



Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

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



Вычисление радиального съема материала и толщины слоя с текущей шероховатостью 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>,  khao@list.ru, ^d  <https://orcid.org/0000-0001-6800-9392>,  nastya.chasovitina@mail.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.923

История статьи:

Поступила: 27 июня 2021
 Рецензирование: 23 июля 2021
 Принята к печати: 14 августа 2021
 Доступно онлайн: 15 сентября 2021

Ключевые слова:

Шлифование хрупких материалов
 Шлифование отверстий в заготовках из ситалла
 Радиальный съем материала
 Толщина слоя с текущей шероховатостью поверхности
 Вероятность удаления материала
 Глубина микрорезания

Благодарности:

Исследования выполнены на оборудовании ЦКП «Структура, механические и физические свойства материалов».

АННОТАЦИЯ

Введение. Параметры качества изделий, определяющие их эксплуатационные свойства и функциональные особенности, окончательно формируются на финишных операциях, к числу которых относится процесс внутреннего шлифования. При этом съем материала шероховатой поверхности заготовки происходит за счет наличия нескольких одновременно протекающих случайных процессов формообразования, возникающих при контактировании шлифовального круга и заготовки. Для моделирования операций шлифования используется теоретико-вероятностный подход. Однако для определения радиального съема материала и толщины слоя с текущей шероховатостью известные модели не могут быть использованы, так как не позволяют учесть специфику обработки изделий из хрупких неметаллических материалов. **Цель работы:** создание новой теоретико-вероятностной модели, позволяющей осуществлять расчет радиального съема материала и толщины слоя, в котором распределена текущая шероховатость при шлифовании хрупких неметаллических материалов. Задачей является исследование закономерностей удаления частиц хрупкого неметаллического материала путем радиального съема и исследование текущей (на данный момент времени) шероховатости, формируемой после каждого радиального съема в зоне контакта. В работе радиальный съем материала и слой с текущей шероховатостью определяются режимами шлифования, состоянием поверхности инструмента, размерами заготовки и круга, исходным состоянием обрабатываемой поверхности после предшествующего контакта. **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 размеры и формы зоны контакта при шлифовании отверстий заготовок из ситалла, которые несколько отличаются от известных при обработке заготовок из металла. Предложенные зависимости показывают, что с увеличением глубины микрорезания радиальный съем материала и толщина слоя с текущей шероховатостью поверхности увеличиваются для всех значений скорости круга и скорости заготовки. По полученным экспериментальным значениям вычисляли максимальную глубину микрорезания и толщину слоя с текущей шероховатостью поверхности. Величину толщины указанного слоя сравнивали с экспериментальными значениями, полученными с помощью профилограмм шлифованной поверхности. Сравнение расчетных и экспериментальных данных указывает на их соответствие практически при всех значениях подач, что подтверждает адекватность полученных уравнений, достаточно хорошо моделирующих реальный процесс шлифования отверстий из хрупких неметаллических материалов.

Для цитирования: Вычисление радиального съема материала и толщины слоя с текущей шероховатостью 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, № 3. – С. 31–44. – DOI: 10.17212/1994-6309-2021-23.3-31-44.

Введение

Современные машины создаются для выполнения многочисленных функций в самых различных областях человеческой деятельности и

характеризуются непрерывно возрастающими показателями универсальности и производительности, быстродействием и непрерывностью рабочего цикла, высокой степенью автоматизации и надежности. Перечисленные особенности обусловили соответствующие требования к свойствам отдельных деталей, а также проблемы, связанные с их обработкой. Известные общие проблемы обработки в значительной мере усугубляются в процессе получения точных

*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

отверстий в деталях из хрупких неметаллических материалов. Такая технологическая операция является одной из наиболее распространенных и по объему не уступает обработке наружных поверхностей. Кроме того, обработка точных отверстий относится к числу наиболее трудоемких и является более сложной, чем обработка наружных поверхностей, что обусловлено более тяжелыми условиями протекания процесса и меньшей жесткостью обрабатываемых инструментов. Параметры качества изделий, определяющие их эксплуатационные свойства и функциональные особенности, окончательно формируются на финишных операциях, к числу которых относится процесс внутреннего шлифования. При этом сьем материала шероховатой поверхности заготовки происходит за счет наличия нескольких одновременно протекающих случайных процессов формообразования, возникающих при контактировании шлифовального круга и заготовки. Для моделирования операций шлифования используется теоретико-вероятностный подход [1]. Впервые идея использования такого подхода при исследовании шероховатости поверхностей была впервые высказана американским математиком Дж. Райсом (1937 г.) и известным отечественным ученым академиком Ю.В. Линником (1954 г.). В дальнейшем появились исследования А.П. Хусу, Ю.Р. Витенберга, И.В. Дунина-Барковского, которым было уделено внимание отечественных и зарубежных ученых. Однако данные работы были направлены лишь на изучение характеристик шероховатых поверхностей без учета условий их формирования [2]. Дальнейшее развитие теоретико-вероятностный подход получил в работах А.Н. Резникова, О.Б. Федосеева, Н.И. Богомолова, Л.А. Глейзера, П.И. Ящерицына, Ю.Д. Аврутина, Д.Г. Евсеева, А.В. Королева, Ю.К. Новоселова и других авторов, использующих различные статистико-вероятностные методы для получения расчетных зависимостей применительно к конкретным схемам и условиям шлифования.

Авторами показано, что любые выводы о количестве рабочих зерен, процентном соотношении их с зернами на поверхности круга могут иметь реальный смысл лишь применительно к конкретным присущим данному процессу условиям, что связано с нестационарностью операций шлифования. Указанные работы отечественных и зарубежных авторов вносят существенный вклад в развитие теории формообразования шлифованных поверхностей, однако не позволяют учесть специфику обработки изделий из хрупких неметаллических материалов, в связи с чем область их применения ограничена [3–17].

С учетом изложенного выше целью данной работы является создание новой теоретико-вероятностной модели, позволяющей осуществлять расчет радиального съема материала и толщины слоя, в котором распределена текущая шероховатость при шлифовании хрупких неметаллических материалов. Задачей является исследование закономерностей удаления частиц хрупкого неметаллического материала путем радиального съема и исследование текущей (на данный момент времени) шероховатости, формируемой после каждого радиального съема в зоне контакта.

