

ISSN 1999-4125 (Print)

ISSN 2949-0642 (Online)

**ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ
ENGINEERING TECHNOLOGY**

Научная статья

УДК 621.923

DOI: 10.26730/1999-4125-2026-3-5-14

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ СИЛ РЕЗАНИЯ ПРИ ГЛУБИННОМ ШЛИФОВАНИИ
ПРОФИЛЬНЫМИ АЛМАЗНЫМИ КРУГАМИ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ТВЕРДЫХ
СПЛАВОВ****Зверовщиков Александр Евгеньевич, Кошелева Юлия Николаевна *,
Зверовщиков Владимир Зиновьевич, Зверовщикова Наталья Васильевна**

Пензенский государственный университет

* для корреспонденции: j231@mail.ru

**Информация о статье**

Поступила:

09 февраля 2026 г.

Одобрена после

рецензирования:

15 июня 2026 г.

Принята к публикации:

01 июля 2026 г.

Ключевые слова:

Глубинное шлифование
профильными алмазными
кругами, сила резания,
толщина слоя, срезаемая
единичным зерном, скорость
подачи детали, теория линий
скольжения

Аннотация.

Сложнопрофильные изделия из твердых сплавов находят достаточно широкое применение в современном машиностроении. Одним из методов обработки таких изделий, показывающим высокую производительность и одновременно обеспечивающим высокую размерную точность сложного профиля, а также достижение заданного качества поверхностного слоя, является глубинное шлифование профильными алмазными кругами. Процесс глубинного шлифования сопровождается повышенными температурами в зоне обработки, что может привести к возникновению таких дефектов, как прижоги и микротрещины. Основным фактором, оказывающим влияние на теплообразование в зоне шлифования, являются силы резания. Для расчета силы резания применена теория линий скольжения. Разработана аналитическая формула для расчета толщины среза единичным зерном. Предложена методика определения площади контакта профилированного шлифовального круга с изделием на основе дискретизации профиля. Установлена связь режимов резания с силой резания. Построены зависимости толщины срезаемого единичным зерном слоя и сил резания при алмазном шлифовании от технологических режимов. Рассчитаны толщина срезаемого единичным зерном слоя и силы резания для рекомендованных режимов обработки твердосплавной концевой фрезы. Предлагаемая методика позволяет при расчете сил резания для глубинного алмазного шлифования учесть геометрию и число режущих зерен, физико-механические свойства шлифуемого материала, параметры и режимы резания. Это является предпосылкой для расчета температур или плотности теплового потока. На основе полученных результатов можно разработать систему управления процессом глубинного шлифования профильными алмазными кругами, в качестве управляющих факторов в которой будут выступать режимы шлифования.

Для цитирования: Зверовщиков А.Е., Кошелева Ю.Н., Зверовщиков В.З., Зверовщикова Н.В. Определение сил резания при глубинном шлифовании профильными алмазными кругами изделий из твердых сплавов// Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2026. № 3 (175). С. 5-14. DOI: 10.26730/1999-4125-2026-3-5-14, EDN: YGMCZK

Благодарности. Работа выполнена в рамках Федерального проекта «Наука и кадры для производства средств производства и автоматизации» при выполнении ПНИ «Исследование процесса формирования

поверхностного слоя из карбида вольфрама на металлических деталях и разработка метода обеспечения высокого ресурса нагруженных деталей и упрочнения режущего инструмента для производства высоконагруженных элементов конструкций» (FSGE-2026-0026)

Введение

Сложнопрофильные изделия из твердых сплавов находят достаточно широкое применение в современном машиностроении. Одним из методов обработки таких изделий, показывающих высокую производительность [1, 2, 3] и одновременно обеспечивающих высокую размерную точность сложного профиля [1, 2, 4], а также достижение заданного качества поверхностного слоя [5, 6], является глубинное шлифование профильными алмазными кругами. Данный метод используется для изготовления стержневого твердосплавного режущего инструмента – концевых фрез, термосверл, а также при производстве изделий медицинского назначения из твердых сплавов, таких как наконечники пинцетов, успешно заменяет операцию протягивания елочного хвостовика турбинных лопаток, а в некоторых случаях данный метод является единственным технологически приемлемым методом обработки, например при вышлифовке канавок

сложного профиля на поверхности твердосплавной концевой фрезы для черновой обработки (Рис. 1).

Однако процесс глубинного шлифования сопровождается повышенными температурами в зоне обработки [5, 6, 7], что может привести к возникновению таких дефектов, как прижоги и микротрещины.

Недостаточность результатов исследований в области профильного шлифования твердых сплавов сдерживает развитие и удешевление производства упомянутых выше объектов.

Методы

Для того, чтобы избежать возникновения дефектов поверхностного слоя шлифуемых изделий, необходимо контролировать тепловыделение в зоне обработки. Для этого нужно установить взаимосвязь температур и сил резания с режимами шлифования.

Основным фактором, оказывающим влияние на теплообразование в зоне шлифования, являются силы резания.

