

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)  
УДК 621.92  
DOI: 10.18503/1995-2732-2022-20-4-110-119



## АПРОБАЦИЯ ТЕМПЕРАТУРНОЙ МОДЕЛИ КРУГЛОГО ВРЕЗНОГО ШЛИФОВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

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

Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

**Аннотация.** В настоящее время повышается требование к точности изготавливаемых изделий, что приводит к увеличению финишных операций. Для закаленных поверхностей деталей одним из популярных методов является шлифование. В связи с высокой конкуренцией необходимо, чтобы повышение качества не сказывалось на себестоимости выпускаемой продукции, поэтому на производстве активно внедряются технологии по повышению эффективности. Один из таких методов – это циклы обработки. Чаще всего проектирование циклов аналитическим методом производится за счет учета ряда ограничений, например по мощности, жесткости технологической системы, допускам на размер и отсутствие температурных дефектов. Технологической особенностью процесса шлифования является его высокая теплонапряженность, вследствие чего температура в зоне обработки может достигать температуры плавления стали. Это приводит к возникновению необратимых дефектов на поверхности готовой детали, а следовательно, к браку и издержкам производства. Из этого можно сделать вывод, что ограничение по температуре является ключевым при проектировании циклов обработки. В рамках данной статьи проводилась проверка разработанной ранее температурной модели круглого врезного шлифования. Проверка осуществлялась с помощью сравнения распределения температуры в заготовке при моделировании процесса обработки методом конечно-элементного моделирования в программной среде Ansys и данными расчетов проверяемой модели. В результате апробации установлено, что погрешность между максимальными температурами в зоне обработки не превышает 7%, что позволяет признать разработанную модель адекватной. Кроме того, в дальнейшем планируется провести ряд экспериментов, проверяющих работу температурной модели при проектировании цикла обработки.

**Ключевые слова:** температура при шлифовании, бесприжоговость, цикл обработки, метод конечных элементов

*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. Апробация температурной модели круглого врезного шлифования с использованием метода конечных элементов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2022. Т. 20. №4. С. 110-119. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-4-110-119>



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

# TESTING A TEMPERATURE MODEL OF CYLINDRICAL PLUNGE GRINDING USING THE FINITE ELEMENT METHOD

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

South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

**Abstract.** Now the requirement for the accuracy of manufactured products is rising, leading to an increase in finishing operations. One of the commonly used methods for hardened workpiece surfaces is grinding. Due to intense competition, quality improvement should not influence the cost of products; therefore, technologies aimed at improving efficiency are actively introduced in production. One of such methods is machining cycles. The cycles are often designed by an analytical method factoring into a number of restrictions, for example, in terms of power, rigidity of the technological system, dimensional tolerances, and the absence of temperature defects. A technological feature of the grinding process is its high heat stress, as a result of which the temperature in the machining zone can reach steel melting temperature. This leads to irreversible defects on the surface of the finished part and, consequently, rejected products and production costs. In view of this, it may be concluded that the temperature limit is key in the design of machining cycles. The paper describes testing of a previously developed temperature model of cylindrical plunge grinding. The testing was carried out by comparing the temperature distribution in the workpiece, when simulating the machining process using the finite element modeling method in the Ansys software environment, and the calculation data of the tested model. As a result of such testing, it was found that the error between maximum temperatures in the machining zone did not exceed 7%, allowing us to recognize the developed model as adequate. In addition, in future we intend to conduct a number of experiments to test the operation of the temperature model when designing a machining cycle.

**Keywords:** grinding temperature, absence of temperature defects, machining cycle, finite element method

*The 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. Testing a Temperature Model of Cylindrical Plunge Grinding Using the Finite Element Method. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2022, vol. 20, no. 4, pp. 110-119. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-4-110-119>

## Введение

В современном производстве для финишной обработки закаленных поверхностей деталей применяется операция шлифования. Для повышения эффективности данной операции производится закупка современных станков с числовым программным управлением (ЧПУ), что позволяет выполнять обработку с применением такого технологического приёма, как цикл. Цикл обработки – это совокупность движений инструмента, повторяющихся при обработке каждой детали. Применение данного приёма позволяет повысить производительность. Проектирование циклов обработки может происходить несколькими методами: с использованием нормативов и справочников режимов резания, с помощью предустановленных в систему ЧПУ станка циклов и применяя аналитические методы.

Циклы, спроектированные по нормативам, имеют следующие допущения: адаптация нормативных значений под конкретные условия обработки производится с помощью эмпирических коэффициентов [1]. Кроме того, количество ступеней

цикла постоянно, что не гарантирует максимальное качество и производительность [2]. Проектирование циклов с помощью предустановленных в стойку ЧПУ программ напоминает работу «черного ящика», следовательно, оператор не может управлять качеством и скоростью обработки [3, 4]. Аналитический метод представлен различными математическими моделями отечественных и зарубежных ученых. В нашей стране основоположником считается Лурье [5], но подробнее рассмотрим современные модели проектирования циклов.

В работах П.П. Переверзева и А.В. Акинцевой [6, 7] описывается методология комплексной структурно-параметрической оптимизации циклов круглого шлифования. Реализация данной методологии производится через цифровой двойник процесса, который учитывает съём металла при изменении таких параметров, как сила резания, глубина резания, жесткость технологической системы, припуск на обработку и износ шлифовального круга. Кроме того, цифровой двойник оптимизирует цикл обработки с помощью метода динамического программирования, исходя из ограничений по требуемой точности

обработки, технологических возможностей оборудования и режущего инструмента.