Теория и методы

Вероятность удаления материала для процессов обработки заготовок из хрупких неметаллических материалов абразивными инструментами вычисляется по зависимости [1]

$$P(M) = 1 - \exp(-b_0 - b_1(y, \tau) - b_2(y, \tau) - \dots - b_n(y, \tau)), \quad (1)$$

где b_n – показатель, характеризующий изменение площади впадин за счет процессов механического резания и хрупкого скалывания соответственно; $b_n = a_n + a_{n+1}$.

В работах [18, 19] получены зависимости, моделирующие показатели:

$$a_1(y, z) = \frac{3\pi n_3 K_c \sqrt{2\rho_3} (V_k \pm V_u) (1 - P_0) (t_f - y)^2}{8H_u^{3/2} V_u} \left(z - \frac{2z^3}{3\sqrt{L_y}} + \frac{z^5}{5L_y} + \frac{8}{15} L_y \right) + \frac{3\pi n_3 K_c \sqrt{2\rho_3} (V_k \pm V_u) (t_f - y)^4}{16H_u^{3/2} V_u t_f^2} \left(z + \frac{z^9}{9L_y^2} - \frac{4z^7}{7L_y^{3/2}} + \frac{6z^5}{5L_y} - \frac{4z^3}{3\sqrt{L_y}} + \frac{8}{20} L_y \right); \quad (2)$$

$$a_2(y, z) = \frac{3\pi n_3 K_c \sqrt{2\rho_3} (V_k \pm V_u) (1 - P_0) (t_f - y)^2}{8H_u^{3/2} V_u} \left(z - \frac{2z^3}{3\sqrt{L_y}} + \frac{z^5}{5L_y} + \frac{8}{15} L_y \right) + \frac{0,05n_3 K_c \sqrt{2\rho_3} (V_k \pm V_u) (t_f - y + \Delta r_x)^4}{H_u^{1,3} V_u (t_f + \Delta r_x)^2} \left(z + \frac{z^9}{9L_y^2} - \frac{4z^7}{7L_y^{3/2}} + \frac{6z^5}{5L_y} - \frac{4z^3}{3\sqrt{L_y}} + \frac{8}{20} L_y \right), \quad (3)$$

где $a_1(y, z)$ – показатель, характеризующий изменение площади впадин, формируемых за счет процесса механического резания; $a_2(y, z)$ – показатель, характеризующий изменение площади впадин, формируемых за счет процесса хрупкого скалывания; Δr_x – величина приращения съема материала в процессе хрупкого скалывания хрупкого неметаллического материала; n_3 – 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; Δr – 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; K_c – коэффициент стружкообразования; z – координата, направленная вдоль зоны контакта; ρ_3 – радиус округления вершины зерна.

Зависимости (1), (2), (3) позволяют рассмотреть методику аналитического расчета радиального съема материала и шероховатости поверхности по входным технологическим переменным процесса шлифования. Как отмечалось в работе [18], граничная область «материал–среда» может быть задана уровнями равной вероятности удаления материала.

На рис. 1 и 2 представлены иллюстрации съема материала при шлифовании отверстий в заготовках из ситалла (АС-370) инструментом AW 60×25×13 63С F90 М 7 В А 50 м/с (при скоростях шлифоваль-

ной головки – 35 и 50 м/с, скорости заготовки – 0,25 м/с, продольной подаче – 33 мм/с, поперечной подаче – 0,008 мм/ход). При прохождении поверхности зоны контакта уровни смещаются к центру заготовки (рис. 1).

Наблюдая за изменением положения уровня $P(M) = \beta_m$, ограничивающего переходную область «материал–среда» со стороны среды, можно проследить за динамикой удаления припуска в зоне контакта заготовки с инструментом. Расстояние между радиусами-векторами исходной поверхности и поверхности после контакта будет определять радиальный съем материала за касание, а положение линии с вероятностью $P(M) = \beta_m$ в течение контакта – текущее значение радиального съема и форму кривой, ограничивающей зону контакта со стороны инструмента (рис. 2).

Наиболее интенсивное уменьшение радиуса-вектора заготовки наблюдается вблизи плоскости, проходящей через центр круга и центр заготовки, когда глубина микрорезания $t(z)$ максимальна и через сечение проходит наибольшее количество режущих кромок инструмента. Уравнение линии, ограничивающей зону контакта заготовки со шлифовальной головкой со

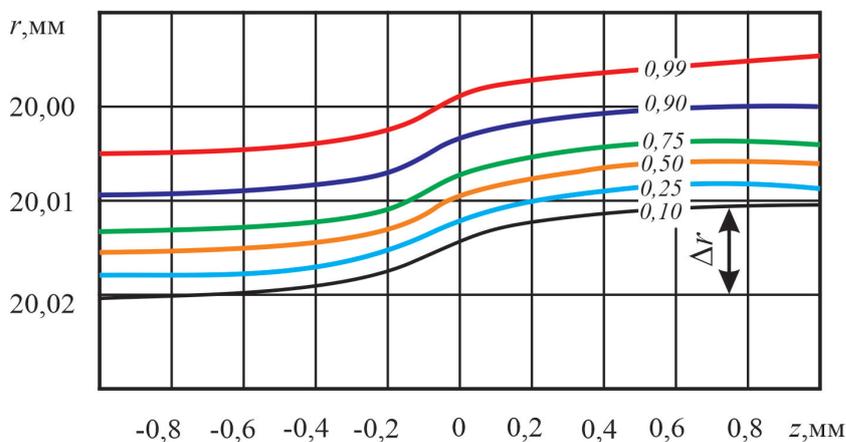


Рис. 1. Изменение радиусов-векторов уровней равной вероятности
Fig. 1. Changing the radius vectors of equal probability levels

