

На правах рукописи

Цветков Борис Викторович

**ПОВЫШЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ АЛМАЗНОГО
ГЛУБИННОГО ШЛИФОВАНИЯ МОНОЛИТНОГО
ТВЕРДОСПЛАВНОГО ИНСТРУМЕНТА**

05.02.07 – Технология и оборудование механической и физико-технической
обработки

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Рыбинск – 2017

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П. А. Соловьева»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор Волков Дмитрий Иванович

Официальные оппоненты:

Гусев Владимир Григорьевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Технология машиностроения» ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»;

Носенко Владимир Андреевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технология и оборудование машиностроительных производств» Волжского политехнического института филиал ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный университет».

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ульяновский государственный технический университет», г. Ульяновск.

Защита состоится «27» декабря 2017 года в 13 часов на заседании диссертационного совета Д 212.210.01 в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П. А. Соловьева» по адресу: 152934, Ярославская область, г. Рыбинск, ул. Пушкина, 53, ауд. Г-237.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П. А. Соловьева», адрес сайта www.rsatu.ru.

Автореферат разослан « 26 » октября 2017 года.

Ученый секретарь

диссертационного совета

д-р техн. наук, доцент _____ Надеждин Игорь Валентинович

Общая характеристика работы

Актуальность темы. В настоящее время наблюдается активный рост парка многоцелевых обрабатывающих центров, позволяющих улучшить технологичность обработки деталей за счет увеличения концентрации операций, выполняемых за один установ. Технология обработки деталей на таком оборудовании предъявляет высокие требования к режущему инструменту по точности, жесткости и эксплуатационным характеристикам. Поэтому в данной области широкое распространение получил концевой монолитный инструмент из твердого сплава.

В условиях жесткой конкуренции в области производства осевых металлорежущих инструментов с такими крупными зарубежными компаниями, как Sandvik Coromant, Iskar и Mitsubishi, важную роль играет стоимость изготовления инструмента. Одним из результативных способов снижения стоимости продукции является уменьшение машинного времени обработки, за счет оптимизации режимов резания.

Однако повышение производительности за счет увеличения режимов шлифования может привести к возникновению дефектов, связанных с повышением напряженного состояния в зоне резания, влияющего на геометрические параметры и качество поверхностного слоя инструмента. Поэтому в большинстве случаев обработка монолитного инструмента различных типоразмеров осуществляется на одних и тех же режимах резания, а для инструмента малого диаметра, во избежание упругих деформаций (отжима) консольно закрепленной заготовки, устанавливаются заниженные режимы, что приводит к увеличению времени обработки и стоимости изготовления.

В настоящее время обработка концевой монолитного инструмента из твердого сплава осуществляется на пятикоординатных заточных станках методом алмазного глубинного шлифования. Данный метод обработки концевой инструмента получил за рубежом довольно широкое применение, однако в нашей стране используется сравнительно недавно и недостаточно изучен, что ограничивает его эффективное использование.

Малая изученность современных методов формообразования спиральной канавки и отсутствие аналитических моделей, описывающих влияние режимов резания и характеристик алмазного инструмента на теплофизические процессы, при данном виде обработки, определяют актуальность работы для теории и практики алмазного глубинного шлифования.

Цель работы. Повышение производительности обработки концевой монолитного твердосплавного инструмента, путем оптимизации режимов резания на основе анализа температурно-силовых процессов происходящих при алмазном глубинном шлифовании спиральных профильных канавок.

Для реализации поставленной цели в данной работе решаются следующие задачи:

1 Исследование кинематики процесса формообразования спиральной канавки концевой инструмента при алмазном глубинном шлифовании.

2 Разработка математических моделей зоны контакта шлифовального круга с заготовкой и силовых процессов при резании, учитывающих особенности алмазного глубинного шлифования спиральной канавки концевой инструмента.

3 Исследование влияния силовых процессов на упругие деформации заготовки в процессе шлифования спиральной канавки концевой инструмента.

4 Разработка модели упругих деформаций заготовки в процессе шлифования спиральных канавок концевой инструмента.

