

УДК 621.923.1

DOI: 10.12737/article_59f074a6a83b54.31913450

А.В. Морозов, к.т.н.,

В.Г. Гусев, д.т.н.

(Владимирский государственный университет им. А. Г. и Н. Г. Столетовых
600000, г. Владимир, ул. Горького, 87)

E-mail: ntk_2005@rambler.ru; prof_gusev@mail.ru

Моделирование температуры заготовки, шлифуемой торцовым сплошным и сегментным кругами, в САЕ-комплексе Solid Works

Исследована температура заготовки в процессе плоского торцового шлифования инструментом со сплошной режущей поверхностью и дискретным инструментом, оснащенным абразивными сегментами. Установлено существенное снижение температуры поверхностного слоя в процессе плоского дискретного шлифования сегментным кругом.

Ключевые слова: плоское торцовое шлифование; абразивный сегмент; дискретная режущая поверхность; температура; компьютерное моделирование.

A.V. Morozov, Can. Eng.,

V.G. Gusev, D. Eng.

(Stoletovs State University of Vladimir, 87, Gorky Str., Vladimir, 600000)

Temperature simulation of blank ground with face solid and segment disks in CAE-Solid Works complex

Flat face grinding is characterized with large areas of a cutting surface contact with a blank under machining which results in intensive heat generations in a cutting area which is able to cause a thermal damage of the surface layer. Thereupon there is developed a designed heat model of a blank, the initial conditions are defined, and there is created a solid-state model of an abrasive segment with a trapezoidal face cutting surface and a temperature simulation of the blank ground with a solid and discrete face tool is carried out in a modern CAE- Solid Works complex.

The result of modeling have shown that the application of the discrete face grinding tool equipped with abrasive segments allows decreasing a temperature of the surface machined by 26-30% as compared to a face grinding tool with a solid cutting surface, which decreases considerably the likelihood of defects appearance in a ground surface layer of a part.

Keywords: plane face grinding; abrasive segment; discrete cutting surface; temperature; computer simulation.

Процессы шлифования протекают при скоростях резания 35...50 м/с и более, вследствие чего обрабатываемый металл претерпевает высокие скорости упругой и пластической деформации с выделением большого количества тепла, приводящего к термическому повреждению обрабатываемого поверхностного слоя в виде прижогов, растягивающих остаточных напряжений и других дефектов, снижающих эксплуатационную надежность изделий.

Проблема снижения дефектов деталей особенно остро стоит перед процессами плоского

торцового шлифования, которые характеризуются, по сравнению с другими видами шлифования, высокой производительностью технологических операций, большими площадями контакта инструмента с заготовкой (достигают нескольких сотен квадратных сантиметров), высокой тепловой напряженностью и большой вероятностью появления указанных дефектов в обработанном поверхностном слое. В этой связи для устранения термического повреждения поверхностного слоя необходимо уменьшать температуру заготовок

не только повышением эффективности действия смазочно-охлаждающих жидкостей, совершенствованием их химического состава, способов подачи в зону резания, оптимизацией режимов шлифования и др., но и конструктивным оформлением режущего инструмента.

Появившееся примерно пол века назад и активно развивающееся дискретное шлифование труднообрабатываемых материалов характеризуется сложнейшими процессами резания–трения, теплообмена, упругих и пластических деформаций снимаемого материала и др. При стохастическом, быстро протекающем тепловом воздействии активных и давящих абразивных зерен на заготовку, конвективном теплообмене между движущимися с высокой скоростью аэродинамических потоков и обрабатываемыми заготовками, аналитическое решение задачи теплопроводности становится громоздким, а его результаты, довольно часто, неадекватно коррелируются с экспериментальными данными. При аналитическом описании этих процессов исследователь вынужден абстрагироваться и принимать ряд допущений, снижающих достоверность получаемых результатов.

В этой связи значение современных методов конечно-элементного моделирования и анализа, основанных на корректно заданных начальных и граничных условиях теплообмена и дискретизации инструмента, возрастает. Моделирование механизмов, процессов, явлений с использованием компьютерной техники и информационных технологий расширяет свои границы, успешно дополняя традиционные аналитические методы исследований. Такая тенденция обусловлена не только сравнительно меньшей трудоемкостью электронного проектирования по сравнению с традиционными методами, но и высокой информативностью и достоверностью получаемых результатов.

