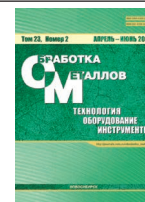




## Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

Сайт журнала: [http://journals.nstu.ru/obrabotka\\_metallov](http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov)



### Моделирование съема припуска в зоне контакта при внутреннем шлифовании хрупких неметаллических материалов

Сергей Братан<sup>a, \*</sup>, Станислав Рошчупкин<sup>b</sup>, Александр Харченко<sup>c</sup>, Анастасия Часовитина<sup>d</sup>

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

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

#### ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.923

#### История статьи:

Поступила: 21 марта 2021  
Рецензирование: 12 апреля 2021  
Принята к печати: 17 апреля 2021  
Доступно онлайн: 15 июня 2021

#### Ключевые слова:

Круглое шлифование хрупких материалов  
Абразивное зерно  
Микрорезание  
Зона контакта заготовки с инструментом  
Вероятность удаления материала  
Вероятность неудаления материала

#### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Финишные операции, в частности круглое шлифование, существенным образом формируют параметры качества изделий, их эксплуатационные характеристики и функциональную пригодность. Стоимость шлифовальных работ при этом существенно возрастает по сравнению со шлифованием металлов, достигая в среднем 20...28 % от общих затрат на изготовление изделий. Выбор оптимальных параметров технологической системы на основе моделирования процесса позволяет повысить надежность, производительность и экономическую эффективность. Для описания процессов обработки хрупких неметаллических материалов используются в основном эмпирические зависимости, а существующие аналитические модели не учитывают стохастическую природу операции шлифования и сочетание процессов микрорезания и хрупкого скалывания при удалении частиц хрупкого неметаллического материала и износа поверхности шлифовального инструмента. **Цель работы:** моделирование съема припуска в зоне контакта при внутреннем шлифовании хрупких неметаллических материалов. Задачей является исследование особенностей и закономерностей изменения вероятности удаления материала при контакте обрабатываемой поверхности с абразивным инструментом. В работе получены теоретико-вероятностные модели, позволяющие выявить закономерности съема материала в зоне контакта. Модели позволяют проследить закономерности взаимодействия режущих и колющих зерен на поверхности заготовки и процесс съема припуска в зоне контакта за счет комбинации явлений микрорезания и хрупкого скалывания, рассматриваемых 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.** Получены данные, дающие наглядную иллюстрацию закономерности удаления материала вдоль зоны контакта на различных уровнях. Анализ полученных результатов показывает, что окружная скорость инструмента и скорость вращения заготовки, которые входят непосредственно в уравнение для расчета вероятности удаления материала, существенно влияют на интенсивность съема материала. Значительным образом оказывает воздействие на съем припуска также поперечная подача. Получена качественная картина изменения вероятности удаления материала в зоне контакта при шлифовании отверстий в хрупких неметаллических материалах. Полученные закономерности изменения вероятности удаления материала при контакте обрабатываемой поверхности с абразивным инструментом и аналитические зависимости справедливы для широкого диапазона режимов шлифования, характеристик инструментов и других технологических факторов.

**Для цитирования:** Моделирование съема припуска в зоне контакта при внутреннем 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. 31–39. – DOI: 10.17212/1994-6309-2021-23.2-31-39.

### Введение

Изделия из таких неметаллических материалов, как керамика, рубины, сапфиры, стекло, кварц, ситаллы, ферриты, несмотря на высокую

хрупкость, усложняющую их обработку при изготовлении, широко применяются в различных отраслях промышленности из-за высоких показателей твердости, прочности и износостойкости. Финишные операции, в частности круглое шлифование, существенным образом формируют параметры качества изделий, их эксплуатационные характеристики и функциональную пригодность. Стоимость шлифовальных работ

#### \*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](mailto:serg.bratan@gmail.com)

при этом существенно возрастает по сравнению со шлифованием металлов, достигая в среднем 20...28 % от общих затрат на изготовление изделий [1].