Авторы статей [8, 9] реализуют оптимизацию режимов обработки на операции шлифования для обеспечения минимальной шероховатости обрабатываемой поверхности. Задача оптимизации реализована с помощью системы линейных уравнений, которые описывают шестнадцать ограничений: по периоду стойкости, твердости и режущей способности шлифовального круга, по деформациям технологической системы, которые выражены через силу резания, по возможностям оборудования и максимально возможным технико-экономическим показателям. Ряд параметров авторы описывают эмпирическими зависимостями.

Авторами [10, 11] разработан программный модуль, который позволяет произвести расчет эффективного цикла для станка с ЧПУ. Данный программный модуль строит цикл шлифования, учитывая ряд ограничений по требуемой шероховатости, возможностям оборудования, износу шлифовального круга, бесприжоговости обработки, жесткости технологической системы.

Среди зарубежных ученых первопроходцем в оптимизации циклов шлифования считается С. Малкин [12], который предложил метод оптимизации, позволяющий обеспечивать требуемое качество поверхности за минимальное время обработки. Оптимизация происходит в два этапа: на первом этапе определяется максимально допустимая скорость радиальной подачи, на втором производится корректировка цикла с учетом размера прижога, который образуется на предыдущем рабочем ходу. Второй этап реализуется за счет ускоренного снятия материала на первых ступенях цикла с последующим снижением подачи по мере снятия припуска.

Авторами [13, 14] разработана методика проектирования циклов для процессов круглого и бесцентрового шлифования, основанная на стратегии непрерывного изменения скорости. Эта технология позволяет повысить контроль над кинематикой процесса шлифовки и механизмом удаления стружки. Методика реализована в виде динамической модели, в которой можно анализировать изменение средней толщины стружки, сил и мощности шлифования, шероховатость заготовки, допуски на размеры и допуски формы, термические дефекты и жесткость технологической системы.

В работах [15, 16] описывают применение искусственного интеллекта для моделирования и оптимизации процесса шлифования. Авторами [16] разработана методология оптимизации про-

цесса шлифования, которая использует многослойный персептрон (MLP) ANN, связанный с NSGA-II, в форме целевой функции. Методология состояла из трех этапов. На первом формировался набор экспериментальных данных, содержащий входные параметры процесса шлифования, связанные с выходными, которые определяют качество обработки. Поскольку дальнейшая оптимизация процесса будет производиться за счет управления входными параметрами, поэтому перед математическим моделированием необходимо выделить минимальное количество наиболее важных. Второй был посвящен обучению и проверке MLP ANN как симулятора процесса шлифования. Наконец, третий, касался генерации оптимизированных решений с помощью NSGA-II, связанных с уже обученным MLP ANN. В итоге полученный симулятор выдавал данные, совпадающие с уже описанными для операций шлифования. Авторами статьи [15] отмечается, что большинство моделей с использованием искусственного интеллекта строится на ограниченном количестве экспериментальных данных, что значительно снижает круг их применимости.

Оптимизация и управление процессом шлифования производится с помощью реализации в программе MATLAB целевой функции с ограничениями [17]. Ограничения накладываются на следующие параметры: мощность обработки, глубина прижога, шероховатость поверхности, допуск на изготовление.

Из рассмотренных выше работ можно сделать вывод, что оптимизация процесса шлифования с применением циклов обработки является актуальной задачей в настоящее время. Большинство авторов [10-14, 17] подчеркивают важность учета ограничения по отсутствию температурных дефектов на поверхности детали. Поэтому целью данной работы является проверка работоспособности разработанной температурной модели [18] круглого врезного шлифования по средствам сравнения расчетных данных с данными, полученными методом конечно-элементного моделирования.

### Обзор литературы

Количество тепла, выделяемого в процессе шлифования вследствие больших скоростей, значительно выше, чем при других видах обработки металлов резанием. Мгновенная температура в зоне контакта может достигать температуры плавления стали, что приводит к изменению структуры поверхностного слоя детали [19]. Второй причиной возникновения температурных дефектов

является низкая теплопроводность абразивного круга и малые, для значительного отвода тепла, размеры стружки, поэтому около 94% тепла при шлифовании переходят в заготовку [20, 21].

Шлифование является финишной операцией механической обработки, которая чаще всего производится на закаленных деталях, и изменение структуры поверхностного слоя вследствие температурных деформаций приводит к неисправимому браку. Поэтому разработана температурная модель взаимодействия шлифовального круга и заготовки при круглом врезном шлифовании. Данная модель позволяет производить расчет температуры как на поверхности детали, так и на любом расстоянии от неё с учетом съема припуска. Для применения разработанной модели для проектирования циклов обработки необходима её апробация. Есть несколько методов проверки математической модели: сопоставление данных с экспериментальными данными и сопоставление с данными другой проверенной модели. Рассмотрим варианты экспериментальных исследований.

Для измерения температуры в процессе шлифования применяют различные технологии, которые можно разделить на два типа – контактные и бесконтактные. Контактное измерение температуры с использованием термопар имеет широкое распространение из-за ряда преимуществ: простота конструкции, надежность и низкая стоимость. Термопары устанавливаются с обратной стороны от обрабатываемой поверхности через небольшое отверстие. Затем производится шлифование поверхности с параллельным измерением температуры [22, 23]. Однако из-за особенностей установки проволочных термопар прямое измерение температуры поверхности затруднено.