5 Исследование влияния режимов резания на распределение тепловых потоков при алмазном глубинном шлифовании спиральной канавки концевой инструмента из твердого сплава.

6 Разработка методики расчёта температурного поля в зоне резания методом конечных элементов.

7 Экспериментальная проверка разработанных математических моделей.

8 Разработка алгоритма оптимизации процесса обработки спиральной канавки монолитного твердосплавного инструмента на основании температурно-силовых показателей алмазного глубинного шлифования.

Методы исследования. Теоретические исследования проводились с использованием положений теории шлифования, технологии машиностроения, теории теплопередачи и сопротивления материалов. Обработка теоретических и экспериментальных данных осуществлялись на персональном компьютере с использованием специально разработанных и типовых программ. При обработке экспериментальных данных были использованы статистические методы.

Экспериментальные исследования осуществлялись в производственных условиях на специализированном оборудовании с использованием контрольно-измерительных приборов по стандартным и разработанным автором методикам.

Достоверность и обоснованность научных результатов. Достоверность научных выводов и рекомендаций обеспечивается удовлетворительным согласованием расчетных и экспериментальных данных.

На защиту выносятся:

– математическая модель зоны контакта шлифовального круга с деталью при обработке спиральной канавки концевой инструмента методом алмазного глубинного шлифования;

– математическая модель силовых процессов резания при обработке профильной спиральной канавки концевой инструмента методом алмазного

глубинного шлифования;

- методика определения температурного поля в зоне резания при алмазном глубинном шлифовании профильной спиральной канавки концевго инструмента;

- математическая модель определения упругих деформаций заготовки при шлифовании спиральной канавки монолитного инструмента из твердого сплава;

- методика и результаты экспериментальных исследований тангенциальной составляющей силы резания при шлифовании спиральной канавки концевго инструмента из сплава H10F;

- методика и результаты экспериментальных исследований упругой деформации заготовок концевго инструмента из сплава H10F;

- методика и результаты экспериментальных исследований температуры в зоне резания при шлифовании спиральной канавки концевго инструмента из сплава H10F;

- методика оптимизации процесса шлифования спиральной канавки монолитного инструмента из твердого сплава.

Научная новизна работы. Результатом теоретических и экспериментальных исследований являются математические модели для анализа и компьютерного моделирования температурно-силовых процессов при обработке спиральной канавки монолитного твердосплавного инструмента. В том числе получены:

- результаты компьютерного моделирования кинематики процесса шлифования и анализа зоны контакта конического шлифовального круга и заготовки при обработке спиральных канавок концевго инструмента;

- результаты моделирования температурно-силовых процессов, возникающих при шлифовании спиральных канавок концевго инструмента;

- модель определения упругих деформаций заготовки при обработке спиральной канавки концевго инструмента из твердого сплава;

- результаты экспериментального определения температуры в зоне обработки и тангенциальной составляющей силы резания при шлифовании спиральной канавки концевго инструмента из сплава H10F;

- результаты экспериментального определения упругой деформации заготовок концевго инструмента из сплава H10F при различных углах наклона спирали и форме канавок.

Практическая значимость. Разработана методика и алгоритм оптимизации процесса шлифования спиральной канавки монолитного твердосплавного инструмента. Результатом применения данной методики является уменьшение времени изготовления и количества отбракованных деталей, что ведет к снижению себестоимости изготавливаемого инструмента и

повышению экономической эффективности производства.

Реализация результатов. Основные положения диссертации переданы на предприятия АО "СатИЗ", ЗАО "НИР" с целью разработки и оптимизации технологических операций алмазного глубинного шлифования монолитного твердосплавного инструмента, а также в РГАТУ для использования в лекционных курсах и на практических занятиях.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертации представлены и обсуждены на Международной молодежной научной конференции «18 Гагаринские чтения», Москва 2012, на Международной молодежной научной конференции «19 Гагаринские чтения», Москва 2013, на Международной научно-практической конференции «Современные материалы, техника и технология», Курск, 2013, на Международной научно-практической конференции «Современные материалы, техника и технология», Курск, 2017.

Данная работа представлялась на всероссийской выставке «НТТМ 2012», Москва 2012 и получила грант призер.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 8 печатных работ в различных журналах, сборниках научных трудов и материалов конференций. Три статьи опубликованы в изданиях, входящих в перечень ВАК.

