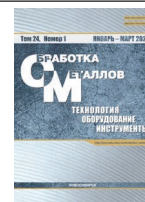




Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

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

Влияние на вероятность удаления материала относительных вибраций абразивного инструмента и заготовки при чистовом шлифовании

Сергей Братан^{1, а, *}, Станислав Рошчупкин^{1, б}, Анастасия Часовитина^{1, в}, Капил Гупта^{2, д}¹ Севастопольский государственный университет, ул. Университетская, 33, г. Севастополь, 299053, Россия² Университет Йоханнесбурга, ул. Джона Орра, 7225, Кампус Дорнфонтейн, Йоханнесбург, 2028, Южная Африка^а <https://orcid.org/0000-0002-9033-1174>, serg.bratan@gmail.com, ^б <https://orcid.org/0000-0003-2040-2560>, st.roshchupkin@yandex.ru,^в <https://orcid.org/0000-0001-6800-9392>, nastya.chasovitina@mail.ru, ^д <https://orcid.org/0000-0002-1939-894X>, kgupta@uj.ac.za

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.923.4

История статьи:

Поступила: 30 декабря 2021

Рецензирование: 21 января 2022

Принята к печати: 15 февраля 2022

Доступно онлайн: 15 марта 2022

Ключевые слова:

Шлифование титана

Абразивное зерно

Микрорезание

Зона контакта заготовки с инструментом

Вероятность удаления материала

Вероятность неудаления материала

Финансирование:

Работа выполнена при поддержке программы Приоритет-2030 Севастопольского государственного университета (стратегический проект № 2).

Благодарности:

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Шлифование остается наиболее производительным и экономичным методом окончательной финишной обработки, обойтись без которого при производстве высокоточных деталей невозможно. Характерными особенностями шлифования материалов является то, что съем материала, шероховатость поверхности заготовки происходят за счет стохастического взаимодействия зерен абразивного материала с поверхностью заготовки при наличии взаимных колебательных движений абразивного инструмента и обрабатываемой заготовки. При обработке заготовок абразивными инструментами удаление материала осуществляется большим числом зерен, которые не имеют регулярной геометрии и случайно расположены на рабочей поверхности. Это обуславливает необходимость применения при математическом моделировании операций теории вероятностей и теории случайных процессов. В реальных условиях при шлифовании контакт круга с деталью происходит с периодически изменяющейся глубиной из-за вибраций станка, отклонений формы инструмента от круглости, неуравновешенности круга или недостаточной жесткости обрабатываемой детали. Для устранения влияния вибраций на производстве применяют инструменты с мягкими связками, снижают значение продольной и поперечной подач, однако все эти меры приводят к снижению производительности операции, что крайне нежелательно. Во избежание стоимостных потерь необходимы математические модели, адекватно описывающие процесс и учитывающие влияние вибраций на выходные показатели процесса шлифования. **Цель работы:** создание теоретико-вероятностной модели съема материала при чистовом и тонком шлифовании, позволяющей с учетом относительных вибраций абразивного инструмента и заготовки проследить закономерности его удаления в зоне 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 влияние на съем материала наложения единичных срезов друг на друга при чистовом шлифовании 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 при наличии вибраций, 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, профильного, плоского и круглого наружного и внутреннего шлифования, для чего необходимо знать величину относительных вибраций. Однако параметры технологической системы не остаются постоянными, а изменяются с течением времени, например вследствие износа шлифовального круга. Для оценки состояния технологической системы были проведены экспериментальные исследования, учитывающие вышеуказанные изменения за период стойкости шлифовального круга.

Для цитирования: Влияние на вероятность удаления материала относительных вибраций абразивного инструмента и заготовки при чистовом шлифовании / С.М. Братан, С.И. Рошчупкин, А.С. Часовитина, К. Гупта // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2022. – Т. 24, № 1. – С. 33–47. – DOI: 10.17212/1994-6309-2022-24-1-33-47.

Введение

Развитие науки и техники ставит задачу широкого применения в конструкциях изделий электромашиностроения, приборостроения, ядерной энергетики, ракетостроения, самолетостроения,

*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

космической техники, медицины и в последнее время – в общем машиностроении новых материалов, к которым предъявляются повышенные требования по жаростойкости, износостойкости, коррозионной стойкости, стойкости к воздействию химикатов. Промышленные предприятия сталкиваются с задачами эффективной обработки вышеуказанных материалов.

В условиях развития рыночной экономики важнейшим фактором успешной деятельности предприятия является создание технологических процессов, обеспечивающих удовлетворение запросов потребителей. К ним относятся: снижение себестоимости выпускаемой продукции при обеспечении высоких эксплуатационных характеристик изделий, а также повышение производительности создания изделий с заданными свойствами, например, при производстве пары трения необходимо за минимальное время технологически обеспечить оптимальную структуру поверхностного слоя рабочих поверхностей деталей, создать на этапе механической обработки микрорельеф поверхности детали, близкий к равновесному состоянию. Такой подход обеспечит сокращение этапа приработки пары трения и увеличит ресурс ее работы [1].

Анализ существующих исследований в области обработки материалов показывает, что несмотря на наличие большого числа высокоточных способов обработки, таких как ультразвуковая, лазерная, высокоскоростное фрезерование и другие, наиболее используемым и производительным методом при изготовлении высокоточных деталей остается шлифование [2–6].

Шлифование – наиболее производительный и экономичный метод окончательной финишной обработки, обойтись без которого при производстве высокоточных деталей невозможно.

Характерными особенностями шлифования материалов является то, что съем материала, шероховатость поверхности заготовки происходят за счет стохастического взаимодействия зерен абразивного материала с поверхностью заготовки при наличии взаимных колебательных движений абразивного инструмента и обрабатываемой заготовки.