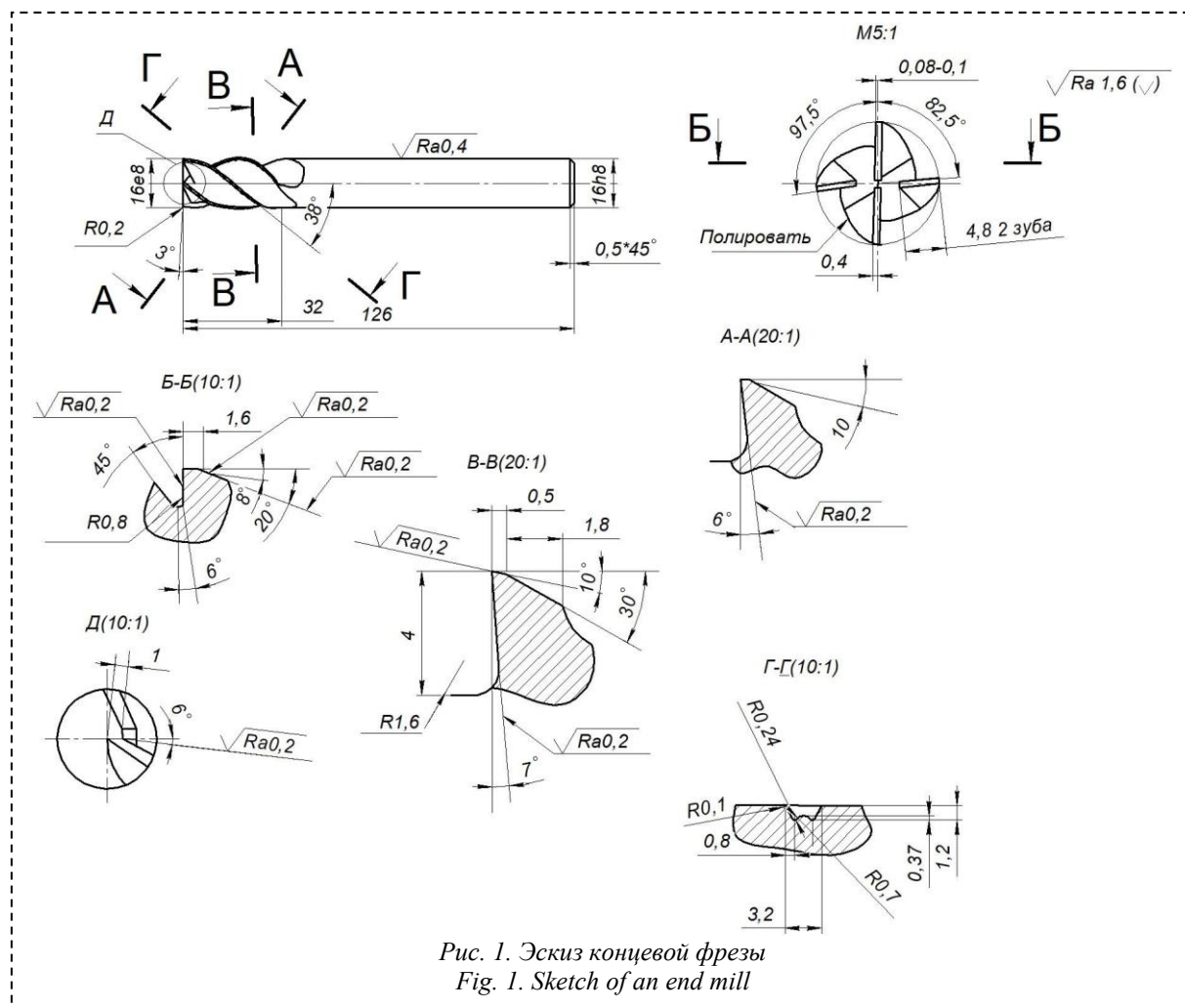


Рис. 1. Эскиз концевой фрезы
Fig. 1. Sketch of an end mill

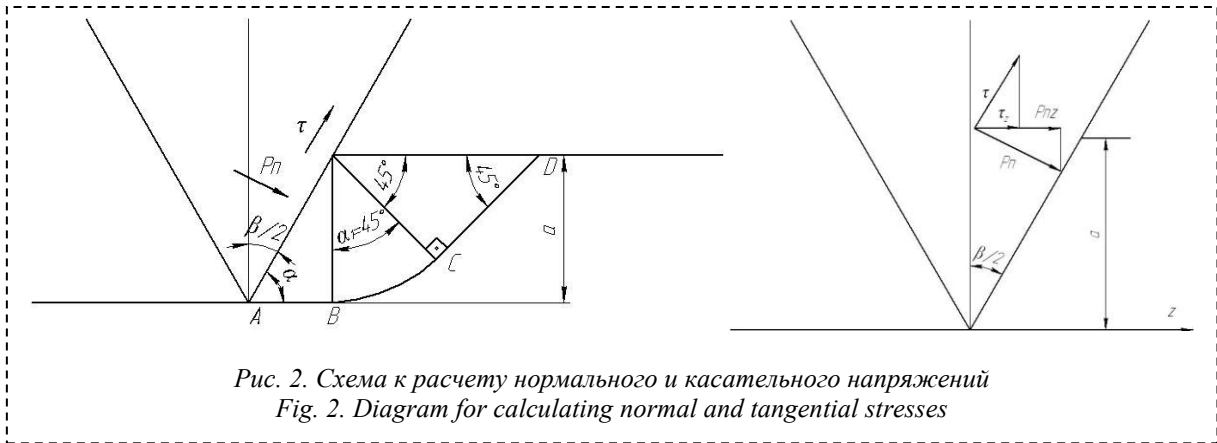


Рис. 2. Схема к расчету нормального и касательного напряжений
Fig. 2. Diagram for calculating normal and tangential stresses

Для расчета тангенциальной составляющей силы резания найдем силу резания, приходящуюся на одно режущее зерно.

Для исследования процесса резания единичным зерном применена теория линий скольжения [8]. Данная теория ранее не применялась для процесса диспергирования при шлифовании.

Согласно теории линий скольжения для отделения слоя материала по линии скольжения ABCD к режущему зерну (Рис. 2) нужно приложить нормальное p_n и касательное τ напряжения.