Структура диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и приложений. Изложена на 150 страницах машинописного текста, содержит 10 таблиц, 84 рисунка, 63 формулы; библиографический список содержит 102 наименования.

Содержание работы

Во введении обосновывается актуальность темы диссертационной работы, предоставляется общая характеристика работы, сформулированы цели и задачи исследований.

В первой главе проведен анализ алмазного шлифования твердых сплавов. Определены особенности глубинного шлифования инструментальных материалов. Было установлено, что публикации результатов исследований алмазного глубинного шлифования в общедоступных источниках, по большей части, носят рекламный характер. Наибольший вклад в исследование процесса глубинного шлифования внесли: С. С. Силин, Н. С. Рыкунов, В. А. Полетаев, Д. И. Волков, Е. И. Сухов, П. И. Ящерицин, Н. Damlos, E. Salje, W. König, R. Druminski и др.

Выполнен анализ подходов при определении оптимальных режимов алмазного шлифования твердых сплавов. Следует отметить, что рекомендации по назначению скорости резания для алмазного шлифования твердых сплавов противоречивы по причине того, что при получении зависимости такого параметра, как удельный расход алмазов от скорости резания, некоторые

авторы вместе со скоростью резания меняли также и подачу. Исследованием алмазной обработки твердых сплавов занимались отечественные и зарубежные ученые: А. Н. Резников, З. И. Кремень, С.А. Попов, Н. П. Малевский, J. W. Negeman, J. Th. M. De Hosson и др.

Рассмотрен процесс формообразования, а также инструмент, применяемый при шлифовании монолитного инструмента. Выделены основные факторы, влияющие на качество обработки твердосплавного инструмента. К ним можно отнести: режимы резания при шлифовании, характеристика алмазного круга, величина радиального и торцевого биения шлифовального круга, состояние рабочей поверхности, марка обрабатываемого материала, схема заточки, наличие и состав СОТС, а также жесткость системы СПИЗ.

Рекомендации по определению оптимальных режимов обработки и характеристик алмазных кругов для алмазного шлифования опираются в основном на экспериментальные данные, полученные в результате исследования традиционных методов многопроходного шлифования.

На основании полученных данных были поставлены цель и задачи теоретико-экспериментального исследования процесса алмазного глубинного шлифования направленные на повышение производительности обработки концевых инструментов из твердого сплава.

Во второй главе для определения геометрических параметров пятна контакта был смоделирован кинематический процесс обработки винтовой канавки концевой цилиндрической фрезы, шлифовальным кругом с конической формой рабочей поверхности (рисунок 1). Моделирование осуществлялось в системе SolidWorks посредством имитации поступательно-вращательного

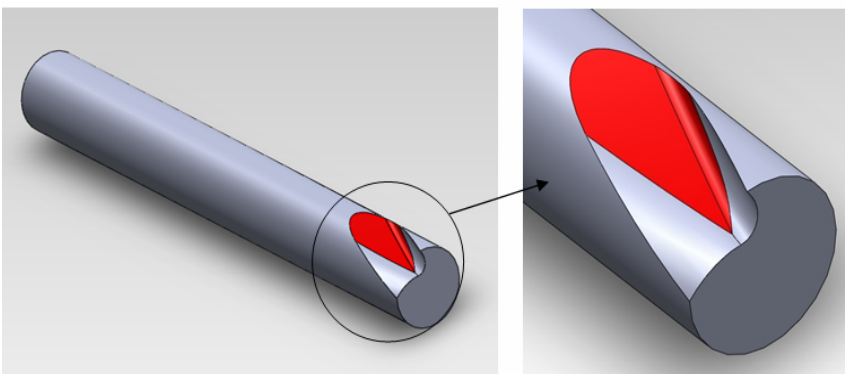


Рисунок 1 - Пятно контакта

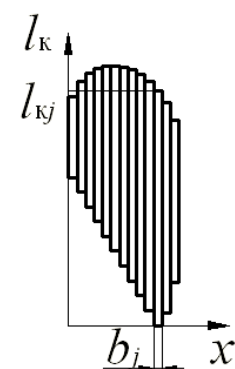


Рисунок 2 - Схема разбиения пятна контакта

движения заготовки относительно шлифовального круга, расположенного под углом к её оси. Пятно контакта, при данном виде обработки, имеет более сложную форму, чем при круглом или плоском шлифовании, а его геометрия сильно зависит от параметров обрабатываемого инструмента и шлифовального круга. Аналитическое описание параметров пятна контакта основано на

дискретном представлении зоны обработки (рисунок 2).

