

НГТУ



НЭТИ

# Обработка металлов

## (технология • оборудование • инструменты)

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


### Моделирование взаимосвязи силы резания с глубиной резания и объемами снимаемого металла единичными зёрнами при плоском шлифовании

Александра Акинцева<sup>а, \*</sup>, Павел Переверзев<sup>б</sup>

Южно-Уральский государственный университет, пр. Ленина, 76, г. Челябинск, 454080, Россия

<sup>а</sup> <https://orcid.org/0000-0001-8881-8461>, [akintsevaav@susu.ru](mailto:akintsevaav@susu.ru); <sup>б</sup> <https://orcid.org/0000-0002-1416-8918>, [pereverzevpp@susu.ru](mailto:pereverzevpp@susu.ru)

#### ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.923.9

#### История статьи:

Поступила: 20 июля 2023

Рецензирование: 01 августа 2023

Принята к печати: 15 августа 2023

Доступно онлайн: 15 декабря 2023

#### Ключевые слова:

Режим резания

Сила резания

Глубина резания

Объем снимаемого металла

Плоское шлифование

Цикл

Погрешность обработки

#### Финансирование

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-29-00792.

#### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Модель расчета силы резания лежит в основе модулей САМ-системы, связанных как с прогнозированием погрешности обработки на металлорежущих станках для заданных условий шлифования, так и с оптимизацией всех параметров технологического режима (параметры режимов резания, режущего инструмента и пр.). Однако из-за отсутствия адекватной модели расчета силы резания, представленной в инженерном виде, такие модули до сих пор не разработаны не только для операций плоского шлифования, но и для всех других видов металлообработки. Сложность получения адекватной модели силы резания для операций плоского шлифования заключается в необходимости установления взаимосвязи станочных параметров макрорежимов резания (подач, скорости резания) шлифовальным кругом с параметрами микрорежимов резания – множеством режущих зерен круга, связанных с пластической деформацией металла в зоне сдвига, микрообъемами снимаемого металла и геометрией режущей части абразивных зерен. **Целью данной работы** является разработка силовой модели, устанавливающей взаимосвязь силы резания с глубиной резания и объемами снимаемого металла единичными зёрнами и кругом в целом на основе интеграции микрообъемов и микросил при срезе металла зёрнами круга. **Предметом исследования** является математическое моделирование взаимосвязи между силой резания и режимами резания с параметрами микрорезания группой единичных зерен на основе равенства работ при снятии металла одного объема. **Методологической основой исследований** служит установленная С.Н. Корчаком связь между работой (энергией), затрачиваемой на пластическую деформацию металла единичным зёрном, интенсивностью напряжений, интенсивностью скоростей деформаций и объемом снимаемого металла кругом в целом. **Результатом работы** является аналитическая модель, достоверно и адекватно устанавливающая взаимосвязь между силой резания и глубиной резания, режимами резания, характеристикой круга, физико-механическими свойствами обрабатываемого материала и другими основными технологическими параметрами. **Областью применения результатов** является возможность использования представленной в данной статье модели расчета силы резания в качестве основы при разработке модуля для САМ-системы (цифрового двойника процесса механической обработки), который бы позволял в рамках производственного процесса вести расчет и проектирование оптимальных технологических параметров операции плоского шлифования, а также осуществлять тестирование режимов резания по критерию точности обработки партии деталей с учетом влияния различных переменных факторов и реальных условий обработки.

**Для цитирования:** Акинцева А.В., Переверзев П.П. Моделирование взаимосвязи силы резания с глубиной резания и объемами снимаемого металла единичными зёрнами при плоском шлифовании // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2023. – Т. 25, № 4. – С. 6–21. – DOI:10.17212/1994-6309-2023-25.4-6-21.

## Введение

Плоское шлифование – это чистовая операция, к которой предъявляются жесткие требования по точности и качеству обработки. Достижение данных требований является весьма

трудоемкой задачей на операциях плоского шлифования ввиду необходимости управления тремя подачами (рис. 1), наличия на обрабатываемых поверхностях пазов и отверстий, одновременной обработки на операции нескольких заготовок и пр. Обеспечение точности и качества обрабатываемой поверхности напрямую зависит от режимов резания. В настоящее время режимы резания назначаются при помощи САМ-системы, основу которой составляет оцифрованная нормативно-справочная литература. Тестирование режимов

#### \*Адрес для переписки

Акинцева Александра Викторовна, к.т.н., доцент  
 Южно-Уральский государственный университет,  
 пр. Ленина, 76,  
 454080, г. Челябинск, Россия  
 Тел.: +7 (922) 633-56-57, e-mail: [akintsevaav@susu.ru](mailto:akintsevaav@susu.ru)

резания в виртуальной среде на выполнение ими требований операционных эскиза и карты с использованием САМ-системы на текущий момент не представляется возможным. Поэтому на предприятиях вынуждены проводить пробную обработку заготовок по назначенным технологическим режимам резания. Зачастую для стабильного выполнения требований чертежа при изготовлении партии деталей режимы резания занижаются до безопасного уровня, что, несомненно, приводит к потере производительности. Наличие экспериментальной проверки на подготовительном этапе производства приводит к увеличению его продолжительности, а также дополнительным временным и материальным затратам.

Причиной описанной выше производственной проблемы является отсутствие инженерной широкодиапазонной аналитической модели, достоверно устанавливающей математическую взаимосвязь силы резания с глубиной резания и другими параметрами режима резания, объемом снимаемого металла, характеристикой и геометрическими параметрами шлифовального круга, физико-механическими свойствами обрабатываемого материала и др.

Приведем анализ научных исследований, направленных на моделирование силы резания на операциях шлифования. В работе [1] установлена взаимосвязь между силой резания единичным зерном абразивного круга и физико-механическими свойствами обрабатываемого материала через напряжения сдвига и сжатия, при этом учитывается температура, возникающая в зоне резания. Идентично в источниках [2, 3] получены расчетные зависимости для нахождения силы резания для операций шлифования, принимающие во внимание процесс трения (коэффициент внутреннего трения, угол трения и др.). На основании зависимостей, полученных в работе [1], разработаны модели для расчета силы резания при плоском шлифовании [4, 5]. В работах [6–14] представлены силовые зависимости, учитывающие процессы затупления и изнашивания абразивного зерна при шлифовании. В работах [15–23] рассмотрено влияние на силу резания динамических нагрузок, возникающих из-за «контактной жесткости» технологической системы, нестационарности процесса абразивной обработки, переменной жесткости технологической системы и т. п. В работах [15,

16] расчет силы резания производится с учетом жесткости технологической системы и динамических нагрузок. В работе [17] расчет силы резания выполняется с учетом коэффициента трения на примере плоского шлифования. Формулы, представленные в перечисленных выше работах, не имеют инженерного вида, что затрудняет их практическое применение в области машиностроения.

Среди работ, посвященных разработке модели силы резания для операций плоского шлифования, выделим следующие. В работе [24] предложена математическая модель плоского шлифования инструментом, смоделированным в виде диска с распределенными по цилиндрической поверхности абразивными зёрнами со случайными геометрическими характеристиками. В работе [25] представлена динамическая математическая модель силы резания, учитывающая износ рабочей поверхности круга в процессе плоского шлифования. В работе [26] приведены экспериментальные исследования составляющих силы резания, возникающих при плоском шлифовании для узкого диапазона материалов (в основном различных сплавов титана). В работе [27] выполнена экспериментальная оценка изменения силы резания и шероховатости на примере плоского шлифования нескольких марок сталей. В работе [28] проведен эксперимент по оценке влияния скорости резания на силу резания и износ шлифовального круга.

Анализ показал, что, несмотря на имеющееся обилие аналитических моделей, связывающих силу резания с глубиной резания единичных режущих зерен круга в процессе шлифования, до сих пор отсутствуют адекватные инженерные модели расчета силы резания для заданной глубины резания при шлифовании кругом в целом. В предложенных моделях вычисляется некая глубина и сила резания при срезе металла единичным зерном абразивного круга в зависимости от количества зерен и прочих факторов при отсутствии достоверной априорной информации о количестве режущих зерен и снимаемых объемах металла. Поэтому по приведенным формулам невозможно вычислить не только глубину резания кругом в целом и возникающую при этом силу резания, но и величину снимаемого припуска во время операции за несколько проходов.