Основная задача, которую необходимо решить при подготовке данных для моделирования тепловых процессов механической и физико-технической обработки, в том числе и дискретного плоского торцового шлифования, заключается в отработке методики определения исходных данных и граничных условий теплообмена. Дискретизация режущей поверхности шлифовальных кругов принципиально изменяет характер теплообразования и теплоотвода из зоны резания, что отражается на протекании процесса шлифования и формировании качественных показателей обработанного поверхностного слоя изделий.

Рассмотрим и сравним по степени снижения температуры обрабатываемой заготовки процессы плоского торцового шлифования инструментом со сплошной режущей поверхностью и дискретным инструментом, оснащенным абразивными сегментами.

Расчетная тепловая модель заготовки содержит 32 853 конечных элемента (рис. 1), согласно которой к обрабатываемой поверхности, изображенной в виде мелких боковых поверхностей тетраэдров, подводится тепловой поток q со стороны шлифовального инструмента, осуществляющего снятие припуска с заготовки. От плоскостей, перпендикулярных обрабатываемой поверхности и включающих более крупные боковые поверхности тетраэдров, отводится тепло, что отражено векторами в виде стрелок с указанием коэффициента теплоотдачи α и температуры T .

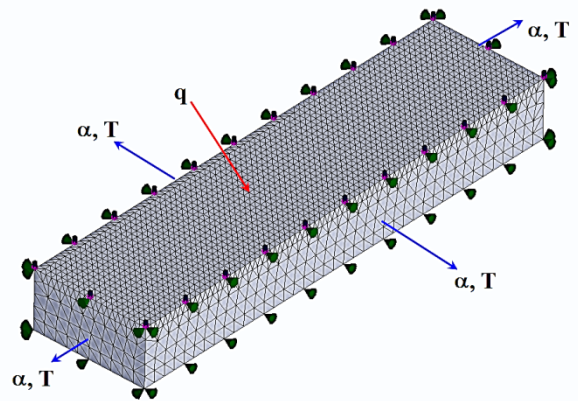


Рис. 1. Конечно-элементная тепловая модель шлифуемой заготовки

Сплошной торцовый шлифовальный круг для обработки плоскостей представляет собой полый цилиндр, режущей поверхностью которого служит плоский кольцевой торец 1 (рис. 2, а). Дискретный торцовый шлифовальный круг состоит из абразивных сегментов 1 трапецеидального поперечного сечения (рис. 2, б), равномерно расположенных по окружной периферии металлического корпуса 2. Между абразивными сегментами имеются воздушные промежутки, обеспечивающие прерывание процесса резания и периодическое охлаждение обрабатываемой заготовки. Усредненная протяженность каждого из воздушных промежутков равна дуге EC окружности.

Угловой шаг расположения абразивных сегментов в корпусе круга

$$\alpha = 2\pi/n_c, \quad (1)$$

где n_c – число сегментов в инструменте.

