

УДК 621.923

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ АЛМАЗНОМ ГЛУБИННОМ ШЛИФОВАНИИ МОНОЛИТНОГО ТВЕРДОСПЛАВНОГО ИНСТРУМЕНТА

Д. И. Волков<sup>1</sup>, Б. В. Цветков<sup>2</sup>, Е. В. Цветков<sup>3</sup>

<sup>1</sup>d\_i\_volkov@rsatu.ru, <sup>2</sup>boris\_tsvetkov@mail.ru, <sup>3</sup>egordis@rambler.ru

Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П. А. Соловьева (РГАТУ)

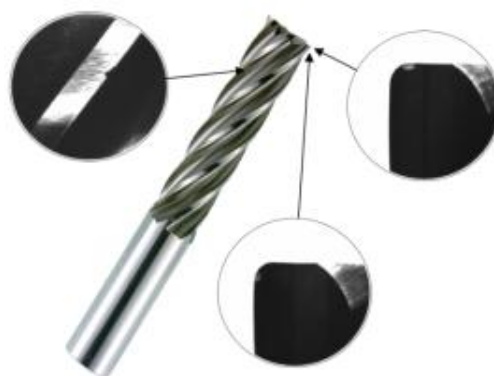
**Аннотация.** Представлены результаты исследования алмазного глубинного шлифования спиральной канавки монолитного твердосплавного инструмента с использованием твердотельного моделирования концевой инструмента в системе «Solid Works» и расчетом модели методом конечных элементов в системе «Ansys». Разработана методика определения температурного распределения и максимальных температур в зоне резания. Полученные данные могут служить основой для разработки новых методик определения оптимальных режимов резания, а также для составления рекомендаций по алмазному глубинному шлифованию монолитного твердосплавного инструмента.

**Ключевые слова:** алмазное глубинное шлифование; твердосплавной инструмента; моделирование зоны контакта; математическая модель тепловых процессов.

В связи с широким распространением станков с ЧПУ, а в частности многокоординатных обрабатывающих центров, возникает потребность в инструменте, обладающем высокой точностью, способностью работать при повышенных режимах резания и длительное время сохранять свои эксплуатационные свойства. Среди многообразия инструментальных материалов и конструкций режущего инструмента достаточно успешно зарекомендовал себя монолитный твердосплавной инструмента, поскольку он обладает высокой теплостойкостью (до 800–900° С), теплопроводностью и твердостью (достигает 95 HRA). Однако такое сочетание свойств твердых сплавов имеет и негативную сторону – это хрупкость материала. В связи с этим дефекты, возникающие при изготовлении твердосплавного инструмента, могут способствовать хрупкому разрушению инструмента в процессе его эксплуатации и проявляться в виде сколов, выкашивания и разрушения режущей части инструмента. Это может привести к выходу инструмента из строя, отклонениям геометрических параметров и повреждению обрабатываемой заготовки.

Основными причинами возникновения дефектов при изготовлении монолитного твердосплавного инструмента являются температурные и силовые воздействия алмазного шлифовального круга на обрабатываемую заготовку (рис. 1), поэтому оптимизацию режимов резания

необходимо выполнять по температурно-силовым факторам [1]. Для этого необходимо исследование таких показателей как баланс механической и тепловой энергии, максимальные температуры на поверхности обрабатываемой детали, распределение температуры по площади пятна контакта инструмента и заготовки, а также создание математического аппарата, позволяющего производить расчет данных показателей для каждого конкретного случая.



**Рис. 1.** Сколы на режущей кромке периметра и радиуса концевой инструмента

Изготовление твердосплавного инструмента осуществляется на многокоординатных заточных станках методом алмазного глубинного шлифования. Данный метод шлифования довольно широко применяется за рубежом, однако в нашей стране нашел применение сравнительно

но недавно и недостаточно изучен, что ограничивает его эффективное использование. Малая изученность и отсутствие аналитических моделей описания теплофизических процессов при данном виде обработки определяет актуальность работы для теории и практики алмазного глубинного шлифования.

Изготовление концевго инструмента связано с обработкой поверхностей, при шлифовании которых имеет место различный уровень энергозатрат, а как следствие – температур и напряжений, возникающих на поверхности обрабатываемого инструмента. Наиболее энергонагруженной операцией является обработка спиральной канавки, в процессе которой снимается основная часть материала припуска при шлифовании концевго инструмента, кроме того, в процессе шлифования спиральной канавки происходит формообразование передней поверхности инструмента (поверхность, по которой сходит стружка в процессе обработки). То есть той поверхности, которая испытывает наиболее сильное давление при обработке резанием, поэтому физико-механические свойства передней поверхности, особенно вблизи режущей кромки, имеют значительное влияние на эксплуатационные свойства инструмента.

