



ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)

УДК 621.92

DOI: 10.18503/1995-2732-2022-20-3-94-102

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ В ЗОНЕ КОНТАКТА ПРИ КРУГЛОМ ВРЕЗНОМ ШЛИФОВАНИИ

Дегтярева-Кашутина А.С., Болдырев И.С.

Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

**Аннотация.** Процесс шлифования является одним из старейших видов обработки, он по-прежнему является одним из наиболее применяемых способов обработки материалов для изготовления изделий с высоким качеством поверхности и точностью размеров. Однако он является одним из самых сложных и наименее понятных процессов по двум основным причинам. Во-первых, абразивные зерна, присутствующие на поверхности инструмента, ориентированы случайным образом. Во-вторых, они подвергаются сложному взаимодействию в зоне обработки. Кроме того, в процессе шлифования, вследствие больших скоростей и низкой теплопроводности шлифовального круга, мгновенная температура в зоне контакта может достигать температуры плавления стали, что приводит к изменению структуры поверхностного слоя детали. Удалить дефектный слой не представляется возможным, потому что размер детали находится в допуске, следовательно, брак является неисправимым, то есть все предыдущие затраты на обработку бесполезны. Температура является одним из главных ограничивающих критериев при назначении режимов резания на операции шлифования. Используемые в статье методы основывались на фундаментальных положениях теории технологии машиностроения, теории резания при лезвийной и абразивной обработке, законах теории теплопроводности твердых тел. Разработана математическая модель расчета температуры в зоне контакта шлифовального круга и заготовки при круглом врезном шлифовании. Разработанная математическая модель учитывает количество абразивных зерен на пятне контакта, физические свойства материала заготовки и шлифовального круга, режимы резания. Полученная модель может в дальнейшем использоваться для проектирования высокоэффективных циклов для операций круглого врезного шлифования в качестве основной для реализации ограничения по неприжоговости обработки.

**Ключевые слова:** шлифование, шлифовальный круг, тепловой поток, пятно контакта, абразивные зерна

*Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (грант № FENU-2020-0020).*

© Дегтярева-Кашутина А.С., Болдырев И.С., 2022

### Для цитирования

Дегтярева-Кашутина А.С., Болдырев И.С. Математическая модель определения температуры в зоне контакта при круглом врезном шлифовании // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2022. Т. 20. №3. С. 94-102. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-3-94-102>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.  
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

# MATHEMATICAL MODEL FOR DETERMINING CONTACT ZONE TEMPERATURE DURING CYLINDRICAL PLUNGE GRINDING

Degtyareva-Kashutina A.S., Boldyrev I.S.

South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

**Abstract.** Although grinding belongs to the oldest machining processes, it is still one of the most used machining techniques for producing parts with high surface quality and dimensional accuracy. At the same time, grinding is among the most complex and least understood processes for two main reasons. First, the abrasive grains present on the surface of the tool are randomly oriented. Secondly, they undergo complex interactions in the processing zone. In addition, during the grinding process, due to high speeds and low thermal conductivity of the grinding wheel, the instantaneous temperature in the contact zone can reach the melting temperature of steel leading to structural changes in the surface layer of the part. It is not possible to remove the defective layer because the size of the part is within tolerance, therefore the defect is irreparable meaning that all previous processing costs were in vain. Therefore, temperature is one of the main limiting criteria when setting cutting parameters for grinding operations. The methods used in the article were based on the fundamental provisions of mechanical engineering theory, the theory of cutting and machining, as well as the theory of thermal conductivity of solids. A mathematical model has been developed for calculating the temperature in the contact zone of the grinding wheel and the workpiece during cylindrical plunge grinding. The developed model takes into account the number of abrasive grains on the contact patch, the physical properties of the workpiece material and the grinding wheel, as well as the cutting parameters. The resulting model can be further used to design high-performance cycles of plunge grinding as the main one for ensuring burn-free machining.

**Keywords:** grinding, grinding wheel, heat flux, contact patch, abrasive grains

*This research was funded by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation; Grant No. FENU-2020-0020.*

## For citation

Degtyareva-Kashutina A.S., Boldyrev I.S. Mathematical Model for Determining Contact Zone Temperature During Cylindrical Plunge Grinding. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2022, vol. 20, no. 3, pp. 94-102. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-3-94-102>

## Введение

Шлифование является высокоскоростным и теплонапряженным процессом механической обработки. Прогнозирование процесса взаимодействия режущего инструмента с заготовкой при шлифовании осложняется тем, что данное взаимодействие имеет стохастический характер и зависит от физических свойств обрабатываемого материала и температурно-скоростных характеристик процесса.

