

МАШИНОСТРОЕНИЕ

Научная статья

УДК 621.923

EDN: WBHBJM

DOI: 10.21285/1814-3520-2026-2-196-207



Определение коэффициента конвективной теплоотдачи смазочно-охлаждающей жидкости при глубинном алмазном шлифовании твердосплавных изделий

А.Е. Зверовщиков^{1✉}, В.З. Зверовщиков², Ю.Н. Кошелева³

¹⁻³Пензенский государственный университет, Пенза, Российская Федерация

Резюме. Цель – определение коэффициента конвективной теплоотдачи между твердым сплавом и смазочно-охлаждающей жидкостью для оценки ее влияния на тепловые процессы при конечно-элементном моделировании процесса глубинного шлифования твердосплавных изделий профильными алмазными кругами. Объектом исследований являлся процесс теплопередачи от втулки из твердых сплавов Т15К6 и ВК8 размерами: наружный диаметр – 24 мм, внутренний диаметр – 17 мм, длина – 36 мм. В качестве смазочно-охлаждающей жидкости использовался 3 %-й раствор Na_2CO_3 в температуре жидкости до 373 К, источника тепла – до 603 К. Моделирование процесса глубинного шлифования на основе полученных экспериментальных данных проводилось методом конечных элементов в SolidWorks Simulation 2015. Авторами разработана методика экспериментального определения коэффициента конвективной теплоотдачи смазочно-охлаждающей жидкости в зоне обработки при профильном глубинном алмазном шлифовании изделий сложных конфигураций из изученных твердых сплавов. Данная методика позволяет определить данный коэффициент с удовлетворительной сходимостью относительно теоретических расчетов (10,49 %). Предложены формулы для расчета коэффициента конвективной теплоотдачи по экспериментальным данным. Значения коэффициента составили для сплава Т15К6 $250,17 \pm 4,42 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{К})$, для сплава ВК8 – $250,61 \pm 4,11 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{К})$ соответственно. Спроектирован стенд, предназначенный для экспериментального определения коэффициента конвективной теплоотдачи между конструкционными или инструментальными материалами и смазочно-охлаждающей жидкостью. Результаты моделирования температурных полей при профильном шлифовании показали, что применение смазочно-охлаждающей жидкости снижает теплонапряженность процесса шлифования на 30 %. Используя предложенную методику, можно достаточно точно определить коэффициент конвективной теплоотдачи для охлаждения твердого сплава в заданной среде (смазочно-охлаждающей жидкости) и использовать полученные данные для моделирования тепловых процессов методом конечных элементов при технологии шлифования с учетом конвективного теплообмена.

Ключевые слова: глубинное профильное алмазное шлифование, твердый сплав, коэффициент конвективной теплоотдачи, смазочно-охлаждающая жидкость, контактная температура

Финансирование. 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).

Для цитирования: Зверовщиков А.Е., Зверовщиков В.З., Кошелева Ю.Н. Определение коэффициента конвективной теплоотдачи смазочно-охлаждающей жидкости при глубинном алмазном шлифовании твердосплавных изделий // iPolytech Journal. 2026. Т. 30. № 2. С. 196–207. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2026-2-196-207>. EDN: WBHBJM.

MECHANICAL ENGINEERING

Original article

Determining the convective heat transfer coefficient of cutting fluid in deep diamond grinding of cemented carbide workpieces

Aleksandr E. Zverovshchikov^{1✉}, Vladimir Z. Zverovshchikov²,
Yulia N. Kosheleva³

¹⁻³Penza State University, Penza, Russian Federation

Abstract. The study aims to determine the coefficient of convective heat transfer between a cemented carbide and a cutting fluid to assess its impact on thermal processes during deep grinding with profiled diamond wheels using

© Зверовщиков А.Е., Зверовщиков В.З., Кошелева Ю.Н., 2026

the finite element method. This research analyzed heat transfer from a sleeve made of T15K6 and VK8 cemented carbides with the following dimensions: outer diameter of 24 mm, inner diameter of 17 mm, and length of 36 mm. A 3 % Na_2CO_3 solution was used as the cutting fluid; the experiments were conducted at a fluid temperature of up to 373 K and a heat source temperature of up to 603 K. Drawing on the obtained experimental data, the deep grinding process was simulated via the finite element method in SolidWorks Simulation 2015. The authors developed an experimental methodology to determine the convective heat transfer coefficient of cutting fluid within the machining zone during deep profiled diamond grinding of complex-shaped cemented carbide workpieces. This procedure provides a means to determine the coefficient with satisfactory agreement with theoretical calculations (10.49 %). Formulas are proposed for calculating the convective heat transfer coefficient from experimental data. The coefficient values obtained were $250.17 \pm 4.42 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ for T15K6 and $250.61 \pm 4.11 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ for VK8, respectively. A test bench was designed for the experimental determination of the convective heat transfer coefficient between structural or tool materials and a cutting fluid. The simulation of temperature fields during profiled grinding revealed that the use of a cutting fluid reduces the thermal stress of the grinding process by 30 %. The proposed method enables reasonably accurate determination of the convective heat transfer coefficient for cooling a cemented carbide in a given medium (cutting fluid) and allows the resulting data to be used for finite element modeling of thermal processes during grinding, taking convective heat transfer into account.

Keywords: deep diamond grinding, hard alloy, convective heat transfer coefficient, cutting fluid, contact temperature

Funding. The work was carried out within the framework of the Federal Project "Science and Personnel for Manufacturing Means of Production and Automation" as a part of the applied research project "Research of the tungsten carbide surface layer formation process on metal parts and development of the method to ensure high durability of loaded parts and hardening of cutting tools for the production of highly loaded structural elements" (FSGE-2026-0026).

For citation: Zverovshchikov A.E., Zverovshchikov V.Z., Kosheleva Yu.N. Determining the convective heat transfer coefficient of cutting fluid in deep diamond grinding of cemented carbide workpieces. *iPolytech Journal*. 2026;30(2):196-207. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2026-2-196-207>. EDN: WBHBJM.

ВВЕДЕНИЕ

Изделия сложной конфигурации из твердых сплавов находят широкое применение в машиностроении, а также в других областях, таких как горнодобывающая промышленность и медицина. Профильное глубинное шлифование алмазными кругами является перспективным методом обработки профильных поверхностей таких изделий. Этот метод обработки позволяет повысить производительность обработки по сравнению с многопроходной схемой шлифования [1–7]. Однако глубинное шлифование по сравнению с маятниковым сопровождается повышенными температурами в зоне резания, что негативно сказывается на качестве поверхностного слоя готового изделия [4–5, 8–17]. Воздействие повышенных температур в зоне обработки может привести к возникновению дефектов поверхностного слоя изделия, таких как прижоги, макро- и микротрещины [10, 11, 18–20].

Положительное действие смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ) при шлифовании обусловлено несколькими причинами: СОЖ уменьшает работу трения путем снижения коэффициента трения, отводит тепло из зоны обработки путем конвективной теплоотдачи, обеспечивает удаление стружки из зоны шлифования [8, 13, 21–23].