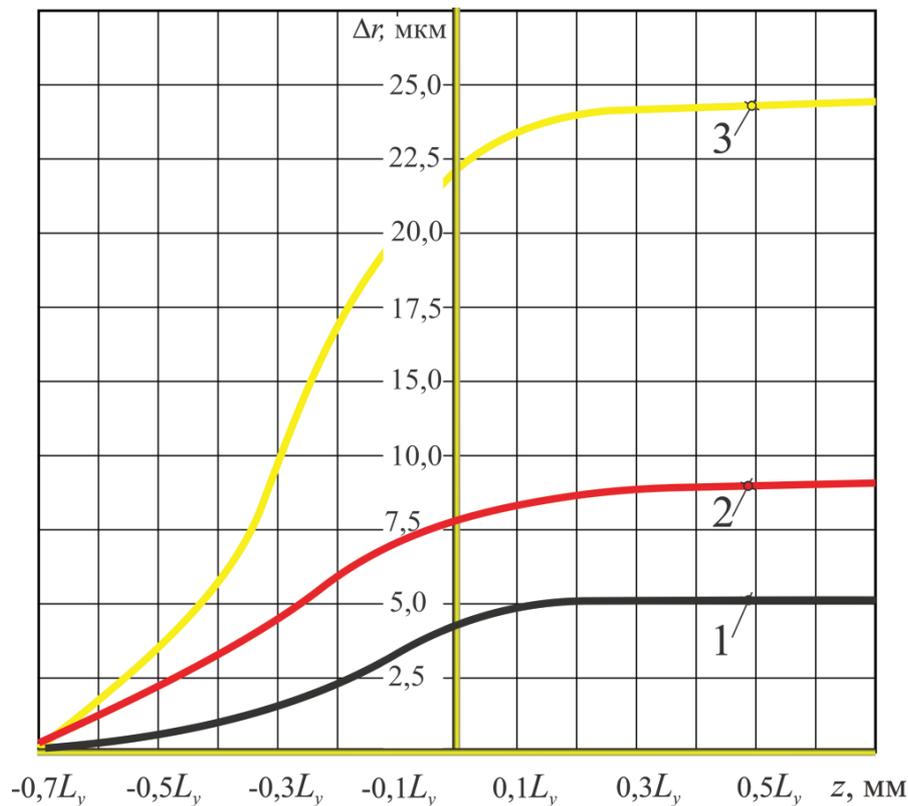


Рис. 2. Влияние глубины микрорезания t_f на радиальный съем материала при шлифовании отверстий в заготовках из ситалла (диаметр отверстия – 150 мм, инструмент AW 60×25×13 63С F90 М 7 В А 50 м/с):

1 – $t_f = 0,010$ мм; 2 – $t_f = 0,020$ мм; 3 – $t_f = 0,050$ мм

Fig. 2. Influence of the micro-cutting t_f depth on the radial material removal when grinding holes in silicon workpieces (hole diameter – 150 mm, tool AW 60×25×13 63С F90 М 7 В А 50 m/s):

1 – $t_f = 0,010$ mm; 2 – $t_f = 0,020$ mm; 3 – $t_f = 0,050$ mm

стороны инструмента (рис. 3), запишется следующим образом, если в уравнении (1) вероятности удаления материала придать значение β_m :

$$P(M) = \beta_m = 1 - \exp(-b_0 - b_1(y, \tau) - b_2(y, \tau) - \dots - b_n(y, \tau)). \quad (4)$$

Обозначим:

$$G_1 = \frac{3\pi n_3 K_c \sqrt{2\rho_3} (V_k \pm V_u) (1 - P_0)}{8 H_u^{3/2} V_u};$$

$$G_2 = \frac{3\pi n_3 K_c \sqrt{2\rho_3} (V_k \pm V_u)}{16 H_u^{3/2} V_u};$$

$$G_3 = \frac{0,05 n_3 K_c \sqrt{2\rho_3} (V_k \pm V_u)}{H_u^{1,3} V_u}.$$

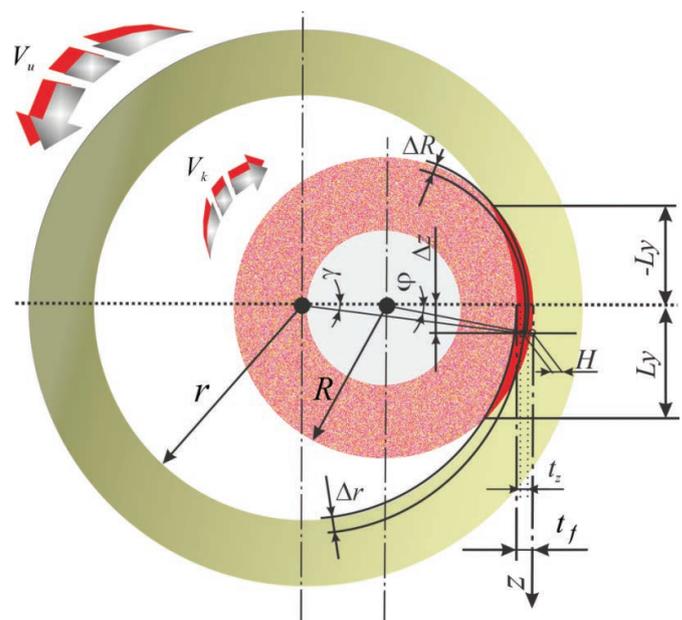


Рис. 3. Схема шлифования отверстия

Fig. 3. Hole grinding diagram

Величина съема материала за j -й контакт поверхности с кругом численно равна смещению к центру заготовки уровня с принятой вероятностью удаления материала и вычисляется из уравнения (4), которое при $y_j = 0$ может быть записано следующим образом:

$$\begin{aligned}
 -\ln(1 - \beta_m) = & G_1(t_f - y)^{m+\chi} + \\
 & + G_2 \frac{(t_f - y)^{m+\chi+\beta}}{t_f^\beta} + G_1(t_f - y)^{m+\chi} + \\
 & + G_3 \frac{(t_f - y + \Delta r_x)^{m_x+\chi+\beta}}{(t_f + \Delta r_x)^\beta}. \quad (5)
 \end{aligned}$$