Нормальное и касательное напряжения для поля линий скольжения можно определить по формулам (плоское напряженно-деформированное состояние) [9]:

$$p_n = 2k_{сд}(0,5 + \frac{\pi}{4} + 0,5 \sin 2\alpha\epsilon), \quad (1)$$

$$\tau = k_{сд} \cos 2\alpha\epsilon, \quad (2)$$

где $k_{сд} = \sigma_T/2$ – постоянная сдвига материала, МПа;
 σ_T – предел текучести (для твердого сплава σ_T принимается равным пределу прочности на растяжение σ_B), МПа;

$$\alpha_B = 90^\circ - \beta/2;$$

β – угол при вершине зерна.

Напряжения p_n и τ зависят от геометрии режущих зерен, а также от толщины слоя, снимаемого единичным зерном a_z .

Для определения тангенциальной составляющей силы резания P_{z1} на единичном зерне найдем сумму двух векторов p_n и τ (Рис. 2):

$$p_\Sigma = p_{nz} + \tau_z = p_n \cos \beta/2 + \tau_z \cos(90^\circ - \beta/2). \quad (3)$$

Силу резания единичным зерном P_{z1} можно найти по формуле:

$$P_{z1} = p_\Sigma S_a, \quad (4)$$

где S_a – площадь контакта зерна с материалом, которая зависит от геометрии зерна и от a_z , мм²;

$$S_a = a_z^2 \tan \beta/2. \quad (5)$$

Толщина среза, приходящаяся на одно режущее зерно, в свою очередь может быть найдена по следующей зависимости [10]:

$$a_z = 2000 \frac{\alpha_z^{0,37} (1-\epsilon)^{0,25} \bar{x}}{(tg \frac{\beta}{2})^{0,25} K^{0,25}} \left(\frac{\omega}{1000 V_{кр}} \right)^{0,25}, \quad (6)$$

где α_z – коэффициент формы зерна;

K – концентрация алмазного порошка;

$V_{кр}$ – скорость шлифовального круга, м/с;

$\bar{x}$ – средний размер зерна, мкм;

ϵ – критическое значение доли зерна, находящейся в связке;

ω – удельная производительность шлифования, определяемая как [10]:

$$\omega = \frac{1000}{60} V_u \sqrt{\frac{t}{D_k}}, \quad (7)$$

где t – глубина шлифования, мм;

V_u – скорость подачи изделия, м/мин;

D_k – диаметр шлифовального круга, мм.

Средний размер зерна определяется следующим образом [11]:

$$\bar{x} = 0,5(h_B + h_N)\eta, \quad (8)$$

где h_B – размер ячейки верхнего сита в свету, мкм;

h_N – размер ячейки нижнего сита в свету, мкм;

η – поправочный коэффициент на размер зерна.

Критическое значение доли зерна, находящейся в связке, определяется по формуле [10]:

$$\epsilon = \frac{\bar{x} - h_{зmax}}{\bar{x}}, \quad (9)$$

где $h_{зmax}$ – максимальная высота выступания зерен, мкм [9]:

$$h_{зmax} = C_h \cdot (1 + \bar{x})^{x_h}, \quad (10)$$

где C_h и x_h – постоянные коэффициенты, зависящие от типа связки.

Параметр a_z зависит от геометрии зерна и от режимов шлифования. Для глубинного шлифования a_z , рассчитанная по формуле (6), составляет 1...3,5 мкм, что соответствует данным, полученным другими исследователями [12].

Тангенциальную составляющую силы резания P_z можно найти следующим образом:

$$P_z = P_{z1} n_d, \quad (11)$$

где n_d – число режущих зерен на площади контакта профильного шлифовального круга с обрабатываемой поверхностью;

$$n_d = Rsn_1 S_{дк}, \quad (12)$$

где n_1 – число зерен, приходящееся на 1 мм² алмазоносного слоя круга [13];

Rs – коэффициент, определяющий, сколько зерен участвует в процессе резания;

$$Rs=0.11 \quad [10].$$

$S_{\text{дк}}$ – площадь контакта круга с изделием, для профильного круга, мм².

Ключевой задачей для профильного шлифования является определение $S_{\text{дк}}$. Сложность задачи обусловлена тем, что профиль круга может быть разным.

В общем виде данная задача сводится к вычислению площади сегмента тела вращения (Рис. 3), образованного вращением кривой заданной функцией $f(x)$ вокруг оси x .

Функция $f(x)$ описывает кривую профиля шлифовального круга. В простейшем случае плоского шлифования эта функция $x=\text{const}$. При шлифовании канавки с радиусным профилем это функция второго порядка. В случае сложных специальных профилей их можно описать либо функциями экспоненты, логарифмическими, рядами Фурье либо вэйвлетами [14]. В сложных случаях можно прибегнуть к дискретизации профиля, например, участками фиксированной ширины (аппроксимированными дугами или

линиями).

Опираясь на Рис. 4 и 5, можно записать формулу для расчета $S_{\text{дк}}$ в общем виде:

$$S_{\text{дк}} = \frac{\pi}{180} \arccos\left(\frac{D_{\text{max}}/2 - t_{\text{max}}}{D_{\text{max}}/2}\right) \cdot \int_a^b f(x) \cdot \sqrt{1 + (f'(x))^2} dx \quad (13)$$

С помощью формулы 13 можно вычислить $S_{\text{дк}}$ для профиля круга любой сложности. Однако в зависимости от функции $f(x)$ вычисления могут быть достаточно трудоемкими. В связи с этим предложено разбить шлифовальный круг на дискретные круги B_i и считать, что данные круги имеют плоский профиль.