Авторами в [24] для измерения температуры предложен массив термопар из фольги. Контакты замыкаются в процессе шлифования и производится фиксация температуры поверхности шлифования в 2D/3D-отображении. Установлено в [25], что пространственное распределение поля температуры шлифования неоднородно, и часто геометрия термопары намного больше, чем температурный градиент, что приводит к значительным отклонениям в результатах измерений.

В отличие от контактных методов измерения, бесконтактные позволяют избежать отклонения температурного поля, вызванного внедрением термопар. Тепловизоры и пирометрические системы активно используются для контроля температуры в реальном времени при обработке шлифованием [26, 27]. Однако из-за того, что зо-

на контакта шлифовального круга и детали перекрывается охлаждающей жидкостью, тепловизионной камере сложно измерить температуру именно на обрабатываемой поверхности. Кроме того, скорость отклика тепловизионного изображения намного меньше, чем изменение температуры, что увеличивает погрешность измерений.

Авторами [28] установлена взаимосвязь между переходными характеристиками теплопередачи при шлифовании и разнообразием металлургических превращений. Для этого проводился эксперимент по измерению температуры при сухом шлифовании, после чего фиксировалось изображение обработанной поверхности и применялся улучшенный алгоритм его распознавания. Выявленные закономерности распространяются на углеродистые стали и большинство металлических материалов (процесс шлифования сопровождается аустенитизацией). При этом пространственное и временное распределение поля температур на обработанной поверхности точно реконструируется на основе металлографических характеристик и алгоритма циклической обратной связи.

Экспериментальные методы требуют дорогостоящего оборудования и имеют ряд ограничений для применения. Рассмотрим аналитические методы расчета температуры при шлифовании.

Метод конечных элементов (МКЭ) имеет широкое применение как для моделирования поведения материала, так и для анализа взаимодействия с нескольких физических полей. Авторы [29, 30], используя МКЭ, смоделировали переходное температурное поле и поле тепловых напряжений, генерируемое в заготовке, с учетом изменения свойств материала под действием температуры. В статье [31] разработана МКЭ-модель для прогнозирования температурного поля при круглом шлифовании. Взаимодействие круга и заготовки происходит на определенном пятне контакта с постоянной скоростью, без учета смаочно-охлаждающей жидкости.

Помимо МКЭ для прогнозирования температуры при шлифовании применяют метод конечных блоков (МКБ) без сетки. Основной особенностью МКБ без сетки является то, что физическая область разделена на несколько блоков (как элементы в МКЭ), и каждому блоку присваивается определенное уравнение. Затем непрерывные условия используются для соединения каждых двух соседних блоков [32].

Также для моделирования температурного поля в зоне шлифования применяется метод конечных разностей. Авторы [33] создали конечно-



разностную модель на основе теории теплопередачи и теплопроводности при шлифовании. Впоследствии [34] предложили улучшенный МКР для трехмерного температурного поля, который объединяет дифференциальные уравнения различных точек, и эффективность вычислений повышается примерно на 20%. МКР может точно имитировать сложный процесс теплопередачи заготовки, но источник входного тепла и распределение энергии необходимо определить заранее. Однако источник тепла и распределение энергии определяются в основном простой дискретизацией результатов теоретического анализа, что вносит погрешность анализа в процесс дифференциального теплообмена и влияет на точность поля температуры.

### Материалы и методы исследования

Методология и методы исследования основывались на фундаментальных положениях теории технологии машиностроения, теории резания при лезвийной и абразивной обработке, законах теории теплопроводности твердых тел.

В рамках данной работы применяется метод конечно-элементного моделирования взаимодействия шлифовального круга с заготовкой с учетом теплообмена с окружающей средой. Программных пакетов, обладающих необходимыми функционалом, два: COMSOL Multiphysics и ANSYS Mechanical.

COMSOL Multiphysics – это интегрированная среда численного моделирования, в которой можно выполнить все этапы построения расчетных моделей, – от создания геометрии, определения свойств материалов и описания физических явлений до настройки решения и визуализации результатов.

Ansys Mechanical – это программный продукт, позволяющий провести анализ статической прочности конструкций, в том числе с учетом изменения исходной формы конструкции, сложного контактного взаимодействия деталей в сборке, нелинейного поведения материалов. В качестве нагрузок могут быть учтены как усилия, давления или известные перемещения, так и воздействия, вычисленные в специальных расчетных моделях, такие как сложное распределение температуры в теле. Ansys Mechanical позволяет произвести моделирование с учетом большего количества факторов, что минимизирует допущения, полагаемые при моделировании процесса, в отличие от реальных условий. Поэтому для решения поставленной задачи применялся именно этот программный продукт.

### Полученные результаты и их обсуждение

Для проведения конечно-элементного моделирования и расчетов в проверяемой программе принимались следующие исходные данные. Материал заготовки – сталь 30ХГСНА, диаметр заготовки – 70 мм, высота – 10 мм. Скорость вращения заготовки  $V_d = 35$  м/мин = 158 об/мин. Толщина среза  $a = 0,006$  м. Припуск на обработку – 0,5 мм.