Режущим инструментом при шлифовании является шлифовальный круг, состоящий из абразивных зерен различных форм и размеров, расположенных случайным образом на режущей поверхности и скрепленных связкой. Размер и форма зерен, а также их расположение на поверхности оказывают влияние на режущие свойства шлифовального круга [1, 2].

На температуру в зоне контакта шлифовального круга с заготовкой, помимо прочих факто-

ров, влияет количество абразивных зерен, попадающих на пятно контакта. Это количество зависит от формы и размера зерна, который, в свою очередь, определяется зернистостью шлифовального круга.

Связка в шлифовальном круге служит для скрепления отдельных зерен в единое тело и определяет прочность их удержания. Прочность удержания зерна связкой влияет на скорость износа шлифовального круга и, следовательно, на качество обрабатываемой поверхности. Твердость связки меньше, чем у абразива, поэтому при расчетах допускают, что резание производится только абразивными зернами [3]. Из-за значительного влияния форм и размеров абразивных зерен на температуру в зоне контакта при обработке в процессе разработки математических моделей необходимо описать структуру шлифовального круга.

Ученые, изучающие процесс шлифования, делятся на две группы: первые считают, что контакт

шлифовального круга с заготовкой сплошной [4, 5], а вторые – дискретный [6, 7]. Дискретный контакт дает точные данные о процессе шлифования, но расчеты требуют больших вычислительных мощностей. В.А. Сипайлов [8] отмечал, что применение в расчетах дискретного метода контакта оправдано для исследования тепловых процессов в шлифовальном круге, а для анализа процессов в металле обрабатываемой заготовки сплошной контакт является достаточным и точным. Это связано с тем, что из-за инерционности тепловых явлений в металле прерывание контакта между кругом и заготовкой не оказывает значительного влияния на ход процесса в целом. В сравнении с экспериментом сплошной контакт имеет погрешность не более 15%, но при этом значительно сокращается время расчета [9].

Целью данного исследования является разработка математической модели расчета температуры в зоне контакта шлифовального круга с заготовкой при круглом врезном шлифовании, учитывающей количество контактирующих зерен, физические свойства обрабатываемого материала и их изменение в процесс обработки, а также режимы резания.

### Обзор литературы

Процесс формирования рабочей поверхности шлифовального круга носит вероятностный характер, как на этапе его изготовления, так и в процессе взаимодействия с обрабатываемой поверхностью. Стохастичность закладывается на начальных операциях изготовления круга, а на последующих операциях – смешивания и формирования – добавляется вероятностный характер расположения абразивных зерен в объеме круга. В связи с этим удаление металла с обрабатываемой поверхности происходит случайным образом.

В настоящее время у ученых нет единого мнения о характере распределения абразивных зерен на поверхности шлифовального круга, это связано с большим количеством факторов, которые влияют на изменение рабочей поверхности инструмента в процессе обработки. Данный вопрос исследовался большим количеством ученых, рассмотрим ряд наиболее значимых работ.

В работе [10] проведены эксперименты, в которых количество вершин абразивных зерен подсчитывалось по их отпечаткам на алюминиевой фольге. Анализ экспериментальных данных показал, что вероятность распределения вершин абразивных зерен имеет правую асимметрию,

которую авторы объясняют наличием вторых вершин у некоторых абразивных зерен.

В.А. Носенко [11] предлагает методику определения количества вершин абразивных зерен по вероятности контакта в зависимости от времени обработки. Характерной особенностью методики является то, что используемая математическая модель учитывает изменения, которые происходят в процессе шлифования, а именно влияние износа на распределение вершин зерен. Рассматриваются следующие виды износа: истирание и скалывание вершины зерна, вырывание зерна из связки круга. Кроме того, предлагаемая модель учитывает характеристики шлифовального круга, режимы обработки, исходное положение зерен на поверхности инструмента и прочность их удержания связкой.

Закон распределения абразивных зерен на рабочей поверхности шлифовального круга предопределяется технологией его изготовления, при которой зерна и связка распределяются равномерно, поэтому большинство исследователей при создании модели строения рабочей поверхности шлифовального круга использовали закон равномерного распределения  $F(x)$  [12]:

$$F(x) = \begin{cases} 0 & x < a; \\ \frac{x}{b-a} & a \leq x < b; \\ 1 & x \geq b. \end{cases} \quad (1)$$

Распределение размеров абразивных зерен для большинства шлифовальных кругов имеет форму нормального распределения  $P(d_3)$  [13] и может быть выражено как

$$P(d_3) = \frac{1}{\sigma_1 \sqrt{2\pi}} \exp \left[ -0,5 \left( \frac{d_3 - \mu_1}{\sigma_1} \right)^2 \right], \quad (2)$$

где  $d_3$  – размер зерна, м;  $\sigma_1$  – среднеквадратичное отклонение;  $\mu_1$  – средний размер зерна, м.