Сложная стохастическая природа процесса шлифования [2] приводит к уменьшению надежности и производительности, разбросу показателей качества изделий, снижению экономической эффективности. Выбор оптимальных параметров технологической системы на основе моделирования процесса позволяет повысить надежность, производительность и экономическую эффективность. Большое количество работ [3–15] посвящено созданию динамических моделей для процессов шлифования. Однако все полученные модели имеют ограниченную область применения и пригодны только для моделирования обработки металлических изделий. Для описания процессов обработки хрупких неметаллических материалов используются в основном эмпирические зависимости, а существующие аналитические модели не учитывают стохастическую природу операции шлифования и сочетание процессов микрорезания и хрупкого скалывания при удалении частиц хрупкого неметаллического материала и износа поверхности шлифовального инструмента.

Целью работы является моделирование съема припуска в зоне контакта при внутреннем шлифовании хрупких неметаллических материалов. Задачей является исследование особенностей и закономерностей изменения вероятности удаления материала при контакте обрабатываемой поверхности с абразивным инструментом.

## Моделирование процесса

Для описания взаимодействия шлифовального инструмента с поверхностью заготовки из хрупких неметаллических материалов авторами разработаны теоретико-вероятностные модели, позволяющие выявить закономерности съема материала в зоне контакта. Модели позволяют проследить закономерности взаимодействия режущих и колющих зерен на поверхности заготовки и процесс съема припуска в зоне кон-

такта за счет комбинации явлений микрорезания и хрупкого скалывания, рассматриваемых как случайное событие. Вероятность удаления при шлифовании хрупких неметаллических материалов вычисляется по формуле

$$P(M) = P_1(\overline{M}) \cdot P_2(\overline{M}), \quad (1)$$

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

Зависимость (1) может быть описана следующим выражением:

$$P(M) = 1 - \exp(-a_0 - a_1(y, \tau) - a_2(y, \tau)), \quad (2)$$

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;  $\tau$  – момент времени происходящего события.

Принятые ранее модели вершин зерен и плотностей их распределения по глубине [16, 17] позволяют перейти к установлению функциональных связей вероятности неудаления материала с технологическими факторами.

Для расчета показателя, характеризующего изменение площади впадин, формируемых за счет процесса механического резания, получено выражение

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

$$+ \frac{3\pi k_c \sqrt{2\rho_z} (V_k \pm V_u) n_z (t_f - y)^4}{16V_u H_u^{3/2} t_f^2} \times \left( z + \frac{z^9}{9L_y^2} - \frac{4z^7}{7L_y^2} + \frac{6z^5}{5L_y} - \frac{4z^3}{3\sqrt{L_y}} + \frac{8}{20} L_y \right), \quad (3)$$

где  $n_z$  – число зерен в единице площади рабочего слоя инструмента;  $V_k$  – окружная скорость инструмента (круга);  $V_u$  – окружная скорость заготовки;  $H_u$  – толщина слоя рабочей поверхности инструмента, контактирующего с заготовкой;  $t_f$  – фактическая глубина резания;  $L_y$  – длина зоны контакта от условной наружной поверхности инструмента до основной плоскости;  $P_0$  – вероятностная характеристика скалывания хрупкого неметаллического материала скалывания;  $z$  – координата, направленная вдоль зоны контакта;  $\rho_z$  – радиус округления вершины зерна.

Зависимость для расчета показателя  $a_2(y, t)$  имеет вид

$$a_2(y, z) = \frac{3\pi k_c \sqrt{2\rho_z} (V_k \pm V_u) n_z (1 - P_0) (t_f - y)^2}{8V_u H_u^{\frac{3}{2}}} \times \left( z - \frac{2z^3}{3\sqrt{L_y}} + \frac{z^5}{5L_y} + \frac{8}{15} L_y \right) +$$

$$a_1(y, z) = \frac{3\pi \cdot 1,0 \sqrt{2 \cdot 7,31 \cdot 10^{-6}} (35 + 0,25) \cdot 15,86 \cdot 10^6 \cdot (1 - 0,5) (9,04 \cdot 10^{-6} - 1 \cdot 10^{-6})^2}{8 \cdot 0,25 (9,04 \cdot 10^{-6})^{3/2}} \times$$