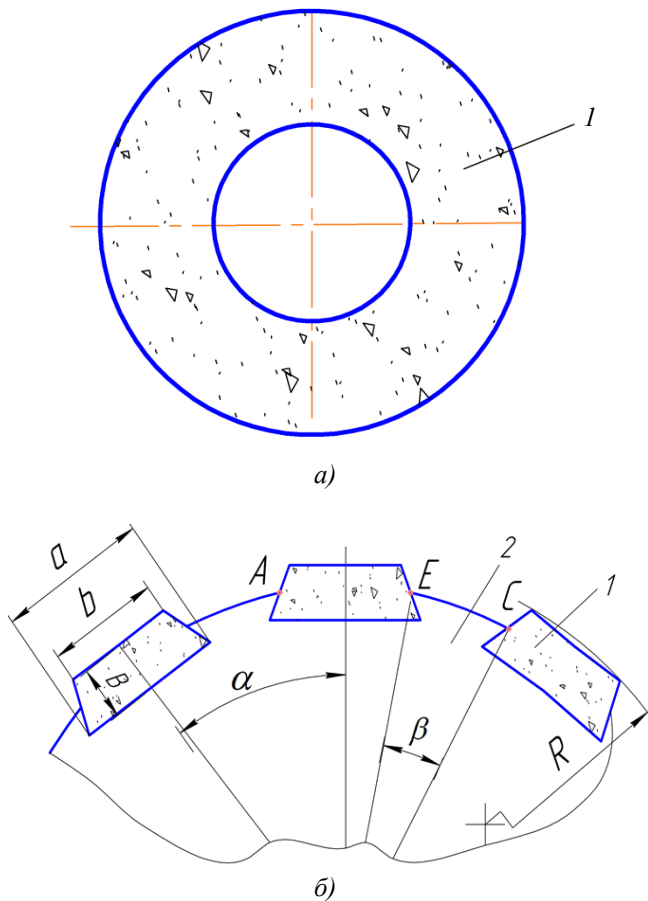


Рис. 2. Схема режущей поверхности сплошного (а) и сегментного (б) торцового шлифовального круга

Точки A и E расположены посередине боковых граней равнобедренной трапеции. Радиус окружности, на которой лежат точки A и E вычисляется по формуле

$$R_A = R_E \approx 0,5\sqrt{(a+b)^2 + (2R-B)^2}, \quad (2)$$

где a, b – длина большого и малого основания равнобедренной трапеции соответственно; B – высота сегмента; R – наружный радиус торцового шлифовального круга.

Время поворота инструмента на центральный угол, соответствующий дуге AE , то есть усредненное время теплового воздействия абразивного сегмента на обрабатываемую поверхность заготовки:

$$\tau_1 = \frac{2\arcsin\left(\frac{a+b}{4R_A}\right)}{\omega}, \quad (3)$$

где ω – угловая скорость торцового шлифовального круга.

Усредненное время отсутствия резания (время отдыха) равно

$$\tau_2 = \frac{\beta}{\omega} = \frac{3 \cdot 10^4 \beta R_A}{2\pi(R-B)n}, \quad (4)$$

где $\beta = (2\pi/n_c) - 2\arcsin\left(\frac{a+b}{4R_A}\right)$ – центральный угол, соответствующий дуге окружности EC ; n – частота вращения шлифовального круга.

Время цикла «резание – отдых» равно времени поворота торцового шлифовального круга на угловой шаг абразивных сегментов и определяется по формуле

$$\tau_{\alpha} = \frac{60}{nn_c}. \quad (5)$$

Частота циклов «резание – отдых» при дискретном торцовом шлифовании сегментным кругом равна

$$f_{\text{цс}} = \frac{nn_c}{60}. \quad (6)$$

Формулы (1) – (6) необходимы для расчета исходных данных, с целью моделирования температуры заготовки, возникающей в процессе дискретного плоского торцового шлифования. Для практического использования результатов конечно-элементного моделирования исследованы тепловые процессы шлифования, применяемые в действующем производстве дисков трения.

Заготовки дисков трения обрабатывали на плоскошлифовальном станке мод. 3Е756-Л1 с круглым столом и вертикально расположенным шпинделем. Характеристика инструмента и режим дискретного плоского торцового шлифования: наружный диаметр $D = 450$ мм; высота сегмента $B = 40$ мм; длина большого основания трапеции $a = 100$ мм; малого основания $b = 85$ мм. Характеристика абразивного материала сегментов – 25AF40(M-P)5B; число абразивных сегментов в инструменте – 10 шт. Частота вращения шлифовального круга $n = 980$ мин⁻¹, снимаемый припуск с каждой стороны заготовки при черновом шлифовании $Z_1 = 1$ мм, при чистовом – $Z_1 = 0,3$ мм. Вертикальная подача шлифовального круга $v_s = 0,05 \dots 0,30$ мм/мин; частота вращения стола с заготовками $n_{\text{ст}} = 7 \dots 32$ мин⁻¹; диаметр стола – 400 мм.

Моделирование температуры обрабатываемой заготовки заключалось в решении нестационарной задачи теплопроводности в трехмерной постановке. Для оценки степени снижения температуры обрабатываемой поверх-

ности заготовки, обусловленной дискретизацией режущей поверхности инструмента, СОЖ в процессе моделирования не учитывали, а охлаждающей средой служили аэродинамические потоки, генерируемые инструментом в процессе работы.