По причине того, что при формообразовании спиральной канавки, движение круга относительно обрабатываемой заготовки осуществляется по сложной траектории, схему формирования глубины снимаемого припуска на j -ых участках нельзя отнести ни к одной из существующих (к плоскому, либо круглому шлифованию). Разработана аналитическая зависимость глубины шлифования от параметров обрабатываемого инструмента и шлифовального круга (1).

$$t_j = \frac{\left(\frac{d_{\dot{e}} \sin \varphi}{2 \sin \psi}\right)^2 + \frac{d_{\dot{e}}^2}{4} (1 - \cos \varphi)^2}{d_{\dot{e}} (1 - \cos \varphi)} + R_{\dot{e}j} - \sqrt{\tilde{n}_j^2 + \left(a_w + R_{i\dot{o}} - \frac{d_{\dot{e}}}{2}\right)^2}, \quad (1)$$

где $d_{\dot{e}}$ – диаметр инструмента, мм; φ – угол, определяющий длину дуги $R_{\text{пр}}$; ψ – установочный угол шлифовального круга; c_j – смещение оси инструмента и шлифовального круга, мм; $R_{\text{пр}}$ – приведенный радиус, мм.

С целью выполнения тепловых и силовых расчетов при обработке спиральной канавки концевой инструмента определены параметры зоны резания, принадлежащие к j -тым участкам.

Определение математического ожидания средней глубины резания единичного зерна осуществлялось по формуле

$$\tilde{a}_{z_j} = \frac{\pi \cdot l_{kj}}{N_{p1}} \cdot \left(\frac{v_d}{v_{kj}}\right) \cdot \sum_{i=1}^n \frac{N_{ij}}{1 + \frac{2\pi}{\tilde{\varphi}_i}}, \quad (2)$$

где N_{p1} – количество зерен первой группы; v_d – подача детали мм/мин; v_{kj} – скорость резания на j -том участке; φ_i – угловая координата.

Зависимость математического ожидания количества зерен, участвующих в резании на j -том участке зоны контакта, от параметров шлифования

$$\tilde{n}_{pj} = \frac{l_{kj}}{\pi \cdot D_k} \cdot \sum_{i=1}^n \pi \cdot D_k \cdot C_v \cdot \xi^2 \cdot \left(i - \frac{1}{2}\right) \cdot \left[b_{kj} - 2 \cdot \tan(\varphi) \cdot \sum_{m=1}^{i-1} N_{mj} \cdot \xi \cdot (i - m)\right] \cdot \left(1 + \frac{2\pi}{\tilde{\varphi}_i}\right), \quad (3)$$

где C_v – градиент плотности зёрен, мм⁻⁴; ξ – размер зерна, мм.

Характеристики зоны контакта абразивного круга с деталью (1), (2), (3) учитывают особенности профиля шлифовального круга и заготовки. Определение данных параметров позволяет сравнить различные, по своим характеристикам, шлифовальные круги и режимы обработки, а также рассчитать температурно-силовые параметры процесса шлифования.

Графики распределения глубины шлифования t и глубины резания

единичного зерна a_z вдоль пятна контакта представлены на рисунках 3 и 4.