Известно, что в ступенчатом цикле плоского шлифования программная подача на глубину изменяется в десятки раз (например, от 0,05 мм/ход на первой ступени цикла до 0,001 мм/мин – на последней). При этом количество режущих зерен и глубина резания тоже должны существенно уменьшаться. Однако в рассмотренных силовых моделях этот факт никак не влияет на глубину резания зернами круга. Учитывая, что количество режущих зерен на рабочей поверхности круга избыточно [29], часть зерен проходит в зоне контакта впустую без съема металла, а с уменьшением подачи на глубину в десятки раз количество избыточных зерен увеличивается. На настоящий момент отсутствуют методики расчета количества избыточных зерен и глубины резания при снижении подачи на глубину в десятки раз. Кроме того, не учитывается, что объем слоя снимаемого металла с заготовки имеет конечное значение, а расчет объема снимаемого металла при микрорезании в моделях не осуществляется, т. е. суммирование снятого металла не производится и непонятно, когда закончится процесс снятия заданного объема металла. Большим упущением в рассмотренных выше моделях также является то, что сила резания в моделях не изменяется в зависимости от твердости круга.

Таким образом, до сих пор отсутствует научный подход, устанавливающий взаимосвязь сил резания и глубин среза металла единичными зернами со снимаемым припуском и силой резания, возникающей при шлифовании кругом в целом. В результате отсутствует аналитическая модель расчета взаимосвязи силы резания с глубиной резания на операциях плоского шлифования, представленная в инженерном виде.

Сложность получения адекватной модели силы резания заключается в необходимости установления взаимосвязи параметров макрорежимов резания (подач, скорости резания), регулируемых на пульте управления станком, с параметрами микрорежимов резания абразивными зернами, связанными с пластической деформацией металла в зоне сдвига, физико-механическими свойствами обрабатываемого металла, передним и задним углом режущей кромки зерен, затуплением режущей кромки по задней поверхности зерен, скоростью резания, параметрами зоны контакта режущего инструмента

с заготовкой и др. В частности, для операции плоского шлифования необходимо связать объем снятого металла с заготовки и параметры трех подач станка (на глубину, поперечную, продольную) с параметрами микрорезания: углом сдвига металла в зоне пластической деформации, длиной и площадью контакта круга с заготовкой, переменной глубиной среза металла единичными зернами круга, стохастическим характером съема металла избыточным количеством зерен круга, геометрией режущей кромки абразивных зерен, площадкой затупления на задней поверхности, прочностью обрабатываемого металла, а также с суммарным микрообъемом металла, снимаемого всеми зернами.

Таким образом, **целью данной работы** является установление взаимосвязи между силой резания, глубиной резания и объемом снимаемого металла единичными зернами при плоском шлифовании. Рассмотрены основные этапы разработки модели расчета силы резания, возникающей в процессе плоского шлифования, на основе равенства объема металла, снимаемого совокупностью единичных зерен, и такого же объема металла, снимаемого шлифовальным кругом (равенство объемов снимаемого металла).

### Методика исследования

В качестве базы для разработки модели силы резания при плоском шлифовании примем модель силы резания, возникающей при резании единичным абразивным зерном. Съем металла единичным зерном происходит при энергетических затратах, чаще всего выражаемых в виде работы или мощности. Взаимосвязь между работой и мощностью при пластической деформации металла установлена в работе [1]:

$$A = \iiint_{\omega} \sigma \varepsilon d\omega; \quad (1)$$

$$N = \frac{dA}{dt} = \iiint_{\omega} \sigma \dot{\varepsilon} d\omega, \quad (2)$$

где  $A$  – работа, затрачиваемая на деформацию объема  $\omega$  металла, Н · м (Дж);  $N$  – мощность, необходимая для деформации объема  $\omega$  металла, Н · м/с (Вт);  $\sigma$  – интенсивность напряжений в движущемся объеме деформируемого металла, Н/м<sup>2</sup>;  $\dot{\varepsilon}$  – интенсивность скорости деформаций, с<sup>-1</sup>;  $\varepsilon$  – интенсивность степени деформации;

$\omega$  – объем деформируемого металла,  $\text{м}^3$ ;  $t$  – время деформации объема  $\omega$  металла, с.

Отметим, что допущения, принятые С.Н. Корчаком в работе [1], не привязаны к конкретному виду шлифования, поэтому они будут справедливы и для разрабатываемой модели силы резания, возникающей в процессе плоского шлифования. На рис. 1 показана расчетная схема среза металла режущей кромкой абразивного зерна круга с площадкой затупления  $l_j$ . В работе [1] принята свободная схема резания из-за малого влияния краевых эффектов по длине режущей кромки, которая превышает глубину резания единичным зерном круга в сотни раз. Принято допущение, что зона сдвига имеет форму параллелограмма, так как температурно-скоростные параметры процесса шлифования (скорость резания 30–60 м/с и температура 600–1500 °С) делают состояние металла схожим с идеально-пластическим, а зона сдвига сужается в тонкую полоску и не имеет клиновидной формы, как при прочих видах резания. По данным источника [1], толщина  $m$  зоны сдвига равна 1–5 мкм. В результате для условий свободного резания также сделаны допущения, что в зоне сдвига, имеющей форму параллелограмма (рис. 1), величины интенсивности напряжений  $\sigma$  и интенсивности

скорости деформации  $\dot{\epsilon}$  в среднем постоянны. Сдвиг металла в зоне резания производится из условия, что абразивное зерно абсолютно острое, длина его режущей кромки равна  $b_j$ , а длина площадки затупления по задней грани равна нулю, т. е.  $l_j = 0$ .

Площадь зоны сдвига можно описать толщиной  $m$  самой зоны, глубиной среза  $a_s$  и углом сдвига  $\beta_1$  (рис. 1). Работа абсолютно острого абразивного зерна шлифовального круга затрачивается на пластическую деформацию металла объемом  $\omega_j$  в зоне сдвига за время сдвига  $\Delta t$  при прохождении вершины острого зерна круга расстояния  $h_j$  (на рис. 1 – расстояние между точками  $O$  и  $O_1$ ) со скоростью  $V_k$ . Объем снимаемой стружки (рис. 1 и 2, а) состоит из множества объемов  $\omega_j$ .

Применительно к сдвигу элементарного объема металла  $\omega_j$  в зоне резания, совершаемому  $j$ -м зерном круга, преобразуем выражение (1) для расчета работы  $A_j$ , затрачиваемой на пластическую деформацию объема металла  $\omega_j$  (рис. 1):

$$A_j = \sigma \epsilon \iiint_{\omega} d\omega = \sigma \epsilon \omega. \quad (3)$$

Выразим мощность  $N_j$  деформации металла в зоне сдвига через приращение элементарного

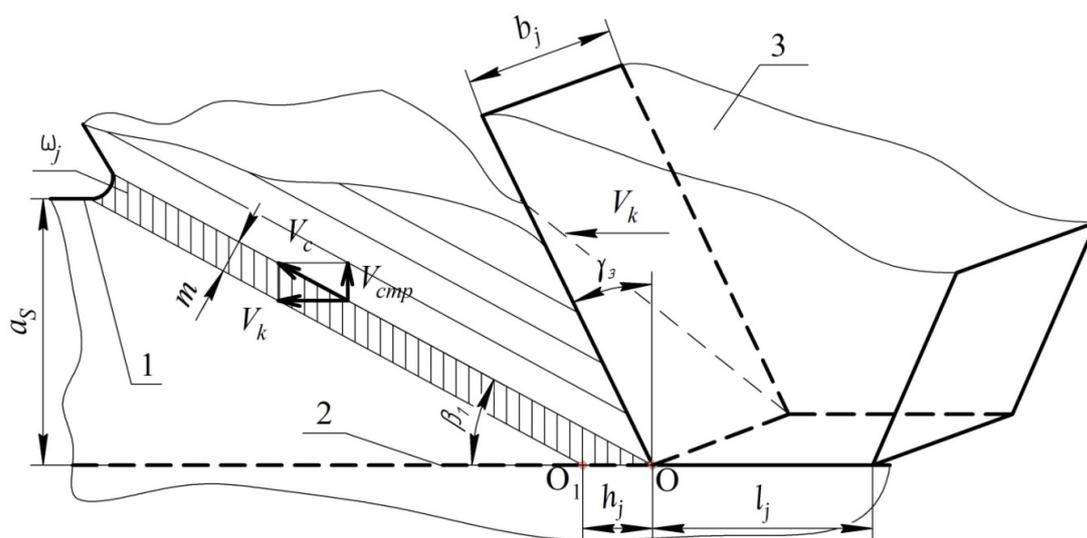


Рис. 1. Расчетная схема пластической деформации в зоне сдвига при резании единичным зерном:

1 – наружная поверхность металла; 2 – траектория перемещения режущего зерна; 3 – режущее зерно

Fig. 1. Calculation model of plastic deformation in the shear zone when cutting with a single grain:

1 – outer metal surface; 2 – cutting grain motion pattern; 3 – cutting grain

объема металла  $\omega_j$  и элементарного времени сдвига  $\Delta t$ :

$$N_j = \frac{dA}{dt} = \sigma \dot{\epsilon} \frac{d\omega}{dt} = \sigma \dot{\epsilon} \omega_j, \quad (4)$$

при условии, что

$$\omega_j = \frac{a_s m b_j}{\sin \beta_1}, \quad (5)$$

где  $a_s$  – толщина среза острым единичным зерном (рис. 1 и 2, б), м;  $m$  – толщина зоны сдвига металла в зоне резания, м;  $\beta_1$  – угол наклона условной плоскости сдвига, град. (рис. 2, б);  $b_j$  – длина режущей кромки единичного абразивного зерна, м;  $N_j$  – мощность деформации объема металла  $\omega_j$  в зоне сдвига, Н · м/с (Вт).