При обработке заготовок абразивными инструментами удаление материала осуществляется большим числом зерен, которые не имеют

регулярной геометрии и случайно расположены на рабочей поверхности. Это обуславливает необходимость применения при математическом моделировании операций теории вероятностей и теории случайных процессов.

Значительное внимание исследованию процессов шлифования уделено в работах А.И. Грабченко, В.Л. Доброскока, В.И. Кальченко, Ф.Н. Новикова, М.Д. Узуняна, В.А. Федорова, Л.Н. Филимонова, А.В. Якимова и других авторов, которые с помощью различных статистико-вероятностных методов получили расчетные зависимости применительно к конкретным схемам и условиям шлифования. Авторами показано, что любые выводы о количестве рабочих зерен, о 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.

Первые математические модели абразивно-алмазной обработки, отражающие динамические свойства процессов, их стохастическую природу, а также нестационарность состояний технологических операций, были получены и опубликованы в 1971 г. Ю.К. Новоселовым. В 1975 г. появились публикации А.В. Королева, в которых использовался аналогичный подход.

Вышеуказанные работы внесли существенный вклад в развитие теории формообразования шлифованных поверхностей, однако в них не учитывалась специфика обработки изделий при наличии относительных вибраций круга и заготовки на выходные показатели операции шлифования, поэтому они имеют ограниченную область применения [7–10].

При обработке заготовок абразивными инструментами удаление материала осуществляется большим числом зерен, которые не имеют регулярной геометрии и случайно расположены на рабочей поверхности. Это обуславливает при моделировании таких операций целесообразность применения математического аппарата теории вероятностей и теории случайных процессов [11–14].

В реальных условиях при шлифовании контакт круга с деталью осуществляется с периодически изменяющейся глубиной из-за вибраций станка, отклонений формы инструмента от круглости, неуравновешенности круга или недоста-

точной жесткости обрабатываемой детали. Для устранения влияния вибраций на производстве применяют инструменты с мягкими связками, снижают значение продольной и поперечной подачи, однако все эти меры приводят к снижению производительности операции, что крайне нежелательно.

Для избежания стоимостных потерь необходимы математические модели, адекватно описывавшие процесс и учитывающие влияние вибраций на выходные показатели процесса шлифования [15–19].

На основе вышеизложенного целью данной работы является создание теоретико-вероятностной модели съема материала при чистовом и тонком шлифовании, позволяющей с учетом относительных вибраций абразивного инструмента и заготовки проследить закономерности его удаления в зоне контакта.

Методика исследований

Наличие взаимных колебательных движений абразивного инструмента и обрабатываемой заготовки является характерной особенностью процесса шлифования. Колебательные движения возникают из-за дисбаланса вращающихся частей станка, колебаний, поступающих извне, автоколебаний, сопровождающих процесс резания. Частота вынужденных колебаний для шлифовальных станков, по данным П.И. Ящерицына, составляет 150...350 Гц, частота автоколебаний – 300...900 Гц [1].

Наличие относительных колебательных движений шлифовального круга и заготовки приводит к изменению размеров и формы зоны контакта, к искажению траекторий относительного движения вершин абразивных зерен в обрабатываемом материале, к изменению текущей глубины микрорезания t_z (рис. 1).

Относительные смещения в направлении линии центров шлифовальной головки и заготовки вне зависимости от причин, их вызывавших, могут быть описаны уравнением

$$Y = \sum_i A_{\omega i} \cos(\omega_i \tau + \psi_{yi}), \quad (1)$$

где $A_{\omega i}$, ω_i , ψ_{yi} – амплитуда, циклическая частота и начальная фаза отклонений t_f ; τ – время контакта поверхности с инструментом.

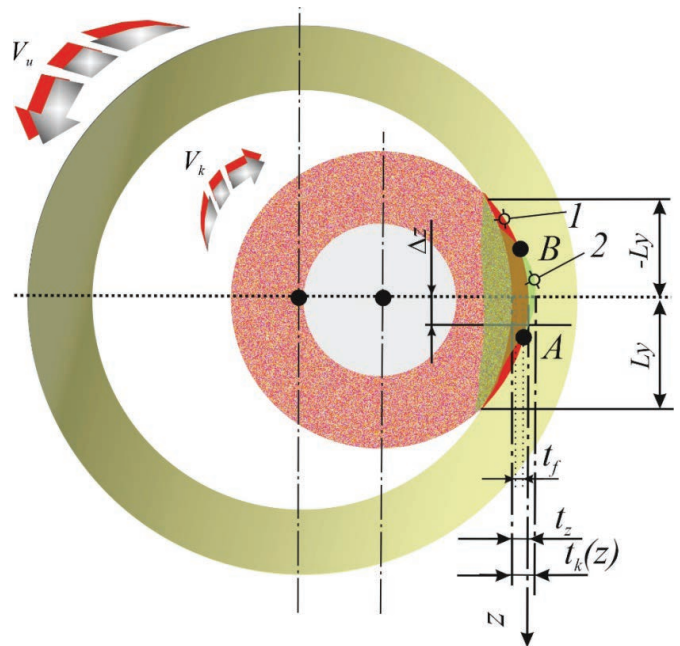


Рис. 1. Влияние вибраций на глубину микрорезания при внутреннем шлифовании

Fig. 1. Influence of vibrations on the depth of microcutting during internal grinding

Текущее значение глубины микрорезания t_z зависит от радиусов-векторов заготовки r и круга R , межцентрового расстояния A (см. рис. 1). Для наиболее выступающих зерен оно может быть определено по уравнению

$$t(z) = t_f - \frac{z^2 D d}{(d - D)} = t_f - \frac{z^2}{D_e}, \quad (2)$$

где D , d – диаметры инструмента и заготовки соответственно; D_e – эквивалентный диаметр; z – расстояние сечения заготовки до основной плоскости.