Твердотельные модели заготовки и инструмента создавали в программной среде САЕ – комплекса Solid Works, что позволило с высокой точностью определить площади контакта инструмента с заготовкой. Рассматриваемый временной интервал обработки принимали равным продолжительности прохождения заготовкой площади контакта, численное значение которой определяли расчетом на основании известного режима шлифования.

Геометрические размеры твердотельной модели заготовки: ширина 10 мм, длина 40 мм, высота 5 мм определены в зависимости от площади контакта заготовки с инструментом, глубины прогрева заготовки и размеров рабочей поверхности торцового шлифовального круга.

Теплофизические характеристики легированной стали 35ХГС, из которой выполнены обрабатываемые заготовки дисков трения следующие: плотность $\rho = 7850 \text{ кг/м}^3$; коэффициент теплопроводности $\lambda = 38 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$; удельная теплоемкость $c = 496 \text{ Дж/кг} \cdot \text{К}$. Так как в эксперименте смазочно-охлаждающую жидкость не использовали, то в компьютер были введены теплофизические характеристики сухого воздуха при $20 \text{ }^\circ\text{C}$: плотность $\rho = 1,205 \text{ кг/м}^3$; коэффициент теплопроводности $\lambda = 0,0259 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$; удельная изобарная теплоемкость $c = 1005 \text{ Дж/кг} \cdot \text{К}$; коэффициент вязкости $\mu = 0,0000181 \text{ Н} \cdot \text{с/м}^2$; коэффициент кинематической вязкости $\nu_{\text{кин}} = 0,000015 \text{ Н} \cdot \text{с/м}^2$; число Прандтля $Pr = 0,703$.

Мощность резания определяли по формуле

$$N_{\text{рез}} = \frac{P_z v}{1020 \cdot 60}, \quad (7)$$

где P_z – главная составляющая силы резания, H ; v – скорость резания, м/с.

Плотность теплового потока, поступающего в заготовку, рассчитывали по формуле:

$$q = (0,6 - 0,9) N_{\text{рез}} / S_k, \quad (8)$$

где S_k – площадь контакта круга с заготовкой.

Зависимости (7) и (8) использовали для расчета мощности резания $N_{\text{рез}}$ и удельного теплового потока q с учетом того, что 80 %

образующегося в зоне шлифования тепла поступает в обрабатываемую заготовку. Расчетный удельный тепловой поток $q = 2\,293\,400 \text{ Вт/м}^2$, а начальная температура заготовки $T_0 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$. Усредненный коэффициент теплоотдачи определяли в зависимости от скорости резания v по формуле

$$\alpha_{\text{ср}} = 5,6 + 4v, \quad (9)$$

Вследствие значительной площади режущей поверхности каждого из абразивных сегментов, тепловой поток подводится по всей шлифуемой поверхности заготовки. Эффективная мощность резания составляла 1146,7 Вт, площадь контакта инструмента с заготовкой $S_k = 400 \text{ мм}^2$. Моделирование проводили в нестационарной постановке задачи, что позволило установить неоднородность теплового поля и различные значения температуры, соответствующие реальным условиям шлифования.

В результате моделирования получено распределение теплового поля в поверхностном слое, шлифованном сплошным торцовым кругом, а также поле абсолютных значений температуры (рис. 3, а, б). С момента касания торцового шлифовального круга заготовки температура обрабатываемой поверхности по мере увеличения времени шлифования возрастает как для сплошного, так и дискретного инструмента.