Диаметр круга – 600 мм, материал круга – электрокорунд, зернистость – F46, твердость – средняя СТ2, структура – 6. Объемное содержание зерен, связки и пор для используемого круга составляет:  $W_z = 0,5$ ;  $W_c = 0,17$ ;  $W_n = 0,33$  [35]. Размер зерна  $d_z = 0,37$  мм =  $370 \cdot 10^{-6}$  м. Скорость круга  $V_k = 50$  м/с, скорость радиальной подачи постоянна и равна  $S_{рад} = 1,25$  мм/мин.

Для решения задачи теплопроводности представим заготовку в виде цилиндра с теплоизолированными торцами. Взаимодействие шлифовального круга и заготовки происходит по дуге контакта (зоне резания). Шлифовальный круг представим в виде теплового источника мощностью  $Q$ , который перемещается по поверхности заготовки с угловой скоростью  $V_d$ . Вне зоны резания с поверхности заготовки происходит теплоотдача с коэффициентом  $\alpha$ .

Уравнение теплопроводности в полярных координатах:

$$c \frac{\partial U}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial r} \left( \lambda \frac{\partial U}{\partial r} \right) + \frac{\lambda \partial U}{r \partial r} + \frac{\partial}{r^2 \partial \varphi} \left( \lambda \frac{\partial U}{\partial \varphi} \right), \quad (1)$$

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

Краевые условия в зоне резания:

$$\lambda \frac{\partial u}{\partial r} = Q. \quad (2)$$

Краевые условия вне зоны резания:

$$\lambda \frac{\partial u}{\partial r} = \alpha(T - U), \quad (3)$$

где  $T$  – температура окружающей среды, °C.

В двумерной схеме получаем задачу в виде уравнения теплопроводности и совокупности краевых условий второго и третьего рода, то есть смешанную краевую задачу для уравнения (1).

Деталь разбивалась сеточкой, состоящей из 40 слоев и 80 углов, то есть для заготовки диаметром 70 мм шаг между слоями равен 1,75 мм, а разница между углами – 4,5°, длина дуги на поверхности равна 2,75 мм. Тепловой источник

моделировался как сплошной поток постоянной интенсивности. Начальная температура заготовки и окружающей среды задавалась 20°C. Подвод смазочно-охлаждающей жидкости учитывался как воздействие охлаждающего источника ограниченного размера, с учетом тепло- и температуропроводности материала заготовки.

При данных условиях снятие припуска происходит за 63 оборота заготовки. На **рис. 1** представлены данные распределения температуры на 10-ти (а), 20-ти (б), 30-ти (в) и 60-ти (г) оборотах.

Как видно из представленных распределений, максимальная температура в зоне обработки на 60-м обороте и составила 1574,67°C, минимальная температура на этом же обороте равна 193,108°C. С учетом того, что расстояние между слоями равно 1,75 мм, а размер снимаемого припуска 0,5 мм, то прижог на поверхности готовой детали образовался на 20-м обороте, где температура в зоне резания составила 905,881°C, а температура на 2-м слое 709,5°C (см. **рис. 1, б**).

При расчете в проверяемой температурной модели круглого врезного шлифования на последнем обороте температура в пятне контакта круга и заготовки достигала 1474,028°C, а в большей части детали 169,5°C (**рис. 2**).

Разница между максимальными температурами моделирования и расчета составила менее 7%, а между минимальными 14%. Большую разницу между минимальными температурами можно объяснить особенностью расчетов температурной модели, которая в отличие от МКЭ считает температуру по секторам сетки, принимая, что в рамках одного сектора температура одинаковая. Следовательно, увеличивая количество секторов, повышется точность расчетов, но при этом возрастает их длительность, что не всегда оправдано. Поскольку основной задачей разработанной температурной модели является снижение подачи при приближении температуры на поверхности детали к максимально допустимой, то можно считать, что апробация прошла успешно.