При вращении заготовки участок обрабатываемой поверхности проходит в зоне контакта от точки A до точки B . Глубина резания при отсутствии вибраций изменяется монотонно (линия 1) от нуля до t_f и от t_f до нуля, текущее время

контакта определяется выражением $\tau = \frac{z}{V_u}$.

Для точки A $z = -L$, $\tau = 0$, для точки B $z = +L$, $\tau = \frac{2L}{V_u}$.

Для сечения поверхности, проходящего через зону контакта заготовки с кругом, мгновенная глубина микрорезания единичными abra-

живными зернами с учетом (1) и (2) может быть описана функцией

$$t(k)_i = t_f - \frac{z^2}{D_e} + \sum_i A_{\omega i} \cos \left(\frac{\omega_i z}{V_u} + \psi_{yi} \right). \quad (3)$$

Для описания закономерностей удаления материала в зоне контакта в работе [20] предложены понятия вероятности удаления $P(M)$ и вероятности неудаления $P(\bar{M})$ материала. Первый показатель $P(M)$ определяется вероятностью события, при котором материал в точке обрабатываемой поверхности удален. Второй показатель $P(\bar{M})$ – 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

$$P(M) = 1 - \exp^{-a(y) - a(y, \tau)}, \quad (4)$$

где $a(y)$ – показатель, определяющий вероятность удаления материала на уровне y до входа поверхности в зону контакта заготовки с кругом; $a(y, \tau)$ – показатель, характеризующий изменение площадей впадин, формируемых суммой профилей абразивных зерен, проходящих через рассматриваемое сечение заготовки после соответствующих контактов зерен с поверхностью заготовки.

За время Δt сечение поворачивается на угол $\Delta \varphi$ и через него проходит участок с длиной дуги $(V_k \pm V_u) \Delta \tau$, или с учетом того, что $\tau = \frac{z}{V_u}$, получим $\frac{\Delta z(V_k \pm V_u)}{V_u}$. Из общего числа зерен, прошедших через сечение, ширину профиля b_g будут иметь зерна, вершины которых расположены в слое круга $\frac{(V_k \pm V_u)}{V_u} \Delta z \Delta u$. Число таких вер-

шин вычисляется по плотности их распределения по глубине инструмента $f(u)$:

$$\Delta \lambda = n_g f(u) \frac{(V_k \pm V_u)}{V_u} \Delta z \Delta u. \quad (5)$$

При наличии вибраций ширина контура вершины, соответствующая данному уровню, является нестационарной, она не остается постоянной, а изменяется с течением времени. Ее величина может быть описана степенной зависимостью [1], которая с учетом того, что $\tau = \frac{z}{V_u}$,

вычисляется по уравнению

$$b_g(y) = C_b h^m = C_b [t(k) - y - u]^m = C_b \left(t_f - y - u - \frac{z^2}{D_e} + A_{\omega} \cos \left(\frac{\omega z}{V_u} + \psi_y \right) \right)^m. \quad (6)$$

Для описания плотности распределения вершин абразивных зерен О. Койл предложил использовать зависимость вида [17]

$$f(u) = C_h u^{\chi-1} \quad f(u) = C_h u^{\chi-1}, \quad (7)$$

где C_h – коэффициент пропорциональности кривой распределения:

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

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

С учетом вышеизложенного зависимость (7) может быть представлена в виде

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

где χ – параметр функции плотности распределения.

Изменение параметра $a(y, \tau)$ определяется приращением суммы поперечных размеров профилей абразивных зерен:

$$\Delta a(y, \tau) = K_c n_g b_g(\tau) f(u) \Delta u (V_k \pm V_u) \Delta \tau, \quad (9)$$

где K_c – коэффициент стружкообразования, который учитывает, что не весь материал удаляется из объема риски, а часть его вытесняется и образует по краям риски навалы.

После интегрирования уравнения (9) получим интегральное уравнение для расчета параметра $a(y, z)$ в зоне контакта:

$$a(y, z) = \int_{-L_y}^z \int_0^{t(k)-y} K_c n_g b_g f(u) \times \times \frac{V_k \pm V_u}{V_u} dudz, \quad (10)$$

где L_y – расстояние от основной плоскости до пересечения уровня с условной наружной поверхностью инструмента, определяется из уравнения

$$L_{yi} = \sqrt{(t_{ki} - y)D_e}. \quad (11)$$

Рассмотренные выше модели вершин зерен и плотностей их распределения по глубине позволяют перейти к установлению функциональных связей вероятности неудаления материала от технологических факторов.

При подстановке в уравнение (10) полученных выражений b_g и $f(u)$ из уравнений (6) и (8) оно принимает вид

$$a(y, z) = \frac{K_c C_b (V_k \pm V_u) n_g \chi}{V_u H_u^\chi} \int_{-L_y}^z \int_0^{t(k)-y} \times \times \left(t_f - y - u - \frac{z^2}{D_e} + A_\omega \cos \left(\frac{\omega z}{V_u} + \psi_y \right) \right)^m \times \times u^{\chi-1} dudz, \quad (12)$$

После интегрирования полученного уравнения по \dot{e} получим

$$a(y, z) = \frac{\Gamma(m+1)\Gamma(\chi)K_c C_b (V_k \pm V_u) n_g \chi}{\Gamma(m+\chi+1)V_u H_u^\chi} \times \times \int_{-L_y}^z \left(t_f - \frac{z^2}{D_e} - y + A_\omega \cos \left(\frac{\omega z}{V_u} + \psi_y \right) \right)^{m+\chi} dz, \quad (13)$$

где $\Gamma(m+1)$, $\Gamma(\chi)$, $\Gamma(m+\chi+1)$ – соответствующие гамма-функции.