Для того чтобы избежать возникновения дефектов поверхностного слоя при глубин-

ном шлифовании, необходимо знать характер распределения температурного поля в зоне обработки. Наиболее подходящим инструментом исследования тепловых процессов при шлифовании является конечно-элементное моделирование. С его помощью можно получить полную картину распределения тепловых полей в шлифуемом изделии, а также определить температурные напряжения. По результатам таких исследований можно судить о возможности появления микротрещин и других дефектов в поверхностных слоях шлифуемых изделий.

Одним из важных факторов, которые можно учесть при моделировании процесса глубинного алмазного шлифования, является влияние СОЖ на процесс обработки. Обработку по схеме глубинного шлифования рекомендовано производить с применением СОЖ, так как весь припуск снимается за один проход и тепловыделение в зоне резания может быть очень интенсивным. Известно [11, 18], что контактные температуры могут превышать 1273 К. При таких температурах использование СОЖ является необходимым условием достижения заданных качественных характеристик поверхностного слоя изделия, гарантирующего отсутствие прижогов и микротрещин. Ряд исследований [12, 18] показывает, что СОЖ позволяет снизить температуру при шлифовании на 17–30 %.

Однако для того, чтобы учесть влияние СОЖ при конечно-элементном моделировании, необходимо знать значение коэффициента конвективной теплоотдачи твердого сплава к СОЖ. Системное окно, в котором необходимо задать коэффициент конвективной теплоотдачи, изображено на рис. 1. Между тем данные по значениям коэффициентов конвективной теплоотдачи для твердых сплавов и СОЖ в открытых литературных источниках отсутствуют. Таким образом, задача определения коэффициента конвективной теплоотдачи α является актуальной для проведения конечно-элементного моделирования.

В свою очередь, коэффициент конвективной теплоотдачи зависит от физических характеристик среды, ее термодинамического состояния, условий гидродинамического потока жидкости [11, 18]. Существуют методики теоретического расчета α [11, 18]. Также возможно экспериментальным путем определить коэффициент конвективной теплоотдачи. При моделировании процесса глубинного шлифования предпочтительнее использовать данные, полученные экспериментальным путем, так как теоретические методики расчета содержат много допущений. Однако для общей оценки правильности экспериментальных исследований необходимо воспользоваться в том числе расчетными методиками.

При проведении исследования примем гипотезу, что поток СОЖ в зазоре между поверхностью круга и заготовкой имеет ламинарный характер течения, в рассматриваемом объеме отсутствует газовая составляющая. Гипотеза о ламинарном характере потока жидкости

в зазоре предложена на основании того, что приведенный эквивалентный диаметр потока будет достаточно маленьким, так как величина зазора между кругом и деталью будет определяться максимальной высотой выступания зерен, а ее величина составляет 1,5–2,5 мкм [18, 24]. Способ подачи СОЖ предложен свободно падающей струей. При таких условиях число Рейнольдса меньше своего критического значения и, следовательно, можно считать, что поток жидкости в зазоре между кругом и деталью имеет ламинарный характер течения.

Целью работы является экспериментальное определение коэффициента конвективной теплоотдачи смазочно-охлаждающей жидкости в зоне обработки при профильном глубинном алмазном шлифовании твердых сплавов Т15К6 и ВК8.

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Предлагается учесть влияние фактора СОЖ на контактную температуру используя безразмерный комплекс β , характеризующий интенсивность теплообмена [11] (1):

$$\beta = \frac{2 \cdot \alpha \cdot a}{\lambda \cdot V}, \quad (1)$$

где α – коэффициент конвективной теплоотдачи, Вт/(м²·К); a – температуропроводность материала, м²/с; λ – теплопроводность материала, Вт/(м·К); V – скорость продольной подачи изделия, м/мин.

Контактная температура с учетом действия СОЖ определится следующим образом (2):

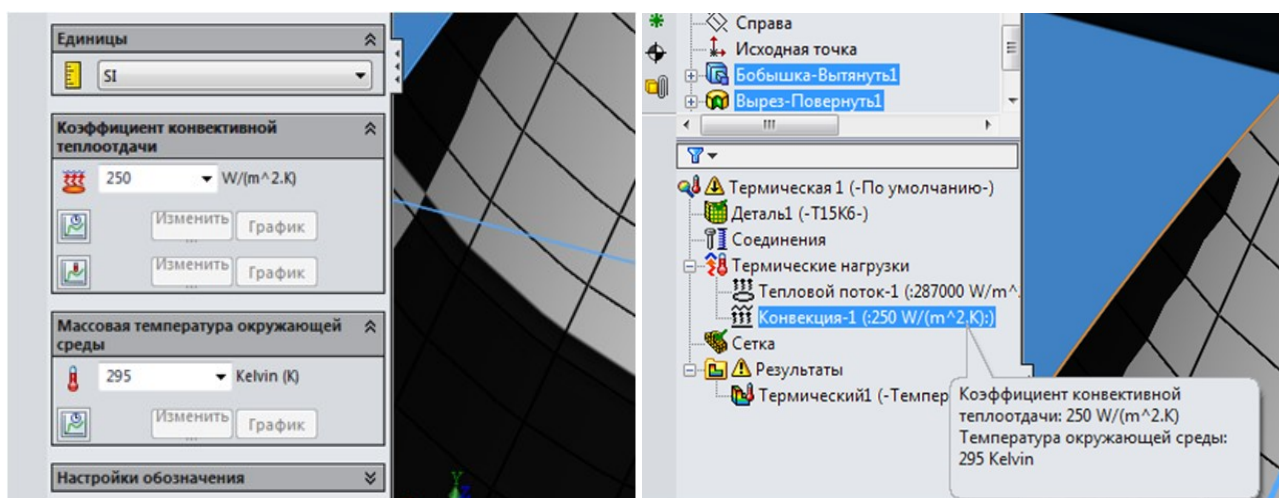


Рис. 1. Окно, в котором задается коэффициент конвективной теплоотдачи

Fig. 1. Window of setting a convective heat transfer coefficient

$$T = T_{max}(1 - \beta), \quad (2)$$

$$Nu = 0,664 \cdot Pr^{1/3} \cdot Re^{0,8}. \quad (7)$$

где T_{max} – контактная температура без учета действия СОЖ, К.

В этом случае задача нахождения комплекса β сводится к определению коэффициента конвективной теплоотдачи α .

Искомый коэффициент α входит в формулу для определения критерия Нуссельта, характеризующего условия теплообмена на границе твердое тело – жидкость [11, 12] (3):

$$Nu = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda}, \quad (3)$$

где l – линейный размер изделия, м; λ – коэффициент теплопроводности охлаждающей жидкости, Вт/(м·К).

Решение уравнения гидродинамики в критериальной форме (4):

$$Nu = f(Re, Pr), \quad (4)$$

где Pr – критерий Прандтля, являющийся мерой подобия температурных и тепловых полей в потоке жидкости, он показывает отношение скорости диффузии к теплопроводности, является физической характеристикой среды и зависит только от ее термодинамического состояния; Re – критерий Рейнольдса, характеризующий гидродинамический режим потока.