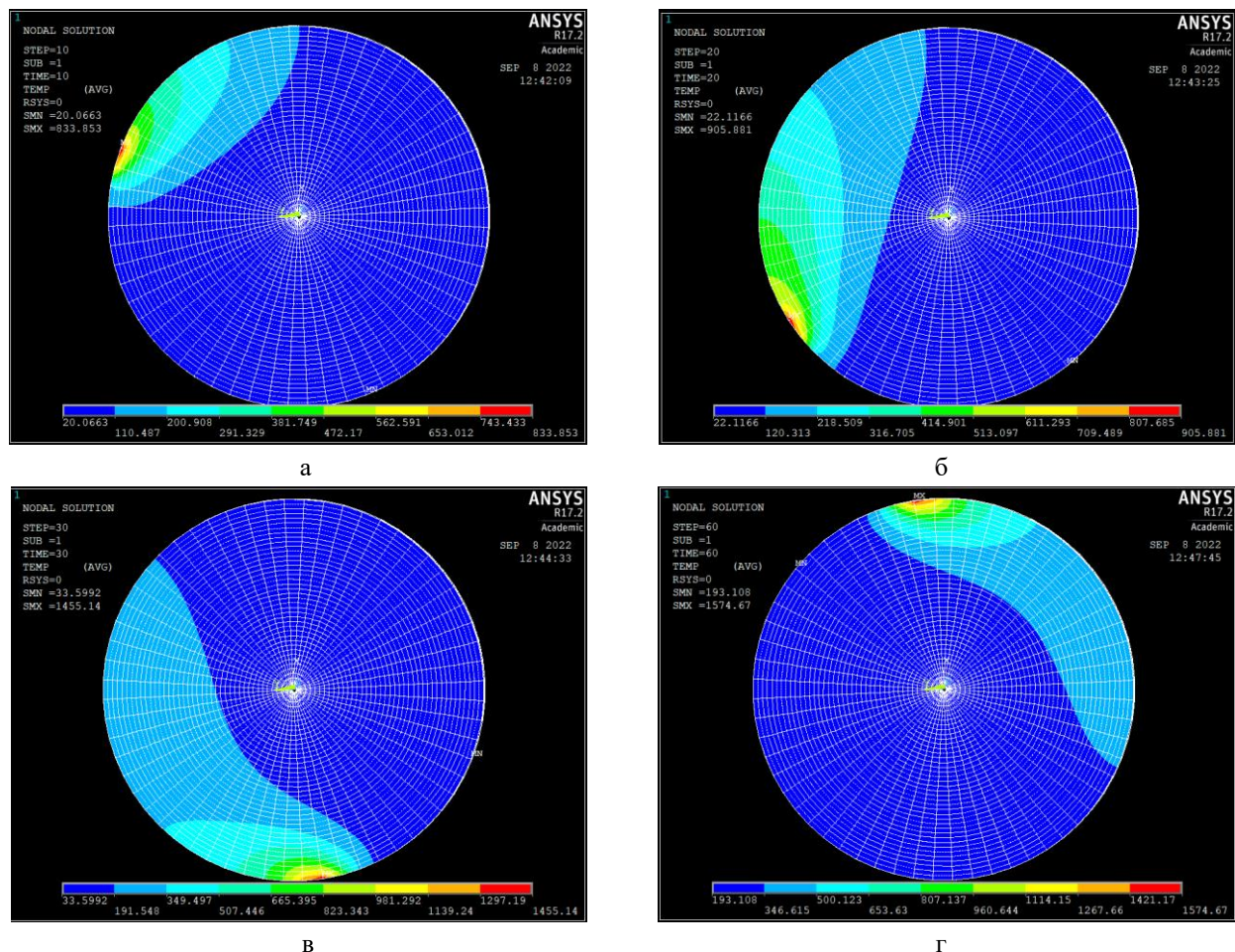


Рис. 1. Распределение температуры в заготовке при обработке шлифованием на: а – 10-ти оборотах; б – 20-ти оборотах; в – 30-ти оборотах; г – 60-ти оборотах

Fig. 1. Temperature distribution in the workpiece during grinding on: а is 10 turns; б is 20 turns; в is 30 turns; г is 60 turns

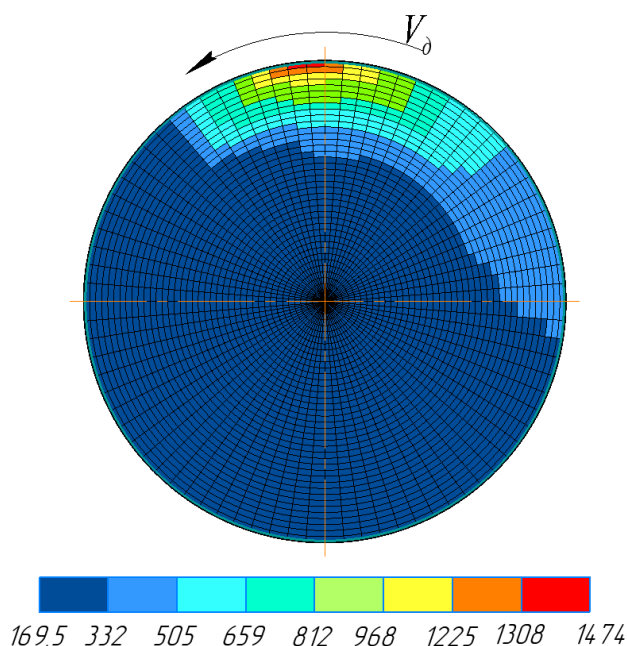


Рис. 2. Распределение температуры в заготовке на 60-м обороте при расчете в температурной модели  
 Fig. 2. Temperature distribution in the workpiece at the 60<sup>th</sup> turn when calculated in the temperature model

### Заключение

Проведена апробация разработанной температурной модели для круглого врезного шлифования, в ходе которой установлено, что погрешность между максимальными температурами, рассчитанными методом конечных элементов и проверяемой моделью, составляет менее 7%.

В дальнейшем планируется провести проверку на своевременность переключения радиальной подачи в процессе обработки с целью обеспечения бесприжоговости.