Дальнейшее интегрирование уравнения (13) возможно только при известных значениях показателей χ , m и значениях ψ_y , характеризующих начальную фазу отклонений. Вид зависимостей определяется их суммой. При $\chi = 1, 5$, $m = 0, 5$ и $C_b = 2\sqrt{2\rho_g}$

$$a(y, z) = \frac{3\pi n_g K_c \sqrt{2\rho_g} (V_k \pm V_u) Y_{\psi_y}}{8V_u H_u^{3/2}}, \quad (14)$$

где

$$Y_{\psi_y} = \int_{-L_y}^z \left(t_f - \frac{z^2}{D_e} - y + A_\omega \cos \left(\frac{\omega z}{V_u} + \psi_y \right) \right)^2 dz.$$

Обозначим $\alpha = \frac{\omega L_y}{V_u} + \psi_y$, $\beta = \frac{\omega z}{V_u} + \psi_y$ и выполним интегрирование Y_{ψ_y} для случаев, когда начальная фаза равна: 1 – $\psi_y = 0(2\pi)$; 2 – $\psi_y = \pi$; 3 – $\psi_y = \frac{\pi}{2}$; 4 – $\psi_y = \frac{3\pi}{2}$

$$Y_{2\pi} = \frac{L_y^5 + z^5}{5D_e^2} - \frac{2(t_f - y)(L_y^3 + z^3)}{3D_e} + \frac{(z + L_y)(A^2 + 2(t_f - y)^2)}{2} + \frac{A^2 V_u (\sin 2\alpha + \sin 2\beta)}{4\omega} - \frac{4A V_u^2 (L_y \cos \alpha + z \cos \beta)}{D_e \omega^2} + \frac{2A V_u (2V_u^2 + D_e \omega^2 (t_f - y)) (\sin \alpha + \sin \beta)}{D_e \omega^3} - \frac{2A V_u (L_y^2 \sin \alpha + z^2 \sin \beta)}{D_e \omega}; \quad (15)$$

$$Y_\pi = \frac{L_y^5 + z^5}{5D_e^2} - \frac{2(t_f - y)(L_y^3 + z^3)}{3D_e} + \frac{(z + L_y)(A^2 + 2(t_f - y)^2)}{2} +$$

$$\begin{aligned}
 & + \frac{A^2 V_u (\sin 2\alpha + \sin 2\beta)}{4\omega} + \frac{4AV_u^2 (L_y \cos \alpha + z \cos \beta)}{D_e \omega^2} - \\
 & - \frac{2AV_u (2V_u^2 + D_e \omega^2 (t_f - y)) (\sin \alpha + \sin \beta)}{D_e \omega^3} + \frac{2AV_u (L_y^2 \sin \alpha + z^2 \sin \beta)}{D_e \omega};
 \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned}
 Y_{\frac{\pi}{2}} = & \frac{L_y^5 + z^5}{5D_e^2} - \frac{2(t_f - y)(L_y^3 + z^3)}{3D_e} + \frac{(z + L_y)(A^2 + 2(t_f - y)^2)}{2} - \\
 & - \frac{A^2 V_u (\sin 2\alpha + \sin 2\beta)}{4\omega} - \frac{4AV_u^2 (L_y \sin \alpha - z \sin \beta)}{D_e \omega^2} - \\
 & - \frac{2AV_u (2V_u^2 + D_e \omega^2 (t_f - y)) (\cos \alpha - \cos \beta)}{D_e \omega^3} + \frac{2AV_u (L_y^2 \cos \alpha - z^2 \cos \beta)}{D_e \omega};
 \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned}
 Y_{\frac{3\pi}{2}} = & \frac{L_y^5 + z^5}{5D_e^2} - \frac{2(t_f - y)(L_y^3 + z^3)}{3D_e} + \frac{(z + L_y)(A^2 + 2(t_f - y)^2)}{2} - \\
 & - \frac{A^2 V_u (\sin 2\alpha + \sin 2\beta)}{4\omega} + \frac{4AV_u^2 (L_y \sin \alpha - z \sin \beta)}{D_e \omega^2} - \\
 & - \frac{2AV_u (2V_u^2 + D_e \omega^2 (t_f - y)) (\cos \alpha - \cos \beta)}{D_e \omega^3} - \frac{2AV_u (L_y^2 \cos \alpha - z^2 \cos \beta)}{D_e \omega}.
 \end{aligned} \quad (18)$$

Результаты и их обсуждение

Расчет вероятности удаления материала при наличии вибраций в любой области зоны контакта при известном исходном состоянии поверхности рассчитывается при подстановке показателя $a(y, \tau) = a$ из выражения (14) в уравнение (4) с учетом параметра Y для каждого из случаев, когда начальная фаза равна: $\psi_y = 0(2\pi)$ (15); $\psi_y = \pi$ (16); $\psi_y = 0(2\pi)$ (17); $\psi_y = 0(2\pi)$ (18). Для наглядности процедуры расчета приведем численный пример.

Выполним расчет вероятности неудаления и вероятности удаления материала при шлифовании отверстий диаметром 150 мм в заготовках из титанового сплава ВТ3-1 инструментом АУ 60×25×13 63С F90 М 7 В А 35 м/с (при скорости круга 35м/с, скорости заготовки 0,25 м/с, про-

дольной подаче 33 мм/с, поперечной подаче 0,005 мм/ход). Из расчета баланса перемещений [20] определяем, что для заданных условий обработки $t_f = 11,54 \cdot 10^{-6}$ м. На основании данных исследований [20, 21, 22] принимаем: $K_c = 0,9$; $\rho_z = 7,31 \cdot 10^{-6}$ м; $n_z = 15,86$ зерен/мм². Для рассмотренных условий $L_y = 3,397 \cdot 10^{-4}$ м, $\omega = 628$ рад/с, $\nu = 100$ Гц. Расчет выполним по уравнениям (2)–(4) для уровня $y = 10,38 \cdot 10^{-6}$ м при $z = -0,8 \frac{L_y}{2}$, $A = 0,2t_f$.