Критерий Прандтля (5):

$$Pr = \frac{\nu}{a}, \quad (5)$$

где ν – коэффициент кинематической вязкости, м²/с.

Критерий Рейнольдса (6):

$$Re = \frac{V \cdot l}{\nu}, \quad (6)$$

где V – скорость потока жидкости, м/с.

Для ламинарного потока жидкости критерий Нуссельта определится [11] (7):

Используя данную методику расчета, можно определить значение коэффициента конвективной теплоотдачи. Однако физико-механические характеристики среды и ее термодинамическое состояние будут изменяться под действием температуры, поэтому расчетное значение α будет приблизительным. Для определения коэффициента конвективной теплоотдачи целесообразно провести экспериментальные исследования.

Существуют методики экспериментального определения коэффициента конвективной теплоотдачи^{4,5}. Данные методики используются для расчетов остывания газов и жидкостей в трубопроводах и неприменимы по динамике к процессу шлифования.

Однако можно адаптировать существующие методики^{4,5} и использовать их для экспериментального определения коэффициента конвективной теплоотдачи при шлифовании с СОЖ, а также коэффициента конвективной теплоотдачи воздуха для шлифования без использования СОЖ.

Для экспериментального определения коэффициента конвективной теплоотдачи был сконструирован стенд (рис. 2).

Исследования проводились для твердосплавных втулок 1 из твердых сплавов ВК8 и Т15К6 размером: наружный диаметр – 24 мм, внутренний диаметр – 17 мм, длина – 36 мм.

В качестве смазочно-охлаждающей жидкости использовался 3%-й раствор Na₂CO₃ в температуре жидкости до 273 К, источника тепла – до 603 К.

В качестве нагревательного элемента использовалась спираль 2 из нихромовой проволоки марки Х20Н80 диаметром 1 мм, диаметр навивки спирали – 14 мм, длина спирали – 34 мм. Спираль заизолирована от втулки с помощью пластинок природной каменной слюды малой толщины, это необходимо для уменьшения влияния теплоемкости изолятора на результаты экспериментов.

Втулка 1 закреплена на керамической подставке 9 с помощью термостойкого клея. Кера-

⁴А. с. № 1553849, СССР, А1 G01K17/20. Стенд для определения коэффициента конвективной теплоотдачи / С.Н. Караваев; заявитель Московское высшее техническое училище им. Н.Э. Баумана. Заявка № 4169307. Заявл. 25.11.1986; опубл. 30.03.1990.

⁵Клименко А.В., Зорина В.М. Промышленная теплоэнергетика и теплотехника: справочник. 3-е изд., перераб. и доп. М.: МЭИ, 2004. 632 с.

мическая подставка с закрепленной втулкой 1 помещена в емкость с СОЖ 5. Напряжение на нихромовой спирали изменялось с помощью симисторного регулятора напряжения с диапазоном регулирования 10-220В 6.

Значение силы тока для расчета мощности нагревательного элемента определялось с помощью мультиметра 7310 7.

Таким образом, СОЖ 5 заполняла емкость размером, достаточным для сохранения стабильной температуры при проведении эксперимента, в которой размещалась втулка с нагревательным элементом вну-

три. Температура твердосплавной втулки измерялась с помощью термопары с мультиметром АКИП-2209/4 3, температура СОЖ – с помощью термопары с мультиметром АКИП-2209/4 4.

Для определения температуры нагрева спирали выполнен проектный расчет сопротивления и длины проволоки. Так как размер спирали ограничен размером втулки, рассчитаем сначала длину нихромовой проволоки $l_{\text{пров}}$ (8):

$$l_{\text{пров}} = l_{\text{витка}} \cdot N_{\text{витков}}, \quad (8)$$

где $l_{\text{витка}}$ – длина одного витка проволоки, мм; $N_{\text{витков}}$ – количество витков, шт.

Длину одного витка проволоки рассчитываем по формуле (9):

$$l_{\text{витка}} = \pi \cdot \left(D_{\text{стержня}} + \frac{d_{\text{пров}}}{2} \right), \quad (9)$$

где $D_{\text{стержня}}$ – диаметр стержня для намотки спирали, мм; $d_{\text{пров}}$ – диаметр нихромовой проволоки, мм.

Количество витков – по формуле (10):

$$N_{\text{витков}} = \frac{L_{\text{спирали}}}{d_{\text{пров}} + 0,5}, \quad (10)$$

где $L_{\text{спирали}}$ – длина спирали, мм.

Сопротивление нихромовой проволоки R можно определить по ГОСТ⁶ (11):

$$R = \frac{4 \cdot l_{\text{пров}} \cdot \rho}{\pi \cdot d_{\text{пров}}^2}, \quad (11)$$

где ρ – удельное сопротивление нихрома, Ом·мм²/м.

Сила тока определится (12) как

$$I = \frac{U}{R}, \quad (12)$$

где U – напряжение электрической сети, В.

Расчетная температура T нагрева нихромовой спирали определялась по значению силы тока.

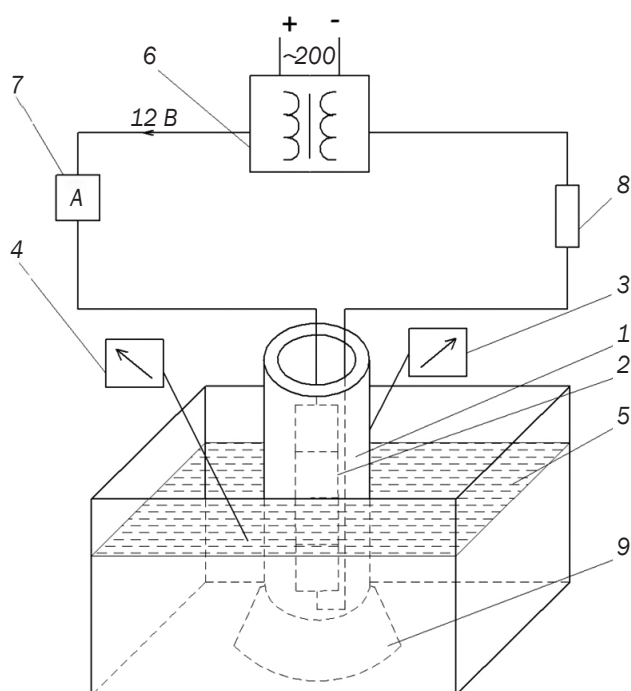


Рис. 2. Стенд для измерения коэффициента конвективной теплоотдачи (1 – втулка из материала, для которого определяется коэффициент конвективной теплоотдачи, 2 – нагревательный элемент, 3 – термопара с мультиметром для измерения температуры втулки, 4 – термопара с мультиметром для измерения температуры смазочно-охлаждающей жидкости, 5 – смазочно-охлаждающая жидкость, 6 – симисторный регулятор напряжения, 7 – амперметр, 8 – резистор, 9 – керамическая подставка для втулки)

Fig. 2. Convective heat transfer coefficient measuring stand (1 – bushing made of the material for which the convective heat transfer coefficient is determined, 2 – heating element, 3 – thermocouple with a multimeter for measuring the temperature of the bushing, 4 – thermocouple with a multimeter for measuring the temperature of the cutting fluid, 5 – cutting fluid, 6 – triac voltage regulator, 7 – ammeter, 8 – resistor, 9 – ceramic stand for the bushing)

⁶ГОСТ 12766.1-90. Проволока из прецизионных сплавов с высоким электрическим сопротивлением. Технические условия. Введ. 01.01.1991. М.: Изд-во стандартов, 2004.