Операция шлифования спиральной канавки отличается высокой интенсивностью съема материала и продолжительным контактом шлифовального круга и заготовки, что является причиной возникновения повышенных температур и сил резания, приводящих к появлению деформированного слоя, а как следствие – остаточных напряжений. На рис. 2 изображен деформированный слой заготовки из твердого сплава марки Н10F после обработки методом алмазного шлифования.

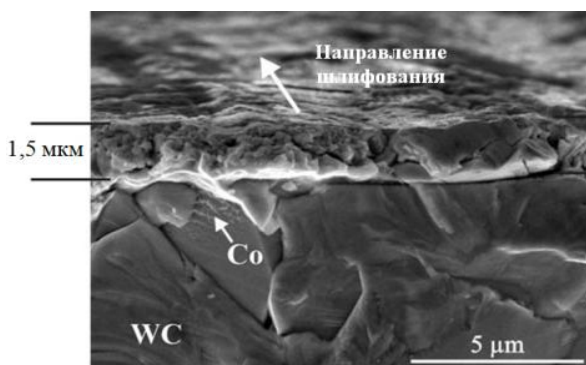


Рис. 2. Микроснимок среза твердого сплава марки Н10F

Для создания математического аппарата, позволяющего производить расчет температурно-силовых показателей для каждого конкретного инструмента, необходимо моделирование про-

цесса шлифования спиральной канавки, а также контактных поверхностей алмазного шлифовального круга и заготовки. В ранних литературных изданиях [2, 3] описывается попытка создания математического аппарата по определению профилей контактных поверхностей шлифовального круга и заготовки, отразившейся в графоаналитическом способе определения. Авторы ставили перед собой задачу построения профиля шлифовального круга исходя из профиля требуемой спиральной канавки инструмента, таким образом, для каждого инструмента требовалась индивидуальная заправка либо отдельный алмазный круг, что при существующей обширной номенклатуре инструмента не представляется возможным. Сегодня же распространена универсальная схема обработки спиральной канавки концевго инструмента, когда используются наборы стандартных кругов, в связи с чем для описания процесса формообразования спиральной канавки аналитическим методом стоит обратная задача – какой будет контактная поверхность шлифовального круга и заготовки при шлифовании стандартным набором кругов инструмента с определенными параметрами. Данную задачу можно решить посредством твердотельного моделирования процесса обработки спиральной канавки концевго инструмента в САПР (рис. 3). Такое решение является достаточно гибким и позволяет учитывать особенности формообразования инструмента с различной геометрией.

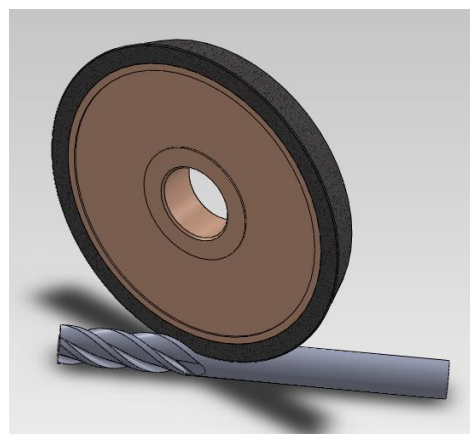


Рис. 3. Визуализация шлифования спиральной канавки концевго инструмента

Поскольку контактная поверхность при шлифовании спиральной канавки имеет переменную длину соприкосновения абразивного круга и заготовки на всей поверхности, то возникают неравномерные стоки тепла, и формируется неоднородное температурное поле. Поэтому использование модели плоского шлифования для расчета параметров зоны контакта

при таких условиях нежелательно, так как приведет к погрешностям при создании модели. Для решения данной задачи следует использовать разделение пятна контакта на элементарные участки (рис. 4).