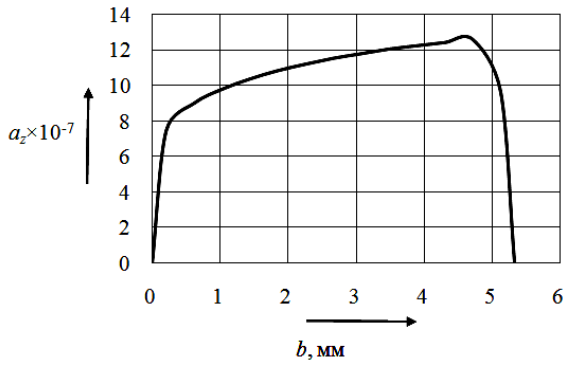


Рисунок 3 - Распределение глубины резания единичного зерна a_z по ширине пятна контакта

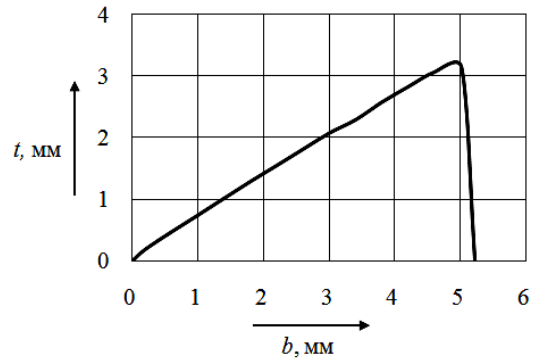


Рисунок 4 - Распределение глубины шлифования t по ширине пятна контакта

Для определения сил, возникающих в процессе снятия стружки на участке j при глубинном шлифовании, получены выражения 4 и 5, которые представляют собой сумму составляющих силы резания единичного зерна P_{zj} , возникающих на данных участках

$$P_{zj} = P_{zedj} \cdot n_{pj} \cdot \tau_p \cdot b_{kj} \cdot a_{zj} \cdot \frac{\sin(\pi - \psi)}{\sin \omega} \cdot \left[\left(1 - \frac{\Delta_1}{a_z}\right) \cdot \frac{2}{B} + \frac{\ell_{kj}}{a_{zj}} + \frac{2 \cdot \sqrt{3}}{1 + 4 \cdot \mu^2} \cdot \left\{ 1 + \mu \cdot \left(\frac{\ell_{kj}}{a_{zj}} + \sqrt{\frac{2 \cdot \rho_1 \cdot \Delta_1}{a_{zj}^2}} \right) \right\} \right], \quad (4)$$

$$P_{yj} = P_{yedj} \cdot n_{pj} \cdot \tau_p \cdot b_{kj} \cdot a_{zj} \cdot \left[\left(1 - \frac{\Delta_1}{a_z}\right) \cdot \frac{1}{B^2} + \frac{\ell_{kj}}{a_{zj}} + \frac{2 \cdot \sqrt{3}}{1 + 4 \cdot \mu^2} \cdot \left(\frac{\ell_{kj}}{a_{zj}} + \mu \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \rho_1 \cdot \Delta_1}{a_{zj}^2}} \right) \right], \quad (5)$$

где ω – угол наклона спиральной канавки; Δ_1 – величина подминаемого слоя, мм; B – тангенс угла наклона условной плоскости сдвига; ρ_1 – радиус скругления режущей кромки абразивного зерна, мм; μ – коэффициент трения контактирующих поверхностей.

Общие составляющие силы шлифования при обработке спиральной канавки определялись суммированием сил, возникающих на j – ых участках, в результате чего учитываются параметры, меняющиеся вдоль ширины пятна контакта обрабатываемого круга и заготовки.

$$P_z = \sum_{j=1}^n P_{zj}, \quad P_y = \sum_{j=1}^n P_{yj}. \quad (6)$$

На рисунках 5 и 6 представлены теоретические и экспериментальные зависимости тангенциальной составляющей силы резания P_z от подачи детали и скорости резания при обработке спиральной канавки концевым инструментом.