В разрабатываемой математической модели нас интересует распределение абразивных зерен только на пятне контакта шлифовального круга и заготовки. Вследствие малых размеров рассматриваемого участка будет достаточно точности, которую предоставляют зависимости (1) и (2).

### Полученные результаты и их обсуждение

Для расчета температуры в зоне контакта заготовки и шлифовального круга запишем уравнение теплопроводности в полярных координатах:

$$c \frac{\partial U}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial r} \left( \lambda \frac{\partial U}{\partial r} \right) + \frac{\lambda \partial U}{r \partial r} + \frac{\partial}{\partial \varphi} \left( \frac{\lambda \partial U}{\partial \varphi} \right), \quad (3)$$

где  $r$  – текущий радиус, м;  $\varphi$  – текущий угол;  $t$  – время, с;  $U$  – температура, °С;  $c$  – теплоемкость, Дж/м<sup>3</sup>·°С;  $\lambda$  – теплопроводность, Дж/м·с·°С.

Краевые условия на пятне контакте (при  $r = R$ )

$$\lambda \frac{\partial u}{\partial r} = \Omega_3 Q, \quad (4)$$

где  $Q$  – мощность теплового источника, Дж/м<sup>2</sup>·с;  $\Omega_3$  – доля теплового потока, поступающего в заготовку.

Краевые условия вне пятна контакта (при  $r = R$ )

$$\lambda \frac{\partial u}{\partial r} = \alpha (T - U), \quad (5)$$

где  $T$  – температура окружающей среды, °С;  $\alpha$  – теплоотдача на границе, Дж/м<sup>2</sup>·°С·с.

Мощность единичного теплового источника рассчитывается по формуле, предложенной в работе С.Н. Корчака [9], которая учитывает тепловыделение от пластического сдвига  $Q_{сдв}$  и трения о вершину абразивного зерна обрабатываемого материала  $Q_{три}$ :

$$Q_0 = Q_{сдв} + Q_{три}, \quad (6)$$

$$Q_{сдв} = 6,75 \cdot \sigma_i \cdot v_k \cdot a \cdot l_3, \quad (7)$$

$$Q_{три} = 0,068 \cdot \sigma_i \cdot v_k \cdot l_3^2, \quad (8)$$

где  $\sigma_i$  – интенсивность сопротивления материала деформации, Дж/м<sup>3</sup>;  $v_k$  – скорость вращения круга, м/с;  $l_3$  – величина площадки затупления зерна, м,  $l_3 = 0,1$  мм;  $a$  – толщина среза, м.

Для нахождения суммарной мощности теплового источника  $Q$  по всему пятну контакта необходимо знать количество режущих и трущихся зерен на пятне контакте.

Согласно исследованиям Д.Г. Евсеева и А.Н. Сальникова [4], доля теплового потока, поступающего в заготовку, определяется как

$$\Omega_3 = \frac{1}{1 + 1,25 \cdot \frac{\lambda_k}{\lambda} \cdot \sqrt{\frac{a}{h_\phi \cdot V_{срад}}}}, \quad (9)$$

где  $\lambda_k, \lambda$  – коэффициенты теплопроводности шлифовального круга и заготовки соответственно, Вт/(м·К);  $h_\phi$  – средний радиус площадки контакта единичного абразивного зерна с заготовкой, м;  $a$  – коэффициент температуропроводности материала заготовки, м<sup>2</sup>/с;  $V_{срад}$  – скорость подачи, м/с.

А.В. Королевым [14] предложена зависимость для определения числа зерен на единичной площади на расстоянии  $y$  от наиболее выступающего звена по зависимости

$$Z_y = Z_0 \cdot C_k \left( \frac{y}{d_3} \right)^\alpha, \quad (10)$$

где  $Z_0$  – число зерен на единичной площади круга, 1/м<sup>2</sup>;  $C_k, \alpha$  – коэффициенты;  $d_3$  – размер зерна, м.

$$Z_0 = \frac{W_3 \cdot W_c}{(W_3 + W_c + W_n) \cdot W_n \cdot d_3^2}, \quad (11)$$

где  $W_3, W_c, W_n$  – объемное содержание зерен, связки и пор соответственно, доли.

Для наглядной демонстрации работы разрабатываемой математической модели произведем расчет температуры в зоне контакта для конкретного примера.