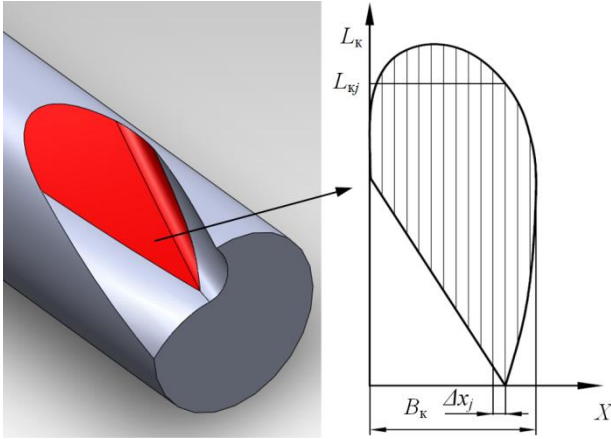


Рис. 4. Схематизация пятна контакта

В результате решение задачи определения теплового поля в теле сложнопрофильной детали сводится к решению уравнения теплопроводности (1), в котором граничные условия задаются для каждого элементарного участка (рис. 5).

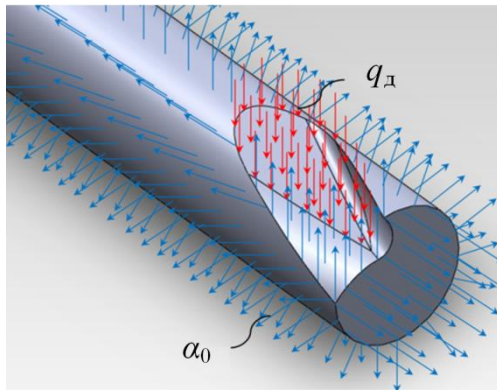


Рис. 5. Схема определения граничных условий при шлифовании спиральной канавки монолитного инструмента

$$\frac{\partial \theta_j}{\partial \tau} = a_m \nabla \theta_j + v_d \frac{\partial \theta_j}{\partial z}, \quad (1)$$

где  $a_m$  — коэффициент температуропроводности материала заготовки;  $v_d$  — скорость движения заготовки.

Граничные и начальные условия, необходимые для однозначного решения уравнения теплопроводности, в этом случае представляют систему разрывных функций, описываемых следующими уравнениями (2, 3, 4):

– граничные условия на контактной поверхности

$$q_{cp} = -\lambda_m \frac{\partial \theta_j}{\partial y} \Big|_{\substack{y \in \Gamma \\ \Gamma \in \ell_k}}; \quad (2)$$

– граничные условия на поверхностях теплообмена

$$-\lambda_m \frac{\partial \theta}{\partial y} \Big|_{\substack{y \in \Gamma \\ \Gamma \notin \ell_k}} = \alpha_0 (\theta - \theta_c) \Big|_{\substack{y \in \Gamma \\ \Gamma \notin \ell_k}}, \quad (3)$$

где  $\Gamma$  — граница соприкосновения шлифовального круга и детали;  $q_{cp}$  — средняя интенсивность теплового источника, распределенного по поверхности зоны контакта инструмента и детали;  $\alpha_0$  — коэффициент теплообмена на свободной поверхности;  $\lambda_m$  — коэффициент теплопроводности материала заготовки;  $\ell_k$  — длина контакта шлифовального круга и детали;  $\theta_c$  — температура СОТС;

– начальные условия

$$\theta|_{\tau=0} = \theta_c. \quad (4)$$

Алмазное глубинное шлифование имеет некоторые особенности, отличающиеся от многопроходного и глубинного шлифования [4]. К ним можно отнести: малую зернистость алмазных кругов, в результате чего в процессе шлифования получают тонкие стружки; в качестве СОТС используется масло, которое снижает трение и является химически нейтральным по отношению к шлифовальным кругам и обрабатываемым материалам, однако обладает более низкой теплопроводностью по сравнению с СОТС на водной основе; СОТС подается под большим давлением, достигающим 20 бар, с целью обеспечить лучшее смачивание и теплоотвод из зоны резания, а некоторые модели точных станков оснащаются дополнительными соплами с давлением 50 бар; теплопроводность алмаза выше, чем у других абразивными материалов, поэтому увеличен отвод тепла в алмазный инструмент. Исходя из вышесказанного, для моделирования тепловых процессов, происходящих при алмазном глубинном шлифовании, необходимо, учитывая все особенности данного процесса, определить отношение тепловых потоков, распределяющихся между шлифовальным кругом, заготовкой, СОТС и стружкой, а также определить их зависимость от скорости резания и подачи.