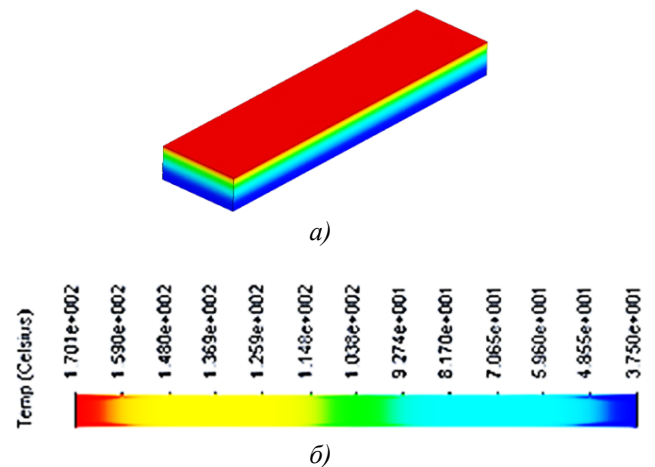


Рис. 3. Тепловое поле (а) в поверхностном слое, шлифованном сплошным торцовым кругом, и поле абсолютных значений температуры (б)

После шлифования в течение 0,5 с сплошным торцовым кругом в центре обрабатываемой поверхности возникает температура $170,1 \text{ }^\circ\text{C}$, а по мере увеличения расстояния рассматри-

ваемого сечения заготовки от обрабатываемой поверхности температура уменьшилась до 37,5 °С.

При шлифовании заготовки дискретным торцовым шлифовальным кругом в течение 0,5 с температура обрабатываемой поверхности составила 128,8 °С (рис. 4, а, б), что на 41,3 °С меньше по сравнению с обработкой сплошным кругом. По мере увеличения расстояния рассматриваемого сечения заготовки от обрабатываемой поверхности температура уменьшилась до 32,2 °С.

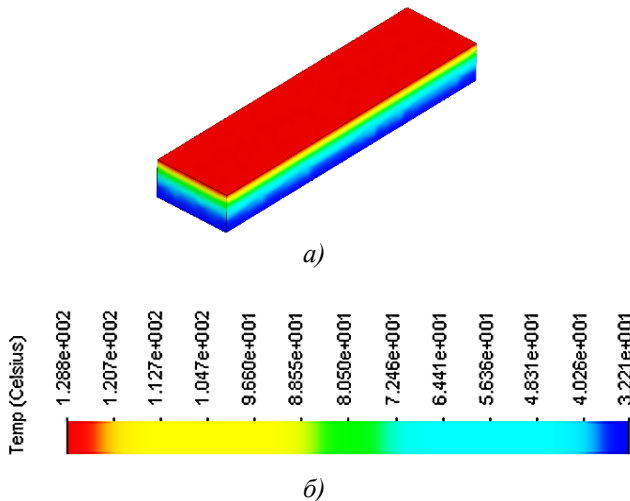


Рис. 4. Тепловое поле (а) в поверхностном слое, шлифованном сегментным торцовым кругом, и поле абсолютных значений температуры (б)

В начале шлифования скорость возрастания температуры поверхности, обрабатываемой сплошным торцовым кругом, составила 340...350 °С/с (рис. 5, кривая 1), а в конце рассматриваемого промежутка времени – 190...200 °С/с, т.е. повышение абсолютного значения температуры заготовки вызывает уменьшение скорости её возрастания в процессе шлифования.

Данные по скорости возрастания температуры и её абсолютным значениям за столь короткий промежуток времени, свидетельствуют о высокой тепловой напряженности процесса сплошного шлифования. В процессе шлифования торцовым дискретным инструментом, оснащённым абразивными сегментами подвод теплоты чередуется с её отводом. Усреднённый коэффициент теплоотдачи: $\alpha_{ср} = 87,6 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$, начальная температура заготовки – 20 °С.

Дискретное шлифование состоит из циклов «нагрев – охлаждение»: время нагрева от 0 до 0,0044 с; время охлаждения заготовки от

0,0045 до 0,0061 с; время цикла – 0,0061 с. За время шлифования в течение 5 с происходит примерно 820 циклов «нагрев – охлаждение» заготовки. Расчетная модель и граничные условия теплообмена при дискретном торцовом шлифовании такие же, как и при сплошном, за исключением теплового потока, направленного на обрабатываемую поверхность заготовки.

При шлифовании сегментным кругом тепловой поток изменяется с течением времени: при контакте сегмента с заготовкой удельный тепловой поток $q = 2\,293\,400 \text{ Вт/м}^2$, а когда заготовка находится между двумя соседними сегментами и контакт отсутствует, $q = 0$.