Тогда $S_{\text{дк}}$ можно рассчитать как:

$$S_{\text{дк}} = \sqrt{D_k \cdot t} \cdot \sum_{i=1}^n B_i, \quad (14)$$

где D_k – диаметр круга, мм;

t – глубина шлифования, мм,

n – число кругов единичной ширины.

Результаты

По технологическим режимам шлифования и характеристикам круга были рассчитаны значения a_z и P_z и построены графические

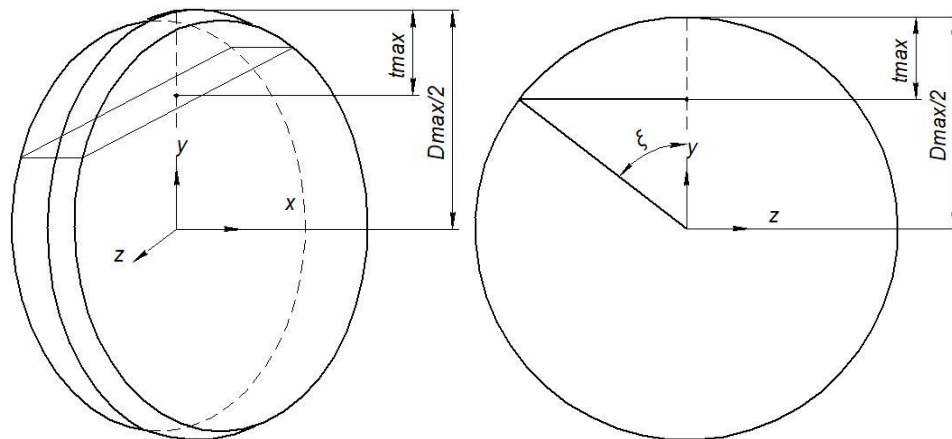


Рис. 3. К расчету площади контакта круга с изделием
Fig. 3. Calculation of the contact area between the circle and the product

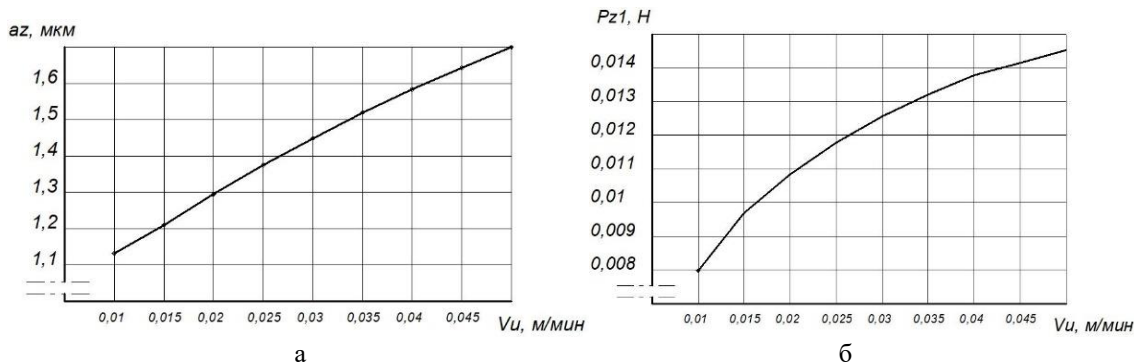


Рис. 4. Характеристики процесса алмазного шлифования: а – влияние скорости подачи детали на толщину среза единичным зерном, б – зависимость тангенциальной составляющей силы резания единичным зерном от скорости подачи детали (при $V_{кр}=35$ м/с, $t=3$ мм, круг AC6, M1, 200/160)

Fig. 4. Characteristics of the diamond grinding process: а – effect of part feed rate on the thickness of a single grain cut, б – dependence of the tangential component of the cutting force of the single grain on the feed rate of the workpiece (at $V_{kr}=35$ m/s, $t=3$ mm, AC6, M1, 200/160)

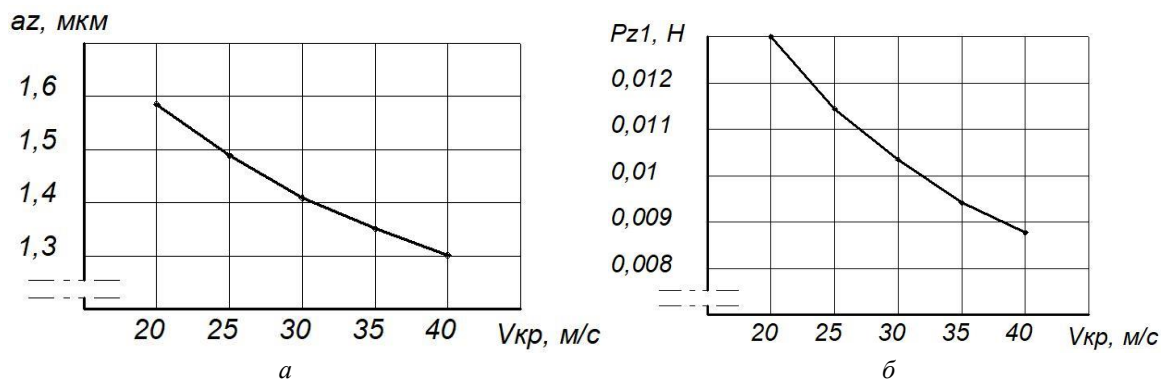


Рис. 5. Характеристики процесса алмазного шлифования: а – влияние скорости круга на толщину среза единичным зерном, б – зависимость тангенциальной составляющей силы резания единичным зерном от скорости круга (при $V_u=0,02$ м/мин, $t=3$ мм, круг AC6, M1, 200/160)

Fig. 5. Characteristics of the diamond grinding process: а – the effect of the circle speed on the thickness of a single grain cut, б – dependence of the tangential component of the cutting force of the single grain on the speed of the wheel (at $V_u=0.02$ m/min, $t=3$ mm, AC6, M1, 200/160)