$$\times \left( -0,1 \cdot 10^{-3} \cdot 0,001 - \frac{2(-0,1 \cdot 10^{-3} \cdot 0,001)^3}{3\sqrt{0,53 \cdot 10^{-3}}} + \frac{(-0,1 \cdot 10^{-3} \cdot 0,001)^5}{5 \cdot 0,53 \cdot 10^{-3}} + \frac{8}{15} \cdot 0,53 \cdot 10^{-3} \right) +$$

$$+ \frac{3 \cdot \pi \cdot 1,0 \cdot \sqrt{2 \cdot 7,31 \cdot 10^{-6}} (35 + 0,25) 15,86 \cdot 10^6 (9,04 \cdot 10^{-6} - 1 \cdot 10^{-6})^4}{16 \cdot 0,25 (9,04 \cdot 10^{-6})^{3/2} (9,04 \cdot 10^{-6})^2} \times$$

$$\times \left( -0,1 \cdot 10^{-3} \cdot 0,001 + \frac{(-0,1 \cdot 10^{-3} \cdot 0,001)^9}{9(0,53 \cdot 10^{-3})^2} - \frac{4(-0,1 \cdot 10^{-3} \cdot 0,001)^7}{7(0,53 \cdot 10^{-3})^{3/2}} + \frac{6(-0,1 \cdot 10^{-3} \cdot 0,001)^5}{5 \cdot 0,53 \cdot 10^{-3}} - \right.$$

$$\left. - \frac{4(-0,1 \cdot 10^{-3} \cdot 0,001)^3}{3\sqrt{0,53 \cdot 10^{-3}}} + \frac{8}{20} 0,53 \cdot 10^{-3} \right) = 2,701;$$

$$+ \frac{0,05 k_c \sqrt{2\rho_z} (V_k \pm V_u) n_z (t_f - y + \Delta r_x)^4}{V_u H_u^{1,3} (t_f + \Delta r_x)^2} \times \left( z + \frac{z^9}{9L_y^2} - \frac{4z^7}{7L_y^2} + \frac{6z^5}{5L_y} - \frac{4z^3}{3\sqrt{L_y}} + \frac{8}{20} L_y \right), \quad (4)$$

где  $\Delta r_x$  – величина приращения съема материала в процессе хрупкого скалывания хрупкого неметаллического материала.

## Результаты и их обсуждение

Выполним расчет вероятности неудаления и вероятности удаления материала при шлифовании отверстий диаметром 150 мм в заготовках из ситалла (АС-370) инструментом AW 60×25×13 63C F90 M 7 В А 35 м/с (при скорости круга 35 м/с, скорости заготовки 0,25 м/с, продольной подаче 33 мм/с, поперечной подаче 0,008 мм/ход). Из расчета баланса перемещений [18] определяем, что для заданных условий обработки  $t_f = 9,04 \cdot 10^{-6}$  м. На основании данных исследований [17, 20, 21] принимаем:  $k_c = 1,0$ ;  $\rho_z = 7,31 \cdot 10^{-6}$  мм;  $n_z = 15,86$  зерен/мм<sup>2</sup>. Для рассмотренных условий  $L_y = 0,002$  м,  $P_0 = 0,5$ ,  $\Delta r_x = 0,1 \cdot t_f$ . Расчет выполним по уравнениям (2), (3), (4) для уровня  $y = 1 \cdot 10^{-6}$  м при  $z = -0,1 \frac{L_y}{2}$ :

$$a_2(y, z) = \frac{3\pi \cdot 1,0 \sqrt{2 \cdot 7,31 \cdot 10^{-6}} (35 + 0,25) 15,86 \cdot 10^6 (1 - 0,5) (9,04 \cdot 10^{-6} - 1 \cdot 10^{-6})^2}{8 \cdot 0,25 (9,04 \cdot 10^{-6})^{\frac{3}{2}}} \times$$