Известно, что для обеспечения бездефектной обработки, в частности получения требуемого качества поверхностного слоя обработанных деталей, необходимо управлять энергетическими параметрами процесса обработки [1]. Основным физическим законом, который осуществляет регулирование процессов, протекающих в зоне обработки, следует считать закон сохранения энергии. Математическая постановка этого закона применительно к процессам абразивной обработки принимает форму уравнения баланса механической и тепловой энергии (5).

$$P_{zj}v_k = Q_{dj} + Q_{жj} + Q_c + Q_{kj}, \quad (5)$$

где  $P_{zj}$  – тангенциальная составляющая силы шлифования;  $v_k$  – скорость круга;  $Q_{dj}$  – тепловой поток, направленный в деталь;  $Q_{жj}$  – количество тепла, отводимое охлаждающей жидкостью;  $Q_c$  – количество тепла, уносимое стружкой;  $Q_{kj}$  – тепловой поток, направленный в круг.

Уравнение баланса механической и тепловой энергии отражает тот факт, что общее количество тепла, выделяемое в процессе шлифования, распределяется между деталью, шлифовальным кругом, срезаемой стружкой и охлаждающей средой.

Доля тепла, уносимая стружкой, определяется из предположения, что температура стружки равна сумме температуры на поверхности детали и температуры, получаемой стружкой в результате пластической деформации, происходящей в плоскости сдвига

$$Q_{cj} = t_j \cdot v_d \cdot b_k \cdot c_{pM} \cdot \theta_{cj}, \quad (6)$$

$$\theta_{cj} = \theta_{cpj} + \frac{\tau_p}{2B \cdot c_{pM}}, \quad (7)$$

где  $\theta_{cj}$  – температура стружки на  $j$ -м участке;  $v_d$  – скорость движения детали;  $b_k$  – ширина рассматриваемой зоны контакта;  $\tau_p$  – сопротивление пластическому сдвигу;  $B = \operatorname{tg}\beta_1$  – тангенс угла наклона плоскости сдвига;  $t_j$  – глубина шлифования на  $j$ -м участке;  $c_{pM}$  – удельная плотность материала заготовки;  $\theta_{cpj}$  – среднеинтегральная температура на  $j$ -м участке.

Доля тепла, поступающая в деталь, определяется в соответствии с законом Фурье, устанавливающим на поверхности детали граничные условия второго рода (8)

$$Q_{dj} = 4q_{cpj} \cdot b_k \frac{a_M}{v_d} L, \quad (8)$$

где  $L = \frac{v_d l_k}{a_M}$  – безразмерная полуширина зоны контакта заготовки и шлифовального круга;  $q_{cpj}$  – средняя плотность теплового потока на  $j$ -м участке.

Тепло, отводимое охлаждающей жидкостью с поверхности детали, должно учитывать только долю теплоты, уносимую из зоны контакта, и исключать отводимую со свободной поверхности, так как последняя должна быть исключена из уравнения баланса как получаемая деталью. Конвективный теплообмен в зоне контакта осуществляется в соответствии с законом, описываемым уравнением Ньютона–Рихмана [1], определяющим граничные условия третьего рода, а общее количество энергии, отводимой охлаждающей жидкостью, подчиняется интегралу

$$Q_{жj} = \lambda_M b_k \beta \int_0^{2L} \frac{Z}{2L} \theta(Z) dZ = 2\lambda_M b_k \beta L \theta_{cpj}, \quad (9)$$

где  $\beta$  – безразмерный критерий, характеризующий теплообмен на поверхности тела:

$$\beta = \frac{2\alpha_0 a_M}{\lambda_M v_d}, \quad (10)$$

где  $\alpha_0$  – коэффициент теплоотдачи в СОТС.

Определением коэффициента теплоотдачи в СОТС в зоне резания при шлифовании занимались многие ученые, результатом труда которых являются эмпирические зависимости. В них учитываются условия течения жидкости и теплообмен с СОТС в зоне обработки, однако данные зависимости значительно отличаются друг от друга. Поэтому в качестве наиболее подходящей модели были использованы результаты исследований [5].