### Список источников

1. Общемашиностроительные нормативы времени и режимов резания для нормирования работ, выполняемых на универсальных и многоцелевых станках с числовым программным управлением: справочник / Переверзев П.П. [и др.]. М.: Экономика, 1990. 394 с.
2. Вереина Л.И., Краснов М.М., Фрадкин Е.И. Абразивная обработка: справочник. М.: ИНФРА-М, 2017. 304 с.
3. Fanuc Series 30i-Model B. Fanuc Series 31i-Model B. Fanuc Series 32i-Model B. Для систем многоцелевого станка. Руководство по эксплуатации. 2012. 474 с.
4. Studer. Grinding software [Электронный ресурс]: офиц. сайт. 2022. URL: <https://www.studer.com/en/cylindrical-grinding-machines/software-options/grinding-software/> (дата обращения 06.09.2022).
5. Лурье Г.Б. Прогрессивные методы круглого наружного шлифования. Л.: Машиностроение, Ленингр. отделение, 1984. 103 с.
6. Акинцева А.В., Переверзев П.П. Основные этапы создания единой методологии комплексной структурно-параметрической оптимизации циклов круглого шлифования с ЧПУ // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение. 2021. Т. 21. № 4. С. 37-48. DOI: 10.14529/engin210404.
7. Analytical basics of digital twin for CNC round grinding process / A.V. Akintseva, P.P. Pereverzev, B. Reshetnikov, A.V. Irshin // Materials Today: Proceedings, 2020, pp. 1740-1744. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.08.244
8. Влияние условий обработки на эффективность шлифования микропористого покрытия / Н.С. Алексеев, А.В. Шашок, В.А. Капорин, С.В. Иванов // Вестник Башкирского государственного аграрного университета. 2019. № 2(50). С. 89-94. DOI: 10.31563/1684-7628-2019-50-2-89-94.
9. Обработка шлифованием высоколегированных коррозионно-стойких сталей на примере 12X18H10T / А.М. Романенко, Д.Б. Шатько, А.А. Непогожев, Я.С. Караваев // Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей». 2021. № 3(38). С. 98-106. DOI: 10.38013/2542-0542-2021-3-98-106.
10. Guzeev V.I., Nurkenov A.K. Researching the CNC-Machine Stiffness Impact on the Grinding Cycle Design // Procedia Engineering, 2016, vol. 150, pp. 815-820. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.118>.
11. Shipulin L.V., Nurkenov A.Kh., Mazein P.G. Implementation of the design concept of a high-speed processing cycle for CNC machines in the form of a software module CAM-system // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 2018. Vol. 450, iss. 3. Number 032028. doi.org/10.1088/1757-899X/450/3/032028



12. Malkin S. Grinding Cycle Optimization // CIRP Annals, 1981, vol. 30, Iss. 1, pp. 223-226, [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)60930-5](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60930-5).
13. Alvarez J., Barrenetxea D., Marquinez J.I. et al. Continuous variable feed rate: a novel method for improving infeed grinding processes. // Int J Adv Manuf Technol, 2014, vol. 73, pp. 53-61. <https://doi.org/10.1007/s00170-014-5771-1>
14. Barrenetxea D., Alvarez J., Marquinez J.I., Sanchez J.A. Grinding with controlled kinematics and chip removal // CIRP Annals, 2016, vol. 65, Iss. 1, pp. 341-344, <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2016.04.097>.
15. Modelling and monitoring of abrasive finishing processes using artificial intelligence techniques: A review/ V. Pandiyan, S. Shevchik, K. Wasmer, S. Castagne, T. Tjahjowidodo // Journal of Manufacturing Processes, 2020, vol. 57, pp. 114-135. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.06.013>.
16. Nametala C.A.L., Souza A.M., Júnior B.R.P, da Silva E.J. A simulator based on artificial neural networks and NSGA-II for prediction and optimization of the grinding process of superalloys with high performance grinding wheels/ C.A.L. Nametala, A.M. Souza, B.R.P Júnior, E.J. da Silva // CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 2020, Volume 30, Pages 157-173. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2020.05.004>.
17. Li G.F., Wang L.S., Yang L.B. Multi-parameter optimization and control of the cylindrical grinding process // Journal of Materials Processing Technology, 2002, vol. 129, Iss. 1-3, pp. 232-236, [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(02\)00607-6](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(02)00607-6).
18. 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>
19. Евсеев Д.Г. Формирование свойств поверхностных слоев при абразивной обработке. Саратов: Изд-во Саратовского университета, 1975. 127 с.
20. Калинин Е.П. Теория и практика управления производительностью шлифования без прижогов с учетом затупления инструмента. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. 358 с.
21. Kadivar M., Azarhoushang B. Cutting temperature and energy partitioning in grinding // Tribology and Fundamentals of Abrasive Machining Processes (Third Edition), William Andrew Publishing, 2022, pp. 469-505, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823777-9.00002-1>.
22. Temperature measurement of surface grinding using a fluid supplying system from inside of grinding wheel / Z. Li, Y. Yao, K. Nakae, H. Sasahara // Emerg. Technol. Precis. Eng. Xiv, 2012, vol. 523-524, pp. 125-130. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.523-524.125>
23. Yi J., Sheng X.M., Feng C.B. Temperature measurement and simulation in stainless steel high-speed grinding // Applied Mechanics and Materials. 2012. T. 184. C. 684-687. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.184-185.684>
24. Li H.N., Axinte D. On a stochastically grain-discretised model for 2D/3D temperature mapping prediction in grinding // International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2017. T. 116. C. 60-76.
25. Liu D. et al. An in-situ infrared temperature-measurement method with back focusing on surface for creep-feed grinding // Measurement. 2016. T. 94. C. 645-652.
26. Dai S.J., Li X.Q., Zhang H.B. Research on temperature field of non-uniform heat source model in surface grinding by cup wheel //Advances in Manufacturing. 2019. T. 7. № 3. C. 326-342.
27. Han J. et al. In situ measurement of cutting edge temperature in turning using a near-infrared fiber-optic two-color pyrometer // Measurement. 2020. T. 156. C. 107595.
28. Metallographic method for temperature measurement: Reconstruction of grinding temperature field based on critical austenitizing depth and cyclic feedback algorithm / Y. Hong, S. Xiu, C. Sun, Y. Zhao, X. Zhang // Journal of Materials Processing Technology. 2022. Vol. 310. No. 117770, <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2022.117770>.
29. Numerical Modeling of Transient Temperature and Stress in WC-10Co4Cr Coating During High-Speed Grinding / J. Yi, Z.H. Deng, W. Zhou, S.J. Li // International Journal of Precision Engineering and Manufacturing. 2020. T. 21. № 4. C. 585-598.
30. Miao Q., Li H.N., Ding W.F. On the temperature field in the creep feed grinding of turbine blade root: Simulation and experiments // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2020. T. 147. C. 118957.
31. Finite element modelling of temperature in cylindrical grinding for future integration in a digital twin / A. Heininen, R. Prod'Hon, H. Mokhtarian, E. Coatanéa, K. Koskinen // Procedia CIRP, 2021, vol. 104, pp. 875-880, <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.11.147>.
32. Grinding temperature field prediction by meshless finite block method with double infinite element / Z.Wang, T. Yu, X. Wang, T. Zhang, Ji Zhao, P.H. Wen // International Journal of Mechanical Sciences, 2019, vol. 153-154, pp. 131-142, <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2019.01.037>.
33. Zhang J. et al. Temperature field model and experimental verification on cryogenic air nanofluid minimum quantity lubrication grinding // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2018. T. 97. № 1. C. 209-228.
34. Chen H. et al. Simulation of 3D grinding temperature field by using an improved finite difference method // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2020. T. 108. № 11. C. 3871-3884.
35. Островский В.И. Теоретические основы процесса шлифования. Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1981. 144 с.