$$\times \left( -0,1 \cdot 10^{-3} \cdot 0,001 - \frac{2(-0,1 \cdot 10^{-3} \cdot 0,001)^3}{3\sqrt{0,53 \cdot 10^{-3}}} + \frac{(-0,1 \cdot 10^{-3} \cdot 0,001)^5}{5 \cdot 0,53 \cdot 10^{-3}} + \frac{8}{15} 0,53 \cdot 10^{-3} \right) +$$

$$+ \frac{0,05 \cdot 1,0 \cdot \sqrt{2 \cdot 7,31 \cdot 10^{-6}} 35,25 \cdot 15,86 \cdot 10^6 (9,04 \cdot 10^{-6} - 1 \cdot 10^{-6} + 0,1 \cdot 9,04 \cdot 10^{-6})^4}{0,25 (9,04 \cdot 10^{-6})^{1,3} (9,04 \cdot 10^{-6} + 0,1 \cdot 9,04 \cdot 10^{-6})^2} \times$$

$$\times \left( -0,1 \cdot 10^{-3} \cdot 0,001 + \frac{(-0,1 \cdot 10^{-3} \cdot 0,001)^9}{9(0,53 \cdot 10^{-3})^2} - \frac{4(-0,1 \cdot 10^{-3} \cdot 0,001)^7}{7(0,53 \cdot 10^{-3})^{\frac{3}{2}}} + \frac{6(-0,1 \cdot 10^{-3} \cdot 0,001)^5}{5 \cdot 0,53 \cdot 10^{-3}} - \right.$$

$$\left. - \frac{4(-0,1 \cdot 10^{-3} \cdot 0,001)^3}{3\sqrt{0,53 \cdot 10^{-3}}} + \frac{8}{20} 0,53 \cdot 10^{-3} \right) = 2,701.$$

Для определения показателя  $a_0$  использованы профилограммы, снятые с образца заготовки (ситалл АС-370) после чернового шлифования [22]. Вероятность события, характеризующего удаление поверхностного слоя на уровне  $y = 0,004$  мм при значении показателя  $a_0 = 0,546$ , вычисляется по уравнению (2):

$$P(M) = 1 - e^{-(a_0 + a_1 + a_2)} =$$

$$= 1 - e^{-0,546 - 2,7 - 2,701} = 0,997.$$

Вероятность отсутствия удаления материала, как противоположное событие, может быть определена из формулы полной вероятности:

$$P_1(\overline{M}) = 1 - P(M) = 1 - 0,997 = 0,003.$$

Для других уровней  $y$  рассматриваемого примера расчетные данные по вероятности удаления материала приведены в таблице и на рис. 1.

Анализ полученных данных (см. таблицу) дает наглядную иллюстрацию закономерности удаления материала вдоль зоны контакта на различных уровнях.

Расчеты по формуле (2) показывают, что вероятность удаления при значениях  $z = -3,38$ ,  $y = 0,8 \cdot t_f$ ,  $t_f = 9,04 \cdot 10^{-6}$  м равна 0,71. Это означает, что 71 % будет удален, а 29 % обрабатываемого материала останется на поверхности в виде микронеровностей.

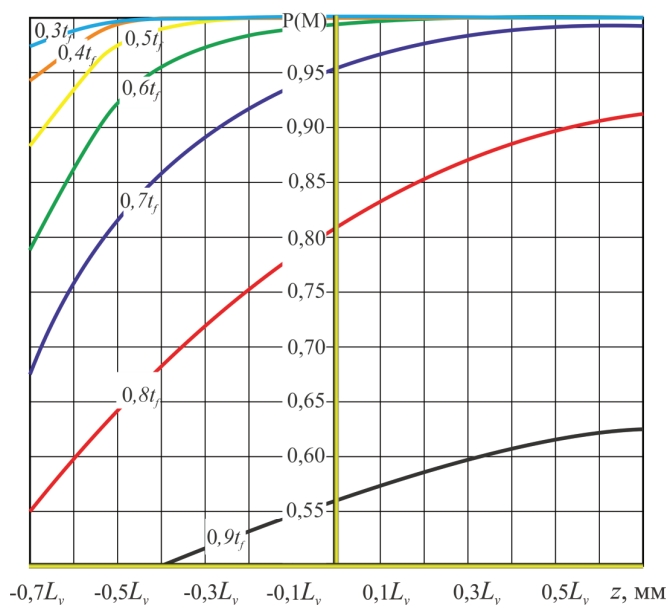
Объясняется это тем, что в процессе шлифования единичные зерна оставляют следы в виде царапин, которые накладываются друг на друга, при этом часть зерен не осуществляют среза, так как попадают в след траекторий предшествующего зерна. Некоторая часть зерен будет контактировать с обрабатываемым материалом частично, т. е. контакт будет распространяться не на всю ширину зерна. При обработке хрупких неметаллических материалов под царапиной могут образовываться сколы. С увеличением количества зерен, контактирующих с поверхностью заготовки, число царапин, перекрывающих друг друга, возрастает.