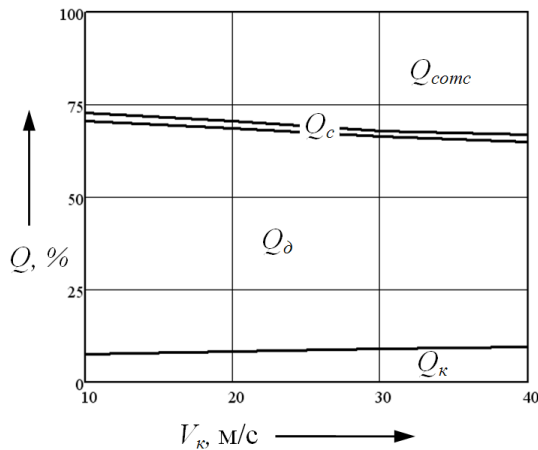
Суммарное количество энергии, поступающей в абразивный инструмент в единицу времени, можно определить с учетом полученной ранее плотности режущих зерен на поверхности круга и средней интенсивности теплового потока в режущее зерно:

$$Q_{жj} = q_{cpj} \frac{\lambda_3 \sqrt{\pi}}{\lambda_M 2L} \sqrt{\frac{v_k \ell_{kj}}{2a_3}} \theta_{cpj} 4\delta^2 p_p b_k 2\ell_{kj}, \quad (11)$$

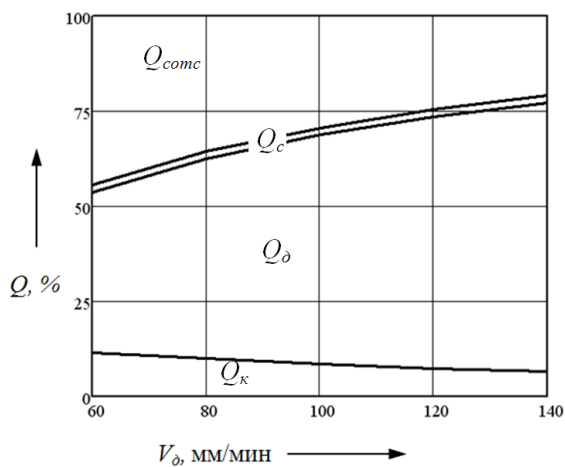
где  $\ell_{kj}$  – длина контакта шлифовального круга и детали на  $j$ -м участке;  $\lambda_3$  – коэффициент теплопроводности зерна шлифовального круга;  $q_{cpj}$  – средняя плотность теплового потока на  $j$ -м участке;  $a_3$  – температуропроводность зерна шли-

фовального круга;  $2\delta$  – размер контакта зерна;  $\rho_p$  – плотность режущих зерен.

На рис. 6 и 7 представлены графики зависимости баланса механической и тепловой энергии при алмазном глубинном шлифовании спиральной канавки монолитного твердосплавного инструмента от скорости резания и подачи.



**Рис. 6.** Зависимость баланса энергии от скорости резания ( $v_d = 100 \text{ мм/мин}$ ;  $t_{max} = 0,78 \text{ мм}$ )



**Рис. 7.** Зависимость баланса энергии от подачи ( $v_k = 20 \text{ м/с}$ ,  $t_{max} = 0,78 \text{ мм}$ )

Таким образом, проведя исследование баланса тепловой и механической энергии в зоне контакта алмазного круга и заготовки, было выяснено, что распределение теплового потока, образующегося при обработке спиральной канавки по типовой технологии, выглядит следующим образом: приблизительно 30 % тепла, образующегося в зоне резания, уходит в СОТС. Это ниже, чем при традиционном глубинном шлифовании, что объясняется высоким коэффициентом вязкости и низкой теплопроводностью применяемого СОТС; основное количество

тепла забирает деталь, около 60 %, такой показатель можно объяснить высокой теплопроводностью твердого сплава; количество тепла, идущего в шлифовальный круг, достаточно велико (8 %) по сравнению с традиционным глубинным шлифованием (2 %), это связано с высокой теплопроводностью алмаза; доля тепла, идущего в стружку, составляет 2 % и не определяет тепловой обстановки в зоне контакта.

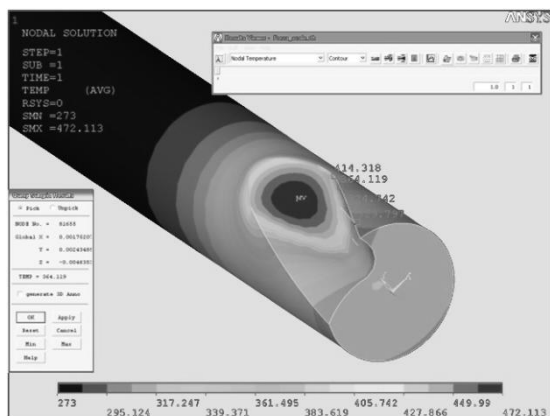
Определение температуры в точке, располагаемой на поверхности детали, и температурного распределения в процессе резания является сложной задачей, даже в случае обработки плоских поверхностей. В данном случае аналитический способ решения такой задачи сильно осложняется неравномерностью теплового потока, возникающего на поверхности пятна контакта шлифовального круга и заготовки, и сложной геометрией поверхностей, на которые задаются граничные условия. Поэтому при расчетах температуры для криволинейных поверхностей преобладающее значение приобретают численные методы.