Для данного стенда получились следующие расчетные значения нихромовой проволоки и параметры электрической сети:

$d_{\text{пров}} = 1 \text{ мм}$; $L_{\text{спираль}} = 34 \text{ мм}$; $D_{\text{стержня}} = 13 \text{ мм}$;
 $l_{1\text{витка}} = 42 \text{ мм}$; $N_{\text{витков}} = 23$; $l_{\text{пров}} = 975 \text{ мм}$;
 $R = 1,4 \text{ Ом}$; $I = 8,6 \text{ А}$; $U = 12 \text{ В}$; $T_{\text{max}} = 673 \text{ К}$.

Фотография стенда для исследования коэффициента конвективной теплоотдачи представлена на рис. 3.

Исследования проводились для определения коэффициента конвективной теплоотдачи твердого сплава Т15К6 и ВК8 к СОЖ, в качестве которой использовался 3%-й содовый раствор.

Нагревательный элемент, потребляющий мощность N , Вт, нагревал втулку из твердого сплава, для которого необходимо определить коэффициент конвективной теплоотдачи α , Вт/(м²·К). После наступления состояния теплового равновесия с помощью термопар измерялись температуры окружающей среды (смазочно-охлаждающей жидкости) T_c и температура нагретого твердосплавного образца T_o . Эксперимент повторялся 5 раз, после

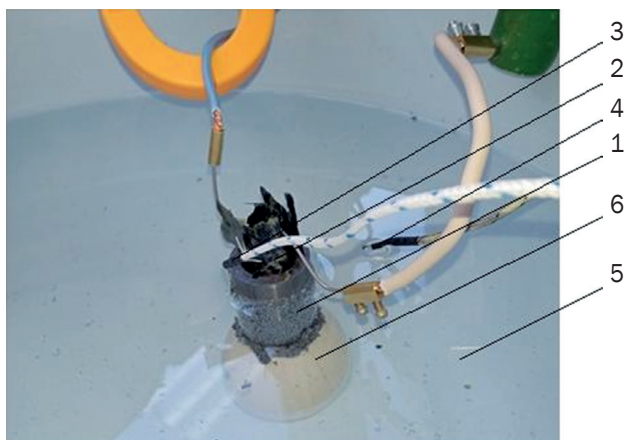


Рис. 3. Фотография стенда для исследования коэффициента конвективной теплоотдачи (1 – втулка из материала, для которого определяется коэффициент конвективной теплоотдачи, 2 – нагревательный элемент, 3 – термопара с мультиметром для измерения температуры втулки, 4 – термопара с мультиметром для измерения температуры смазочно-охлаждающей жидкости, 5 – смазочно-охлаждающая жидкость, 6 – керамическая подставка для втулки)

Fig. 3. Photograph of a stand for studying the convective heat transfer coefficient (1 – bushing made of the material for which the convective heat transfer coefficient is determined, 2 – heating element, 3 – thermocouple with a multimeter for measuring the temperature of the bushing, 4 – thermocouple with a multimeter for measuring the temperature of the cutting fluid, 5 – cutting fluid, 6 – ceramic stand for the bushing)

остывания элементов системы до комнатной температуры 295 К. Далее по нижеприведенной методике определялся общий коэффициент конвективной теплоотдачи (13):

$$\alpha_k = \frac{N}{(T_o - T_c) \cdot F}, \quad (13)$$

где F – площадь теплоотдачи образца, м².

Коэффициент конвективной теплоотдачи определится (14):

$$\alpha = \alpha_k - \alpha_l, \quad (14)$$

где α_l – коэффициент теплоотдачи излучением, Вт/(м²·К).

Коэффициент α_l находим по формуле (15):

$$\alpha_l = \varphi \frac{\varepsilon_{\text{пр}} \cdot C_0 \cdot \left[\left(\frac{T_o}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_c}{100} \right)^4 \right]}{T_o - T_c}, \quad (15)$$

где φ – угловой коэффициент поглощения, учитывающий часть излучения первого тела, которое воспринимается вторым телом; $\varepsilon_{\text{пр}}$ – приведенная степень черноты системы тел; C_0 – коэффициент излучения абсолютно черного тела, Вт/(м²·К⁴).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

Результаты эксперимента по определению коэффициента конвективной теплоотдачи представлены в табл. 1, 2.

Для оценки полученных данных проведена статистическая проверка значимости полученных результатов [25]. Для проверки статистической однородности вычислялся доверительный интервал, случайные ошибки выявлялись по критерию Стьюдента.

Экспериментальным путем установлено, что коэффициент конвективной теплоотдачи поверхности твердосплавной втулки из Т15К6 к СОЖ $\alpha = 250,17 \pm 4,42 \text{ Вт/(м}^2\text{·К)}$, для ВК8, соответственно, $\alpha = 250,61 \pm 4,11 \text{ Вт/(м}^2\text{·К)}$, что уточняет результаты теоретических расчетов. По результатам теоретических расчетов $\alpha = 280 \text{ Вт/(м}^2\text{·К)}$.

Данные, полученные экспериментально, использованы для конечно-элементного моделирования глубинного профильного шлифования твердого сплава (рис. 4, 5).

Модель нагружалась тепловым потоком, рассчитанным по известным методикам

Таблица 1. Результаты определения коэффициента конвективной теплоотдачи для твердого сплава ВК8 и 3 %-го содового раствора**Table 1.** Results of determining the convective heat transfer coefficient for the VK8 hard alloy and a 3% soda solution

№ опыта	N, Вт	Температура, К							S ²	F, м ²	$\alpha_{\text{к}}$ Вт/(м ² ·К)	$\alpha_{\text{л}}$ Вт/(м ² ·К)	α Вт/(м ² ·К)
		T _с	T ₀₁	T ₀₂	T ₀₃	T ₀₄	T ₀₅	T _{осредн}					
1	103	304	453	455	451	458	461	455,6	15,8	0,0027	251,64	0,375	251,26
2		305	462	458	458	451	454	456,6	17,8		251,64	0,375	251,26
3		303	454	455	451	461	455	455,2	13,2		250,64	0,375	250,27
4		307	458	459	455	462	461	459	7,5		250,97	0,375	250,60
5		303	451	452	462	459	461	457	26,5		247,72	0,375	247,34
6		304	459	453	450	456	456	454,8	11,7		252,97	0,375	252,60
7		303	455	459	452	455	454	455	6,5		250,97	0,375	250,60
8		305	461	453	458	460	462	458,8	12,7		248,04	0,375	247,66
9		307	453	458	459	451	460	456,2	15,7		255,68	0,375	255,31
10		304	451	454	455	451	456	453,4	5,3		255,34	0,375	254,97
11		304	457	455	459	457	451	455,8	9,2		251,31	0,375	250,93
12		307	459	462	457	453	454	457	13,5		254,32	0,375	253,95
13		303	453	461	456	457	454	456,2	9,7		249,01	0,375	248,63
14		302	461	457	458	458	460	458,8	2,7		243,29	0,375	242,92
15		304	454	455	462	459	449	455,8	24,7		251,31	0,375	250,93

[11, 18], и позволяла учесть конвективный теплообмен в зоне резания при наличии и отсутствии СОЖ.

