIRP*, 2017, vol. 58, pp. 422–427. DOI: 10.1016/j.procir.2017.03.247.
8. Garitaonandia I., Fernandes M.H., Albizuri J. Dynamic model of a centerless grinding machine based on an updated FE model. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2008, vol. 48, pp. 832–840. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2007.12.001.
9. Tawakolia T., Reinecke H., Vesali A. An experimental study on the dynamic behavior of grinding wheels in high efficiency deep grinding. *Procedia CIRP*, 2012, vol. 1, pp. 382–387. DOI: 10.1016/j.procir.2012.04.068.
10. Jung J., Kim P., Kim H., Seok J. Dynamic modeling and simulation of a nonlinear, non-autonomous grinding system considering spatially periodic waviness on workpiece surface. *Simulation Modeling Practice and Theory*, 2015, vol. 57, pp. 88–99. DOI: 10.1016/j.simpat.2015.06.005.
11. Yu H., Wang J., Lu Y. Modeling and analysis of dynamic cutting points density of the grinding wheel with an abrasive phyllotactic pattern. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, vol. 86, pp. 1933–1943. DOI: 10.1007/s00170-015-8262-0.
12. Guo J. Surface roughness prediction by combining static and dynamic features in cylindrical traverse grinding. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2014, vol. 75, pp. 1245–1252. DOI: 10.1007/s00170-014-6189-5.
13. Arriandiaga A., Portillo E., Sanchez J.A., Cabanes I., Pombo I. A new approach for dynamic modeling of energy consumption in the grinding process using recurrent neural networks. *Neural Computing and Applications*, 2016, vol. 27, pp. 1577–1592. DOI: 10.1007/s00521-015-1957-1.
14. Soler Ya.I., Le N.V., Si M.D. Influence of rigidity of the hardened parts on forming the shape accuracy during flat grinding. *MATEC Web of Conferences*, 2017, vol. 129, p. 01076. DOI: 10.1051/mateconf/201712901076.
15. Soler Ya.I., Khoang N.A. [Influence of the depth of cut on the height roughness of tools made of U10A steel during surface grinding with cubic boron nitride wheels]. *Aviamashinostroenie i transport Sibiri: sbornik materialov IX Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii [Aircraft engineering and transport of Siberia. Proceedings of the 9th All-Russian Scientific and Practical Conference]*. Irkutsk National Research Technical University. Irkutsk, 2017, pp. 250–254. (In Russian).
16. Novoselov Yu., Bratan S., Bogutsky V., Gutsalenko Yu. Calculation of surface roughness parameters for external cylindrical grinding. *Fiabilitate si Durabilitate = Fiability and Durability*, 2013, suppl. 1, pp. 5–15.
17. Novoselov Yu.K. *Dinamika formoobrazovaniya poverkhnostei pri abrazivnoi obrabotke [Dynamics of surface shaping during abrasive processing]*. Sevastopol, SevNTU Publ., 2012. 304 p. ISBN 978-617-612-051-3.
18. Lobanov D.V., Yanyushkin A.S., Arkhipov P.V. Napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie tverdosplavnykh rezhushchikh elementov pri almaznom zatachivanii [Stress-strain state of carbide cutting elements during diamond sharpening]. *Vektor nauki Tol'yatinskogo gosudarstvennogo universiteta = Vector of sciences. Togliatti State University*, 2015, no. 3-1 (33-1). pp. 85–91. DOI: 10.18323/2073-5073-2015-3-85-91.
19. Kassen G., Werner G. Kinematische Kenngrößen des Schleifvorganges [Kinematic parameters of the grinding process]. *Industrie-Anzeiger = Industry scoreboard*, 1969, no. 87, pp. 91–95. (In German).
20. Bratan S., Roshchupkin S., Kolesov A., Bogutsky B. Identification of removal parameters at combined grinding of conductive ceramic materials. *MATEC Web of Conferences*, 2017, vol. 129, p. 01079. DOI: 10.1051/mateconf/201712901079.
21. Gusev V.V., Moiseev D.A. Iznos almaznogo shlifoval'nogo kruga pri obrabotke keramiki [Wear of a diamond grinding wheel when processing ceramics]. *Progressivnye tekhnologii i sistemy mashinostroeniya = Progressive Technologies and Systems of Mechanical Engineering*, 2019, no. 4 (67), pp. 25–29. (In Russian).
22. Novoselov Yu., Bratan S., Bogutsky B. Analysis of relation between grinding wheel wear and abrasive grains wear. *Procedia Engineering*, 2016, vol. 150, pp. 809–814. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.07.116.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2021 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).