При шлифовании заготовки дискретным торцовым кругом наблюдается значительно меньший градиент температуры: в начале шлифования скорость возрастания температуры поверхности составила 280...300, а в конце рассматриваемого промежутка времени – 130...150 °С/с (рис. 5, кривая 2). Эти данные свидетельствуют о возможности снижения тепловой напряженности плоского торцового шлифования путем расчленения сплошной режущей поверхности инструмента на отдельные участки в виде режущих сегментов, между которыми созданы воздушные промежутки, обеспечивающие периодическое охлаждение заготовки в процессе шлифования.

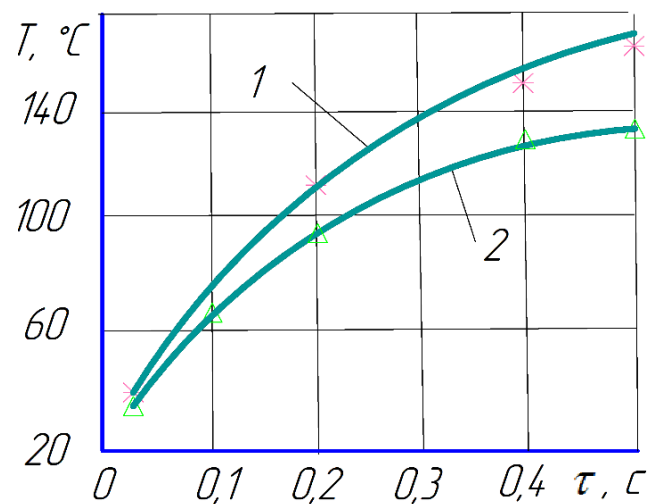


Рис. 5. Изменение температуры обрабатываемой поверхности в функции времени шлифования: 1 – сплошным; 2 – сегментным кругом

При шлифовании сегментным торцовым инструментом в течение 0,5 с возникают перепады температуры, что подтверждает факт периодического нагрева и охлаждения заготовки и приводит к снижению температуры обрабатываемой поверхности. Меньшие зна-

чения температуры обрабатываемой поверхности в процессе шлифования дискретным торцовым шлифовальным кругом объясняются не только прерыванием процесса резания, но и охлаждением заготовки более мощными аэродинамическими потоками, генерируемыми дискретным инструментом [8, 9].

График изменения температуры по глубине поверхностного слоя заготовки после теплового воздействия дискретного шлифовального инструмента в течение 0,1 с свидетельствует о достижении исходной температуры заготовки на глубине 0,6 мм (рис. 6, кривая 1), а после теплового воздействия сплошного круга указанная температура возникает при глубине поверхностного слоя 1 мм (рис. 6, кривая 2).

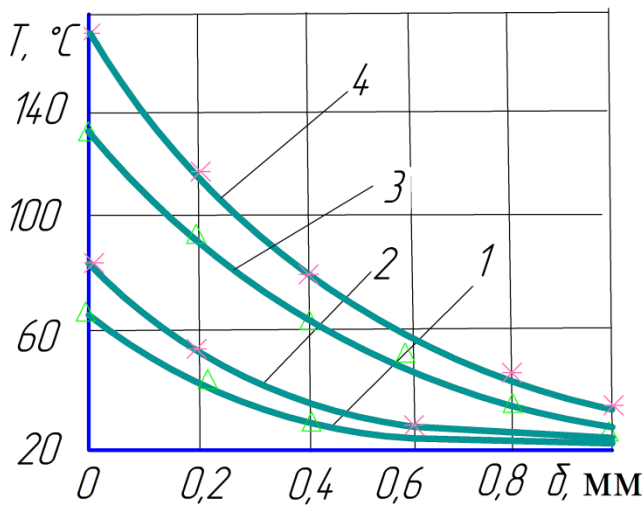


Рис. 6. Изменение температуры по глубине поверхностного слоя, шлифованного в течение 0,1 и 0,5 с: 1, 3 – сегментным; 2, 4 – сплошным торцовым кругом

Кривая 3 характеризует уменьшение температуры по глубине поверхностного слоя заготовки после шлифования дискретным кругом в течение 0,5 с, а кривая 4 – сплошным кругом в течение того же времени. Для дискретного и сплошного торцового шлифовального круга исходная температура заготовки возникает на глубине 1,1 мм и 1,5 мм соответственно.