Моделирование выполнялось в SolidWorks Simulation 2015 для стадии врезания при профильном глубинном шлифовании периферией круга.

Инструментом служил алмазный круг диаметром 250 мм, имеющий профиль радиусом $R = 5,665$ мм, шириной 10 мм. Расчет выполнен для режимов шлифования: скорость круга $V_{\text{кр}} = 35$ м/с, скорость подачи

детали $V_{\text{и}} = 0,015$ м/мин, максимальная глубина шлифования $t = 3$ мм. Результаты моделирования тепловых полей для шлифования твердого сплава Т5К6 без СОЖ представлены на рис. 4, а на рис. 5 а показаны результаты моделирования при шлифовании твердого сплава Т15К6 с СОЖ. На рис. 5 б приведены результаты моделирования для сплава ВК8. Получены распределения тепловых полей в образцах по сечениям дуги контакта круга с деталью и профиля шлифуемого образца.

Таблица 2. Результаты определения коэффициента конвективной теплоотдачи для твердого сплава Т15К6 и 3 %-го содового раствора**Table 2.** Results of determining the convective heat transfer coefficient for the T15K6 hard alloy and a 3 % soda solution

№ опыта	N, Вт	Температура, К							S ²	F, м ²	$\alpha_{\text{к}}$ Вт/(м ² ·К)	$\alpha_{\text{л}}$ Вт/(м ² ·К)	α Вт/(м ² ·К)
		T _с	T ₀₁	T ₀₂	T ₀₃	T ₀₄	T ₀₅	T _{осредн}					
1	103	304	451	459	455	462	460	457,4	19,3	0,0027	248,68	0,375	248,31
2		305	452	459	455	449	454	453,8	13,7		256,37	0,375	256,00
3		304	455	459	460	458	453	457	8,5		247,72	0,375	247,34
4		307	458	459	458	458	461	458,8	1,7		251,31	0,375	250,93
5		303	453	455	462	459	458	457,4	12,3		247,07	0,375	246,70
6		304	453	451	461	456	457	455,6	14,8		251,64	0,375	251,26
7		303	453	458	459	451	454	455	11,5		250,97	0,375	250,60
8		305	451	454	456	460	462	456,6	19,8		251,64	0,375	251,26
9		307	454	455	461	454	456	456	8,5		256,03	0,375	255,65
10		304	460	453	462	451	456	456,4	21,3		250,32	0,375	249,94
11		304	459	460	459	459	449	457,2	21,2		249,01	0,375	248,63
12		307	451	460	456	455	455	455,4	10,3		257,06	0,375	256,69
13		303	461	457	458	457	454	457,4	6,3		247,07	0,375	246,70
14		302	461	458	451	461	462	458,6	20,3		243,60	0,375	243,23
5		303	462	455	457	459	451	456,8	17,2		249,66	0,375	249,29

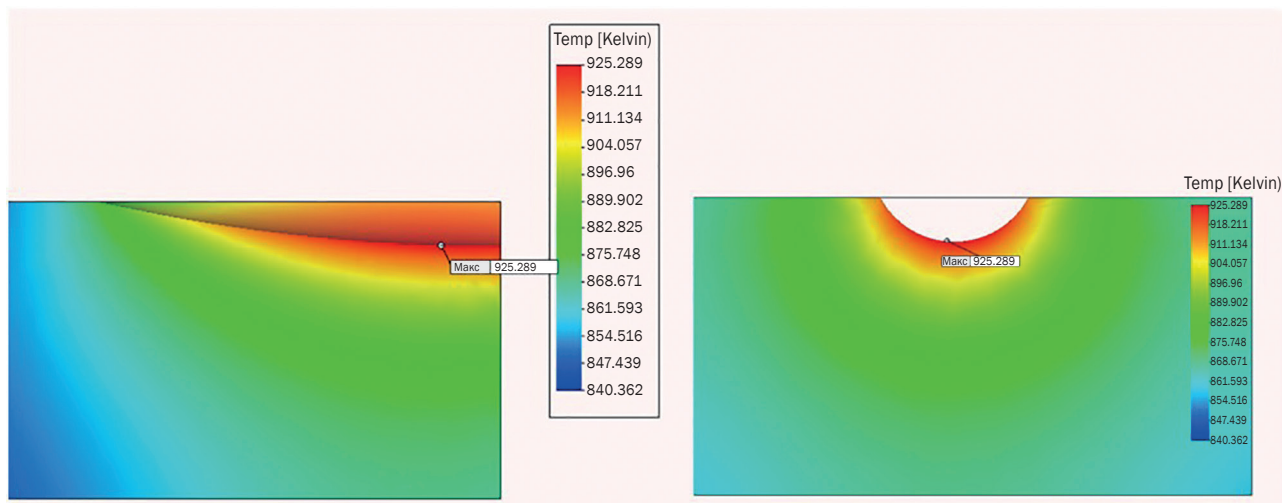


Рис. 4. Результаты моделирования тепловых полей в SolidWorks Simulation 2015 для шлифования без смазочно-охлаждающей жидкости твердого сплава T15K6

Fig. 4. Results of thermal field modeling in SolidWorks Simulation 2015 for coolant-free grinding of T15K6 hard alloy