Ввиду сложной формы пятна контакта, зависящей от большого количества геометрических параметров шлифовального круга и обрабатываемого инструмента, был выбран метод анализа теплового состояния в зоне резания с помощью систем инженерного анализа. Для определения температуры, возникающей в зоне обработки, по формуле (7) рассчитывалась

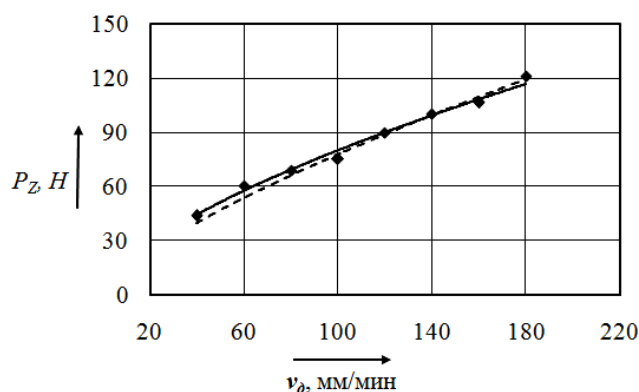


Рисунок 5 - Зависимости составляющей силы резания P_z от подачи детали

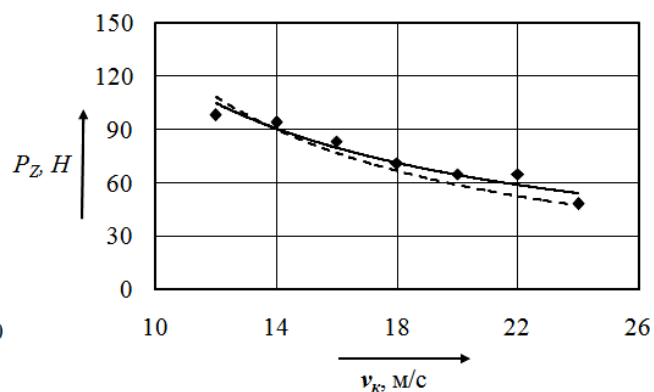


Рисунок 6 - Зависимости составляющей силы резания P_z от скорости резания

средняя плотность теплового потока на j – ых участках поверхности пятна контакта.

Произведен анализ и получены зависимости распределения тепла между деталью θ_d , шлифовальным кругом θ_k , срезаемой стружкой θ_c и охлаждающей средой $\theta_{\text{сотс}}$ при алмазном глубинном шлифовании спиральной канавки концевой инструмента из твердого сплава. Графики зависимости распределения тепла между элементами, участвующими в резании, от подачи детали и скорости резания изображены на рисунках 7 и 8.

$$q_{cpj} = \frac{P_{zedj} P_{pj} v_{kj}}{1 + \theta_{cpj} \left[\frac{\beta}{2} + \sqrt{\frac{t_j}{D_{kj}}} \left(1 + \frac{\tau_p v_d}{2Bq_{cpj} \theta_{cpj}} \right) + \sqrt{\pi} \frac{\lambda_3}{\lambda_m} \frac{S_3}{2L} \sqrt{L_3} \right]}, \quad (7)$$

где ρ_{pj} – плотность режущих зерен, мм^{-2} ; λ_3 – коэффициент теплопроводности материала абразивного зерна, $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$; λ_m – коэффициент теплопроводности материала детали, $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$; L – безразмерная полуширина зоны контакта; L_3 – критерий, подобный Пекле, для абразивного зерна; S_3 – площадь контакта зерен в безразмерном виде.

В результате анализа установлено, что количество тепла, уходящего в алмазный шлифовальный круг, достаточно велико - 30%, по сравнению с глубинным шлифованием традиционными абразивами, у которого оно составляет около 10%.

В третьей главе был смоделирован процесс передачи тепла из зоны резания в обрабатываемую заготовку. Величина теплового потока для j – ых участков пятна контакта была рассчитана с помощью разработанной модели процесса алмазного шлифования. На основании анализа процесса обработки были определены начальные и граничные условия в области зоны контакта и на свободной поверхности заготовки.