## References

1. Pereverzev P.P. et al. *Obshchemashinostroitelnye normativy vremeni i rezhimov rezaniya dlya normirovaniya rabot, vopolnyayemykh na universalnykh i mnog-*



- otselevykh stankakh s chislovym programmnyim upravleniem: spravochnik* [General machine building standards in cutting time and conditions for setting norms of operations performed on universal and multi-purpose CNC machines: a reference book]. Moscow: Ekonomika, 1990, 394 p. (In Russ.)
2. Vereina L.I., Krasnov M.M., Fradkin E.I. *Abrazivnaya obrabotka: spravochnik* [Abrasive processing: a reference book]. Moscow: INFRA-M, 2017, 304 p. (In Russ.)
  3. Fanuc Series 30i-Model B. Fanuc Series 31i-Model B. Fanuc Series 32i-Model B. For multi-purpose machine systems. Manual. 2012, 474 p.
  4. Studer. Grinding software. Available at: <https://www.studer.com/en/cylindrical-grinding-machines/software-options/grinding-software/> (Accessed on September 06, 2022).
  5. Lurie G.B. *Progressivnye metody kruglogo naruzhnogo shlifovaniya* [Advanced methods of circular external grinding]. Leningrad: Mashinostroenie, Leningrad Department, 1984, 103 p. (In Russ.)
  6. Akintseva A.V., Pereverzev P.P. Main stages of developing a unified methodology for integrated structural and parametric optimization of circular grinding cycles with CNC. *Vestnik Yuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Mashinostroenie* [Bulletin of South Ural State University. Series: Mechanical Engineering], 2021, vol. 21, no. 4, pp. 37-48. DOI: 10.14529/engin210404
  7. Akintseva A.V., Pereverzev P.P., Reshetnikov B., Irshin A.V. Analytical basics of digital twin for CNC round grinding process. *Materials Today: Proceedings*, 2020, pp. 1740-1744. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.08.244
  8. Alekseev N.S., Shashok A.V., Kaporin V.A., Ivanov S.V. Influence of processing conditions on efficiency of grinding a microporous coating. *Vestnik Bashkirskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Bulletin of Bashkir State Agrarian University], 2019, no. 2(50), pp. 89-94. DOI: 10.31563/1684-7628-2019-50-2-89-94
  9. Romanenko A.M., Shatko D.B., Nepogozhev A.A., Karavaev Ya.S. Grinding of high-alloy corrosion-resistant steels using 12Kh18N10T steel grade as an example. *Vestnik Kontserna VKO "Almaz – Antey"* [Journal of Almaz – Antey Air and Space Defence Corporation], 2021, no. 3(38), pp. 98-106. DOI: 10.38013/2542-0542-2021-3-98-106
  10. Guzeev V.I., Nurkenov A.K. Researching the CNC-machine stiffness impact on the grinding cycle design. *Procedia Engineering*, 2016, vol. 150, pp. 815-820. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.118>.
  11. Shipulin L.V., Nurkenov A.Kh., Mazein P.G. Implementation of the design concept of a high-speed processing cycle for CNC machines in the form of a software module CAM-system. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, 2018, vol. 450, no. 3. Number 032028. DOI: 10.1088/1757-899X/450/3/032028
  12. Malkin S. Grinding cycle optimization. *CIRP Annals*, 1981, vol. 30, no. 1, pp. 223-226. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)60930-5](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60930-5)
  13. Alvarez J., Barrenetxea D., Marquinez J.I. et al. Continuous variable feed rate: a novel method for improving infeed grinding processes. *Int J Adv Manuf Technol*, 2014, vol. 73, pp. 53-61. <https://doi.org/10.1007/s00170-014-5771-1>
  14. Barrenetxea D., Alvarez J., Marquinez J.I., Sanchez J.A. Grinding with controlled kinematics and chip removal. *CIRP Annals*, 2016, vol. 65, no. 1, pp. 341-344. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2016.04.097>
  15. Pandiyan V., Shevchik S., Wasmer K., Castagne S., Tjahjowidodo T. Modelling and monitoring of abrasive finishing processes using artificial intelligence techniques: A review. *Journal of Manufacturing Processes*, 2020, vol. 57, pp. 114-135. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.06.013>
  16. Nametala C.A.L., Souza A.M., Júnior B.R.P., da Silva E.J. A simulator based on artificial neural networks and NSGA-II for prediction and optimization of the grinding process of superalloys with high performance grinding wheels. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2020, vol. 30, pp. 157-173. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2020.05.004>
  17. Li G.F., Wang L.S., Yang L.B. Multi-parameter optimization and control of the cylindrical grinding process. *Journal of Materials Processing Technology*, 2002, vol. 129, no. 1-3, pp. 232-236. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(02\)00607-6](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(02)00607-6)
  18. Degtyareva-Kashutina A.S., Boldyrev I.S. A 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>
  19. Evseev D.G. *Formirovanie svoystv poverkhnostnykh sloev pri abrazivnoy obrabotke* [Forming properties of surface layers during abrasive processing]. Saratov: Publishing House of Saratov University, 1975, 127 p. (In Russ.)
  20. Kalinin E.P. *Teoriya i praktika upravleniya proizvoditelnostyu shlifovaniya bez prizhgov s uchetom zatupleniya instrumenta* [Theory and practice of controlling the performance of grinding without burning, taking into account the tool edge blunting]. Saint Petersburg: Publishing House of Polytechnic University, 2009, 358 p. (In Russ.)
  21. Kadivar M., Azarhoushang B. Cutting temperature and energy partitioning in grinding. *Tribology and fundamentals of abrasive machining processes (Third Edition)*. William Andrew Publishing, 2022, pp. 469-505. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823777-9.00002-1>
  22. Li Z., Yao Y., Nakae K., Sasahara H. Temperature measurement of surface grinding using a fluid supplying system from inside of grinding wheel. *Emerg. Technol. Precis. Eng.* XIV, 2012, vol. 523-524, pp. 125-130. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.523-524.125>