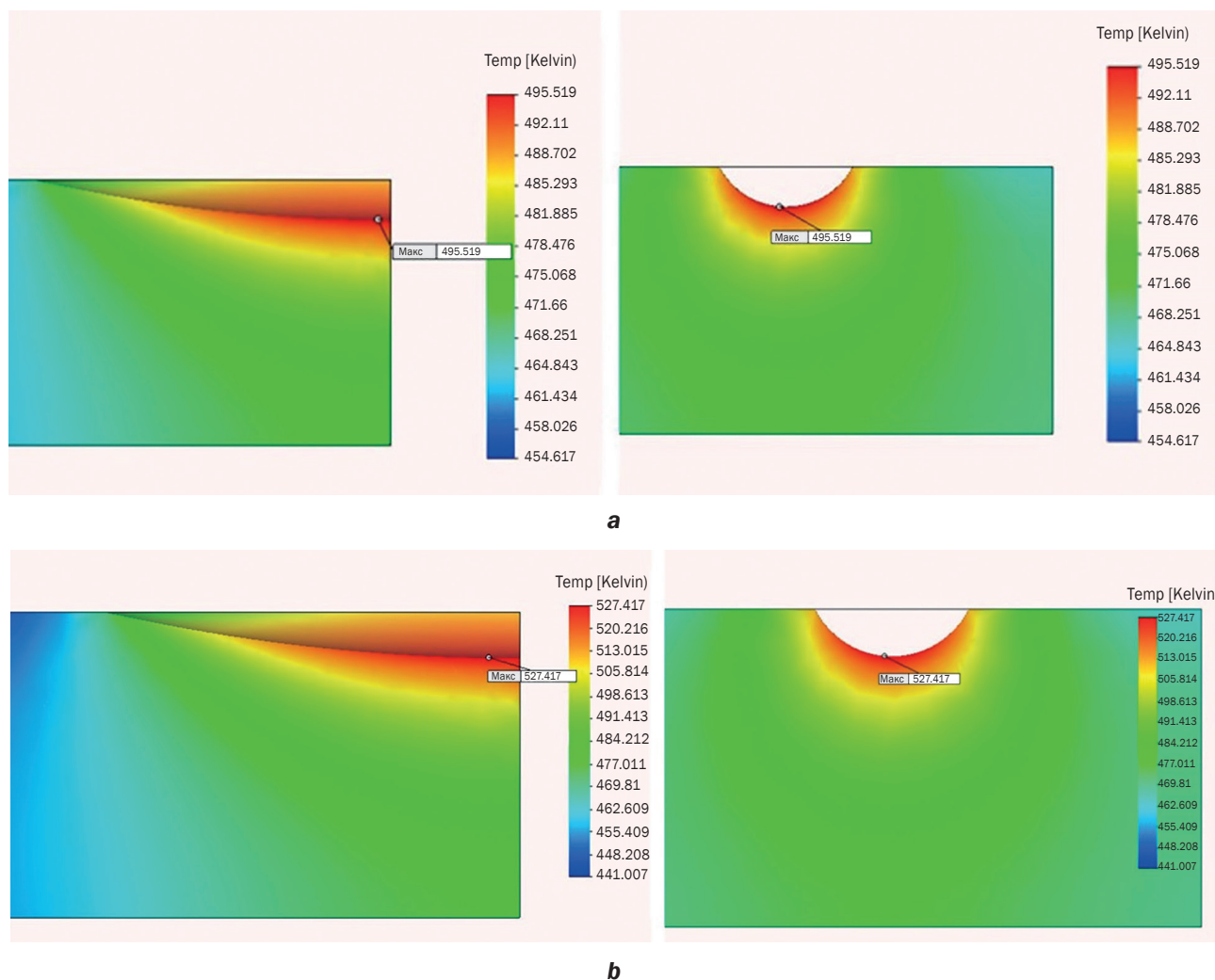


Рис. 5. Результаты моделирования тепловых полей в SolidWorks Simulation 2015 с использованием экспериментально определенного коэффициента конвективной теплоотдачи: а – для твердого сплава VK8; б – для твердого сплава T15K6

Fig. 5. Results of thermal field modeling in SolidWorks Simulation 2015 using the experimentally determined convective heat transfer coefficient: a – for VK8 hard alloy; b – for T15K6 hard alloy

Характер распределения тепловых полей в обоих образцах схож, температуры сопоставимы с ожидаемыми по результатам известных исследований [4, 11], что косвенно говорит об адекватности моделирования тепловых процессов. Наличие СОЖ в зоне резания позволяет значительно снизить теплонапряженность процесса шлифования до 30 %. По результатам моделирования шлифования с применением СОЖ максимальная температура зоны резания не превышает 573 К, что позволяет прогнозировать отсутствие прижогов и микротрещин в поверхностных слоях шлифуемых изделий [11]. Кроме того, по результатам моделирования можно впервые сделать выводы, что максимальная температура возникает на первой половине дуги контакта алмазного круга с деталью. Распределение температур по профилю неравномерно, максимальная температура ожидаемо наблюдается в центре профиля, по краям профиля температура снижается, однако градиент температур к краю профиля увеличивается. Следовательно, при моделировании процессов в дальнейшем, необходимо обращать внимание на наиболее уяз-

вимые места, с точки зрения возникновения дефектов, при шлифовании подобного профиля. Такими местами, согласно приведенным результатам предварительного моделирования (см. рис. 4, 5), будут области у края радиусного профиля.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, предложенная методика позволяет определить коэффициент конвективной теплоотдачи с удовлетворительной сходимостью относительно теоретических расчетов (10,49 %). Для сплава Т15К6 интервальная оценка коэффициента конвективной теплоотдачи составила: $\Delta a_i = 4,42$; $S_B^2 = 13,78$; $t(P,m,N) = 2,776$. Для ВК8: $\Delta a_i = 4,11$; $S_B^2 = 12,83$; $t(P,m,N) = 2,776$.

Данная методика подходит для определения коэффициента конвективной теплоотдачи с целью охлаждения в жидкой среде (смазочно-охлаждающей жидкости), который можно применять для моделирования тепловых процессов методом конечных элементов и прогнозирования качества поверхностей при технологии шлифования с учетом конвективного теплообмена.

Список источников

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. С. 123–128. <https://doi.org/10.34771/UZCERU.2022.77.3.024>. EDN: DHIKPB.
2. Якимов А.В. Оптимизация процессов шлифования. М.: Машиностроение, 1975. 176 с.
3. Горбунова И.А., Пиралишвили Ш.А., Волков Д.И. Теоретико-экспериментальное моделирование тепловых процессов в поверхностных слоях заготовки при глубинном шлифовании // Справочник. Инженерный журнал. 2005. № 3. С. 29–33.
4. Безъязычный В.Ф., Голованов Д.С. Качество поверхностного слоя деталей из титановых сплавов при глубинном шлифовании // Вестник Рыбинского государственного авиационного технического университета имени П.А. Соловьева. 2017. № 3. С. 65–69. EDN: WPTNMM.
5. Бровкина Я.Ю., Шабалин Д.Н., Козарь И.И., Петров А.В. Методика исследования параметров алмазного шлифовального круга и повышения периода стойкости кругов за счет снижения сил трения при обработке технической керамики // Перспективные машиностроительные технологии: сб. науч. тр. Междунар. науч.-практ. конф. (г. Санкт-Петербург, 21–25 ноября 2022 г.). СПб.: Политех-Пресс, 2023. С. 20–23. EDN: DKPRZS.
6. Кремень З.И., Юрьев В.Г., Бабошкин А.Ф. Технология шлифования в машиностроении. СПб.: Политехника, 2007. 424 с. EDN: QNBTFZ.
7. Saberi A., Rahimi A.R., Parsa H., Ashrafiyou M., Rabiei F. Improvement of surface grinding process performance of SK45 soft steel by minimum quantity lubrication (MQL) technique using compressed cold air jet from vortex tube // Journal of Cleaner Production. 2016. Vol. 131. Iss. 10. P. 728–738. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.04.104>.
8. Худобин Л.В. Смазочно-охлаждающие средства, применяемые при шлифовании. М.: Машиностроение, 1971. 217 с.
9. Янюшкин А.Р., Мулюхин Н.В., Секлетина Л.С. Исследования напряжений твердосплавных пластин после комбинированного электроалмазного шлифования // Современные технологии: проблемы и перспективы: сборник статей Всерос. научн.-практ. конф. для аспирантов, студентов и молодых учёных (г. Севастополь, 20–23 мая 2019 г.). Севастополь: Севастопольский гос. ун-т, 2019. С. 48–53. EDN: WAMHKA.
10. Силин С.С., Леонов Б.Н., Хрульков В.А., Лобанов А.В., Полетаев В.А., Данченко Э.Б. Особенности глубинного шлифования титановых сплавов // Вестник машиностроения. 1989. № 1. С. 43–45.
11. Сипайлов В.А. Тепловые процессы при шлифовании и управление качеством поверхности. М.: Машиностроение, 1978. 167 с.