Для моделирования тепловых процессов, происходящих при шлифовании

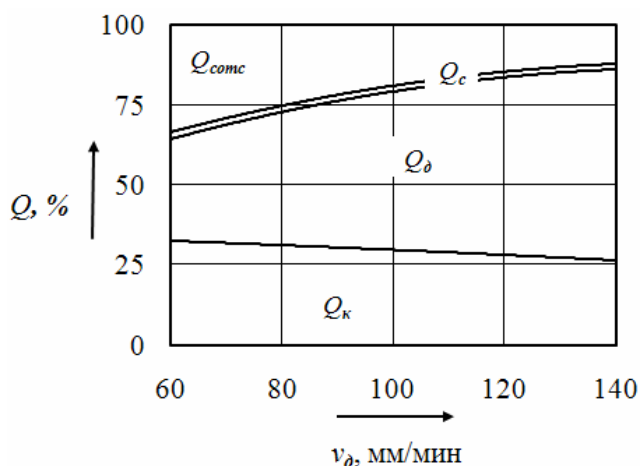


Рисунок 7 - Зависимость баланса тепла от скорости детали v_d при $v_k = 20$ м/с

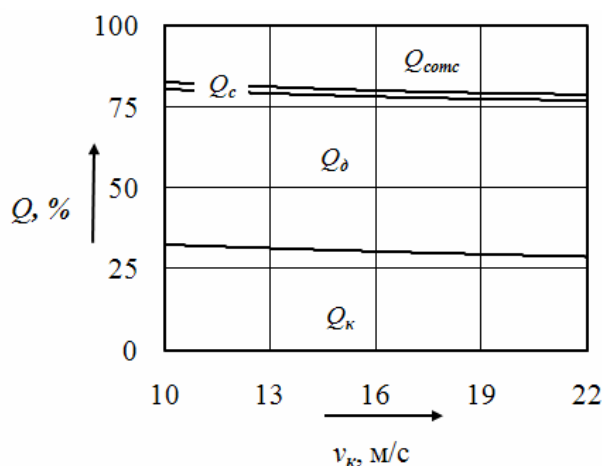


Рисунок 8 - Зависимость баланса тепла от скорости резания v_k при $v_d = 100$ мм/мин

спиральной канавки, использовалась система инженерного анализа Ansys. Расчет процесса в системе осуществлялся методом конечных элементов. Для построения расчётной модели в системе Ansys использовалась твердотельная

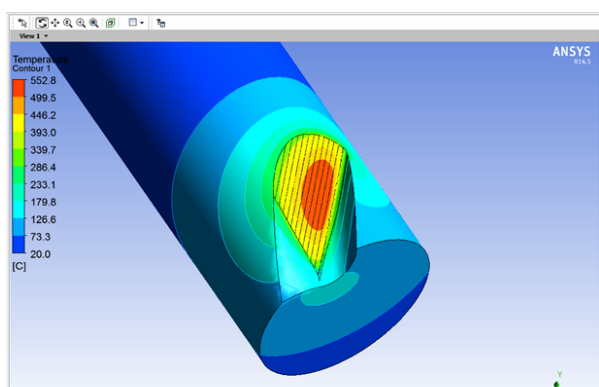


Рисунок 9 - Схема распределения температур при глубинном шлифовании спиральной канавки концевого инструмента

модель заготовки концевого инструмента, построенная в программе SolidWorks.

Результатом расчёта является схема распределения температур при глубинном шлифовании спиральной канавки концевого инструмента (Рис. 9). Помимо максимальной температуры, модель позволяет определить температуру в любой точке поверхности заготовки при обработке спиральной канавки концевого инструмента, что

делает возможным отслеживание теплового воздействия в областях, наиболее часто подверженных дефектам.

Экспериментальное определение температуры в области обработки производилось на многокоординатном заточном станке Walter Helitronic Power.

Определение температуры осуществлялось с помощью искусственной термопары хромель–алюмель с электродами диаметром 0,3 мм.

На рисунках 10 и 11 представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований зависимостей температуры в зоне обработки от подачи детали и скорости резания при шлифовании спиральной канавки.

В четвертой главе определяется влияние упругой деформации изгиба, возникающей при шлифовании спиральной канавки, на геометрические параметры концевого инструмента. Разработано математическое описание изгиба заготовки под действием нормальной составляющей силы резания P_y .