Тогда формула (4) примет следующий вид:

$$N_j = \sigma \dot{\epsilon} \frac{a_s m b_j}{\sin \beta_1}. \quad (6)$$

Пластическая деформация объема металла  $\omega_j$  в зоне сдвига совершается в результате действия тангенциальной составляющей силы резания  $P_{ZSj}$  абсолютно острого зерна. Поэтому мощность деформации  $N_j$  равна мощности действия силы  $P_{ZSj}$ . Из схемы среза при резании условно острым зерном (рис. 2, б) выразим мощность  $N_j$ :

$$N_j = R_{Sj} V_k \cos \beta = P_{ZSj} V_k, \quad (7)$$

где  $R_{Sj}$ ,  $P_{ZPj}$  – соответственно равнодействующая и тангенциальная составляющие силы резания острого зерна, Н;  $V_k$  – скорость круга, м/с;  $\beta$  – угол между  $R_{Sj}$  и вектором  $V_k$  (рис. 2, б), град.

Найдем тангенциальную составляющую силы резания единичным зерном, приравняв формулы (6) и (7):

$$P_{ZPj} = \sigma \dot{\epsilon} \frac{a_s m b_j}{V_k \sin \beta_1}. \quad (8)$$

Радиальная составляющая силы резания  $P_{YPj}$  единичным зерном может быть найдена по формуле

$$P_{YPj} = R_{Sj} \sin \beta = P_{ZPj} \operatorname{tg} \beta; \quad (9)$$

$$P_{YPj} = \sigma \dot{\epsilon} \frac{a_s m b_j}{V_k \sin \beta_1} \operatorname{tg} \beta. \quad (10)$$

В процессе шлифования абразивные зерна круга затупляются с образованием площадки  $l_j$  на задней грани. Площадка затупления препятствует внедрению абразивного зерна в металл в процессе резания. Поэтому возникает допол-

нительная радиальная сила  $P_{YTj}$ , необходимая для заглубления затупленного зерна (рис. 2, б), без которого невозможен сдвиг металла. В процессе резания происходит трение площадки затупления зерна по поверхности металла. В результате возникает дополнительная тангенциальная сила  $P_{ZTj}$ . Поэтому появляется необходимость учета влияния площадки затупления на общую силу радиальную силу резания  $P_{Yj}$  и тангенциальную силу  $P_{Zj}$ .

За основу примем модель схемы силы резания, действующей на абразивное зерно с площадкой затупления (рис. 1 и 2, а). На рис. 2, а представлена кинематическая схема плоского шлифования. Отметим, что многие элементы на рис. 2, а для наглядности показаны условно и увеличены в размерах (риски, абразивные зерна и др.).

Составим уравнения для нахождения составляющих силы резания зернами круга (рис. 2, б [1]):

$$P_{Yj} = P_{YPj} + P_{YTj}; \quad (11)$$

$$P_{Zj} = P_{ZPj} + P_{ZTj}. \quad (12)$$

Учтем влияние площадки затупления абразивного зерна на составляющие сил резания, получающиеся от воздействия силы трения [1]:

$$P_{YTj} = \frac{\sigma}{3} b_j l_j; \quad (13)$$

$$P_{ZTj} = \mu P_{YTj} = \mu \frac{\sigma}{3} b_j l_j, \quad (14)$$

где  $\mu$  – коэффициент трения абразивного зерна по обрабатываемому материалу;  $l_j$  – длина площадки затупления зерна, м.

Подставим выражения (9), (10), (13) и (14) в формулы (11) и (12) и получим

$$P_{Yj} = \sigma \dot{\epsilon} \frac{a_s m b_j}{V_k \sin \beta_1} \operatorname{tg} \beta + \frac{\sigma}{3} b_j l_j; \quad (15)$$

$$P_{Zj} = \sigma \dot{\epsilon} \frac{a_s m b_j}{V_k \sin \beta_1} + \mu \frac{\sigma}{3} b_j l_j. \quad (16)$$

Формулы (15) и (16) представляют собой модели расчета радиальной и тангенциальной составляющих силы резания при пластической деформации объема металла в зоне сдвига затупленным единичным зерном круга. Причем в моделях (15) и (16) составляющие силы резания выражены не через параметры станочных режимов резания кругом в целом (подачи на

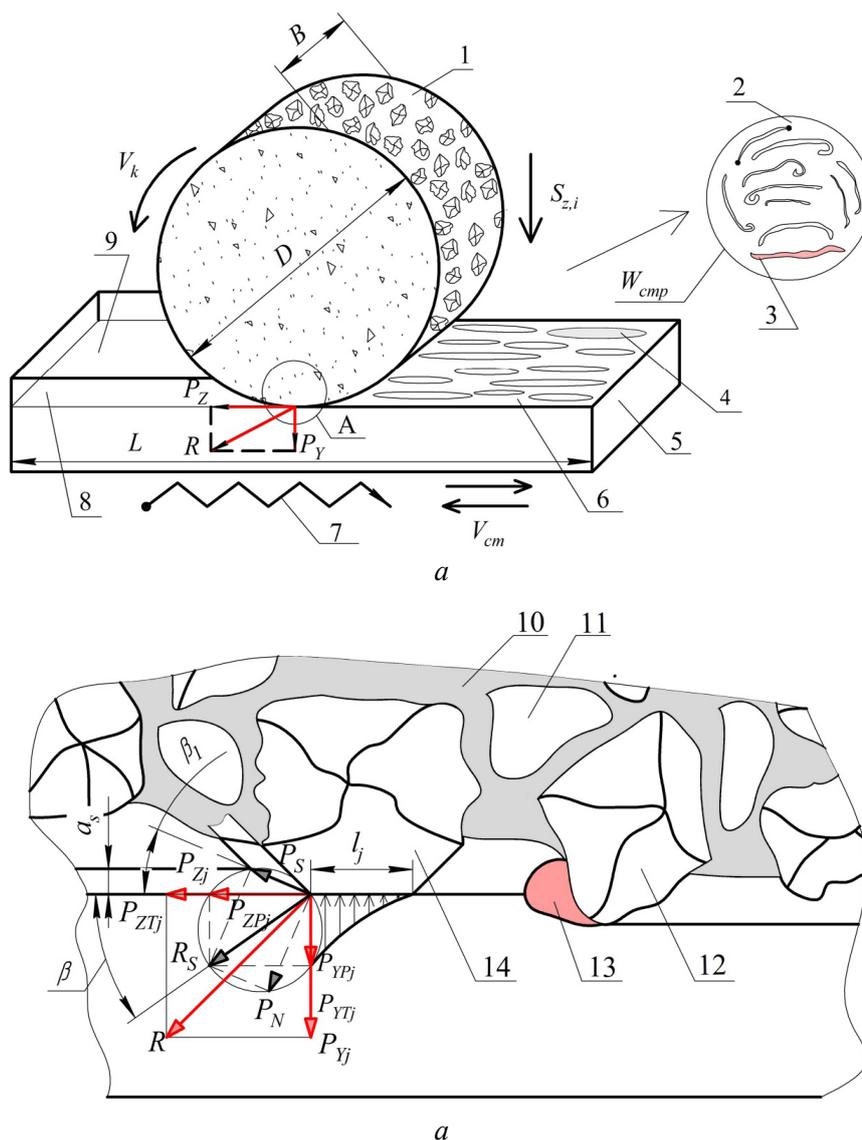


Рис. 2. Схема обработки плоским шлифованием (а); схема среза единичным зерном, эпюра напряжений и составляющих усилия (б) – вид А на рис. 2, а:

1 – шлифовальный круг; 2 – общий объем снимаемой стружки (показан условно); 3 – стружка, срезаемая единичным зерном; 4 – след зерна; 5 – заготовка; 6 – обработанная поверхность; 7 – магнитный стол; 8 – припуск; 9 – обрабатываемая поверхность; 10 – связка; 11 – пора; 12 – реальное абразивное зерно; 13 – стружка, срезаемая единичным зерном; 14 – идеализированное абразивное зерно

Fig. 2. Flat grinding (a); a cutoff with a single grain, diagram of stresses and force components (b) – view A in fig. 2, a:

1 – grinding wheel; 2 – total volume of chips being removed (shown conditionally); 3 – chips being removed by a single grain; 4 – grain trace; 5 – workpiece; 6 – machined surface; 7 – magnetic table; 8 – stock; 9 – surface being machined; 10 – bond; 11 – pore; 12 – real abrasive grain; 13 – chips cut by a single grain; 14 – ideal abrasive grain

глубину, осевая, продольная), а через параметры микрорезания в зоне сдвига металла и трения площадки затупления единичного зерна. Первое слагаемое в моделях (15) и (16) определяет величину силы резания при срезе металла абсолютно

острым зерном, необходимую для пластической деформации металла в зоне сдвига. Второе слагаемое определяет силу резания, необходимую для преодоления вдавливания и трения площадки затупления.

Поскольку съём металла в процессе плоского шлифования осуществляется одновременно несколькими зёрнами (группой единичных зёрен) в зоне контакта круга с заготовкой, то выполним преобразование параметров микрорезания множества зёрен в режимные параметры круга в целом, исходя из условия обеспечения равенства работ по съёму одинакового объема металла зёрнами и кругом в целом. Другими словами, примем, что объем металла  $W_{пр}$ , снимаемый за время одного хода стола с заготовки совокупностью единичных абразивных зёрен, равен этому же объёму металла  $W_{пр}$ , снимаемому шлифовальным кругом в целом (рис. 3). Для выполнения такого преобразования примем следующие допущения.

1. Объем металла  $W_{пр}$ , снимаемого с заготовки, равен сумме всех объёмов  $W_{зоны}$  металла в зоне сдвига, т. е.  $W_{пр} = W_{зоны}$  (рис. 3).
2. Поскольку объем срезаемой стружки состоит из множества слоев сдвига металла в зоне резания, то общий объем металла стружки  $W_{стр} = W_{зоны}$  и тоже равен  $W_{пр} = W_{стр} = W_{зоны}$  (рис. 3).
3. Объем металла  $W_{пр}$  определяется длиной заготовки  $L$  (мм), шириной рабочей поверхности

круга  $B$  (мм) и подачей на глубину  $S_{z,i}$  (мм/раб. ход), т. е. (рис. 3):

$$W_{пр} = S_{z,i}LB = W_{стр} = W_{зоны} \quad (17)$$

4. Сумма сил резания от всех режущих зёрен, находящихся в данный момент времени в зоне контакта круга с заготовкой, равна силе резания для круга в целом:

$$P_Z = P_{\Sigma ZP} + P_{\Sigma ZT} = \sum_{j=1}^J P_{ZPj} + \sum_{j=1}^J P_{ZTj}; \quad (18)$$

$$P_Y = P_{\Sigma YP} + P_{\Sigma YT} = \sum_{j=1}^J P_{YPj} + \sum_{j=1}^J P_{YTj}, \quad (19)$$

где  $P_Y, P_Z$  – соответственно радиальная и тангенциальная составляющие силы резания при шлифовании кругом в целом;  $P_{\Sigma YP}, P_{\Sigma ZP}$  – соответственно радиальная и тангенциальная составляющие силы резания при шлифовании кругом в целом, когда все зёрна абсолютно острые;  $P_{\Sigma YP}, P_{\Sigma ZT}$  – соответственно радиальная и тангенциальная составляющие силы резания от площадок затупления при шлифовании кругом в целом.

5. Допущение о равенстве работ, затрачиваемых на снятие одного и того же объема металла

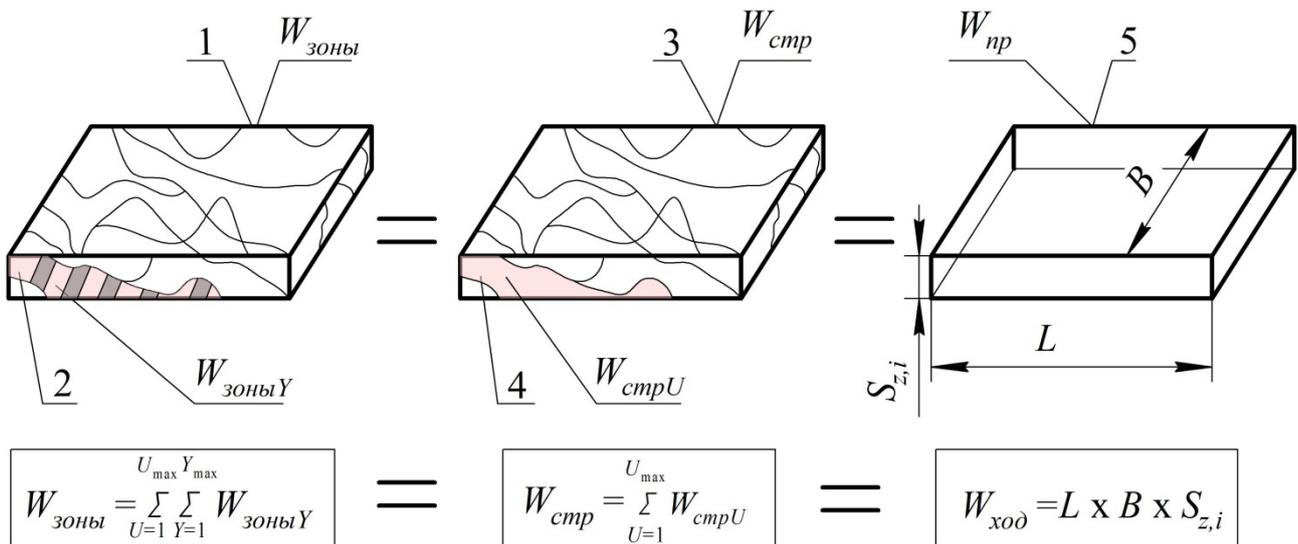


Рис. 3. Равенство объемов снимаемого металла в зонах сдвига, стружке и заготовке:

1 – общий объем металла, находящегося в зонах сдвига; 2 – объем металла, находящегося в зоне сдвига; 3 – общий объем снимаемой стружки; 4 – объем стружки, срезаемой единичным зерном; 5 – общий объем металла, снимаемого за один ход стола

Fig. 3. The equality of volumes of metal being removed in shear zones, in the chips, and in the workpiece: 1 – the total volume of metal in the shear zones; 2 – the volume of metal in the shear zone; 3 – the total volume of chips being removed; 4 – the volume of chips cut by a single grain; 5 – the total amount of metal being removed during one pass of the table

$W_{\text{пр}}$  совокупностью единичных абразивных зерен и шлифовальным кругом в целом.

На рис. 3  $U_{\text{max}} (Y_{\text{max}})$  – максимально возможное количество стружек (зон сдвигов).

Установим взаимосвязь работ по снятию объема металла  $W_{\text{пр}}$  отдельно для группы зерен и для круга в целом. В соответствии со структурой модели (12) силы резания  $P_{Zj}$  для единичного зерна общая работа  $A_j$  (Н · м), совершаемая силой резания  $P_{Zj}$ , состоит из работы  $A_{Pj}$ , совершаемой силой  $P_{ZPj}$ , и работы  $A_{Tj}$ , совершаемой силой  $P_{ZTj}$ :

$$A_j = A_{Pj} + A_{Tj}. \quad (20)$$

Аналогично общая работа  $A_{\Sigma}$  от тангенциальной составляющей силы резания для круга в целом состоит из работы  $A_{\Sigma P}$ , суммарно совершаемой силами  $P_{ZPj}$  от всех режущих зерен круга в зоне контакта, и работы  $A_{\Sigma T}$ , суммарно совершаемой силами  $P_{ZTj}$  от всех режущих зерен круга в зоне контакта:

$$A_{\Sigma} = A_{\Sigma P} + A_{\Sigma T}. \quad (21)$$

Тогда суммы работ от сил резания единичных зерен равны работе круга в целом от общей силы резания. Найдем работу по пластической деформации металла в зоне сдвига, которая совершается силой  $P_{ZPj}$  на расстоянии  $L$  длины обрабатываемой поверхности (рис. 2, а):

$$A_{Pj} = P_{ZPj} L = \sigma \dot{\varepsilon} \frac{a_s m b_j}{V_k \sin \beta_1} L = \sigma \dot{\varepsilon} \frac{\omega_j}{V_k} L, \quad (22)$$

$$\begin{aligned} A_{\Sigma P} &= \sum_{j=1}^J A_{Pj} = L \sum_{j=1}^J P_{ZPj} = \\ &= \frac{\sigma \dot{\varepsilon} L}{V_k} \sum_{j=1}^J \frac{a_s m b_j}{\sin \beta_1} = \frac{\sigma \dot{\varepsilon} L}{V_k} \sum_{j=1}^J \omega_j = \frac{\sigma \dot{\varepsilon} L W_{\text{пр}}}{V_k}, \quad (23) \end{aligned}$$

где  $L$  – длина обрабатываемой поверхности, м;  $\omega_j$  – объем снимаемого металла при резании  $j$ -м единичным зерном, м<sup>3</sup>.