Выполним замену переменных:

$$y = y_{j-1} + H_j; \quad t_f = H_j + \Delta r; \quad \Delta r_x = \zeta t_f,$$

где Δr_x – приращение величины съема материала за счет хрупкого разрушения; ζ – параметр, зависящий от формы абразивных зерен, свойств обрабатываемого материала и закона распределения зерен по глубине рабочего слоя инструмента, рассчитывается по зависимости [19]

$$\zeta = \frac{1}{\theta(m_x + \chi + \beta)^2}.$$

Тогда зависимость (5) примет вид

$$\begin{aligned}
 -\ln(1 - \beta_m) = & G_1(H_j + \Delta r_p - (y_{j-1} + H_j))^{m+\chi} + G_2 \frac{(H_j + \Delta r_p - (y_{j-1} + H_j))^{m+\chi+\beta}}{(H_j + \Delta r_p)^\beta} + \\
 & + G_1(H_j + \Delta r_p - (y_{j-1} + H_j))^{m+\chi} + G_3 \frac{\left(H_j + \Delta r_p - (y_{j-1} + H_j) + \frac{1}{\theta(m_x + \chi + \beta)^2}(H_j + \Delta r_p)\right)^{m_x + \chi + \beta}}{\left(H_j + \Delta r_p + \frac{1}{\theta(m_x + \chi + \beta)^2}(H_j + \Delta r_p)\right)^\beta}.
 \end{aligned}$$

После приведения подобных слагаемых:

$$\begin{aligned}
 -\ln(1 - \beta_m) = & G_1(\Delta r_p - y_{j-1})^{m+\chi} + G_2 \frac{(\Delta r_p - y_{j-1})^{m+\chi+\beta}}{(H_j + \Delta r_p)^\beta} + G_1(\Delta r_p - y_{j-1})^{m+\chi} + \\
 & + G_3 \frac{\left(\Delta r_p - y_{j-1} + \frac{1}{\theta(m_x + \chi + \beta)^2}(H_j + \Delta r_p)\right)^{m_x + \chi + \beta}}{\left(H_j + \Delta r_p + \frac{1}{\theta(m_x + \chi + \beta)^2}(H_j + \Delta r_p)\right)^\beta}. \quad (6)
 \end{aligned}$$

Численное решение уравнения (6) выполнено для условий шлифования отверстий в заготовках из ситалла (АС-370) инструментом AW 60×25×13 63С F90 М 7 В А 50 м/с (при скоростях шлифовальной головки 35 и 50 м/с, скорости заготовки 0,25 м/с, продольной подаче 33 мм/с, поперечной подаче 0,008 мм/ход). Результаты представлены графиками на рис. 4 и 5.

В отличие от процесса шлифования металлов размеры и форма зоны контакта при шлифовании отверстий заготовок из ситалла (рис. 4)

несколько отличаются от известных из литературных источников [17–19]. Фактический размер зоны по координате z на 75...80 % больше, чем принимаемый при срезах в виде запятой и на 10...15 % меньше, чем принимаемый при сегментообразных срезах. Ширина зоны отличается от максимально возможной на величину текущего радиального съема материала (рис. 4).

Радиальный съем материала и слой с текущей шероховатостью определяются режимами

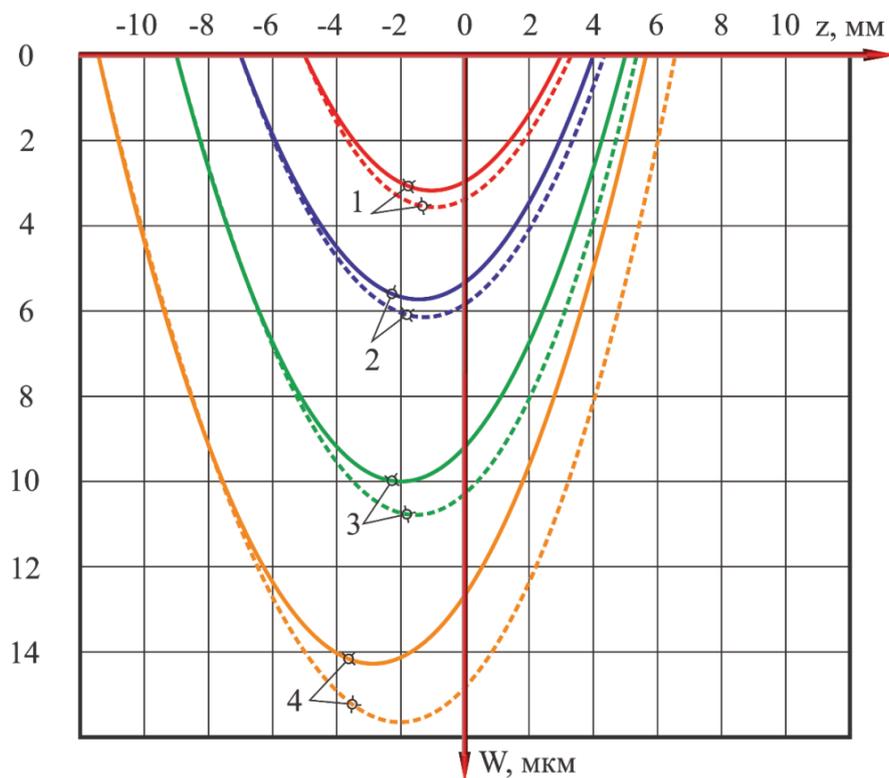


Рис. 4. Ширина зоны контакта заготовки с кругом без учета (—) и с учетом (---) радиального съема материала:

1 – $t_f = 9,22$ мкм; 2 – $t_f = 14,65$ мкм; 3 – $t_f = 23,76$ мкм;

4 – $t_f = 30,58$ мкм

Fig. 4. Width of the contact area of the workpiece with the grinding wheel without (—) and with (---) radial material removal:

1 – $t_f = 9,22$ μm; 2 – $t_f = 14,65$ μm; 3 – $t_f = 23,76$ μm; 4 – $t_f = 30,58$ μm