Материал заготовки – сталь 30ХГСНА, диаметр заготовки – 70 мм, высота – 10 мм, диаметр круга – 600 мм, материал круга – электрокорунд, зернистость – F46, твердость – средняя СТ2, структура – 6.

В теории физики твердого тела установлено, что физические характеристики материала изменяются в зависимости от температуры. Для пяти групп сталей С.Н. Корчак [9] экспериментально определил зависимости удельной теплоемкости и теплопроводности от температуры. Данные по изменению физических свойств стали 30ХГСНА в зависимости от температуры приведены в **табл. 1**.

Режимы резания, для которых будут произведены расчеты, приведены в **табл. 2**.

Объемное содержание зерен, связки и пор для используемого круга составляет:  $W_3 = 0,5; W_c = 0,17; W_n = 0,33$  [16]. Размер зерна  $d_3 = 0,37$  мм =  $370 \cdot 10^{-6}$  м [17]. Подставив значения в формулу (11), получим:

$$Z_0 = \frac{0,5 \cdot 0,17}{(0,5 + 0,17 + 0,33) \cdot 0,33 \cdot (370 \cdot 10^{-6})^2} = 1881488 \text{ 1/м}^2 = 1,88 \text{ 1/м}^2.$$

Таблица 1. Изменение интенсивности сопротивления материала деформации, теплоемкости и теплопроводности стали 30ХГСНА и шлифовального круга от температуры  
 Table 1. Change in the intensity of resistance of the material to deformation, heat capacity and thermal conductivity of steel 30KhGSNA and the grinding wheel as a function of temperature

$T, ^\circ\text{C}$	$\sigma_i \cdot 10^6, \text{Дж/м}^3$	$c, \text{Дж/м}^3 \cdot ^\circ\text{C}$	$\lambda, \text{Дж/м} \cdot \text{с} \cdot ^\circ\text{C}$	$a, \text{м}^2/\text{с}$	$\lambda_{\text{к}}, \text{Вт/(м} \cdot ^\circ\text{C)} [15]$
0	320	0,461	28,989	10,17	2,62
200	280	0,487	35,851	9,39	2,95
400	250	0,539	32,926	8,11	3,31
600	200	0,609	29,153	5,58	3,67
800	130	0,695	26,453	5,5	4,03
1000	100	0,682	24,830	5,33	4,21
1200	80	0,676	23,935	5,89	–
1400	4	0,674	23,465	5,89	–
1500	0	0,673	23,326	5,89	–

Таблица 2. Режимы резания  
 Table 2. Cutting parameters

Параметр	Круглое наружное с радиальной подачей		
Скорость круга $V_{\text{к}}, \text{м/с}$	35	50	80
Скорость вращения заготовки $V_{\text{д}}, \text{м/мин/об/мин}$	35/158		
Скорость радиальной подачи $V_{\text{срад}}, \text{мм/мин}$	0,787	1,03	1,25
Толщина среза $a, \text{м}$	0,008	0,006	0,005

Подставляем полученное значение в формулу (10), значения коэффициентов  $C_k = 0,24$ ,  $\alpha = 2,75$  [16]:

$$Z_y = 1,88 \cdot 0,24 \left( \frac{0,1}{0,37} \right)^{2,75} = 0,12.$$

Значение  $y$  должно соответствовать условию  $0 \leq y \leq l_s + a$ , для нашего примера примем равным значению износа. И тогда получаем, что количество зерен на  $1 \text{ мм}^2$  равно 0,012. Размер пятна контакта круга и заготовки найдем по формуле, предложенной Масловым Е.Н. [18]. Тогда для скорости 35 м/с количество зерен на пятне контакта равно 26, для 50 – 23, а для 80 – 21.

Поскольку в формуле (9) теплопроводность и температуропроводность заготовки и теплопроводность шлифовального круга зависят от температуры в зоне контакта, поэтому и доля поступающего в заготовку тепла представлена в виде графика (рис. 1).

Произведем расчет по формулам (6) – (8) и найдем суммарное значение мощности теплового источника для заданных скоростей шлифовального круга в зависимости от температуры в зоне контакта (рис. 2). Как видно из графика и табл. 1, с увеличением температуры сокращается сопротивление материала резанию, а следовательно, и количество усилий, затрачиваемых на резание.

Для проверки адекватности модели сравним рассчитанные значения с результатами, полученными В.И. Ключко [19]. Для этого произведем расчет температуры в зоне контакта для заданных скоростей шлифовального круга и отобразим полученные значения на графике (рис. 3). Как видно из графика, разница между расчетными значениями и данными В.И. Ключко составляет не более 10%. Это позволяет утверждать, что представленную модель можно использовать для определения температуры в зоне контакта при круглом врезном шлифовании.