Рассчитаем параметры $\alpha = \frac{\omega z}{V_u} + \psi_y$ и $\beta = \frac{\omega L_y}{V_u} + \psi_y$ для случаев, когда начальная фаза равна $\psi_y = 0$:

$$\alpha = \frac{628(-0,136 \cdot 10^{-4})}{0,25} + 0 = -0,341,$$

$$\beta = \frac{628 \cdot 3,397 \cdot 10^{-4}}{0,25} + 0 = 0,853.$$

Отсюда получим $\sin \alpha = -0,3344$,
 $\cos \alpha = 0,942$, $\sin \beta = 0,753$, $\cos \beta = 0,658$,
 $\sin \alpha = -0,3344$, $\sin 2\beta = 0,991$.

После подстановки численных значений параметров в (15) получим:

$$Y_0 = \frac{(3,397 \cdot 10^{-4})^5 + (-0,136 \cdot 10^{-3})^5}{5 \cdot 0,1^2} - \frac{2(11,54 \cdot 10^{-6} - 10,38 \cdot 10^{-6})((3,397 \cdot 10^{-4})^3 + (-0,136 \cdot 10^{-3})^3)}{3 \cdot 0,1} +$$

$$+ \frac{(-0,136 \cdot 10^{-3} + 3,397 \cdot 10^{-4})((2,308 \cdot 10^{-6})^2 + 2(11,54 \cdot 10^{-6} - 10,38 \cdot 10^{-6})^2)}{2} +$$

$$+ \frac{(2,308 \cdot 10^{-6})^2 0,25(-0,63 + 0,991)}{4 \cdot 628} -$$

$$- \frac{4 \cdot 2,308 \cdot 10^{-6} \cdot 0,25^2(3,397 \cdot 10^{-4} \cdot 0,942 + -0,136 \cdot 10^{-3} \cdot 0,658)}{0,1 \cdot 628^2} +$$

$$+ \frac{2 \cdot 2,308 \cdot 10^{-6} \cdot 0,25(2 \cdot 0,25^2 + 0,1 \cdot 628^2(11,54 \cdot 10^{-6} - 10,38 \cdot 10^{-6}))(-0,3344 + 0,753)}{0,1 \cdot 628^3} -$$

$$- \frac{2 \cdot 2,308 \cdot 10^{-6} \cdot 0,25((3,397 \cdot 10^{-4})^2(-0,3344) + (-0,136 \cdot 10^{-3})^2 0,753)}{0,1 \cdot 628} = 1,22 \cdot 10^{-15}.$$

Затем по уравнению (14) рассчитываем значение показателя с учетом вибраций $a(y, \tau) = a(y, z)$:

$$a(y, z) = \frac{3 \cdot 3,14 \cdot 15,866 \cdot 10^6 \cdot 1 \sqrt{2 \cdot 7,31 \cdot 10^{-6}} \times (35 \pm 0,25) 1,22 \cdot 10^{-15}}{8 \cdot 0,25(11,54 \cdot 10^{-6})^{3/2}} = 0,282.$$

При отсутствии вибраций показатель $a_{cm}(y, z)$ может быть рассчитан по зависимости [21]:

$$a_{cm}(y, z) = \frac{3\pi n_g K_c \sqrt{2\rho_g} (V_k \pm V_u)(t_f - y)^2}{8V_u H_u^{3/2}} \times$$

$$\times \left(z - \frac{2z^3}{\sqrt[3]{L_y}} + \frac{z^5}{5L_y} + \frac{8}{15} L_y \right). \quad (19)$$

При подстановке в выражение (19) выше-рассмотренных значений параметров получим значение показателя $a_{cm}(y, z)$ при отсутствии вибраций:

$$a_{cm}(y, z) = \frac{3 \cdot 3,14 \cdot 15,86 \cdot 10^6 \cdot 1 \sqrt{2 \cdot 7,31 \cdot 10^{-6}} (35 \pm 0,25) (11,54 \cdot 10^{-6} - 10,38 \cdot 10^{-6})^2}{8 \cdot 0,25(11,54 \cdot 10^{-6})^{3/2}} \times$$

$$\times (-0,136 \cdot 10^{-3} - \frac{2(-0,136 \cdot 10^{-3})^3}{\sqrt[3]{3,397 \cdot 10^{-4}}} + \frac{(-0,136 \cdot 10^{-3})^5}{5 \cdot 3,397 \cdot 10^{-4}} + \frac{8}{15} 3,397 \cdot 10^{-4}) = 0,014.$$

Абсолютная погрешность ΔA расчетов составила: а относительная δ_A :

$$\Delta A = |a_{cm}(y, z) - a(y, z)| =$$

$$= |0,014 - 0,313| = 0,299,$$

$$\delta_A = \frac{\Delta A}{a(y, z)} 100 \% = \frac{0,299}{0,313} 100 \% = 95,5 \%.$$

Для проверки результатов расчетов были проведены экспериментальные исследования. На станке Knuth RSM 500 CNC было выполнено шлифование отверстий диаметром 150 мм в заготовках из титанового сплава BT3-1 инструментом AW 60×25×13 63C F90 M 7 B A 35 м/с (при скорости круга 35 м/с, скорости заготовки 0,25 м/с, продольной подаче 33 мм/с, поперечной подаче 0,005 мм/ход). С опытных образцов после операции шлифования были сняты профилограммы, по которым оценивалось значение показателя $a_{\text{экспер}}(y, z)$ (табл. 1) и определена относительная погрешность (табл. 2).