Для установления связи работы  $A_{\Sigma P}$ , совершаемой по съему металла абсолютно острыми зернами, необходимо найти общий энергетический параметр, присущий единичным зернам и кругу в целом. Таким общим параметром является скорость съема металла  $Q$ , м<sup>3</sup>/с. При резании  $j$ -м единичным зерном скорость съема металла  $Q_j$  равна отношению объема металла  $\omega_j$  в зоне сдвига к времени его деформации за время сдвига  $\Delta t$ , которое соответствует про-

хождению острого зерна расстояния  $h_j$  со скоростью  $V_k$ :

$$Q_j = \frac{\omega_j}{\Delta t}, \quad (24)$$

$$\text{при } \dot{\varepsilon} = \frac{\varepsilon}{\Delta t}, \quad (25)$$

где  $Q_j$  – скорость съема металла при резании  $j$ -м единичным зерном, м<sup>3</sup>/с;  $\Delta t$  – время деформации объема металла  $\omega_j$  за время сдвига, с.

Учтем формулы (24) и (25) в уравнении и получим

$$A_{\Sigma P} = \frac{\sigma \dot{\varepsilon} L}{V_k} \sum_{j=1}^J \omega_j = \frac{\sigma \dot{\varepsilon} L}{V_k} \sum_{j=1}^J Q_j. \quad (26)$$

Сумма скоростей съема металла группой зерен, находящихся в зоне контакта круга с заготовкой, равна скорости съема металла кругом в целом:

$$Q_{\text{кр}} = \sum_{j=1}^J Q_j, \quad (27)$$

где  $Q_{\text{кр}}$  – скорость съема металла кругом в целом, м<sup>3</sup>/с.

Тогда формула (4) примет следующий вид:

$$A_{\Sigma P} = \frac{\sigma \dot{\varepsilon} L}{V_k} Q_{\text{кр}}. \quad (28)$$

При съеме металла кругом в целом скорость съема  $Q_{\text{кр}}$  металла равна отношению объема металла  $W_{\text{пр}}$ , соответствующего слою металла с высотой, равной врезной радиальной подаче, длиной – длине обрабатываемой поверхности, шириной – ширине шлифования, равной или меньше высоты шлифовального круга (рис. 3), к времени, за которое снимается объем металла  $W_{\text{пр}}$  (времени хода стола без учета перебегов), при скорости стола  $V_{\text{ст}}$  (м/мин):

$$Q_{\text{кр}} = \frac{W_{\text{пр}}}{t_{\text{ст}}} = \frac{S_z, i B L}{t_{\text{ст}}} = S_z, i B V_{\text{ст}}, \quad (29)$$

или при  $t_{\text{ст}} = \frac{L}{V_{\text{ст}}}$ :

$$Q_{\text{кр}} = S_z, i B V_{\text{ст}}, \quad (30)$$

где  $t_{\text{ст}}$  – время хода стола на длину заготовки  $L$ , с.

После подстановки выражения (29) в уравнение (28) получим

$$A_{\Sigma P} = \frac{\sigma \dot{\varepsilon} L}{V_k} S_z, i B V_{\text{ст}}. \quad (31)$$

Тогда работу  $A_{\Sigma P}$ , совершаемую абсолютно острыми зернами круга по пластической деформации металла в зоне резания, можно записать в следующем виде при съеме металла кругом в целом:

$$A_{\Sigma P} = P_{ZP} L = \frac{\sigma \varepsilon L}{V_k} S_{z,i} B V_{\text{ст}}. \quad (32)$$

Найдем для абсолютно острого круга в целом тангенциальную составляющую силы резания  $P_{ZP}$ :

$$P_{ZP} = \frac{\sigma \varepsilon S_{z,i} B V_{\text{ст}}}{V_k}. \quad (33)$$

Установим взаимосвязь работ, совершаемых силами трения затупленными зернами, отдельно для единичного зерна и для круга в целом (у которого зерна имеют площадку затупления):

$$A_{Tj} = P_{ZTj} L = \frac{\sigma b_j l_j \mu}{3} L. \quad (34)$$

После суммирования по всем зернам получим формулу работы силы трения:

$$\begin{aligned} A_{\Sigma T} &= \sum_{j=1}^J A_{Tj} = \sum_{j=1}^J P_{ZTj} L = \frac{\sigma \mu}{3} L \sum_{j=1}^J b_j l_j = \\ &= \frac{\sigma \mu}{3} L \sum_{j=1}^J f_j = \frac{\sigma \varepsilon L}{V_k} F_{\text{тр}}, \end{aligned} \quad (35)$$

$$F_{\text{тр}} = \sum_{j=1}^J f_j, \quad (36)$$

где  $f_j$  – площадь площадки затупления единичного зерна,  $\text{м}^2$ ;  $F_{\text{тр}}$  – сумма площадей площадок затупления единичных зерен,  $\text{м}^2$ ;

$$A_{\Sigma T} = P_{ZT} L = \frac{\sigma \mu}{3} \eta B L_K L; \quad (37)$$

$$P_{ZT} = \sum_{j=1}^J P_{ZTj}, \quad (38)$$

где  $\eta$  – степень затупления круга;  $P_{ZT}$  – тангенциальная составляющая силы резания кругом в целом, возникающая при трении, Н [30]:

$$P_{ZT} = \frac{\sigma \mu}{3} \eta B L_K, \quad (39)$$

$$L_K = \sqrt{D S_{z,i}}, \quad (40)$$

где  $L_K$  – длина дуги контакта для плоского шлифования, м;  $D$  – диаметр шлифовального круга, м.

Тогда тангенциальную составляющую силы резания можно будет найти как

$$P_Z = \frac{\sigma \varepsilon V_{\text{ст}} B S_{z,i}}{V_k} + \frac{\sigma \mu \eta B}{3} \sqrt{D S_{z,i}}. \quad (41)$$

Аналогичным способом получим формулу для радиальной составляющей силы резания:

$$P_Y = \frac{\sigma \varepsilon V_{\text{ст}} B S_{z,i}}{V_k} \text{tg } \beta + \frac{\sigma \eta}{3} \sqrt{D S_{z,i}}. \quad (42)$$

В работе [30] доказано, что  $\text{tg } \beta \approx 0,68$  и  $\varepsilon \approx 2,8$ . Учтем полученные значения в формулах (41) и (42). В результате получим

$$P_Z = 2,8 \frac{\sigma V_{\text{ст}} B S_{z,i}}{V_k} + \frac{\sigma \mu \eta B}{3} \sqrt{D S_{z,i}}; \quad (43)$$

$$P_Y = 1,9 \frac{\sigma V_{\text{ст}} B S_{z,i}}{V_k} + \frac{\eta B \sigma}{3} \sqrt{D S_{z,i}}. \quad (44)$$

Экспериментальное доказательство адекватности описанной выше модели силы резания, возникающей в процессе плоского шлифования, производилась в лаборатории университета на плоскошлифовальном станке 3Л722А с использованием комплекта оборудования для регистрации и анализа сил резания KISTLER. Плоскошлифовальный станок 3Л722А позволяет производить обработку периферией круга на прямоугольном столе, что соответствует рассматриваемому в данной статье виду плоского шлифования. Используемый динамометр модели 9257В фирмы KISTLER имеет технические возможности, соответствующие требованиям проводимых испытаний. При этом точность данного прибора составляет  $\pm 3,5\%$  и является достаточной для проводимых измерений.