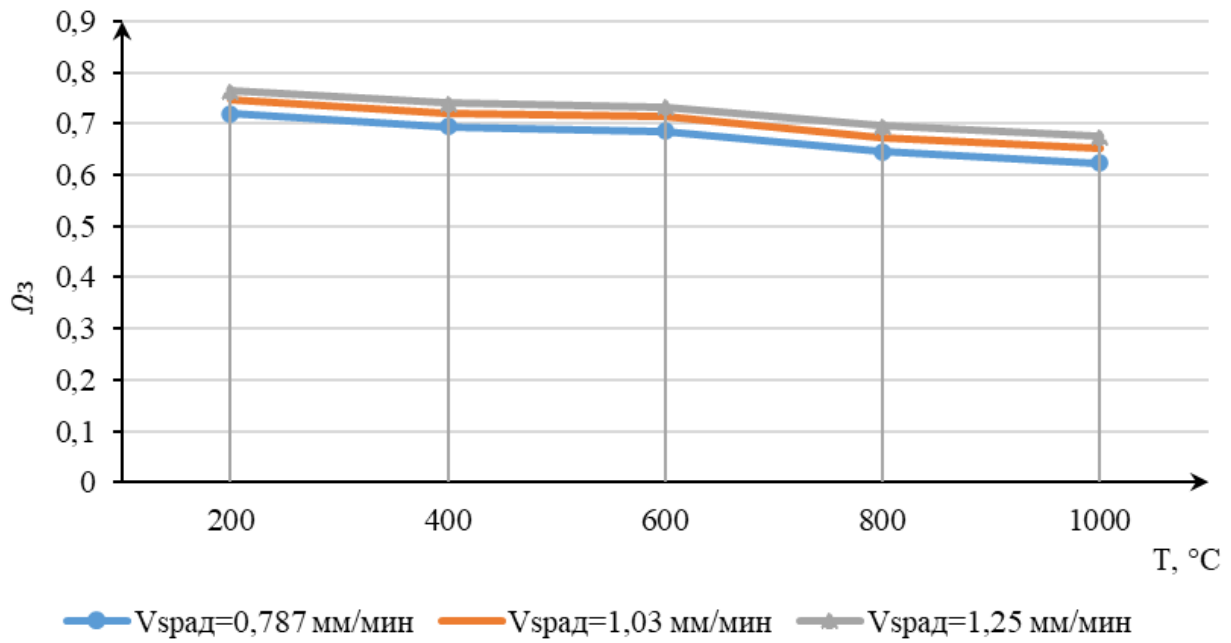


Рис. 1. График доли поступления тепла в заготовку в зависимости от температуры  
 Fig. 1. Graph of the heat input into the workpiece depending on the temperature