Среди численных методов решения задач в различных областях, получивших наибольшее распространение, ведущее положение занимает метод конечных элементов (МКЭ) [6].

Большое значение с точки зрения точности расчетов имеет выбор моделирующего устройства или пакета прикладных программ, с помощью которых производится имитация процессов, происходящих в зоне резания. Наиболее распространенной из профессиональных программных продуктов, использующих метод конечных элементов для моделирования тепловых процессов, является система Ansys.

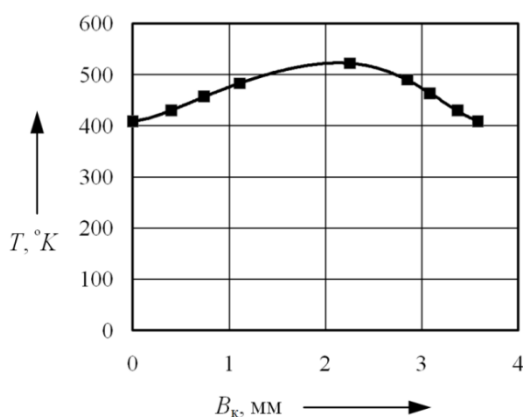
Для построения расчетной модели в системе Ansys была использована твердотельная модель заготовки концевой инструмента, построенная в системе SolidWorks. Она представляет собой совокупность поверхностей, возникающих при обработке спиральной канавки в момент установления пятна контакта шлифовального круга и заготовки. Полученные данные используются для конечно-элементного моделирования в системе Ansys, процесса обработки и расчета величины температурного поля в точках, имеющих наибольшее влияние на эксплуатационные свойства монолитного инструмента.

Результатом расчета в системе Ansys является схема распределения температур при глубинном шлифовании спиральной канавки концевой инструмента (рис. 8).



**Рис. 8.** Схема распределения температур при глубинном шлифовании спиральной канавки концевой инструмента

Из рис. 9 видно, что максимальное значение температуры в зоне контакта возникает на «дне» стружечной канавки и имеет смещение в сторону передней поверхности инструмента, т. е. той поверхности, как указывалось ранее, чьи физико-механические свойства имеют значительное влияние на эксплуатационные свойства инструмента.



**Рис. 9.** Распределение температуры по ширине пятна контакта при глубинном шлифовании спиральной канавки концевой инструмента

Также помимо максимальной температуры полученная модель позволяет отслеживать температуру в областях, наиболее часто подверженных дефектам (область вблизи режущей кромки).

Предлагаемая модель расчета температур в зоне резания при алмазном глубинном шлифовании позволила учесть сложную геометрическую форму пятна контакта алмазного круга и заготовки.

Компьютерное моделирование тепловых процессов позволяет определить распределение

температуры по площади пятна контакта при алмазном глубинном шлифовании и оценить значения максимальных температур, возникающих в зоне резания на различных режимах и с использованием различных по своим характеристикам алмазных кругов.

Полученные в результате расчета температурные показатели процесса шлифования спиральной канавки для каждого конкретного случая позволяют осуществить подбор оптимальных характеристик алмазных кругов и оптимизацию режимов резания в условиях бездефектной обработки.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Волков Д. И., Борвинок Д. В. Баланс механической и тепловой энергии при шлифовании инструментальных материалов кругами из СТМ // Справочник, инженерный журнал. 2009. № 4. С. 19–21.
2. Ординарцев И. А., Филиппов Г. В., Шевченко А. Н. Справочник инструментальщика: справочник. Л.: Машиностроение, 1987. 846 с.
3. Баранчиков В. И., Боровский Г. В., Гречишников В. А. Справочник конструктора инструментальщика: справочник. М.: Машиностроение, 1994. 560 с.
4. Полетаев В. А., Волков Д. И. Глубинное шлифование лопаток турбин: монография. М.: Машиностроение, 2009. 270 с.
5. Горбунова И. А. Разработка методики анализа теплового состояния в контактной зоне при глубинном шлифовании на базе экспериментальных исследований условий теплообмена: дис. ... канд. техн. наук: 05.03.01: защищена 21.05.05; утв. 15.08.05. Рыбинск, 2005. 168 с.
6. Лещева В. В. Моделирование профильного и глубинного шлифования лопаток турбин // Справочник, инженерный журнал. 2009. № 4. С. 59–61.