23. Yi J., Sheng X.M., Feng C.B. Temperature measurement and simulation in stainless steel high-speed grinding. *Applied Mechanics and Materials*, 2012, vol. 184, pp. 684-687. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.184-185.684>
24. Li H.N., Axinte D. On a stochastically grain-discretised model for 2D/3D temperature mapping prediction in grinding. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2017, 116, 60-76.
25. Liu D. et al. An in-situ infrared temperature-measurement method with back focusing on surface for creep-feed grinding. *Measurement*, 2016, 94, 645-652.
26. Dai S.J., Li X.Q., Zhang H.B. Research on temperature field of non-uniform heat source model in surface grinding by cup wheel. *Advances in Manufacturing*, 2019, 7 (3), 326-342.
27. Han J. et al. In situ measurement of cutting edge temperature in turning using a near-infrared fiber-optic two-color pyrometer. *Measurement*, 2020, 156, 107595.
28. Hong Y., Xiu S., Sun C., Zhao Y., Zhang X. Metallic method for temperature measurement: Reconstruction of grinding temperature field based on critical austenitizing depth and cyclic feedback algorithm. *Journal of Materials Processing Technology*, 2022, vol. 310, no. 117770. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2022.117770>
29. Yi J., Deng Z.H., Zhou W., Li S.J. Numerical modeling of transient temperature and stress in WC-10Co4Cr coating during high-speed grinding. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2020, 21 (4), 585-598.
30. Miao Q., Li H.N., Ding W.F. On the temperature field in the creep feed grinding of turbine blade root: Simulation and experiments. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2020, 147, 118957.
31. Heininen A., Prod'hon R., Mokhtarian H., Coatanéa E., Koskinen K. Finite element modelling of temperature in cylindrical grinding for future integration in a digital twin. *Procedia CIRP*, 2021, vol. 104, pp. 875-880. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.11.147>
32. Wang Z., Yu T., Wang X., Zhang T., Zhao J., Wen P.H. Grinding temperature field prediction by meshless finite block method with double infinite element. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2019, vol. 153-154, pp. 131-142. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2019.01.037>
33. Zhang J. et al. Temperature field model and experimental verification on cryogenic air nanofluid minimum quantity lubrication grinding. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, 97 (1), 209-228.
34. Chen H. et al. Simulation of 3D grinding temperature field by using an improved finite difference method. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2020, 108, (11), 3871-3884.
35. Ostrovsky V.I. *Teoreticheskie osnovy protsessy shlifovaniya* [Theory of a grinding process]. Leningrad: Publishing House of Leningrad University, 1981, 144 p. (In Russ.)

Поступила 05.10.2022; принята к публикации 14.10.2022; опубликована 22.12.2022  
Submitted 05/10/2022; revised 14/10/2022; published 22/12/2022

**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.