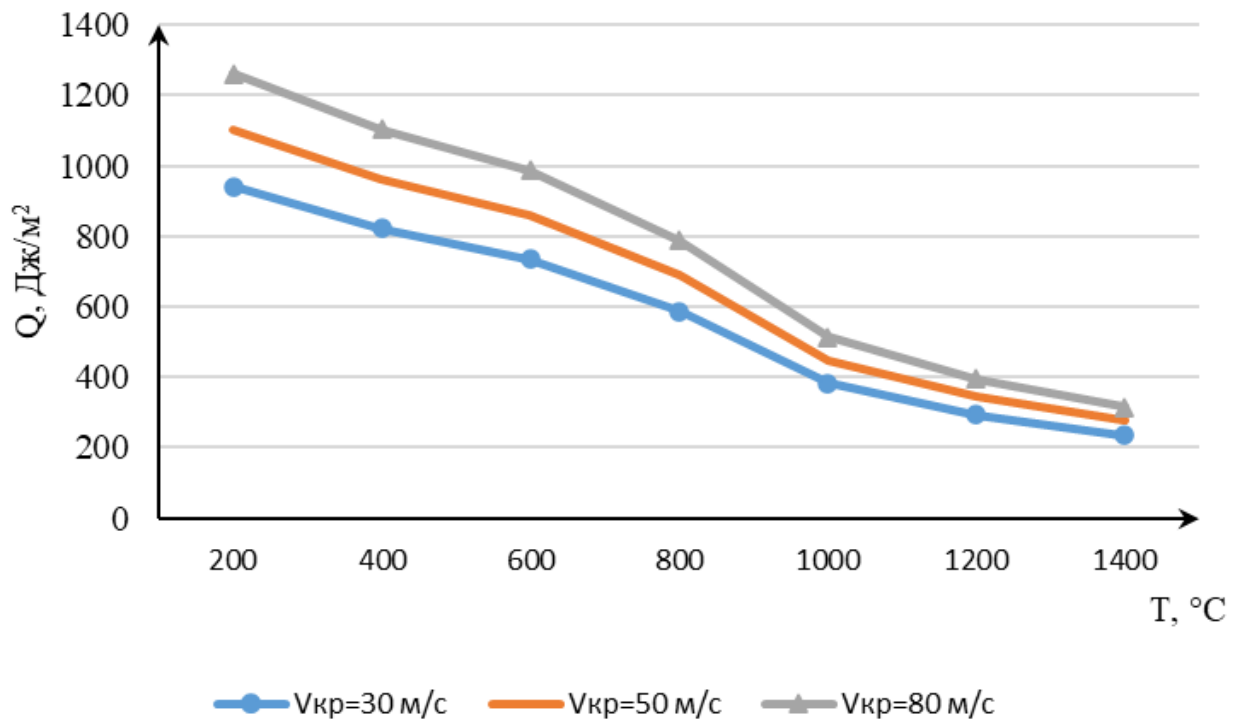


Рис. 2. График суммарной мощности теплового источника в зависимости от температуры  
 Fig. 2. Graph of the total power of the heat source depending on the temperature

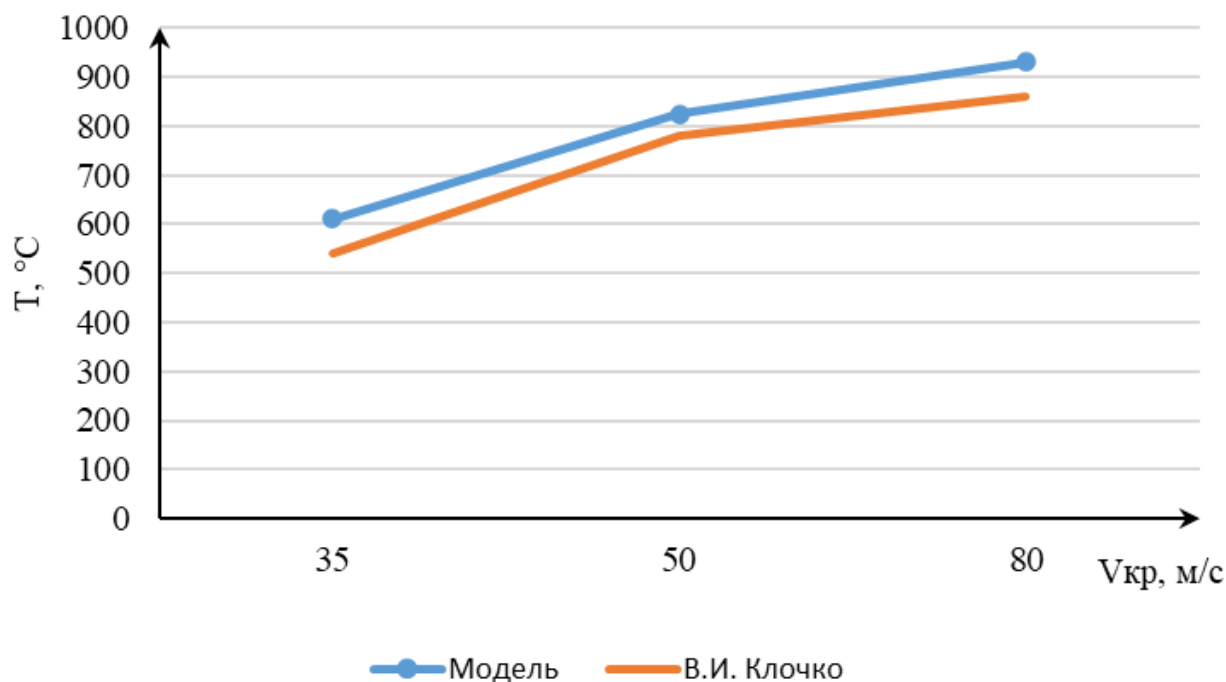


Рис. 3. График температуры в зоне контакта в зависимости от скорости шлифовального круга  
 Fig. 3. Graph of the temperature in the contact zone depending on the grinding wheel speed

**Заключение**

Разработана математическая модель проектирования температуры в зоне контакта шлифовального круга и заготовки при круглом врезном шлифовании. Данная модель может в дальнейшем использоваться для реализации ограничения по бесприжоговости обработки при проектировании циклов круглого врезного шлифования.