Вероятность события, характеризующего удаление поверхностного слоя на уровне $y = 0,004$ мм при значении показателя $a_0 = 0,545$, вычисляется по уравнению путем подстановки результатов расчета $a(y, \tau)$ в выражение (4):

$$P(M) = 1 - \exp^{-a_0 - a(y, \tau)} =$$

$$= 1 - \exp^{-0,545 - 0,282} = 0,576.$$

Таблица 1

Table 1

Значения показателя a , характеризующего изменение вероятности удаления материала на рассматриваемом уровне

The values of the indicator a characterizing the change in the probability of material removal at the considered level

Значение показателя a / The value of the indicator a	Номер опыта / Experiment No.				
	1	2	3	4	5
$a_{\text{экспер}}(y, z)$ / $a_{\text{experiment}}(y, z)$	0,392	0,313	0,264	0,4	0,305
$a_{\text{cm}}(y, z)$	0,014				
$a(y, z)$	0,282				

Таблица 2

Table 2

Относительная погрешность вычислений

Relative error of calculations

Экспериментальные (действительные) величины / Experimental (actual) values	Относительная погрешность / Relative error	
	$\delta_A = \frac{\Delta A}{a_{\text{экспер}}(y, z)} 100, \% /$ $\delta_A = \frac{\Delta A}{a_{\text{experiment}}(y, z)} 100, \%$	
$a_{\text{экспер}}(y, z)$ / $a_{\text{experiment}}(y, z)$	$a_{\text{cm}}(y, z)$	$a(y, z)$
0,392	96,4	28,06
0,313	91,05	9,9
0,264	94,6	6,82
0,4	96,5	29,5
0,305	95,4	7,54

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

$$P(\bar{M}) = 1 - P(M) = 1 - 0,576 = 0,424.$$

Полученные расчеты показывают, что вероятность удаления при значениях $A = 0,2t_f$,

$$z = -0,8 \frac{L_y}{2}, L_y = 3,397 \cdot 10^{-4} \text{ м}, y = 10,38 \cdot 10^{-6} \text{ м},$$

$$t_f = 11,54 \cdot 10^{-6} \text{ м}, \omega = 628 \text{ рад/с}, \nu = 100 \text{ Гц}$$

равна 0,424. Это означает, что 42 % материала будет удалено, а 58 % обрабатываемого материала останется на поверхности в виде микронеровностей.

Для других уровней y и значений частот колебаний рассматриваемого примера расчетные данные по вероятности удаления материала представлены на рис. 2 и 3 и в табл. 3.

Анализ полученных данных дает наглядную иллюстрацию закономерности удаления материала вдоль зоны контакта на различных уровнях при различных частотах относительных колебаний шлифовального круга и заготовки.

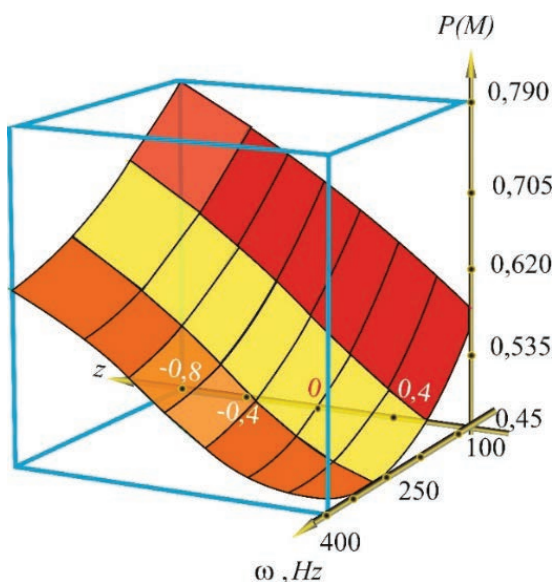


Рис. 2. Изменение вероятности удаления материала вдоль зоны контакта от величины относительных вибраций при внутреннем шлифовании

Fig. 2. Change in the probability of material removal along the contact zone from the magnitude of relative vibrations during internal grinding

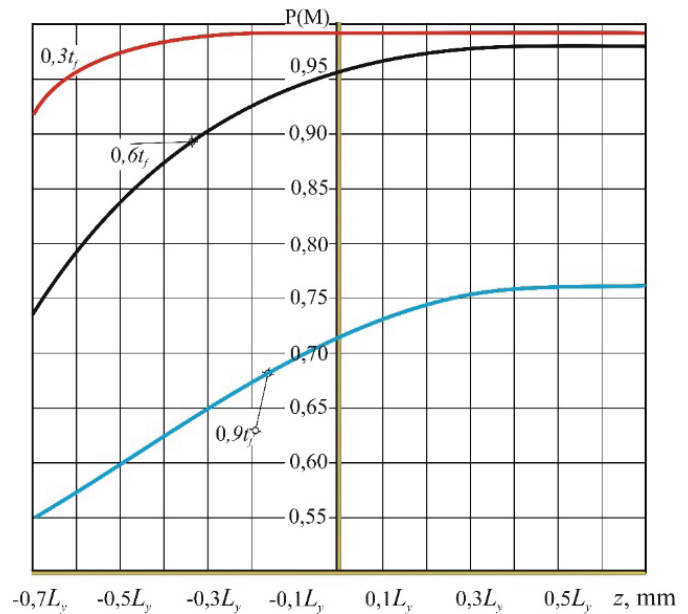


Рис. 3. Изменение вероятности удаления материала вдоль зоны контакта от уровня прохождения зерен в материале заготовки при внутреннем шлифовании при величине относительных вибраций 100 Гц

Fig. 3. Change in the probability of material removal along the contact zone from the level of grain passage in the workpiece material during internal grinding at a relative vibration value of 100 Hz

Полученные данные показывают, что при прохождении поверхности зоны контакта круга с заготовкой вероятность удаления металла увеличивается в пределах фактической глубины резания и уменьшается с увеличением частоты относительных колебаний инструмента и заготовки на всех уровнях. Наиболее интенсивно вероятность повышается при значении $z > 0$, когда абразивные зерна проходят основную плоскость. Это объясняется тем, что в этот период глубина резания максимальна и в резании участвует наибольшее число абразивных зерен. За счет наличия вибраций сьем интенсивно еще растет и после прохождения зернами уровня основной плоскости.