Предложенные зависимости позволяют рассчитывать изменения вероятности удаления материала при обработке хрупких неметаллических материалов на операциях шлифования. Приведенные выше аналитические модели могут быть использованы для схем плоского, круглого наружного и внутреннего шлифования. Они дают адекватное описание явлений съема припуска для широкого диапазона режимов резания, характеристик абразивного инструмента при шлифовании заготовок их хрупких неметаллических материалов.

Иллюстрация съема материала при шлифовании отверстий в заготовках из ситалла (АС-370) инструментом AW 60×25×13 63С F90 М 7 В А 35 м/с (при скорости круга 35 м/с, скорости заготовки 0,25 м/с, продольной подаче 33 мм/с, поперечной подаче 0,008 мм/ход) представлена на рис. 1.

**Значения вероятности удаления материала при шлифовании отверстий в заготовках из ситалла**  
**Values of the probability of material removal when grinding holes in workpieces made of sitall**

z	Значения параметров зоны контакта в радиальном направлении (уровней y)								
	Values of the parameters of the contact zone in the radial direction (levels y)								
	$y = 0,1t_f$	$y = 0,2t_f$	$y = 0,3t_f$	$y = 0,4t_f$	$y = 0,5t_f$	$y = 0,6t_f$	$y = 0,7t_f$	$y = 0,8t_f$	$y = 0,9t_f$
-6,76	0,998	0,993	0,98	0,95	0,895	0,806	0,687	0,559	0,459
-5,07	1	0,999	0,999	0,994	0,975	0,92	0,806	0,642	0,486
-3,38	1	1	1	0,999	0,994	0,967	0,88	0,71	0,512
-1,69	1	1	1	1	0,999	0,986	0,926	0,764	0,536
0	1	1	1	1	1	0,994	0,954	0,809	0,56
1,69	1	1	1	1	1	0,998	0,972	0,845	0,582
3,38	1	1	1	1	1	0,999	0,983	0,874	0,603
5,07	1	1	1	1	1	1	0,989	0,898	0,623
6,76	1	1	1	1	1	1	0,993	0,917	0,642



**Рис. 1.** Изменение вероятности удаления материала при шлифовании отверстий в заготовках из ситалла (диаметр отверстия – 150 мм, инструмент AW 60×25×13 63C F90 M 7 BA 35 м/с, скорость круга – 35 м/с, скорость заготовки – 0,25 м/с,  $t_f = 0,00904$  мм, на уровнях:  $y = 0,3t_f \dots 0,9t_f$ )

**Fig. 1.** Change in the likelihood of material removal when grinding holes in sitall workpieces (hole diameter – 150 mm, tool AW 60 × 25 × 13 63C F90 M 7 BA 35 m / s, wheel speed – 35 m / s, workpiece speed – 0.25 m / s,  $t_f = 0,00904$  mm, at levels:  $y = 0,3t_f \dots 0,9t_f$ )

Анализ полученных данных показывает, что окружная скорость инструмента и скорость вращения заготовки, которые входят непосредственно в уравнение для расчета вероятности

удаления материала, существенно влияют на интенсивность съема материала. Значительным образом оказывает воздействие на съем припуска также поперечная подача, которая не представлена непосредственно в уравнениях (2), (3) и (4), но определяет максимальную глубину микрорезания  $t_f$  и рассчитывается через уравнение баланса перемещений [17].