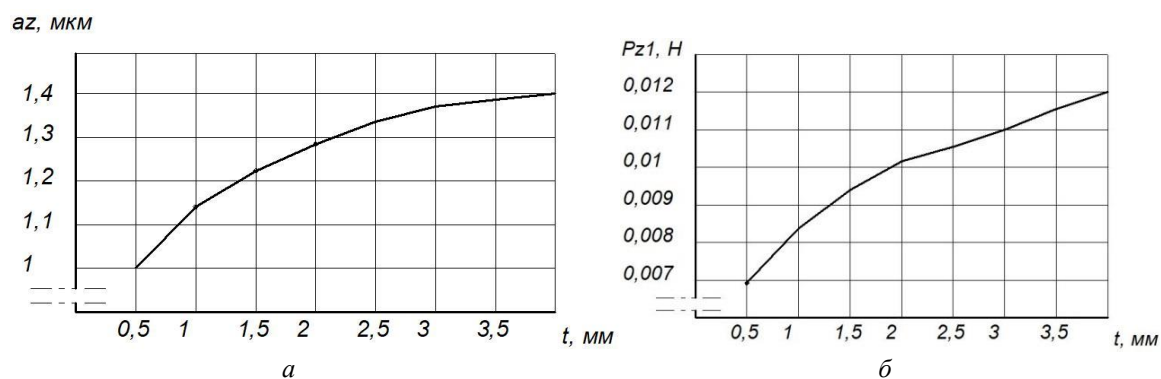


Рис. 6. Характеристики процесса алмазного шлифования: а – влияние глубины шлифования на толщину среза единичным зерном, б – зависимость тангенциальной составляющей суммарной силы резания по профилю от глубины шлифования (при $V_{кр}=35$ м/с, $V_u=0,02$ м/мин, круг AC6, M1, 200/160)

Fig. 6. Characteristics of the diamond grinding process: а – The effect of grinding depth on the thickness of a single grain cut, б – dependence of the tangential component of the total cutting force on the grinding depth (at $V_{кр}=35$ m/s, $V_u=0.02$ m/min, AC6, M1, 200/160)

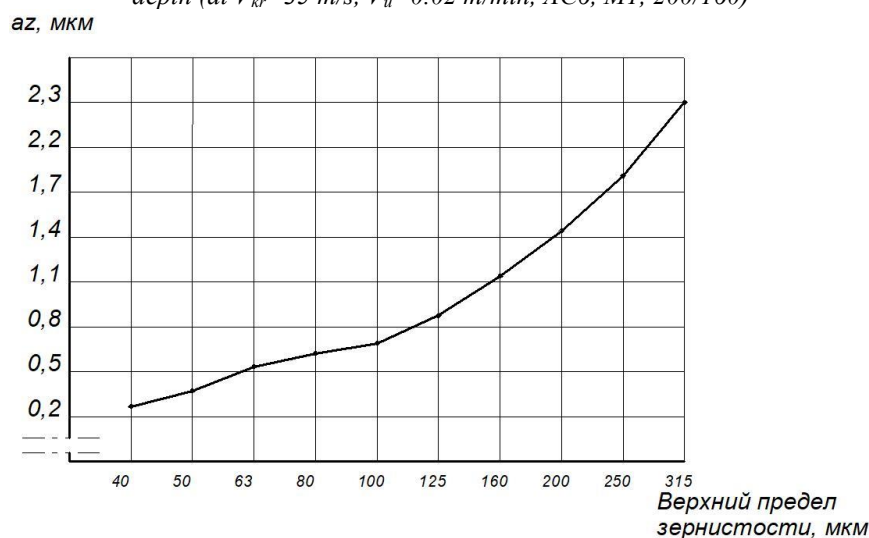


Рис. 7. Зависимость толщины среза единичным зерном от зернистости алмазного порошка (при $V_{кр}=35$ м/с, $V_u=0,02$ м/мин, $t=3$ мм, круг AC6, M1, 200/160)

Fig. 7. Dependence of the thickness of a single grain cut on the grain size of the diamond powder (at $V_{кр}=35$ m/s, $V_u=0.02$ m/min, $t=3$ mm, AC6, M1, 200/160)

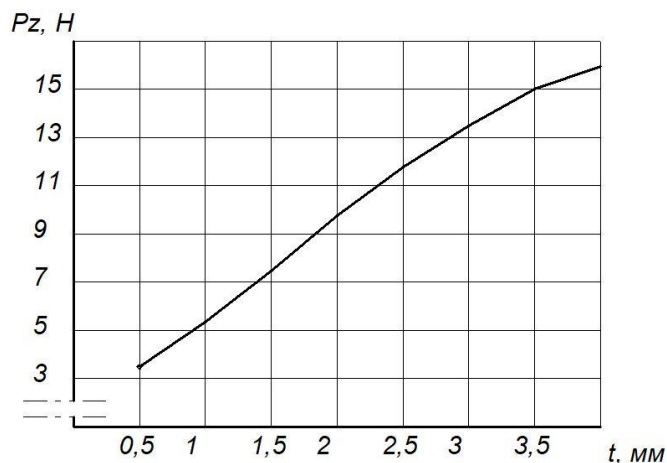


Рис. 8. Зависимость тангенциальной составляющей суммарной силы резания по профилю от глубины шлифования (при $V_{кр}=35$ м/с, $V_u=0.02$ м/мин, профиль шириной 10 мм, круг AC6, M1, 200/160)

Fig. 8. Dependence of the tangential component of the total cutting force on the profile from the depth of grinding (at $V_{кр}=35$ m/s, $V_u=0.02$ m/min, profile width 10 mm, AC6, M1, 200/160)