#### ОБ АВТОРАХ

**ВОЛКОВ Дмитрий Иванович**, зав. каф. резания материалов, станков и инструментов. Дипл. инж.-мех. (РАТИ, 1976). Д-р техн. наук (там же, 1997), проф. Иссл. в обл. абразивной обработки.

**ЦВЕТКОВ Борис Викторович**, асп. каф. резания материалов, станков и инструментов. Дипл. м-р техн. и технол. по технол., оборуд. и автоматиз. машиностроительных производств (РГАТА, 2011). Готовит дис. об алмазном глубинном шлифовании монолитного твердосплавного инструмента.

**ЦВЕТКОВ Егор Викторович**, преп. каф. резания материалов, станков и инструментов. Дипл. инж. (РГАТА, 2007). Канд. техн. наук (там же, 2010). Иссл. в обл. глубинного шлифования секторов соплового аппарата ГТД.

#### METADATA

**Title:** Thermal processes modeling of a diamond deep grinding of a spiral lead of the monolithic carbide material cutting tools.

**Authors:** D. I. Volkov, B. V. Tsvetkov, E. V. Tsvetkov.

**Affiliation:** Rybinsk State Aviation Technical University (RGATA), Russia.

**Email:** boris\_tsvetkov@mail.ru.

**Language:** Russian.

**Source:** Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 17, no. 8 (61), pp. 114-120, 2013. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

**Abstract:** In the paper results of study of a diamond deep grinding of a spiral lead of the monolithic carbide material cutting tools with use of solid-state simulation of the end-cutting tool in "Solid Works" and calculation of a sample piece by a finite element method in "Ansys" was show. The technique of definition of temperatures distribution and the maximum temperatures in a cutting zone was developed. The obtain data could form the fundamentals for working out of new techniques of definition of optimum cutting conditions, and also for creation recommendations about a diamond deep grinding of the monolithic carbide material cutting tools.

**Key words:** diamond deep grinding; carbide material cutting tools; simulation of a zone of contact; mathematical model of thermal processes.

#### References (English transliteration):

1. D. I. Volkov and D. V. Borvinok, "Mechanical and thermal energy balance while tool materials grinding with the super hard materials wheels," (in Russian), *Spravochnik. Inzhenernyy zhurnal*, vol. 12, no. 4 (145), pp. 19-21, 2009.
2. I. A. Ordinartsev, G. V. Filipof, and A. N. Shevchenko, *Toolmaker handbook*, (in Russian). St. Petersburg, Mashinostroenie, 1987.
3. V. I. Baranchikov, G. V. Borovski, and V. A. Grechishnikov, *Tool engineer handbook*, (in Russian). Moscow: Mashinostroenie, 1994.
4. V. A. Poletaev and D. I. Volkov, "Turbine rotor blade creep feed grinding," (in Russian), monograph. Moscow, Mashinostroenie, 2009.
5. I. A. Gorbunova, *Working out of a technique of the thermal condition analysis in a contact area while deep grinding on the basis of experimental researches of heat exchange conditions*, (in Russian), Ph. D. thesis, 15.08.2005, Rybinsk, 2005.
6. V. V. Lesheva, "Turbine rotor blade creep feed grinding profile modeling", (in Russian), *Spravochnik. Inzhenernyy zhurnal*, vol. 12, no. 4 (145), pp. 59-61, 2009.

#### About authors:

**VOLKOV, Dmitry Ivanovich**, Prof., Dept. of Material cutting, machinetools and cutting tools. Dr. of Tech. Sci. (RGATU, 1997).

**TSVETKOV, Boris Viktorovich**, Postgrad. (PhD) Student, Dept. of Material cutting, machinetools and cutting tools. Master of Technics & Technology (RGATU, 2011).

**TSVETKOV, Egor Viktorovich**, lect., Dept. of Material cutting, machinetools and cutting tools. Cand. of Tech. Sci. (RGATU, 2011).