12. Долганов А.М., Иванова Т.Н. Исследование влияния теплообмена на температурное поле при шлифовании пластин по кромке // Научно-технический вестник Поволжья. 2012. № 2. С. 186–189.
13. Киселев Е.С., Ковальногов В.Н. Теплофизический анализ концентрированных операций шлифования: монография. Ульяновск: УлГТУ, 2002. 140 с. EDN: WOANZZ.
14. Zhukov E.L., Kozar I.I., Olodyazhnyi 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. No. 2. P. 128–132. <https://doi.org/10.12776/ams.v22i2.737>. EDN: WPDVFN.
15. Попов В.Ю., Янюшкин А.С., Малышев Н.О., Медведева О.И., Звядинцева С.Ю. Моделирование в системе Ansys контактирующих поверхностей при шлифовании // Системы. Методы. Технологии. 2022. № 1. С. 30–35. (In Russ.). <https://doi.org/10.18324/2077-5415-2022-1-30-35>. EDN: ZICTUN.
16. Волков Д.И., Полетаев В.А., Голованова А.М., Цветков Б.В. Определение изменений теплообмена в зоне обработки при высокоскоростном глубинном шлифовании // Вестник Рыбинского государственного авиационного технического университета имени П.А. Соловьева. 2023. № 4. С. 67–73. EDN: SQCGAT.
17. Цветков Б.В., Волков Д.И., Коряжкин А.А. Моделирование тепловых процессов при высокоскоростном глубинном шлифовании инструментом из кубического нитрида бора // Вестник Рыбинского государственного авиационного технического университета имени П.А. Соловьева. 2023. № 4. С. 38–45. EDN: OIRQJS.
18. Ящерицын П.И., Цокур А.К., Еременко М.Л. Тепловые явления при шлифовании и свойства обработанных поверхностей. Минск: Наука и техника, 1973. 184 с.
19. Носенко В.А., Пузырькова В.Е., Сердюков Н.Д., Слепцов Д.С. Влияние среды на показатели процесса шлифования сталей и титановых сплавов инструментом из корунда и карбида кремния // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2021. № 8. С. 34–37. <https://doi.org/10.35211/1990-5297-2021-8-255-34-37>. EDN: ZGGGQL.
20. Носенко В.А., Сердюков Н.Д., Шкода О.М., Самарский П.И. Испытание СОЖ на операции плоского врезного шлифования титанового сплава // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2020. № 8. С. 40–43. <https://doi.org/10.35211/1990-5297-2020-8-243-40-43>. EDN: LVUEAJ.
21. Кондратенко В.С., Кобыш А.Н., Кисляченко В.Г., Тамбовский А.Д. Оптимизация состава смазочно-охлаждающей жидкости для шлифования различных материалов связанным алмазным инструментом // Перспективные материалы и технологии (ПМТ-2024): сборник докладов Междунар. научн.-техн. конф. ИПТИП РТУ МИРЭА (г. Москва, 12–16 апреля 2024 г.). М.: МИРЭА – Российский технологический университет, 2024. С. 548–552. EDN: PZPTWP.
22. Sinha M.K., Madarkar R., Ghosh S., Paruchuri V.R. Application of eco-friendly nanofluids during grinding of Inconel 718 through small quantity lubrication // *Journal of Cleaner Production*. 2016. Vol. 141. P. 1359–1375. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.09.212>.
23. Волков Д.И., Цветков Б.В., Голованова А.М. Моделирование подачи охлаждающей жидкости в зону обработки при высокоскоростном глубинном шлифовании // Вестник Рыбинского государственного авиационного технического университета имени П.А. Соловьева. 2024. № 2. С. 89–95. EDN: KHRBLZ.
24. Воячек И.И., Муйземнек А.Ю., Кошелева Ю.Н. Выбор режимов алмазного глубинного шлифования труднообрабатываемых материалов из условия сохранения режущей способности круга // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2013. № 1. С. 94–101. EDN: QANNKR.
25. Спиридонов А.А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов. М.: Машиностроение, 1981. 184 с.

References

1. Abdulgazis D.U., Abdulgazis U.A., Bratan S.M. Evaluation of the feasibility of application of diamond grinding wheels for processing hard alloys in the mode of deep grinding. *Scientific Notes of the Crimean Engineering and Pedagogical University*. 2022;3:123-128. (In Russ.). <https://doi.org/10.34771/UZCEPU.2022.77.3.024>. EDN: DHIKPB.
2. Yakimov A.V. *Optimization of grinding processes*. Moscow: Mashinostroenie; 1975, 176 p. (In Russ.).
3. Gorbunova I.A., Piralishvili Sh.A., Volkov D.I. Theoretical and experimental modeling of thermal processes in the surface layers of a workpiece during creep feed grinding. *Handbook. An Engineering Journal*. 2005;3:29-33. (In Russ.).
4. Bezyazychny V.F., Golovanov D.S. Quality of the surface layer of titanium alloy parts during creep feed grinding. *Bulletin of the P.A. Solovyov Russian State Technical University*. 2017;3:65-69. (In Russ.). EDN: WPTHMM.
5. Brovkina Ya.Yu., Shabalin D.N., Kozar I.I., Petrov A.V. Methodology for studying the parameters of a diamond grinding wheel and increasing the durability period of circles by reducing friction forces during processing of technical ceramics. In: *Advanced Mechanical Engineering Technologies. Collected Scientific Papers of the International Scientific and Practical Conference*. 21–25 November 2022, St. Petersburg. St. Petersburg: Politekh-Press; 2023, p. 20-23. (In Russ.). EDN: DKPRZS.
6. Kremen Z.I., Yuriev V.G., Baboshkin A.F. *Grinding technology in mechanical engineering*. St. Petersburg: Politekhnik; 2007, 424 p. (In Russ.). EDN: QNBTFZ.
7. Saberi A., Rahimi A.R., Parsa H., Ashrafijou M., Rabiei F. Improvement of surface grinding process performance of CK45 soft steel by minimum quantity lubrication (MQL) technique using compressed cold air jet from vortex tube. *Journal of Cleaner Production*. 2016;131(10):728-738. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.04.104>.
8. Khudobin L.V. *Cutting fluids used in grinding*. Moscow: Mashinostroenie; 1971, 217 p. (In Russ.).