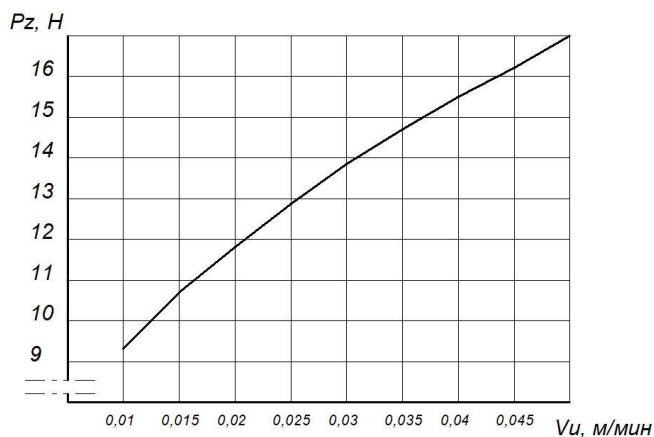


Рис. 9. Зависимость тангенциальной составляющей суммарной силы резания от скорости подачи детали (при $V_{кр}=35$ м/с, $t=3$ мм, профиль шириной 10 мм, круг AC6, M1, 200/160)

Fig. 9. Dependence of the tangential component of the total cutting force on the feed rate of the workpiece (at $V_{кр}=35$ m/s, $t=3$ mm, profile width 10 mm, AC6, M1, 200/160)

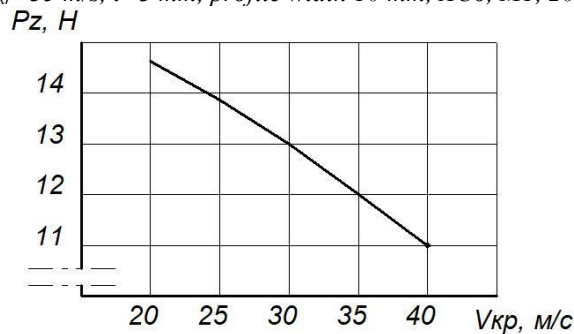


Рис. 10. Зависимость тангенциальной составляющей суммарной силы резания от скорости круга (при $V_u=0.02$ м/мин, $t=3$ мм, профиль шириной 10 мм, круг AC6, M1, 200/160)

Fig. 10. Dependence of the tangential component of the total cutting force on the speed of the wheel (at $V_u=0.02$ m/min, $t=3$ mm, profile width 10 mm, AC6, M1, 200/160)

зависимости силы резания и средней толщины слоя, снимаемого единичным зерном, а также силы резания на полном профиле от глубины шлифования, скорости подачи детали и скорости круга (Рис. 4–10).

Из графиков видно, что с увеличением глубины шлифования и скорости подачи детали

и толщина слоя, приходящегося на одно режущее зерно, и сила резания увеличиваются, а с увеличением скорости круга и a_z и P_z снижаются. С увеличением зернистости алмазного порошка a_z увеличивается.

Для шлифования фасонных канавок на поверхности твердосплавной концевой фрезы из

БК8 (Рис. 1) алмазным профильным кругом (марка алмазов АС6, зернистость 100/80, концентрация алмазов в алмазоносном слое 100%, связка М1, наибольший диаметр круга $D_k=152,4$ мм, ширина круга $B=7,22$ мм, максимальная глубина шлифования $t=2,45$ мм, скорость круга $V_{кр}=35$ м/с, скорость подачи детали $V_u=0,025$ м/мин, профиль круга соответствует профилю фасонной канавки фрезы) выполнен расчет толщины слоя, снимаемого единичным зерном, силы резания и контактной температуры T шлифования по методике [15]. Полученные результаты: $a_z=0,879$ мкм, $P_{z1}=0,006$ Н, $P_z=4,838$ Н, $T=513^\circ\text{C}$.