**Список источников**

1. Baidakova N.V., Orlova T.N. Influence of Abrasive Grain Geometrical Characteristics on the Grinding Quality // *Procedia Engineering*, 2017, vol. 206, pp. 194-199, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.459>.
2. The Influence of Abrasive Grit Morphology on Wheel Topography and Grinding Performance / J. Palmer, D. Curtis, D. Novovic, H. Ghadbeigi// *Procedia CIRP*, 2018, vol. 77, pp. 239-242. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.09.005>.
3. Новоселов Ю.К., Богуцкий В.Б., Дзюбаба Р.Н. Прогнозирование параметров шероховатости поверхности при абразивной обработке // *Известия ТулГУ. Технические науки*. 2017. Вып. 8. Ч. 1. С. 262-269.
4. Евсеев Д.Г., Сальников А.Н. Физические основы процесса шлифования. Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 1978. 128 с.
5. Lishchenko N.V., Larshin V.P. The influence of lubricating fluid coolant action on grinding temperature // *Science Vector of Togliatti State University*. 2015. №3-1. С. 68-74.
6. Дьяконов А.А. Исследование прочностных характе-

- ристик материалов при скорости деформации и температурном режиме шлифования // *Металлообработка*. 2007. №4. С. 2-5.
7. Grinding force and power modeling based on chip thickness analysis / R.L. Hecker, S.Y. Liang, X.J. Wu, et al. // *Int J AdvManufTechnol* 2007. Vol. 33. P. 449. <https://doi.org/10.1007/s00170-006-0473-y>
8. Сипайлов В.А. Тепловые процессы при шлифовании и управление качеством поверхности. М.: Машиностроение, 1978. 167 с.
9. Корчак С.Н. Производительность процесса шлифования стальных деталей. М.: Машиностроение, 1974. 280 с.
10. Переладов А.Б., Камкин И.П., Анохин А.В. Исследование статистико-вероятностных характеристик рабочей поверхности шлифовального круга // *Известия вузов. Машиностроение*. 2014. №3 (648). С. 67-71.
11. Носенко В.А., Даниленко М.В., Васильев В.В. Методика определения характера распределения контактирующих вершин зерен на поверхности шлифовального круга с учетом многопроходности процесса // *Известия Волгоградского государственного технического университета*. 2021. Т. 1 (248). С. 23-26.
12. Байкалов А.К. Введение в теорию шлифования материалов. Киев: Наукова думка, 1978. 207 с.
13. Parametric evaluation and three-dimensional modelling for surface topography of grinding wheel/ W. Liu, Zh. Deng, Y. Shang, L. Wan // *International Journal of Mechanical Sciences*. 2019. Vol. 155. Pp. 334-342. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2019.03.006>.

14. Королев А.В. Исследование процессов образования поверхностей инструмента и детали при абразивной обработке. Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 1975. 191 с.
15. Киселев Е.С. Теплофизика правки шлифовальных кругов с применением СОЖ. Ульяновск: УЛГТУ, 2001. 170 с.
16. Островский В.И. Теоретические основы процесса шлифования. Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1981. 144 с.
17. Переверзев П.П. Теория и методика расчета оптимальных циклов обработки деталей на круглошлифовальных станках с программным управлением: дис. ... д-ра техн. наук. Челябинск, 1999. 295 с.
18. Маслов Е.Н. Теория шлифования материалов. М.: Машиностроение, 1974. 320 с.
19. Ключко В.И. Эффективность высокоскоростного шлифования разных сталей и сплавов с учетом точности и качества обработки: дис. ... канд. техн. наук. Челябинск, 1984. 207 с.
9. Korchak S.N. *Proizvoditel'nost' protsessa shlifovaniya stal'nykh detaley* [The performance of steel part grinding process]. Moscow: Mashinostroenie, 1974, 280 p. (In Russ.)
10. Pereladov A.B., Kamkin I.P., Anokhin A.V. Understanding the statistical and probabilistic characteristics of the working surface of the grinding wheel. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroyeniye* [Proceedings of Russian Universities. Mechanical Engineering], 2014, no. 3 (648), pp. 67-71. (In Russ.)
11. Nosenko V.A., Danilenko M.V., Vasiliev V.V. A method for determining the distribution of contacting grain peaks on the surface of grinding wheels accounting for multiple passes. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Volgograd State Technical University], 2021, vol. 1 (248), p. 23-26. (In Russ.)
12. Baikalov A.K. *Vvedenie v teoriyu shlifovaniya materialov* [Introduction to the theory of grinding]. Kyiv: Naukova Dumka, 1978, 207 p. (In Russ.)
13. Liu W., Deng Zh., Shang Y., Wan L. Parametric evaluation and three-dimensional modelling for surface topography of grinding wheel. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2019, vol. 155, pp. 334-342, <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2019.03.006>.
14. Korolev A.V. *Issledovanie protsessov obrazovaniya poverkhnostey instrumenta i detali pri abrazivnoy obrabotke* [Understanding surface formation in tools and workpieces during abrasive machining]. Saratov: Publishing House of Saratov University, 1975, 191 p. (In Russ.)
15. Kiselev E.S. *Teplofizika pravki shlifoval'nykh krugov s primeneniem SOZH* [Thermal physics behind grinding wheel dressing using lubricoolants]. Ulyanovsk: UISTU, 2001, 170 p. (In Russ.)
16. Ostrovsky V.I. *Teoreticheskie osnovy protsessa shlifovaniya* [Fundamentals of the grinding process]. Leningrad: Publishing House of Leningrad University, 1981, 144 p. (In Russ.)
17. Pereverzev P.P. *Teoriya i metodika rascheta optimal'nykh tsiklov obrabotki detaley na krugloshlifoval'nykh stankakh s programmnym upravleniyem: dissertatsiya doktora tekhn. nauk* [Calculating optimum machining cycles for cylindrical CNC grinders: Theory and procedure. Doctoral dissertation]. Chelyabinsk, 1999. 295 p. (In Russ.)
18. Maslov E.N. *Teoriya shlifovaniya materialov* [Theory of grinding]. Moscow: Mashinostroenie, 1974, 320 p. (In Russ.)
19. Klochko V.I. *Effektivnost' vysokoskorostnogo shlifovaniya raznykh staley i spлавov s uchetom tochnosti i kachestva obrabotki: dis. ... kand. tekhn. nauk* [The efficiency of high-speed grinding of different steels and alloys taking into account precision and quality. PhD dissertation]. Chelyabinsk, 1984, 207 p. (In Russ.)