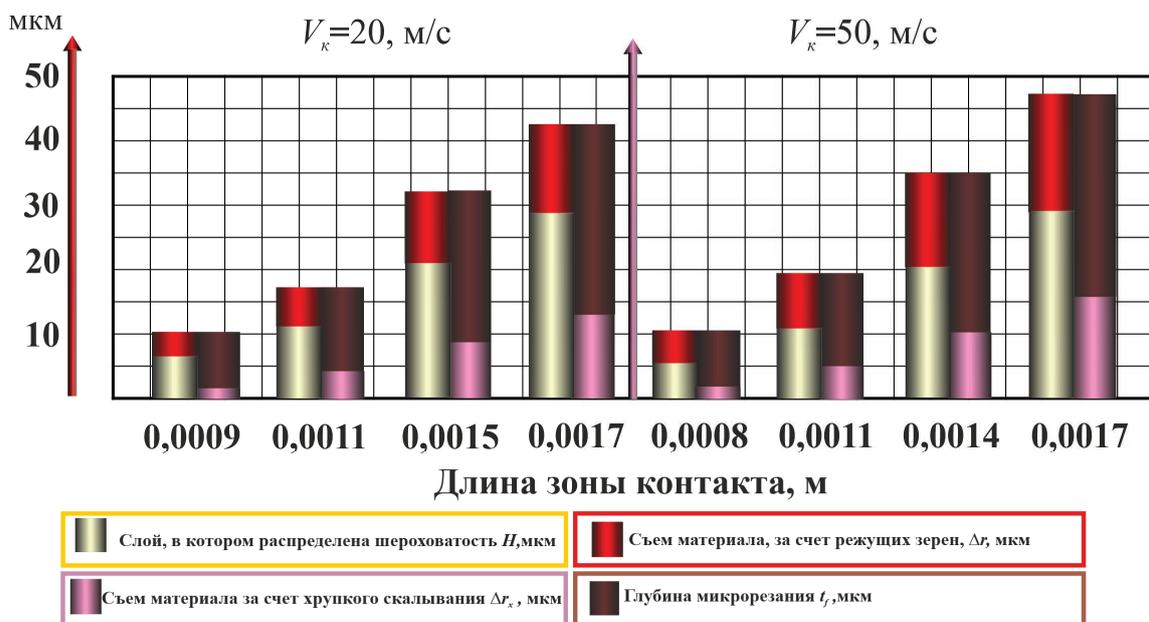


Рис. 5. Влияние скорости круга на радиальный съем металла и толщину слоя с текущей шероховатостью при шлифовании заготовок из ситалла (АС-370)

Fig. 5. Influence of wheel speed on radial metal removal and thickness of layer with current roughness when grinding silicon workpieces (AC-370)

шлифования, состоянием поверхности инструмента, размерами заготовки и круга, исходным состоянием обрабатываемой поверхности после предшествующего контакта.

При установившемся процессе шлифования для вывода зависимости радиального съема от элементов режима шлифования в явном виде с учетом многопроходности процесса совмещаем начало координат с уровнем максимальных вершин профиля на $(j - n)$ -м касании, где n – число касаний поверхности с кругом, необходимых для полного обновления. Тогда при $0 \leq y_{j-1} \leq \Delta r_p$ получим:

$$t_f = (n + 1)\Delta r_p - y_{j-1}. \quad (7)$$

Известно, что при достаточно широком изменении элементов режима резания число касаний n , которые нужны для полного удаления исходной шероховатости поверхности, меняется в пределах от 2 до 12 [18].

С учетом вышеизложенного в предположении, что n является величиной непрерывной, на основании зависимостей (6) и (7) после разложе-

ния в ряд и свертки первых 12 членов при выбранном значении вероятности β_m получаем приближенное решение для расчёта радиального съема материала, полученного за счет механического резания, для условий шлифования заготовок из хрупких неметаллических материалов (рис. 7):

$$\Delta r_p = \frac{(0,677t_f V_u + 0,073t_f^2 K_c (V_k \pm V_u) n_3 \sqrt{D_e \rho_3})}{V_u}, \quad (8)$$

где D_e – эквивалентный диаметр.

Толщина слоя с текущей шероховатостью (рис. 6), исходя из геометрических соображений, может быть рассчитана по зависимости

$$H = t_f - \Delta r_p + \Delta r_x. \quad (9)$$

В результате подстановок значений параметров в выражение (9) получена математическая модель формирования слоя с текущей шероховатостью после шлифования заготовок, изготовленных из хрупких неметаллических материалов:

$$H = t_f - \frac{(0,677t_f V_u + 0,073t_f^2 K_c (V_k \pm V_u) n_3 \sqrt{D_e \rho_3})}{V_u} \times \left(1 + \left(1 - \exp \left[- \frac{(0,677t_f V_u + 0,073t_f^2 K_c (V_k \pm V_u) n_3 \sqrt{D_e \rho_3})}{V_u \theta^{(m_x + \chi + \beta)^2}} \right] \right) \right). \quad (10)$$

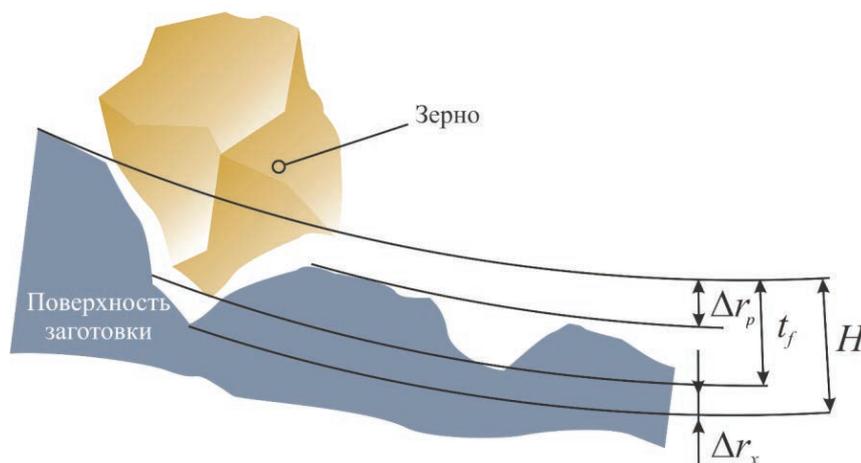


Рис. 6. Схема контактирования абразивного зерна с хрупким материалом заготовки

Fig. 6. Pattern of abrasive grain contact with brittle workpiece material

Пример. Рассчитать толщину слоя с текущей шероховатостью поверхности при внутреннем шлифовании отверстия $d = 150 \cdot 10^{-3}$ м заготовки из АС-370. При этом в качестве инструмента выбрана шлифовальная головка АУ 60×25×13 63С F90 М 7 В А 35 м/с с величиной поперечной подачи $\Delta A_{si} = 5$ мкм на оборот заготовки и скоростью вращения заготовки $V_u = 0,25$ м/с. Приращения упругих деформаций инструмента и заготовки, а также температурных деформаций элементов системы не учитываем. Текущее состояние системы $t_f = 14,65$ мкм. Для заданных условий $K_c = 1$,