Выводы

Данная методика позволяет при расчете сил резания для глубинного алмазного шлифования учесть геометрию и число режущих зерен, физико-механические свойства шлифуемого материала, параметры и режимы резания. Расчет сил резания позволяет перейти к расчету температур и плотности теплового потока. Также методика позволяет на основе полученных результатов разработать систему прогнозирования результатов и управления процессом глубинного шлифования профильными алмазными кругами, в качестве входных факторов в которой будут выступать режимы шлифования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абдулгасис Д. У., Абдулгасис У. А., Братан С. М. Оценка целесообразности применения алмазных шлифовальных кругов для обработки твердых сплавов в режиме глубинного шлифования // Ученые записки Крымского инженерно-педагогического университета. 2022. № 3(77). С. 123–128.
2. Коряжкин А. А., Носенко С. В., Носенко В. А. Повышение эффективности обработки рабочих лопаток компрессора из титанового сплава методом многокоординатного глубинного шлифования // Известия Волгоградского государственного технического университета. Учредители: Волгоградский государственный технический университет. 2019. №1(224). С. 17–21.
3. Batako A. D. L., Morgan M. N., Rowe B. W. High efficiency deep grinding with very high removal rates // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2013. Vol. 66. № 9. С. 1367–1377.
4. Makarov V. F., Kirchanov V. P., Popov A. N. The choice of grinding wheels for deep grinding of turbine blades // Technical Paper – Society of Manufacturing Engineers. ISAAT 2007. Dearborn, MI. 2007.
5. Сипайлов В. А. Тепловые процессы при шлифовании и управление качеством поверхности. М. : Машиностроение, 1978. 167 с.
6. Безязычный В. Ф., Голованов Д. С. Качество поверхностного слоя деталей из титановых сплавов при глубинном шлифовании // Вестник РГТА имени П.А. Соловьева. 2017. № 3(42). С. 65–69.
7. Zhukov E. L., Kozar I. I., Olodyazhniy D. Y. Problems of ensuring quality of a surface layer when producing components from hard-to-process heat resistant alloys // Acta Metallurgica Slovaca. 2016. Vol. 22. № 2. Pp. 128–132.
8. Гречников Ф. В., Каргин В. Р. Теория пластического деформирования металлов. Самара : Издательство Самарского университета, 2021. 448 с.
9. Кожевникова Г. В. Теория и практика поперечно-клиновой прокатки. Минск : Беларус. навука, 2010. 291 с.
10. Абразивная и алмазная обработка материалов. Справочник. Под ред. А. Н. Резникова. М. : Машиностроение, 1978. 391 с.
11. Соколов В. О. Комплексное обеспечение точности профильной алмазно-абразивной обработки : дис. доктора технических наук. Саратов, 2000. 397 с.
12. Силин С. С., Хрульков В. А., Лобанов А. В., Рыкунов Н. С. Глубинное шлифование деталей из труднообрабатываемых материалов. М. : Машиностроение, 1984. 64 с.
13. Бакуль В. Н. Число зерен в одном карате – одна из важнейших характеристик алмазного порошка // Синтетические алмазы. 1976. Вып. 4. С. 22–27.
14. Смоленцев Н. К. Основы теории вейвлетов. Вейвлеты в MathLab. 5 издание, ДМК Пресс, 2019. 560 с.
15. Соколов В. О., Кошелева Ю. Н. О моделировании тепловых процессов при глубинном шлифовании.- Системы проектирования, моделирования, подготовки производства и управление проектами CAD/CAM/CAE/PDM: сборник статей II Международной научно-практической конференции. Пенза : Приволжский дом знаний, 2008. С. 70–72.

© 2026 Авторы. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Об авторах:

Зверовщиков Александр Евгеньевич – доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой технологии и оборудования машиностроения, ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет», 440026, Российская Федерация, г. Пенза, ул. Красная, д. 40, e-mail: azwer@mail.ru

Кошелева Юлия Николаевна – специалист по учебно-методической работе 1 категории Учебно-методического управления. ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет», 440026, Российская Федерация, г. Пенза, ул. Красная, д. 40, e-mail: j231@mail.ru

Зверовщиков Владимир Зиновьевич – доктор технических наук, профессор кафедры технологии и оборудования машиностроения, ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет», 440026, Российская Федерация, г. Пенза, ул. Красная, д. 40, e-mail: tmspgu@mail.ru

Зверовщикова Наталья Васильевна – кандидат технических наук, доцент кафедры высшей и прикладной математики, ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет», 440026, Российская Федерация, г. Пенза, ул. Красная, д. 40.

Заявленный вклад авторов:

Зверовщиков Александр Евгеньевич – постановка исследовательской цели, задач, обзор соответствующей литературы, проведение исследования, сбор и анализ данных, написание текста, обработка и обсуждение результатов эксперимента, выводы.

Кошелева Юлия Николаевна – постановка исследовательской цели, задач, обзор соответствующей литературы, проведение исследования, сбор и анализ данных, написание текста, обработка и обсуждение результатов эксперимента, выводы.

Зверовщиков Владимир Зиновьевич – постановка исследовательской цели, задач, обзор соответствующей литературы, проведение исследования, сбор и анализ данных, написание текста, обработка и обсуждение результатов эксперимента, выводы.

Зверовщикова Наталья Васильевна – постановка исследовательской цели, задач, обзор соответствующей литературы, проведение исследования, сбор и анализ данных, написание текста, обработка и обсуждение результатов эксперимента, выводы.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Original article**DETERMINATION OF CUTTING FORCES DURING DEEP GRINDING OF HARD ALLOY PRODUCTS WITH PROFILE DIAMOND WHEELS**

Alexander E. Zverovshchikov, Julia N. Kosheleva*,
Vladimir Z. Zverovshchikov, Natalia V. Zverovshchikova

Penza State University

* for correspondence: j231@mail.ru

**Article info**

Received:

09 February 2026

Accepted for publication:

15 June 2026

Accepted:

01 July 2026

Keywords: Deep grinding with profile diamond wheels, cutting force, layer thickness, single

Abstract.

Complex-shaped products made of hard alloys are widely used in modern mechanical engineering. One of the methods for processing such products, which provides high productivity while ensuring high dimensional accuracy of the complex profile and achieving the desired surface quality, is deep grinding with profile diamond wheels. The deep grinding process is accompanied by increased temperatures in the processing area, which can lead to defects such as burns and microcracks. The main factor affecting heat generation in the grinding zone is the cutting force. The theory of sliding lines is used to calculate the cutting force. An analytical formula has been developed to calculate the thickness of a single grain cut. A method has been proposed for determining the contact area between a profiled grinding wheel and a workpiece based on the discretization of the profile. The relationship between cutting modes and the cutting force has been established. The thickness of a single grain cut layer and the cutting forces during diamond grinding have been plotted as a function of the technological modes. The thickness of the layer cut by a single grain and the cutting forces for the

grain cutting, part feed speed, and sliding line theory

recommended processing modes of a solid-carbide end mill are calculated. The proposed method allows for the calculation of cutting forces for deep diamond grinding, taking into account the geometry and number of cutting grains, the physical and mechanical properties of the material being ground, and the parameters and modes of cutting. This is a prerequisite for calculating temperatures or heat flux density. Based on the results obtained, it is possible to develop a control system for deep grinding with profile diamond wheels, where the grinding modes will serve as the control factors.