Приведенные данные свидетельствуют не только о меньших абсолютных значениях температуры, скоростях её возрастания с течением времени дискретного шлифования, но и о менее глубоком прогревании поверхностного слоя заготовки, что способствует уменьшению вероятности появления термических дефектов при использовании дискретного инструмента.

Результаты проведенных исследований те-

плового состояния заготовки в процессе плоского торцового шлифования сплошным и дискретным инструментом позволяют сделать следующие выводы:

- наиболее высокая тепловая напряженность процесса плоского торцового шлифования возникает при использовании сплошных кругов, в этой связи от такой конструкции режущего инструмента следует отказаться при обработке металлов и сплавов, склонных к образованию различного рода термических дефектов;

- прерывистость режущей поверхности торцовых шлифовальных кругов положительно сказывается на снижении абсолютных значений температуры, скоростей её повышения и глубины прогревания обрабатываемого поверхностного слоя, а, следовательно, на снижении тепловой напряженности процесса обработки, вследствие чего дискретные торцовые шлифовальные инструменты можно рекомендовать к практическому использованию в условиях производства на более высоких режимах резания;

- наибольшая эффективность использования дискретных торцовых шлифовальных кругов достигается не только при обработке материалов, склонных к образованию термических дефектов, но и при выполнении предварительных технологических операций шлифования, характеризующихся высокой тепловой напряженностью.

Выполнение изложенных рекомендаций позволит существенно снизить тепловую напряженность процесса плоского торцового шлифования, обеспечить выпуск качественной машиностроительной продукции и повысить эффективность процесса обработки в целом.

Таким образом, моделирование температуры обрабатываемой заготовки, выполненное с использованием современного САЕ-комплекса Solid Works, показало, что применение дискретного торцового шлифовального инструмента, оснащенного абразивными сегментами, между которыми имеются воздушные промежутки, позволяют уменьшить тепловую напряженность процесса на 26... 30 % по сравнению с торцовым шлифовальным инструментом со сплошной режущей поверхностью.

Указанное снижение температуры получено при шлифовании в течение непродолжительного времени (0,5 с), в то время как в реальных производственных условиях процессы торцового шлифования протекают в течение

более длительного времени. Сравнение кривых 1, 2 с кривыми 3, 4 (см. рис. 6) приводит к выводу о том, что степень снижения температуры зависит также от продолжительности теплового воздействия инструмента на заготовку. С увеличением времени шлифования эффект снижения температуры при обработке дискретным торцовым кругом повышается, а тепловая напряженность уменьшается.

Наряду с уменьшением температуры обрабатываемой поверхности применение дискретного шлифовального круга, позволяет уменьшить расход дорогостоящего абразивного материала. При переходе сплошного шлифования на дискретное расход абразивной массы на единицу инструмента уменьшается на следующую величину:

$$\Delta_m = \Delta_c - \Delta_d = 0,25L\rho(\pi(D^2 - d^2) - 2(a+b)Bn_c), \quad (10)$$

где Δ_c , Δ_d , масса сплошного и дискретного торцового шлифовального круга соответственно; L – длина абразивного сегмента, равная высоте сплошного шлифовального круга; ρ – плотность абразивного материала; D , d – наружный и внутренний диаметр сплошного круга соответственно; a , b – длина большого и малого основания трапеции – поперечного сечения сегмента соответственно; B – высота (толщина) сегмента; n_c – число абразивных сегментов в дискретном круге.