Предложенные модели позволяют проследить закономерность съема припуска в пределах дуги контакта шлифовального круга с заготовкой.

Выводы

Разработанные математические модели позволяют проследить влияние на сьем материала наложения единичных срезов друг на друга при

Таблица 3

Table 3

Изменение вероятности удаления материала вдоль зоны контакта на различных уровнях от значений относительных вибраций шлифовального круга и заготовки при шлифовании отверстий

The change in the probability of material removal along the contact zone at different levels depends on the values of the relative vibrations of the grinding wheel and the workpiece during grinding holes

Удаление материала	$z, \text{ м}$	$P(M)$			
		$v, \text{ Гц}$			
		100	200	300	400
$y = 0,3t_f, \text{ м}$	–0,36	0,925	0,816	0,984	0,973
	–0,27	0,977	0,931	0,994	0,992
	–0,18	0,995	0,958	0,998	0,997
	–0,09	0,999	0,987	0,999	0,999
	0	1	0,997	1	1
	0,09	1	0,999	1	1
	0,18	1	1	1	1
	0,27	1	1	1	1
	0,36	1	1	1	1
$y = 0,6t_f, \text{ м}$	–0,27	0,769	0,477	0,623	0,844
	–0,20	0,853	0,548	0,652	0,876
	–0,14	0,914	0,652	0,699	0,899
	–0,07	0,953	0,763	0,769	0,922
	0	0,976	0,855	0,843	0,947
	0,07	0,988	0,917	0,901	0,963
	0,014	0,994	0,954	0,929	0,977
	0,20	0,997	0,974	0,961	0,984
	0,27	0,999	0,985	0,974	0,989
$y = 0,9t_f, \text{ м}$	–0,14	0,576	0,488	0,45	0,465
	–0,11	0,608	0,515	0,463	0,466
	–0,07	0,639	0,546	0,485	0,475
	–0,03	0,669	0,579	0,514	0,497
	0	0,698	0,612	0,548	0,526
	0,03	0,724	0,644	0,581	0,558
	0,07	0,749	0,673	0,613	0,587
	0,11	0,770	0,699	0,64	0,61
	0,14	0,788	0,721	0,661	0,629

чистовом шлифовании 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 при наличии вибраций, а также 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, профильного, плоского и круглого наружного и внутреннего шлифования, для чего необходимо знать величину относительных вибраций. Однако параметры технологической системы не остаются постоянными, а изменяются с течением времени, например вследствие износа шлифовального круга. Для оценки состояния технологической системы необходимо проведение экспериментальных исследований, учитывающих вышеуказанные изменения за период стойкости шлифовального круга. Одним из путей определения параметров технологической системы является натурный эксперимент.

Экспериментальная апробация результатов была проведена на шлифовальном станке с ЧПУ марки Knuth RSM 500 CNC в центре коллективного пользования «Инжиниринг и промдизайн» СевГУ при обработке элементов экспериментальной системы – насос, разработанной в Севастопольском государственном университете. В конструкции данного изделия предусмотрены детали (ротор ведущий), выполненные из сплава титана марки ВТЗ-1, параметры качества которых обеспечиваются только на операциях шлифования.

Список литературы

1. Novoselov Y., Bogutsky V., Shron L. Patterns of removing material in workpiece – grinding wheel contact area // *Procedia Engineering*. – 2017. – Vol. 206. – P. 991–996. – DOI: 10.1016/j.proeng.2017.10.583.
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.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. – P. 382–387. – DOI: 10.1016/j.procir.2012.04.068.
12. Dynamic modeling and simulation of a non-linear, non-autonomous grinding system considering spatially periodic waviness on workpiece surface / J. Jung, P. Kim, H. Kim, J. Seok // *Simulation Modeling 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 // *Авиационное машиностроение и транспорт Сибири: сборник статей IX Всероссийской научно-практической конференции / Иркутский национальный исследовательский технический университет. – Иркутск, 2017. – С. 250–254.*
17. Бубнов В.А., Князев А.Н. Титан и его сплавы в машиностроении // *Вестник Курганского государственного университета. Серия: Технические науки*. – 2016. – № 3 (42). – С. 92–96.
18. Носенко В.А., Федотов Е.В., Даниленко М.В. Математическое моделирование распределения вершин зерен при шлифовании в результате различных видов изнашивания с использованием марковских случайных процессов // *Международный научно-исследовательский журнал*. – 2015. – № 2-1 (33). – С. 101–106.
19. Gorbatyuk S.M., Kochanov A.V. Method and equipment for mechanically strengthening the surface of rolling-mill rolls // *Metallurgist*. – 2012. – Vol. 56, N 3–4. – P. 279–283.

20. Вероятностная модель удаления поверхностного слоя при шлифовании хрупких неметаллических материалов / С.М. Братан, С.И. Рошупкин, 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.

21. *Bratan S., Roshchupkin S., Chasovitina A.* The correlation of movements in the technological system

during grinding precise holes // *Materials Science Forum.* – 2021. – Vol. 1037. – P. 384–389. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.1037.384.