$$\begin{aligned} \Delta r_x = & \frac{1}{0,25} \left((0,677 \cdot 14,65 \cdot 10^{-6} \cdot 0,25 + 0,073(14,65 \cdot 10^{-6})^2 1(35 \pm 0,25) \times \right. \\ & \left. \times 15,866 \cdot 10^6 \sqrt{0,1 \cdot 7,31 \cdot 10^{-6}} \right) \left[1 - \exp \left(- \frac{1}{0,25 \cdot 0,5^{(0,7+1,3+2)^2}} \left(0,677 \cdot 14,65 \cdot 10^{-6} \cdot 0,25 + \right. \right. \right. \\ & \left. \left. \left. + 0,073(14,65 \cdot 10^{-6})^2 1(35 \pm 0,25) \cdot 15,866 \cdot 10^6 \sqrt{0,1 \cdot 7,31 \cdot 10^{-6}} \right) \right) \right] = 4,603 \cdot 10^{-6}. \end{aligned}$$

Тогда толщина слоя с текущей шероховатостью будет равна, м:

$$\begin{aligned} H = t_f - \Delta r_p + \Delta r_x = & 14,65 \cdot 10^{-6} - \\ & - 7,458 \cdot 10^{-6} + 4,603 \cdot 10^{-6} = 11,795 \cdot 10^{-6}. \end{aligned}$$

Сопоставление величин радиального съема материала и слоя с текущей шероховатостью, вычисленных по зависимостям (8) и (9) для случая внутреннего шлифования отверстия $d = 150 \cdot 10^{-3}$ м заготовки из АС-370 приведено в табл. 1. При этом сохранены условия приведенного выше примера с начальным состоянием системы $t_{f0} = 0$; $V_k = 35$ м/с; $V_u = 0,25$ м/с.

Для большинства режимов шлифования отклонение значений радиального съема и слоя с текущей шероховатостью материала, рассчитанных по упрощенным моделям, не превышает 1 %. Только для режимов 4 и 6 они составляют 1,17 и 1,19 %. Таким образом, принятые приближения обеспечивают достаточно высокую точность расчетов и позволяют аналитически оценить влияние на радиальный съем материала и слой с текущей шероховатостью поверхности элементов режима шлифования и характеристик

$$n_3 = 15,866 \cdot 10^6 \text{ м}, \quad \rho_3 = 7,31 \cdot 10^{-6} \text{ м}, \quad \theta = 0,5, \\ \beta = 2, \quad m_x = 0,7 \text{ и } \chi = 1,3.$$

Определим величину радиального съема материала, полученного за счет механического резания, м:

$$\begin{aligned} \Delta r_p = & \frac{1}{0,25} \left((0,677 \cdot 14,65 \cdot 10^{-6} \cdot 0,25 + \right. \\ & \left. + 0,073(14,65 \cdot 10^{-6})^2 1(35 \pm 0,25) \times \right. \\ & \left. \times 15,866 \cdot 10^6 \sqrt{0,1 \cdot 7,31 \cdot 10^{-6}} \right) = 7,458 \cdot 10^{-6}. \end{aligned}$$

Вычислим величину съема за счет хрупкого разрушения зерен, м:

абразивного инструмента. Радиальный съем и слой с текущей шероховатостью поверхности зависят от фактической глубины микрорезания, скорости заготовки, размеров заготовки и круга, геометрии абразивного зерна, числа режущих кромок на поверхности круга.

С увеличением глубины микрорезания радиальный съем материала и толщина слоя с текущей шероховатостью поверхности увеличиваются для всех значений скорости круга и скорости заготовки (рис. 5 и 7).

В исследованном диапазоне толщина слоя с текущей шероховатостью поверхности изменяется почти пропорционально t_f . Так, для кругов зернистостью F90 при увеличении t_f почти в 2 раза (с 9,22 до 14,65 мкм при $V_k = 35$ м/с) толщина слоя с текущей шероховатостью увеличивается в 1,92 раза (с 5,2 до 10,01 мкм). Радиальный съем материала с увеличением глубины микрорезания увеличивается более значительно, чем толщина слоя с текущей шероховатостью поверхности. Так, при увеличении t_f в 1,59 раза (с 9,22 до 14,65 мкм) (рис. 5) радиальный съем увеличивается в 3,1 раза (с 2,38 до 7,34 мкм).

Сопоставление результатов расчетов численными методами с выполненными по упрощенным зависимостям
Comparison of numerical results with those based on simplified dependencies

№ п/п	Фактическая глубина t_f , мкм/ Actual depth t_f , μm	Число контактов, n / Number of contacts, n	Радиальный сьем материала, мкм/ Radial material removal, μm		Толщина слоя с текущей шероховатостью H , мкм/ Layer thickness with current roughness H , μm			Длина зоны контакта, мм/ Contact area length, mm
			Δr_p	Δr_x	зависимость (6)/ dependency (6)	упрощенная модель (10)/ simplified model (10)	отклонение, %/ deviation, %	
1	9,22	5	4,096	1,857	6,998	6,982	0,23	0,0008
2	14,65	2	7,458	4,603	11,849	11,795	0,46	0,0011
3	16,04	3	8,345	5,428	13,161	13,12	0,31	0,0011
4	23,76	7	13,37	10,55	21,19	20,94	1,17	0,0014
5	27,92	6	16,11	13,53	25,49	25,33	0,63	0,0016
6	29,77	12	17,34	14,89	27,64	27,31	1,19	0,0017
7	30,58	9	17,88	15,47	28,369	28,17	0,71	0,0017