В ходе эксперимента осуществлялось измерение радиальной составляющей силы резания как наиболее значимой для точности обработки (рис. 4). Экспериментальная проверка проводилась на образцах с размерами  $500 \times 20 \times 20$  (длина  $\times$  ширина  $\times$  высота) из материала стали 45, также использовался круг с размерами  $500 \times 20 \times 203$  мм и с наиболее распространенной характеристикой – 25AF40L10V. Отметим, что разработанная силовая модель позволяет учитывать круги различной характеристики.

Для измерения силы резания использовался датчик, сигналы с которого поступали по двум модулям. В дальнейшем полученные цифровые

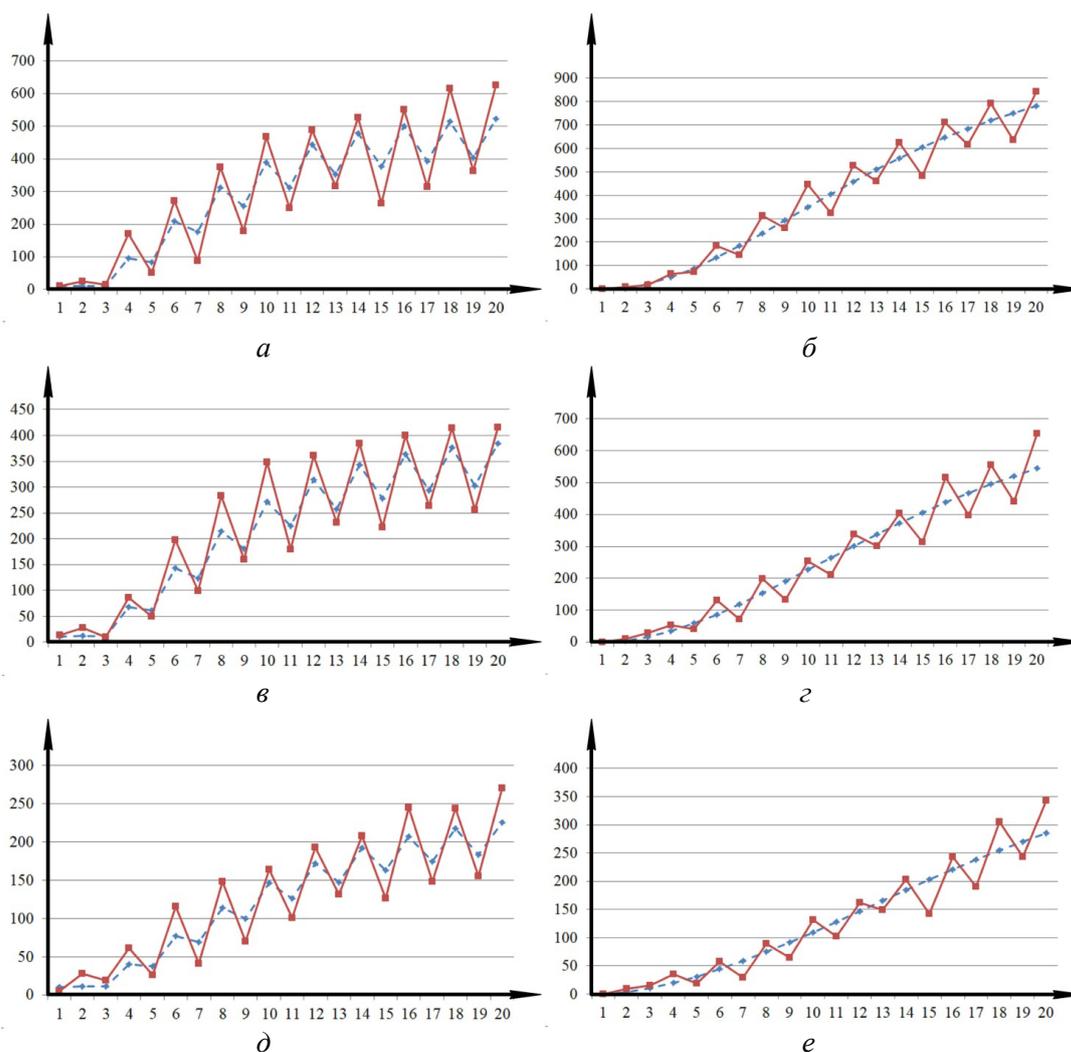


Рис. 4. Зависимость радиальной составляющей силы резания от порядкового номера хода стола с заготовкой при случае РХ-ХХ ( $V_{\text{ст}} = 10$  м/мин и  $S_{z,i} = 0,024$  (а), 0,018 (б), 0,011 (в) м/раб. ход) и ( $V_{\text{ст}} = 10$  м/мин и  $S_{z,i} = 0,024$  (г), 0,018 (д), 0,011 (е) м/раб. ход): вертикальная ось на графиках – радиальная составляющая силы резания, Н; горизонтальная ось на графиках – порядковый номера хода стола; сплошная линия – расчетные значения силы резания; штриховая линия – экспериментальные значения силы резания

Fig. 4. The relationship between the radial component of the cutting force and the sequential number of the table pass with the workpiece at РХ-ХХ ( $V_{\text{table}} = 10\text{m/min}$  and  $S_{\text{rad}} = 0.024$  (a), 0.018 (б), 0.011 (в) m/pass) and ( $V_{\text{table}} = 10\text{m/min}$  and  $S_{\text{rad}} = 0.024$  (г), 0.018 (д), 0.011 (е) m/pass):

vertical axis on the graphs is the radial component of the cutting force, N; horizontal axis on the graphs is the sequence number of the table stroke; solid line – calculated values of cutting force; dashed line – experimental values of cutting force

сигналы обрабатывались на персональном компьютере. Отметим, что настройка системы измерения осуществлялась на станке в пределах от 0 до 3 кН. На рис. 4 представлены результаты эксперимента в формате графиков, отражающих зависимость радиальной составляющей силы резания от изменения различных параметров режима резания. В среднем различие между расчетными значениями и экспериментальными

данными составило 10 %. В результате можно сделать вывод, что описанная выше модель расчета силы резания для операций плоского шлифования является адекватной.

### Результаты и их обсуждение

Полученные аналитические выражения (43) и (44) представлены в инженерном виде, что дает возможность их практического использо-

вания для расчета силы резания, действующей в процессе плоского шлифования, с учетом режима резания, характеристики, диаметра и ширины круга, физико-механических свойств заготовки и многих других параметров. Первые слагаемые уравнений (43) и (44) учитывают силу резания, необходимую для пластической деформации металла в зоне сдвига (силу, идущую на сьем металла). Вторые слагаемые учитывают силу резания, необходимую для преодоления силы трения, возникающую из-за площадок затупления на зернах. Поэтому в дальнейшем представленная силовая модель будет являться основой для аналитической модели расчета глубины резания, позволяющий прогнозировать изменение технического размера и его погрешности.

Нахождение составляющих силы резания становится возможным двумя способами. Первый способ основывается на равенстве объемов металлов, снимаемых за один ход заготовки совокупностью единичных режущих зерен и шлифовальным кругом в целом (изложен в настоящей статье). Второй способ учитывает равенство интенсивностей съема металла шлифовальным кругом в целом и режущими зернами, контактирующими с заготовкой в текущий момент времени.

Оба подхода основываются на энергетическом балансе, предложенном С.Н. Корчаком, о равенстве работ, затрачиваемых на сьем металла с обрабатываемой поверхности заготовки единичными абразивными зернами и шлифовальным кругом в целом. Иначе говоря, на равенстве работ по объему снимаемого металла и равенстве по скорости съема припуска единичными абразивными зернами и шлифовальным кругом в целом.

В работе [31] более подробно рассмотрен алгоритм применения второго способа вывода модели составляющих силы резания, который базируется на равенстве интенсивности съема металла шлифовальным кругом в целом интенсивности съема металла режущими абразивными зернами, расположенными в зоне контакта круга с деталью. Отметим, что уравнения модели силы резания, полученные разными способами (по условиям равенства интенсивности или объемов снимаемого металла), являются идентичными. В результате можно сказать, что рассматриваемые аналитические модели силы

резания, построенные на общих допущениях и подходах, которые основаны на научных изысканиях С.Н. Корчака, связанных с теорией резания и пластического деформирования металла, достоверны вне зависимости от условия равенства интенсивности или объемов снимаемого металла.

Полученная аналитическая модель расчета силы резания, базирующаяся на равенстве скорости съема и объемов удаляемого металла кругом в целом и единичными зернами, находящимися в зоне контакта круга с заготовкой, экспериментально подтвердилась, что говорит о ее адекватности.