На рис. 2 изображена качественная картина изменения вероятности удаления материала в зоне контакта при шлифовании отверстий в хрупких неметаллических материалах.

На рис. 2 показано, что положение линии АВ соответствует соотношению удаленной и неудаленной частей материала с учетом исходной шероховатости поверхности заготовки. Положение линии ВГ позволяет проследить закономерность изменения значений вероятности удаления материала после окончания контакта инструмента с заготовкой. Закономерности изменений вероятности удаления материала на фиксированных уровнях вдоль длины зоны контакта отражены в плоскостях, параллельных плоскости  $P(M)$ ,  $z$ .

Положение линии БВ определяет закономерность съема припуска при уровне вероятности  $P(M) = 0,997$ .

Анализ полученных данных позволяет сделать следующее заключение. При контактировании поверхности инструмента с материалом



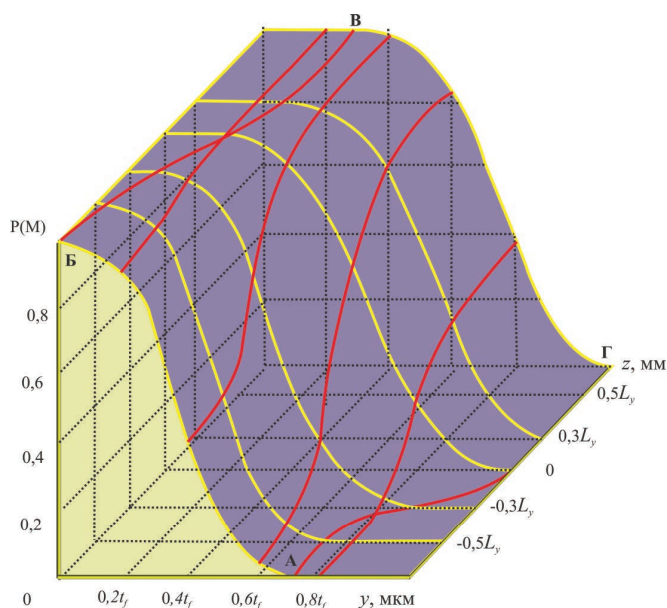


Рис. 2. Изменение вероятности удаления припуска в зоне контакта при шлифовании отверстий в хрупких неметаллических материалах

Fig. 2. Change in the probability of removing the allowance in the contact zone when grinding holes in brittle non-metallic materials

заготовки с возрастанием фактической глубины резания увеличивается вероятность удаления материала на всех уровнях  $y$ . Наибольшее значение вероятности соответствует координате  $z = 0$  (положение сечения зоны контакта по основной плоскости), так как в этом положении фактическая глубина резания максимальна.

## Выводы

Выражения (2) (3) и (4) позволяют найти величины съема материала  $\Delta r$  соответственно для схем внутреннего, плоского и круглого наружного шлифования. Для решения рассмотренных уравнений необходимо знать величину приращення съема  $\Delta r_x$  за счет хрупкого разрушения в процессе развития микротрещин в поверхностном слое. Разработанные математические модели позволяют проследить влияние на съем припуска наложения единичных срезов при шлифовании отверстий хрупких неметаллических материалов. Полученные закономерности изменения вероятности удаления материала при контакте обрабатываемой поверхности с абразивным инструментом и аналитические зависимости [21, 23]

справедливы для широкого диапазона режимов шлифования, характеристик инструментов и других технологических факторов.

## 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. 09004–09008. – 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.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. – 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 // 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 // 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 статей 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. Повышение качества деталей при шлифовании в условиях плавучих мастерских / С.М. Братан, Е.А. Владецкая, Д.О. Владецкий, А.О. Харченко. – М.: Вузовский учебник; Инфра-М, 2018. – 154 с. – ISBN 978-5-9558-0598-6.

19. 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.