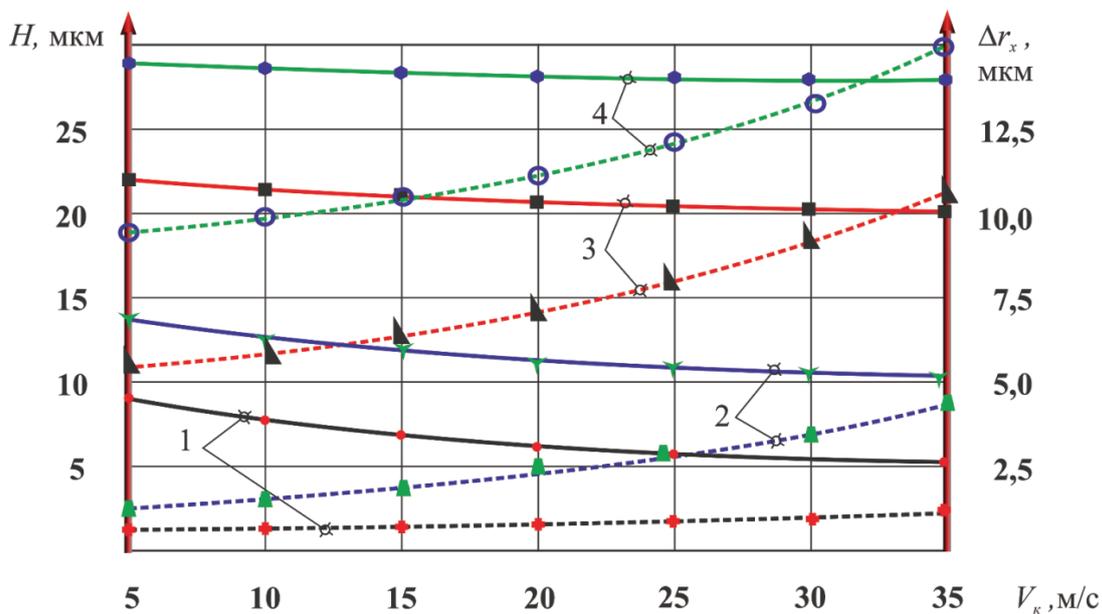


Рис. 7. Влияние скорости круга на сьем материала (---), вызванного хрупким разрушением, и на толщину слоя с текущей шероховатостью (—) поверхности:

1 – $t_f = 9,22$ мкм; 2 – $t_f = 14,65$ мкм; 3 – $t_f = 23,76$ мкм; 4 – $t_f = 30,58$ мкм

Fig. 7. Effect of wheel speed on material removal (---), caused by brittle fracture and on layer thickness with current surface roughness (—):

1 – $t_f = 9,22$ μm ; 2 – $t_f = 14,65$ μm ; 3 – $t_f = 23,76$ μm ; 4 – $t_f = 30,58$ μm

Такое влияние глубины микрорезания на радиальный съем объясняется тем, что при увеличении t_f увеличивается не только толщина, но и длина единичных срезов, растет хрупкая составляющая съема.

С увеличением скорости круга радиальный съем увеличивается, толщина слоя с текущей шероховатостью поверхности уменьшается. С увеличением скорости заготовки при $t_f = \text{const}$ радиальный съем материала уменьшается, толщина слоя с текущей шероховатостью поверхности увеличивается.

Результаты и их обсуждение

С целью экспериментальной проверки полученных зависимостей были проведены опыты по шлифованию образцов при внутреннем шлифовании отверстия из АС-370. Образцы (диаметр отверстия – 150 мм, длина – 250 мм) шлифовали на станке RSM M 500 CNC инструментом AW 60×25×13 63С F90 М 7 В А 35 м/с (скорость головки 35 м/с, скорость заготовки 0,262 м/с). Для того чтобы каждая точка поверхности за один проход встречалась с кругом один раз, продольную подачу на оборот заготовки выбирали равной ширине шлифовальной головки bs (рис. 8).

По полученным экспериментальным значениям вычисляли максимальную глубину микрорезания и толщину слоя с текущей шеро-

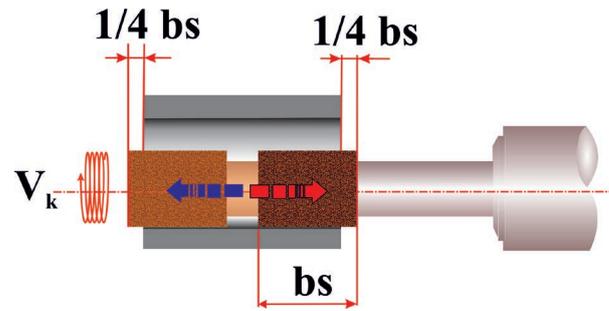


Рис. 8. Схема процесса внутреннего шлифования

Fig. 8. Diagram of the internal grinding process

ховатостью поверхности. Величину толщины указанного слоя сравнивали с экспериментальными значениями, полученными с помощью профилограмм шлифованной поверхности.

Полученные зависимости съема материала и толщины слоя с текущей шероховатостью поверхности от поперечной подачи аналогичны имеющимся в литературных источниках. Если аппроксимировать их уравнениями вида $H = \Delta_H S_y^n$, то показатель степени при S_y будет равен 0,44, что хорошо согласуется с экспериментальными данными других авторов [17].

Сравнение расчетных и экспериментальных данных указывает на их соответствие практически при всех значениях подач. Несколько отли-

Таблица 2

Table 2

Влияние поперечной подачи на глубину микрорезания, радиальный съем материала и шероховатость поверхности

Influence of cross feed on micro-cutting depth, radial material removal and surface roughness

№ п/п	Поперечная подача S_y , мкм/ход/ Cross feed rate S_y , μm/stroke	Фактическая глубина t_p , мкм/ Actual depth t_p , μm	Радиальный съем материала, мкм/ Radial material removal, μm		Толщина слоя с текущей шероховатостью H , мкм/ Layer thickness with current roughness H , μm		
			Δr_p	Δr_x	экспериментальный/ experimental	расчетный calculated/	отклонение, %/ deviation, %
1	0,5	10,47	4,68	2,324	6,382	8,114	21,34
2	1,0	17,83	9,27	6,389	12,451	14,95	16,71
3	2,0	22,34	12,18	9,363	16,872	19,52	13,57
4	4,0	26,38	14,83	12,2	26,01	23,75	8,69
5	8,0	32,16	18,65	16,38	27,904	29,89	6,64

чается наклон расчетной кривой (наибольшее отклонение – 21,34 % расчетных значений от экспериментальных) при поперечной подаче 0,5 мкм/ход. При увеличении поперечной подачи различия в расчетных и экспериментальных значениях шероховатости поверхности уменьшаются. Незначительные различия экспериментальных и теоретических значений в области подач 1...2 мкм/ход могут быть объяснены тем, что при вычислениях число вершин на поверхности круга принято постоянным, в то время как по данным исследований [17–20] оно увеличивается с уменьшением интенсивности съема металла и поперечной подачи. Однако и при сохранении постоянства числа абразивных зерен уравнения (8) и (10) достаточно хорошо моделируют реальный процесс шлифования отверстий из хрупких неметаллических материалов.