22. *Kharchenko A., Chasovitina A., Bratan S.* Modeling of regularities of change in profile sizes and wear areas of abrasive wheel grains during grinding // *Materials Today: Proceedings.* – 2021. – Vol. 38, pt. 4. – P. 2088–2091. – DOI: 10.1016/j.matpr.2020.10.154.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

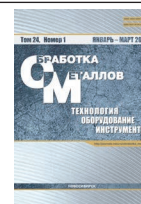
© 2022 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



Obrabotka metallov -

Metal Working and Material Science

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



The effect of the relative vibrations of the abrasive tool and the workpiece on the probability of material removing during finishing grinding

Sergey Bratan^{1, a, *}, Stanislav Roshchupkin^{1, b}, Anastasia Chasovitina^{1, c}, Kapil Gupta^{2, d}

¹ Sevastopol State University, 33 Universitetskaya str., Sevastopol, 299053, Russian Federation

² University of Johannesburg, 7225 John Orr Building Doornfontein Campus, Johannesburg, 2028, South Africa

^a <https://orcid.org/0000-0002-9033-1174>, serg.bratan@gmail.com, ^b <https://orcid.org/0000-0003-2040-2560>, st.roshchupkin@yandex.ru,

^c <https://orcid.org/0000-0001-6800-9392>, nastya.chasovitina@mail.ru, ^d <https://orcid.org/0000-0002-1939-894X>, kgupta@uj.ac.za

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 30 December 2021

Revised: 21 January 2022

Accepted: 15 February 2022

Available online: 15 March 2022

Keywords:

Grinding of titanium

Abrasive grain

Microcutting

The contact area of the workpiece with the tool

Probability of material removing

Probability of material not removing

Funding

The work was carried out with the support of the Priority-2030 program of Sevastopol State University (strategic project No. 2).

Acknowledgements

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

ABSTRACT

Introduction. Grinding remains the most efficient and effective method of final finishing that is indispensable in the production of high-precision parts. The characteristic features of grinding materials are that the removal of the material roughness of the workpiece surface occurs due to the stochastic interaction of the grains of the abrasive material with the surface of the workpiece, in the presence of mutual oscillatory movements of the abrasive tool and the workpiece being processed. During processing workpieces with abrasive tools, the material is removed by a large number of grains that do not have a regular geometry and are randomly located on the working surface. This makes it necessary to apply probability theory and the theory of random processes in mathematical simulation of operations. In real conditions, during grinding, the contact of the wheel with the workpiece is carried out with a periodically changing depth due to machine vibrations, tool shape deviations from roundness, unbalance of the wheel or insufficient rigidity of the workpiece. To eliminate the influence of vibrations in production, tools with soft ligaments are used, the value of longitudinal and transverse feeds is reduced, but all these measures lead to a decrease in the operation efficiency, which is extremely undesirable. To avoid cost losses, mathematical models are needed that adequately describe the process, taking into account the influence of vibrations on the output indicators of the grinding process. **The purpose of the work** is to create a theoretical and probabilistic model of material removing during finishing and fine grinding, which allows, taking into account the relative vibrations of the abrasive tool and the workpiece, to trace the patterns of its removal in the contact zone. **The research methods** are mathematical and physical simulation using the basic provisions of probability theory, the laws of distribution of random variables, as well as the theory of cutting and the theory of deformable solids. **Results and discussion.** The developed mathematical models allow tracing the effect on the removal of the material of the superimposition of single sections on each other during the final grinding of materials. The proposed dependencies show the regularity of the 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 when the treated surface comes into contact with an abrasive tool in the presence of vibrations, the proposed analytical dependences are valid for a wide range of grinding modes, wheel characteristics and a number of other technological factors. The expressions obtained allow finding the amount of material removal also for the schemes of end, profile, flat and round external and internal grinding, for which it is necessary to know the magnitude of relative vibrations. However, the parameters of the technological system do not remain constant, but change over time, for example, as a result of wear of the grinding wheel. To assess the state of the technological system, experimental studies are carried out taking into account the above changes over the period of durability of the grinding wheel.

For citation: Bratan S.M., Roshchupkin S.I., Chasovitina A.S., Gupta K. The effect of the relative vibrations of the abrasive tool and the workpiece on the probability of material removing during finishing grinding. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty)* = *Metal Working and Material Science*, 2022, vol. 24, no. 1, pp. 33–47. DOI: 10.17212/1994-6309-2022-24.1-33-47. (In Russian).

* 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

References

1. Novoselov Y., Bogutsky V., Shron L. Patterns of removing material in workpiece – grinding wheel contact area. *Procedia Engineering*, 2017, vol. 206, pp. 991–996. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.10.583.
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.
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. Bubnov V.A., Knyazev A.N. Titan i ego splavy v mashinostroenii [Titanium and its alloys in mechanical engineering]. *Vestnik Kurganskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki = Bulletin of the Kurgan State University. Series: Technical Sciences*, 2016, no. 3 (42), pp. 92–96.
18. Nosenko V.A., Fedotov E.V., Danilenko M.V. Matematicheskoe modelirovanie raspredeleniya vershin zeren pri shlifovanii v rezul'tate razlichnykh vidov iznashivaniya s ispol'zovaniem markovskikh sluchainykh protsessov [Mathematical simulation of distribution of abrasive grains at grinding in a result of various types of wear by using markov processes]. *Mezhdunarodnyi nauchno-issledovatel'skii zhurnal = International Research Journal*, 2015, no. 2-1 (33), pp. 101–106.
19. Gorbatyuk S.M., Kochanov A.V. Method and equipment for mechanically strengthening the surface of rolling-mill rolls. *Metallurgist*, 2012, vol. 56, no. 3–4, pp. 279–283.
20. 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.

21. Bratan S., Roshchupkin S., Chasovitina A. The correlation of movements in the technological system during grinding precise holes. *Materials Science Forum*, 2021, vol. 1037, pp. 384–389. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.1037.384.

22. Kharchenko A., Chasovitina A., Bratan S. Modeling of regularities of change in profile sizes and wear areas of abrasive wheel grains during grinding. *Materials Today: Proceedings*, 2021, vol. 38, pt. 4, pp. 2088–2091. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.10.154.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2022 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/>).