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

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

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

23. 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

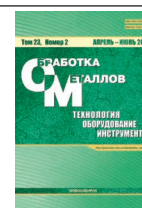
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 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](http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov)



## Simulation of the stock removal in the contact zone during internal grinding of brittle non-metallic materials

Sergey Bratan<sup>a,\*</sup>, Stanislav Roshchupkin<sup>b</sup>, Alexander Kharchenko<sup>c</sup>, Anastasia Chasovitina<sup>d</sup>

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

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

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received: 21 March 2021

Revised: 12 April 2021

Accepted: 17 April 2021

Available online: 15 June 2021

#### Keywords:

Cylindrical grinding of fragile materials

Abrasive grain

Microcutting

The contact area of the workpiece with the tool

Bulk fracture probability

The probability of not deleting the material

### ABSTRACT

**Introduction.** Finishing operations, in particular, cylindrical grinding, essentially form the quality parameters of products, its performance characteristics and functional suitability. At the same time, the cost of grinding work increases significantly in comparison with grinding metals, reaching an average of 20...28 % of the total cost of manufacturing products. The selection of the optimal parameters of the technological system based on the process simulation can improve the reliability, productivity and economic efficiency. To describe the processing of brittle nonmetallic materials, empirical dependences are mainly used, and the existing analytical models do not take into account the stochastic nature of the grinding operation and the combination of microcutting and brittle chipping when removing particles of brittle nonmetallic material and wear of the surface of the grinding tool. **Purpose of the work:** simulation of stock removal in the contact zone during internal grinding of brittle non-metallic materials. The task is to study the features and patterns of change in the probability of material removal when the treated surface comes into contact with an abrasive tool. In the work, the theoretical and probabilistic models are obtained, allowing to reveal the patterns of material removal in the contact zone. The models make it possible to trace the regularities of the interaction of cutting and piercing grains on the surface of the workpiece and the process of removing the allowance in the contact zone due to a combination of the phenomena of microcutting and brittle chipping, 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.** Data are obtained that provide a clear illustration of the patterns of material removal along the contact zone at various levels. Analysis of the results obtained shows that the peripheral speed of the tool and the rotation speed of the workpiece, which are directly included in the equation for calculating the probability of material removal, significantly affect the rate of material removal. The cross feed also has a significant effect on stock removal. A qualitative picture of the change in the probability of material removal in the contact zone during grinding of holes in brittle nonmetallic materials is obtained. The obtained patterns of change in the probability of material removal when the machined surface is in contact with an abrasive tool and analytical dependences are valid for a wide range of grinding modes, tool characteristics and other technological factors.

**For citation:** Bratan S.M., Roshchupkin S.I., Kharchenko A.O., Chasovitina A.S. Simulation of the stock removal in the contact zone during internal grinding of brittle non-metallic materials. *Obrabotka metallov (tehnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2021, vol. 23, no. 2, pp. 31–39. DOI: 10.17212/1994-6309-2021-23.2-31-39. (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/matec-conf/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](mailto: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. *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. *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. Vliyaniye glubiny rezaniya na vysotnye sherokhovatosti instrumentov iz stali U10A pri ploskom shlifovanii krugami iz kubicheskogo nitrida bora [Effect of cutting depth on the high-altitude roughness of tools made of steel U10A with flat grinding with cubic boron nitride]. *Aviamashinostroenie i transport Sibiri* [Aircraft engineering and transport of Siberia]. 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. Bratan S.M., Vladetskaya E.A., Vladetskii D.O., Kharchenko A.O. *Povyshenie kachestva detalei pri shlifovanii v usloviyakh plavuchikh masterskikh* [Improving the quality of parts when grinding in floating workshops]. Moscow, Vuzovskii uchebnik Publ., Infra-M Publ., 2018. 154 p. ISBN 978-5-9558-0598-6.
19. Lobanov D.V., Yanyushkin A.S., Arkhipov P.V. Napryazhenno-deformirovannoe sostoyaniye tverdosplavnykh rezhushchikh elementov pri almaznom zatachivaniy [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.
20. 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).
21. 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.
22. 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).
23. 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.