## Выводы

1. В настоящий момент по причине отсутствия адекватных аналитических моделей расчета силы и глубины резания для операций плоского шлифования в САМ-системе различных производителей при проектировании операции режимы резания назначаются вручную.

2. Отсутствие систем автоматического расчета режимов резания для операций плоского шлифования с ЧПУ (цифрового инструмента для САМ-системы) является научно-технической проблемой. Для ее решения необходима разработка аналитической модели силы резания, в которой установлена взаимосвязь между силой и глубиной среза металла единичными зернами со снимаемым припуском и силой резания, возникающей при шлифовании кругом в целом.

3. В качестве решения описанной выше проблемы предложена аналитическая модель расчета силы резания при плоском шлифовании, устанавливающая взаимосвязь силы резания с глубиной резания и объемами снимаемого металла единичными зернами и кругом в целом на основе интеграции микрообъемов и микросил при срезе металла зернами круга.

4. Проведено математическое моделирование взаимосвязи между силой резания и режимами резания с параметрами микрорезания группой единичных зерен на основе равенства работ при снятии металла одного объема.

5. Представленная в настоящей статье модель силы резания, возникающей в процессе плоского шлифования, получила подтверждение экспериментальным путем и совпала с моделью силы



резания, которая также базируется на допущениях С.Н. Корчака и основывается на равенстве интенсивности съема металла шлифовальным кругом в целом и единичными зернами, находящимися в зоне контакта круга с заготовкой.

6. Практическим применением разработанной модели силы резания станет цифровой двойник операции плоского шлифования, позволяющий производить не только прогнозирование стабильности показателей точности и качества обрабатываемой поверхности, но и оптимизацию проектируемой операции с назначением оптимальных циклов параметров режима резания и других входных параметров (например, характеристик абразивного инструмента), что имеет большое практическое значение для цифровизации технологической подготовки производства.

### Список литературы

1. Корчак С.Н. Производительность процесса шлифования. – М.: Машиностроение, 1974. – 280 с.
2. Зубарев Ю.М., Приемывшев А.В. Теория и практика повышения эффективности шлифования материалов. – СПб.: Лань, 2010. – 304 с. – ISBN 978-5-8114-0973-0.
3. Филимонов Л.Н. Высокоскоростное шлифование. – Л.: Машиностроение, 1979. – 248 с.
4. Николаенко А.А. Моделирование обеспечения точности обработки при плоском глубинном шлифовании периферией круга // Технология машиностроения. – 2011. – № 5. – С. 57–59.
5. Кошин А.А., Шипулин Л.В. Стохастические модели температурных и силовых явлений, происходящих при шлифовании, и их реализация средствами параллельных вычислений // Вестник ЮУрГУ. Серия: Математическое моделирование и программирование. – 2012. – № 18 (277). – С. 20–31.
6. Королев А.В., Новоселов Ю.К. Теоретико-вероятностные основы абразивной обработки. Ч. 2. Взаимодействие инструмента и заготовки при абразивной обработке. – Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 1989. – 160 с.
7. Новоселов Ю.К. Динамика формообразования поверхностей при абразивной обработке. – Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2012. – 304 с. – ISBN 978-617-612-051-3.
8. Лоладзе Т.Н. Силы резания при шлифовании металлов // Металлообработка. – 2002. – № 1. – С. 3–8.
9. Мишин В.Н., Балашов В.Н. Силы, возникающие при шлифовании // Автомобильная промышленность. – 2010. – № 10. – С. 26–29.
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 (7–8). – 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. A time-domain surface grinding model for dynamic simulation / M. Leonesio, P. Parenti, A. Cassinari, G. Bianchi, M. Monno // Procedia CIRP. – 2012. – Vol. 4. – P. 166–171. – DOI: 10.1016/j.procir.2012.10.030.
16. Li H., Shin Y.C. A time-domain dynamic model for chatter prediction of cylindrical plunge grinding // Journal of Manufacturing Science and Engineering. – 2006. – Vol. 128 (2). – P. 404–415. – DOI: 10.1115/1.2118748.
17. Patnaik D., Vijayender S., Paruchur V.R. A new model for grinding force prediction and analysis // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2010. – Vol. 50. – P. 231–240. – DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2009.12.004.
18. 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.
19. Lajmert P., Sikora V., Ostrowski D. A dynamic model of cylindrical plunge grinding process for chatter phenomena investigation // MATEC Web of Conferences. – 2018. – Vol. 148. – P. 09004. – DOI: 10.1051/mateconf/201814809004.
20. 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.

21. Influence of cutting parameters on surface hardening of 52100 steel in flat grinding process / M.O. Gomes, L.M. Neto, R.B. Pereira, L.C. Brandão // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2018. – Vol. 96. – P. 1–3. – DOI: 10.1007/s00170-018-1656-z.
22. Impact of cutting speed on grinding wheel wear and cutting force when grinding / T. Bakša, J. Farsky, O. Hronek, M. Zetek // Manufacturing Technology. – 2018. – Vol. 18 (5). – P. 699–703. – DOI: 10.21062/ujep/163.2018/a/1213-2489/MT/18/5/699.
23. Nadolny K., Plichta J., Balasz B. Application of computer modeling and simulation for designing of grinding wheels with zone-diversified structure // Management and Production Engineering Review. – 2010. – Vol. 1 (4). – P. 38–45.
24. Воронов С.А., Вэйдун М.А. Математическое моделирование процесса плоского шлифования // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2017. – № 4. – С. 85–94.
25. Составляющие силы резания плоского врезного шлифования титанового сплава высокоструктурными кругами / С.В. Носенко, В.А. Носенко, Н.Д. Сердюков, А.С. Кузнецова // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2017. – № 5. – С. 36–40.
26. Даниленко М.В. Разработка динамической математической модели силы резания с учетом влияния износа шлифовального круга: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08. – Волгоград, 2018. – 175 с.
27. Li J., Yang R. // Zuhe juchuang yu zidonghua jiagong jishu = Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique. – 2012. – Vol. 6. – P. 92–95. – In Chinese.
28. Liu Y., Zhao H., Jing J., Wei S. // Jingshishi yu moliaomoju gongcheng = Diamond and Abrasives Engineering. – 2012. – Vol. 32 (4). – P. 55–59. – In Chinese.
29. Курдюков В.И. Основы абразивной обработки. – Курган: Изд-во Курган. гос. ун-та, 2014. – 195 с. – ISBN 978-5-4217-0254-2.
30. Переверзев П.П., Пименов Д.Ю. Модель силы резания при круглом врезном шлифовании с учетом затупления режущих зерен абразивного круга // Трение и износ. – 2016. – № 1 (37). – С. 76–82.
31. Акинцева А.В., Переверзев П.П. Аналитическая модель силы резания, возникающая в процессе плоского шлифования // Машиностроительные технологические системы: сборник трудов Международной научно-технической конференции (METS 22). – Ростов н/Д., 2022. – С. 232–238.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2023 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).



Obrabotka metallov -

Metal Working and Material Science

Journal homepage: [http://journals.nstu.ru/obrabotka\\_metallov](http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov)



## Modeling the interrelation of the cutting force with the cutting depth and the volumes of the metal being removed by single grains in flat grinding

Alexandra Akintseva<sup>a, \*</sup>, Pavel Pereverzev<sup>b</sup>

South Ural State University, 76 Lenin Ave., Chelyabinsk, 454080, Russian Federation

<sup>a</sup>  <https://orcid.org/0000-0001-8881-8461>,  [akintsevaav@susu.ru](mailto:akintsevaav@susu.ru); <sup>b</sup>  <https://orcid.org/0000-0002-1416-8918>,  [pereverzevpp@susu.ru](mailto:pereverzevpp@susu.ru)

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received: 20 July 2023

Revised: 01 August 2023

Accepted: 15 August 2023

Available online: 15 December 2023

#### Keywords:

Cutting mode

Cutting force

Cutting depth

Volume of removed metal

Flat grinding

Cycle

Machining error

#### Funding

The research was carried out at the expense of the grant of the Russian Science Foundation № 22-29-00792.