### References

1. Baidakova N.V., Orlova T.N. Influence of Abrasive Grain Geometrical Characteristics on the Grinding Quality. *Procedia Engineering*, 2017, Volume 206, pp. 194-199, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.459>.
2. Palmer J., Curtis D., Novovic D., Ghadbeigi H. The Influence of Abrasive Grit Morphology on Wheel Topography and Grinding Performance. *Procedia CIRP*, 2018, vol. 77, pp. 239-242, <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.09.005>.
3. Novoselov Yu.K., Bogutsky V.B., Dzyubaba R.N. Prediction of surface roughness parameters during abrasive machining. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki* [Bulletin of TulGU. Engineering sciences], 2017, vol. 8, ch. 1, pp. 262-269. (In Russ.)
4. Evseev D.G., Salnikov A.N. *Fizicheskie osnovy protsessa shlifovaniya* [Physical basis of the grinding process]. Saratov: Publishing House of Saratov University, 1978, 128 p. (In Russ.)
5. Lishchenko N.V., Larshin V.P. The influence of lubricating fluid coolant action on grinding temperature. *Science Vector of Togliatti State University*, 2015, no. 3-1, pp. 68-74.
6. Dyakonov A.A. Understanding the strength of materials at the rate of deformation and the temperature regime of grinding. *Metalloobrabotka* [Metalworking], 2007, no. 4, pp. 2-5. (In Russ.)
7. R.L. Hecker, S.Y. Liang, X.J. Wu, et al. Grinding force and power modeling based on chip thickness analysis. *Int J AdvManufTechnol*, 2007, vol. 33, p. 449, <https://doi.org/10.1007/s00170-006-0473-y>
8. Sipailov V.A. *Teplovye protsessy pri shlifovanii i upravlenie kachestvom poverkhnosti*. [Thermal processes during grinding and surface quality control]. Moscow: Mashinostroenie, 1978, 167 p. (In Russ.)

Поступила 24.08.2022; принята к публикации 12.09.2022; опубликована 26.09.2022  
Submitted 24/08/2022; revised 12/09/2022; published 26/09/2022



**Дегтярева-Кашутина Анастасия Сергеевна** – старший преподаватель,  
Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия.  
Email: asdegyareva24@gmail.com. ORCID 0000-0002-4236-9207

**Болдырев Игорь Станиславович** – кандидат технических наук, доцент,  
Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия.  
Email: boldyrev@susu.ru.

**Anastasia S. Degtyareva-Kashutina** – Senior Lecturer,  
South Ural State University, Chelyabinsk, Russia.  
Email: asdegyareva24@gmail.com. ORCID 0000-0002-4236-9207

**Igor S. Boldyrev** – PhD (Eng.), Associate Professor,  
South Ural State University, Chelyabinsk, Russia.  
Email: boldyrev@susu.ru.