For citation: Zverovshchikov A.E., Kosheleva J.N., Zverovshchikov V.Z., Zverovshchikova N.V. Determination of cutting forces during deep grinding of hard alloy products with profile diamond wheels. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*=Bulletin of the Kuzbass State Technical University. 2026; 3(175):5-14. (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1999-4125-2026-3-5-14, EDN: YGMCZK

Acknowledgements. The work was carried out as part of the Federal Project "Science and Personnel for the Production of Means of Production and Automation" during the implementation of the Research Project "Study of the Process of Forming a Surface Layer of Tungsten Carbide on Metal Parts and Development of a Method for Ensuring a High Resource of Loaded Parts and Hardening of Cutting Tools for the Production of Highly Loaded Structural Elements" (FSGE-2026-0026).

REFERENCES

1. Abdulgazis D.U., Abdulgazis U.A., Bratan S.M. Assessment of the feasibility of using diamond grinding wheels for processing hard alloys in deep grinding mode. *Scientific Notes of the Crimean Engineering and Pedagogical University*. 2022; 3(77):123-128.
2. Koryazhkin A.A., Nosenko S.V., Nosenko V.A. Increasing the efficiency of processing compressor blades made of titanium alloy using multi-coordinate deep grinding. *Izvestiya of Volgograd State Technical University. Founders: Volgograd State Technical University*. 2019; 1(224):17-21.
3. Batako A.D.L., Morgan M.N., Rowe B.W. High efficiency deep grinding with very high removal rates. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2013; 66(9):1367-1377.
4. Makarov V.F., Kirchanov V.P., Popov A.N. The choice of grinding wheels for deep grinding of turbine blades. *Technical Paper – Society of Manufacturing Engineers. ISAAT 2007*. Dearborn, MI. 2007.
5. Sipaylov V.A. Thermal processes during grinding and surface quality control. M.: Mechanical Engineering; 1978. 167p.
6. Bezyazychny V.F., Golovanov D.S. Quality of the surface layer of parts from titanium alloys during deep grinding. *Bulletin of the P.A. Solovyov RGTA*. 2017; 3(42):65-69.
7. Zhukov E.L., Kozar I.I., Olodyazhniy D.Y. Problems of ensuring quality of a surface layer when producing components from hard-to-process heat resistant alloys. *Acta Metallurgica Slovaca*. 2016; 22(2):128-132.
8. Grechnikov F.V., Kargin V.R. Theory of Plastic Deformation of Metals. Samara: Publishing House of Samara University; 2021. 448 p.
9. Kozhevnikova G.V. Theory and Practice of Transverse Wedge Rolling.-Minsk:Belarus.navuka, 2010.-291 p. Kozhevnikova G.V. Solution of the Sheet Bending Problem by the Method of Sliding Line Fields. *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Series of Physical and Technical Sciences*. 2018; 63(1):416-423.
10. Abrasive and Diamond Processing of Materials. Handbook. Edited by A.N. Reznikov. Moscow: Mashinostroenie; 1978. 391 p.
11. Sokolov V.O. Complex Ensuring the Precision of Profile Diamond-Abrasive Processing: Dis. Doctor of Technical Sciences. Saratov, 2000. 397 p.
12. Silin S.S., Khrulkov V.A., Lobanov A.V., Rykunov N.S. Deep Grinding of Parts from Hard-to-Machine Materials. M.: Mechanical Engineering; 1984. 64 p.
13. Bakul V.N. The number of grains per carat is one of the most important characteristics of diamond powder. *Synthetic Diamonds*. 1976; 4:22-27.
14. Smolentsev N.K. Fundamentals of Wavelet Theory. Wavelets in MathLab. 5th edition, DMK Press. 2019. 560 p.
15. Sokolov V.O., Kosheleva Yu.N. On Modeling of Thermal Processes in Deep Grinding.-CAD/CAM/CAE/PDM Systems for Design, Modeling, Production Preparation, and Project Management: Collection of Articles from the II International Scientific and Practical Conference. Penza: Privolzhsky House of Knowledge; 2008. Pp. 70-72.

© 2026 The Authors. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

The authors declare no conflict of interest.

About the authors:

Alexander E. Zverovshchikov– Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Technologies and Equipment for Mechanical Engineering, Penza State University, 440026, Russian Federation, Penza, Krasnaya Street, 40, e-mail: azwer@mail.ru

Julia N. Kosheleva– is a specialist in educational and methodological work of the 1st category at the Educational and Methodological Department, Penza State University, 440026, Russian Federation, Penza, Krasnaya Street, 40, e-mail: j231@mail.ru

Vladimir Z. Zverovshchikov– Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Technologies and Equipment for Mechanical Engineering, Penza State University, 440026, Russian Federation, Penza, Krasnaya Street, 40, e-mail: tmspgu@mail.ru

Natalia V. Zverovshchikova– Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Higher and Applied Mathematics. Penza State University, 440026 Russian Federation, Penza, Krasnaya str., 40

Contribution of the authors:

Alexander E. Zverovshchikov – setting a research goal, assignment, reviewing relevant literature, conducting research, collecting and analyzing data, writing text, processing and discussing experimental results, conclusions

Julia N. Kosheleva – setting a research goal, assignment, reviewing relevant literature, conducting research, collecting and analyzing data, writing text, processing and discussing experimental results, conclusions

Vladimir Z. Zverovshchikov – setting a research goal, assignment, reviewing relevant literature, conducting research, collecting and analyzing data, writing text, processing and discussing experimental results, conclusions

Natalia V. Zverovshchikova – setting a research goal, assignment, reviewing relevant literature, conducting research, collecting and analyzing data, writing text, processing and discussing experimental results, conclusions

All authors have read and approved the final manuscript.