Расчеты по (10) показали, что для указанных выше размеров сплошного и сегментного шлифовальных кругов экономия абразивной массы составила 8,5 кг на единицу инструмента. Уменьшение расхода абразивного материала и температуры обрабатываемой поверхности при дискретном плоском торцовом шлифовании приводит к снижению технологической себестоимости изделий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гусев, В.Г., Морозов, В.В. Технология плоского дискретного шлифования: учеб. пособие / под ред. д-ра техн. наук, проф. В. Г. Гусева. – Владимир: Изд-во Владимир. гос. ун-та, 2007. – 344 с. – ISBN 978-5-89368-825-2.
2. Морозов, А.В., Гусев, В.Г. Дискретное плоское торцовое шлифование: монография. – М.: Издательство «Перо», 2016. – 124 с. – ISBN 978-5-906927-57-6.
3. Гусев, В.Г., Швагирев, П.С. Снижение температуры заготовки при дискретном плоском торцовом шлифовании // СТН. – 2013. – №4. – С.23 – 27.
4. Пат. № 1634462 РФ. Абразивный круг для торцового шлифования.
5. Гусев, В.Г., Морозов, А.В. Моделирование распре-

деления тепловых полей в заготовке при торцовом шлифовании сегментами с пазами на базовой и периферийной поверхностях // Вестник машиностроения. – 2015. – №12. – С. 10 – 14.

6. Gusev, V.G., Morozov, A.V., Shvagirev, P.S. Discrete structure of the cutting surface of a grinding wheel (2009) Russian Engineering Research, 29(9), pp. 940–943.

7. Gusev, V.G., Morozov, A.V. Distribution of Thermal Fields in Face Grinding by Slotted Abrasive Segments (2016) Russian Engineering Research, Vol. 36, No. 3, pp. 169–173. ISSN 1068-798X.

8. Гусев, В.Г., Морозов, А.В., Швагирев, П.С. Аэродинамические потоки, генерируемые дискретным торцовым шлифовальным кругом: труды Междунар. науч.-техн. конф. «Наука о резании материалов в современных условиях». (Серия. «Инструментальные и метрологические системы») // Известия Тул. гос. ун-та. Вып. 1. Ч. 2. 2004. – С. 74 – 79. – ISBN 5-7679-0585-1.

9. Гусев, В.Г., Морозов, А.В. Технология дискретизации рабочих поверхностей шлифовальных кругов лазером и гидроабразивной струей // Научно-технические технологии в машиностроении. 2017. №9(75). С. 21–27.

REFERENCES

1. Gusev, V.G., Morozov, V.V. *Plane Discrete Grinding Technology: textbook / under the editorship of V.G. Gusev, D. Eng., Prof.* – Vladimir: Vladimir State University Publishing House, 2007. – pp. 344. ISBN 978-5-89368-825-2.
2. Morozov, A.V., Gusev, V.G. *Discrete Plane Face Grinding: monograph.* М.: “Pen” Publishing House, 2016. – pp. 124. - ISBN 978-5-906927-57-6.
3. Gusev, V.G., Shvagirev, P.S. *Blank Temperature Decrease at Discrete Plane Grinding // STIN.* – 2013. – No.4. – pp. 23-27.
4. Pat. No. 1634462 the RF. *Abrasive Disk for Face Grinding.*
5. Gusev, V.G., Morozov, A.V. Simulation of thermal fields distribution in blanks at face grinding by segments with slots on basic and peripheral surfaces // *Bulletin of Mechanical Engineering.* – 2015. – No.12. – pp. 10-14.
6. Gusev, V.G., Morozov, A.V., Shvagirev, P.S. Discrete structure of the cutting surface of a grinding wheel (2009) Russian Engineering Research, 29(9), pp. 940–943.
7. Gusev, V.G., Morozov, A.V. Distribution of Thermal Fields in Face Grinding by Slotted Abrasive Segments (2016) Russian Engineering Research, Vol. 36, No. 3, pp. 169–173. ISSN 1068-798X.
8. Gusev, V.G., Morozov, A.V., Shvagirev, P.S. Aerodynamic flows generated by discrete face grinding disk: *Proceedings of the Inter. Scientific-Tech. Conf. “Science on Material Cutting under Current Conditions”.* (Series “Tool and Metrological Systems”) // Proceedings of Tula State University. Edition 1. Part 2. 2004. – pp. 74-79. - ISBN 5-7679-0585-1.
9. Gusev, V.G., Morozov, A.V. Technology of grinding disk operating surface discretization with laser and hydroabrasive jet // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering.* 2017. No.9(75). pp. 21–27.

Рецензент д.т.н. В.И. Денисенко