Выводы

Разработанные математические модели позволяют осуществить расчет радиального съема материала и толщины слоя, в котором распределена текущая шероховатость при шлифовании хрупких неметаллических материалов. Предложенные зависимости показывают закономерность удаления частиц хрупкого неметаллического материала путем радиального съема и распределения текущей шероховатости, формируемой после каждого радиального съема в зоне контакта.

Предложенные аналитические зависимости справедливы для широкого диапазона режимов шлифования отверстий в заготовках из ситалла, характеристик кругов и ряда других технологических факторов [18, 19, 20].

Полученные выражения позволяют найти максимальную глубину микрорезания и толщину слоя с текущей шероховатостью поверхности при шлифовании хрупких неметаллических материалов. Сравнение расчетных и экспериментальных данных указывает на их соответствие практически при всех значениях подач, что подтверждает адекватность полученных уравнений, достаточно хорошо моделирующих реальный процесс шлифования отверстий из хрупких неметаллических материалов.

Список литературы

1. Новоселов Ю.К. Динамика формообразования поверхностей при абразивной обработке. – Севастополь: СевНТУ, 2012. – 304 с. – ISBN 978-617-612-051-3.
2. Kassen G., Werner G. Kinematische Kenngrößen des Schleifvorganges // *Industrie-Anzeiger*. – 1969. – N 87. – P. 91–95.
3. 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.
4. 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.
5. 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.
6. 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.
7. 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.
8. 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.
9. 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.
10. 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.
11. 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.
12. 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.

13. 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.

14. 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.

15. 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.

16. 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.

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

18. 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.

19. 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.

20. 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.

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



Calculation of radial material removal and the thickness of the layer with the current roughness 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: 27 June 2021

Revised: 23 July 2021

Accepted: 14 August 2021

Available online: 15 September 2021

Keywords:

Grinding of brittle materials
 Sanding of holes in silicon workpieces
 Radial material removal
 Layer thickness with current surface roughness
 Probability of material removal, micro-cutting depth

Acknowledgements

Research were conducted at core facility "Structure, mechanical and physical properties of materials".

ABSTRACT

Introduction. The quality parameters of products, which determine its performance and functionality, are finally formed in the finishing operations, which include the internal grinding process. In this case, the removal of material from the rough surface of the workpiece occurs due to the presence of several simultaneously running random processes of shaping, occurring during the contact of the grinding wheel and the workpiece. A probabilistic theoretical approach is used to simulate grinding operations. However, for determination of radial material removal and thickness of layer with current roughness, the known models cannot be used, as it does not allow taking into account specific features of machining products made of brittle non-metallic materials. **Purpose of the work.** Creation of a new theoretical and probabilistic model allowing to calculate radial material removal and layer thickness, in which current roughness is distributed during grinding of brittle non-metallic materials. The aim is to investigate the regularities of brittle non-metallic material particles removal by radial removal and study the current (for the moment) roughness formed after every radial removal in the contact area. In the work, radial material removal and the layer with current roughness are determined by grinding modes, tool surface condition, workpiece and wheel dimensions, and the initial condition of the machined surface after the previous contact. **The research methods** are mathematical and physical simulation using basic probability theory, distribution laws of random variables, as well as the theory of cutting and the theory of deformable solids. **Results and discussion.** The developed mathematical models make it possible to trace the dimensions and shape of the contact zone when grinding holes in billets made of silicon, which are somewhat different from those known when machining billets made of metal. The proposed dependencies show that with an increase in the depth of micro-cutting, the radial material removal and the thickness of the layer with the current surface roughness increase for all values of wheel speed and workpiece speed. From the experimental values obtained, the maximum micro-cutting depth and the thickness of the layer with current surface roughness are calculated. The thickness of the said layer is compared with the experimental values obtained from the ground surface profilographs. A comparison of the calculated and experimental data indicates its compliance with almost all feed values, which confirms the adequacy of the obtained equations, which model the real process of grinding holes made of brittle non-metallic materials quite well.

For citation: Bratan S.M., Roshchupkin S.I., Kharchenko A.O., Chasovitina A.S. Calculation of radial material removal and the thickness of the layer with the current roughness when grinding brittle non-metallic materials. *Obrabotka metallov (tehnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2021, vol. 23, no. 3, pp. 31–44. DOI: 10.17212/1994-6309-2021-23.3-31-44. (In Russian).

References

1. 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.
2. 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).
3. 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.

* 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. 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.
5. 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.
6. 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.
7. 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.
8. 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.
9. 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.
10. 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.
11. 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.
12. 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.
13. 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.
14. 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.
15. 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.
16. 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).
17. Gusev V.V., Moiseyev 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.
18. Bratan S.M., Roshchupkin S.I., Kharchenko A.O., Chasovitina A.S. Veroyatnostnaya model' udaleniya poverkhnostnogo sloya pri shlifovanii khrupkikh nemetallicheskich materialov [Probabilistic model of surface layer removal when grinding brittle non-metallic materials]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, 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.
19. Bratan S.M., Roshchupkin S.I., Kharchenko A.O., Chasovitina A.S. Modelirovanie s'ema pripuska v zone kontakta pri vnutrennem shlifovanii khrupkikh nemetallicheskich materialov [Simulation of the stock removal in the contact zone during internal grinding of brittle non-metallic materials]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, 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.
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.

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/>).