9. Yanyushkin A.R., Mulyukhin N.V., Sekletina L.S. Improving the efficiency of grinding carbide and mineral ceramics with a combined electro-diamond method. In: *Modern technologies: problems and prospects: collected articles from the All-Russian scientific and practical conference for graduate students, students and young scientists*. 20–23 May 2019, Sevastopol. Sevastopol: Sevastopol State University; 2019, p. 48-53. (In Russ.). EDN: WAMHKA.
10. Silin S.S., Leonov B.N., Khrulkov V.A., Lobanov A.V., Poletaev V.A., Danchenko E.B. Features of creep feed grinding of titanium alloys. *Russian Engineering Research*. 1989;1:43-45. (In Russ.).
11. Sipaylov V.A. *Thermal processes in grinding and surface quality control*. Moscow: Mashinostroenie; 1978, 167 p. (In Russ.).
12. Dolganov A.M., Ivanova T.N. Study of the influence of heat transfer on the temperature field during edge grinding of plates. *Scientific and Technical Volga region Bulletin*. 2012;2:186-189. (In Russ.).
13. Kiselev E.S., Kovalnov V.N. *Thermophysical analysis of concentrated grinding operations*. Ulyanovsk: Ulyanovsk State Technical University; 2002, 140 p. (In Russ.). EDN: WOANZZ.
14. Zhukov E.L., Kozar I.I., Olodyazhnyi 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. <https://doi.org/10.12776/ams.v22i2.737>. EDN: WPDVFN.
15. Popov V.Yu., Yanyushkin A.S., Malyshev N.O., Medvedeva O.I., Zvyadtseva S.Yu. Ansys modeling of contact surfaces for grinding. *Systems. Methods. Technologies*. 2022;1:30-35. (In Russ.). <https://doi.org/10.18324/2077-5415-2022-1-30-35>. EDN: ZICTUN.
16. Volkov D.I., Poletaev V.A., Golovanova A.M., Tsvetkov B.V. Determination of heat transfer changes in the cutting zone during high-speed creep feed grinding. *Bulletin of the P.A. Solovyov Russian State Technical University*. 2023;4:67-73. (In Russ.). EDN: SQCGAT.
17. Tsvetkov B.V., Volkov D.I., Koryazhkin A.A. Modeling of thermal processes in high-speed creep feed grinding with CBN tools. *Bulletin of the P.A. Solovyov Russian State Technical University*. 2023;4:38-45. (In Russ.). EDN: OIRQJS.
18. Yashcheritsyn P.I., Tsokur A.K., Eremenko M.L. *Thermal phenomena in grinding and properties of machined surfaces*. Minsk: Nauka i tekhnika; 1973, 184 p. (In Russ.).
19. Nosenko V.A., Puzyrkova V.E., Serdyukov N.D., Sleptsov D.S. The influence of the medium on the indicators of the grinding of steels and titanium alloys with a tool from corundum and silicon carbide. *Scientific Journal "Bulletin of the Technological University"*. 2021;8:34-37. (In Russ.). <https://doi.org/10.35211/1990-5297-2021-8-255-34-37>. EDN: ZGGGQL.
20. Nosenko V.A., Serdyukov N.D., Shkoda O.M., Samarsky P.I. Testing of cutting fluid in the operation of flat plunge grinding of titanium alloy. *Scientific Journal "Bulletin of the Technological University"*. 2020;8:40-43. (In Russ.). <https://doi.org/10.35211/1990-5297-2020-8-243-40-43>. EDN: LVUEAJ.
21. Kondratenko V.S., Kobyshev A.N., Kislyachenko V.G., Tambovsky A.D. Optimization of the coolant composition for grinding various materials with a bonded diamond tool. In: *Advanced Materials and Technologies (AMT-2024): Proceedings of the International Scientific and Technical Conference of the Institute of Advanced Technologies and Industrial Programming of the Russian Technological University, Moscow Institute of Radio Engineering, Electronics, and Automation*. 12–16 April 2024, Moscow. Moscow: MIREA – Russian University of Technology; 2024, p. 548-552. (In Russ.). EDN: PZPTWP.
22. Sinha M.K., Madarkar R., Ghosh S., Paruchuri V.R. Application of eco-friendly nanofluids during grinding of Inconel 718 through small quantity lubrication. *Journal of Cleaner Production*. 2016;141:1359-1375. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.09.212>.
23. Volkov D.I., Tsvetkov B.V., Golovanova A.M. Modeling coolant supply to the cutting area under high-speed creep feed grinding. *Bulletin of the P.A. Solovyov Russian State Technical University*. 2024;2:89-95. (In Russ.). EDN: KHRBLZ.
24. Voyachek I.I., Muyzemnek A.Yu., Kosheleva Yu.N. Selecting the modes of deep diamond grinding of churlish materials for retaining circle's cutting capacity. *University proceedings. Volga region. Technical sciences*. 2013;1:94-101. (In Russ.). EDN: QANNKR.
25. Spiridonov A.A. *Planning of an experiment in the study of technological processes*. Moscow: Mashinostroenie; 1981, 184 p. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Зверовщikov Александр Евгеньевич,

доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Технологии и
оборудование машиностроения»,
Пензенский государственный университет,
440026, Российская Федерация, г. Пенза,
ул. Красная, 40
✉ azwer@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-7827-7462>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Aleksandr E. Zverovshchikov,

Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Head of the Department of Technologies and
Equipment for Mechanical Engineering,
Penza State University,
440026, Russian Federation, Penza,
Krasnaya str., 40
✉ azwer@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-7827-7462>

Зверовщиков Владимир Зиновьевич,
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры «Технологии и
оборудование машиностроения»,
Пензенский государственный университет,
440026, Российская Федерация, г. Пенза,
ул. Красная, 40
tmspgu@mail.ru

Кошелева Юлия Николаевна,
специалист по учебно-методической
работе 1 категории кафедры
«Технологии и оборудование машиностроения»,
Пензенский государственный университет,
440026, Российская Федерация, г. Пенза,
ул. Красная, 40
j231@mail.ru

Vladimir Z. Zverovshchikov,
Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Professor of the Department of Technologies and
Equipment for Mechanical Engineering,
Penza State University,
440026, Russian Federation, Penza,
Krasnaya str., 40
tmspgu@mail.ru

Yulia N. Kosheleva,
1st Category Specialist in Educational and
Methodological Work of the Department of Technologies
and Equipment for Mechanical Engineering,
Penza State University,
440026, Russian Federation, Penza,
Krasnaya str., 40
j231@mail.ru

Заявленный вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Зверовщиков Александр Евгеньевич является членом редакционной коллегии журнала «iPolytech Journal» с 2025 года, но не имеет отношения к решению опубликовать эту статью. Статья прошла принятую в журнале процедуру рецензирования. Об иных конфликтах авторы не заявляли.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 28.10.2025 г.; одобрена после рецензирования 27.12.2025 г.; принята к публикации 21.01.2026 г.

Authors' contribution

The authors contributed equally to this article.

Conflict of interests

Alexander E. Zverovshchikov has been a member of the iPolytech Journal Editorial Board since 2025, but he was not involved in making decision about accepting the present article for publication. The article was subjected the Journal's review procedure. The authors do not report any other conflicts of interest.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Information about the article

The article was submitted 28.10.2025; approved after reviewing 27.12.2025; accepted for publication 21.01.2026.