### ABSTRACT

**Introduction.** The model for calculating the cutting force is the basis of the modules of CAM-systems related both to the predicting processing errors on metal-cutting machines for specified grinding conditions, and to the optimizing all parameters of the technological mode (parameters of cutting modes, cutting tools, etc.). However, due to the lack of an adequate model for calculating the cutting force presented in engineering form, such modules have not yet been developed not only for flat grinding operations, but also for all other types of metalworking. It is challenging to obtain an adequate cutting force model for flat grinding operations because it is necessary to establish the interrelation between the machine parameters of the macrocutting modes (feed, cutting speed) of the grinding wheel with the parameters of the microcutting modes — the sets of cutting grains of the wheel associated with the plastic deformation of the metal in the shear zone, microvolumes of the metal being removed and the geometry of the cutting part of the abrasive grains. **The purpose** of this work is to develop a force model establishing the interrelation of the cutting force with the cutting depth and the volumes of the metal being removed by single grains and the wheel as a whole on the basis of the integration of microvolumes and microforces when metal being removed by the wheel grains. **Research methods.** *The subject of the research* is the mathematical modeling of the interrelation between the cutting force and cutting modes with the parameters of microcutting by a group of single grains, based on the equality of work when metal being removed of the same volume. *The methodological basis of the research* is the connection between the work (energy) spent on the plastic deformation of metal by a single grain, the intensity of stresses, the intensity of deformation rates and the volume of the metal being removed by the wheel as a whole, established by S.N. Korchak. **Results and discussion.** *The result of the study* is an analytical model that reliably and adequately establishes the interrelation between the cutting force and the cutting depth, cutting modes, wheel characteristics, physical and mechanical properties of the processing material, and other main technological parameters. *The field of application of the results* is the possibility of using the cutting force calculation model, presented in this paper, as a basis for the development of a module for a CAM-system (a digital twin of the machining), which would allow to perform the calculation and design of optimal technological parameters of the flat grinding operation, as well as cutting modes testing according to the criterion of processing accuracy of a parts batch, considering the influence of various variable factors and real processing conditions within the manufacturing process.

**For citation:** Akintseva A.V., Pereverzev P.P. Modeling the interrelation of the cutting force with the cutting depth and the volumes of the metal being removed by single grains in flat grinding. *Obrabotka metallov (tehnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2023, vol. 25, no. 4, pp. 6–21. DOI: 10.17212/1994-6309-2023-25.4-6-21. (In Russian).

### References

1. Korchak S.N. *Proizvoditel'nost' protsessa shlifovaniya* [Productivity of the grinding process]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1974. 280 p.
2. Zubarev Yu.M., Priemyshev A.V. *Teoriya i praktika povysheniya effektivnosti shlifovaniya materialov* [Theory and practice of improving the efficiency of materials grinding]. St. Petersburg, Lan' Publ., 2010. 304 p. ISBN 978-5-8114-0973-0.

#### \* Corresponding author

Akintseva Alexandra V., Ph.D. (Engineering), Associate Professor  
 South Ural State University,  
 Lenin Ave., 76,  
 454080, Chelyabinsk, Russian Federation  
 Tel.: +7 (922) 633-56-57, e-mail: [akintsevaav@susu.ru](mailto:akintsevaav@susu.ru)

3. Filimonov L.N. *Vysokoskorostnoe shlifovanie* [High-speed grinding]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1979. 248 p.
4. Nikolaenko A.A. Modelirovanie obespecheniya tochnosti obrabotki pri ploskom glubinnom shlifovanii periferiei kruga [Simulation of ensuring the accuracy of processing in flat deep-feed grinding by the periphery of the circle]. *Tekhnologiya mashinostroeniya*, 2011, no. 5, pp. 57–59. (In Russian).
5. Koshin A.A., Shipulin L.V. Stokhasticheskie modeli temperaturnykh i silovykh yavlenii, proiskhodyashchikh pri shlifovanii, i ikh realizatsiya sredstvami parallel'nykh vychislenii [Temperature and force stochastic models in grinding processes and implementation of them by parallel computing]. *Vestnik YuUrGU. Seriya: Matematicheskoe modelirovanie i programirovanie = Bulletin of the South Ural State University. Series: Mathematical Modelling, Programming and Computer Software*, 2012, no. 18 (277), pp. 20–31.
6. Korolev A.V., Novoselov Yu.K. *Teoretiko-veroyatnostnye osnovy abrazivnoi obrabotki. Ch. 2. Vzaimodeistvie instrumenta i zagotovki pri abrazivnoi obrabotke* [Probability-theory approach to abrasive machining. Vol. 2. Tool-blank interaction in abrasive machining]. Saratov, Saratovskii Universitet Publ., 1989. 160 p.
7. 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.
8. Loladze T.N. Sily rezaniya pri shlifovanii metallov [Cutting forces when grinding metals]. *Metalloobrabotka = Metalworking*, 2002, no. 1, pp. 3–8.
9. Mishin V.N., Balashov V.N. Sily, voznikayushchie pri shlifovanii [Forces arising during grinding]. *Avtomobil'naya promyshlennost' = Automotive Industry*, 2010, no. 10, pp. 26–29.
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 (7–8), 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. Leonesio M., Parenti P., Cassinari A., Bianchi G., Monno 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.
16. Li H., Shin Y.C. A time-domain dynamic model for chatter prediction of cylindrical plunge grinding. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2006, vol. 128 (2), pp. 404–415. DOI: 10.1115/1.2118748.
17. Patnaik D., Vijayender S., Paruchur V.R. A new model for grinding force prediction and analysis. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2010, vol. 50, pp. 231–240. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2009.12.004.
18. 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.
19. Lajmert P., Sikora V., Ostrowski D. A dynamic model of cylindrical plunge grinding process for chatter phenomena investigation. *MATEC Web of Conferences*, 2018, vol. 148, p. 09004. DOI: 10.1051/mateconf/201814809004.
20. 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.
21. Gomes M.O., Neto L.M., Pereira R.B., Brandão L.C. Influence of cutting parameters on surface hardening of 52100 steel in flat grinding process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, vol. 96, pp. 1–3. DOI: 10.1007/s00170-018-1656-z.
22. Bakša T., Farsky J., Hronek O., Zetek M. Impact of cutting speed on grinding wheel wear and cutting force when grinding. *Manufacturing Technology*, 2018, vol. 18 (5), pp. 699–703. DOI: 10.21062/ujep/163.2018/a/1213-2489/MT/18/5/699.
23. Nadolny K., Plichta J., Bałasz B. Application of computer modeling and simulation for designing of grinding wheels with zone-diversified structure. *Management and Production Engineering Review*, 2010, vol. 1 (4), pp. 38–45.



24. Voronov S.A., Veidun M. Mathematical modeling of the cylindrical grinding process. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, 2017, vol. 46 (4), pp. 394–403. DOI: 10.3103/S1052618817030177. Translated from *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin*, 2017, no. 4, pp. 85–94.

25. Nosenko S.V., Nosenko V.A., Serdyukov N.D., Kuznetsova A.S. Sostavlyayushchie sily rezaniya ploskogo vreznogo shlifovaniya titanovogo splava vysokostrukturnymi krugami [Components of the cutting force of the flat plunge grinding of titanium alloy with highly structured wheels]. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Izvestia of Volgograd State Technical University*, 2017, no. 5, pp. 36–40.

26. Danilenko M.V. *Razrabotka dinamicheskoi matematicheskoi modeli sily rezaniya s uchetom vliyaniya iznosa shlifoval'nogo kruga*. Diss. kand. tekhn. nauk [Development of a dynamic mathematical model of the cutting force considering the impact of grinding wheel wear. PhD eng. sci. diss.]. Volgograd, 2018. 175 p.

27. Li J., Yang R. *Zuhe juchuangyu zidonghua jiagong jishu = Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique*, 2012, no. 6, pp. 92–95. (In Chinese).

28. Liu Y., Zhao H., Jing J., Wei S. *Jinganshi yu moliaomaju gongcheng = Diamond and abrasives eng*, 2012, vol. 32, no. 4, pp. 55–59. (In Chinese).

29. Kurdyukov V.I. *Osnovy abrazivnoi obrabotki* [Basics of abrasive processing]. Kurgan, Kurgan State University Publ., 2014. 195 p. ISBN 978-5-4217-0254-2.

30. Pereverzev P.P., Pimenov D.Yu. A grinding force model allowing for dulling of abrasive wheel cutting grains in plunge cylindrical grinding. *Journal of Friction and Wear*, 2016, vol. 37 (1), pp. 60–65. DOI: 10.3103/S106836661601013X. Translated from *Trenie i iznos*, 2016, no. 1 (37), pp. 76–82.

31. Akintseva A.V., Pereverzev P.P. [Analytical model of the cutting force arising in the process of flat grinding]. *Mashinostroitel'nye tekhnologicheskie sistemy* [Machine-building technological systems]. Proceedings of the International Scientific and Technical Conference (METS 22). Rostov-on-Don, 2022, pp. 232–238. (In Russian).

## Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2023 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>).