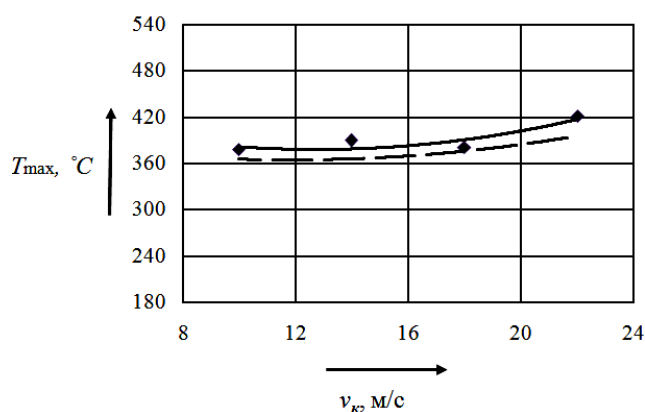


Рисунок 10 - Зависимость максимальной температуры зоне резания от окружной скорости шлифовального круга

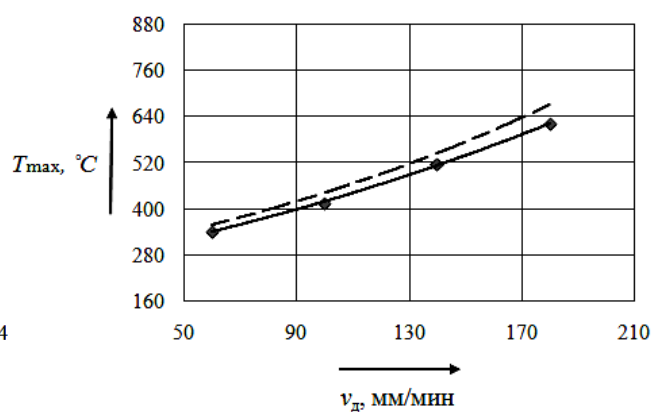


Рисунок 11 - Зависимость максимальной температуры зоне резания от подачи детали

Для решения данной задачи был выбран графоаналитический метод (рисунок 12). Для определения величины упругой деформации изгиба заготовки, на

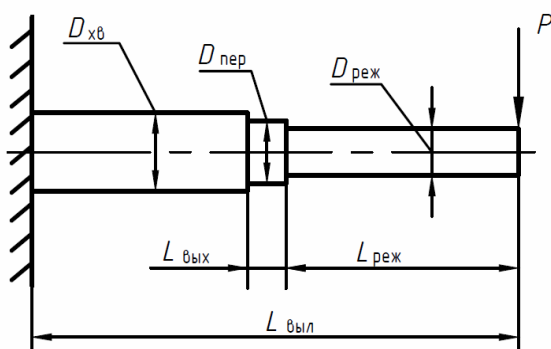


Рисунок 12 - Упрощенная схема действия нагрузки при шлифовании концевой инструмента

основании экспериментальных данных, был рассчитан модуль упругости сплава H10F, величина которого составила 461 ГПа.

На основании теоретических исследований была разработана математическая модель, позволяющая определить деформацию изгиба заготовки для осевого инструмента с различными геометрическими параметрами (7).

Для оценки влияния нагрузки при шлифовании на точность обработки, было проведено экспериментальное исследование жесткости шлифовального шпинделя и упругой системы станка Walter Helitronic Power.

$$\delta_{\text{изг}} = \frac{P_y}{6E_{\text{мат}} \cdot J_{\text{хв}}} \left[3l_{\text{хв}} l_{\text{выл}} (l_{\text{рез}} + l_{\text{пер}} + l_{\text{выл}}^2) - 2l_{\text{хв}}^2 (l_{\text{пер}} + \frac{l_{\text{выл}}}{2} + l_{\text{рез}}) + \frac{2J_{\text{хв}} l_{\text{рез}}^3}{J_{\text{рез}}} + \frac{2J_{\text{хв}} l_{\text{пер}} (3l_{\text{рез}}^2 - l_{\text{пер}}^2)}{J_{\text{пер}}} \right], \quad (7)$$

где $J_{\text{рез}}, J_{\text{хв}}, J_{\text{пер}}$ – осевые моменты инерции соответствующих участков, $\text{кг}\cdot\text{м}^2$.

В пятой главе представляется описание методики и алгоритма определения оптимальных режимов резания (рисунок 13) при шлифовании спиральной канавки концевой инструмента. Ограничивающим факторами являются температура в зоне обработки и величина максимально допустимой нормальной составляющей силы резания, при которой обеспечивается условие

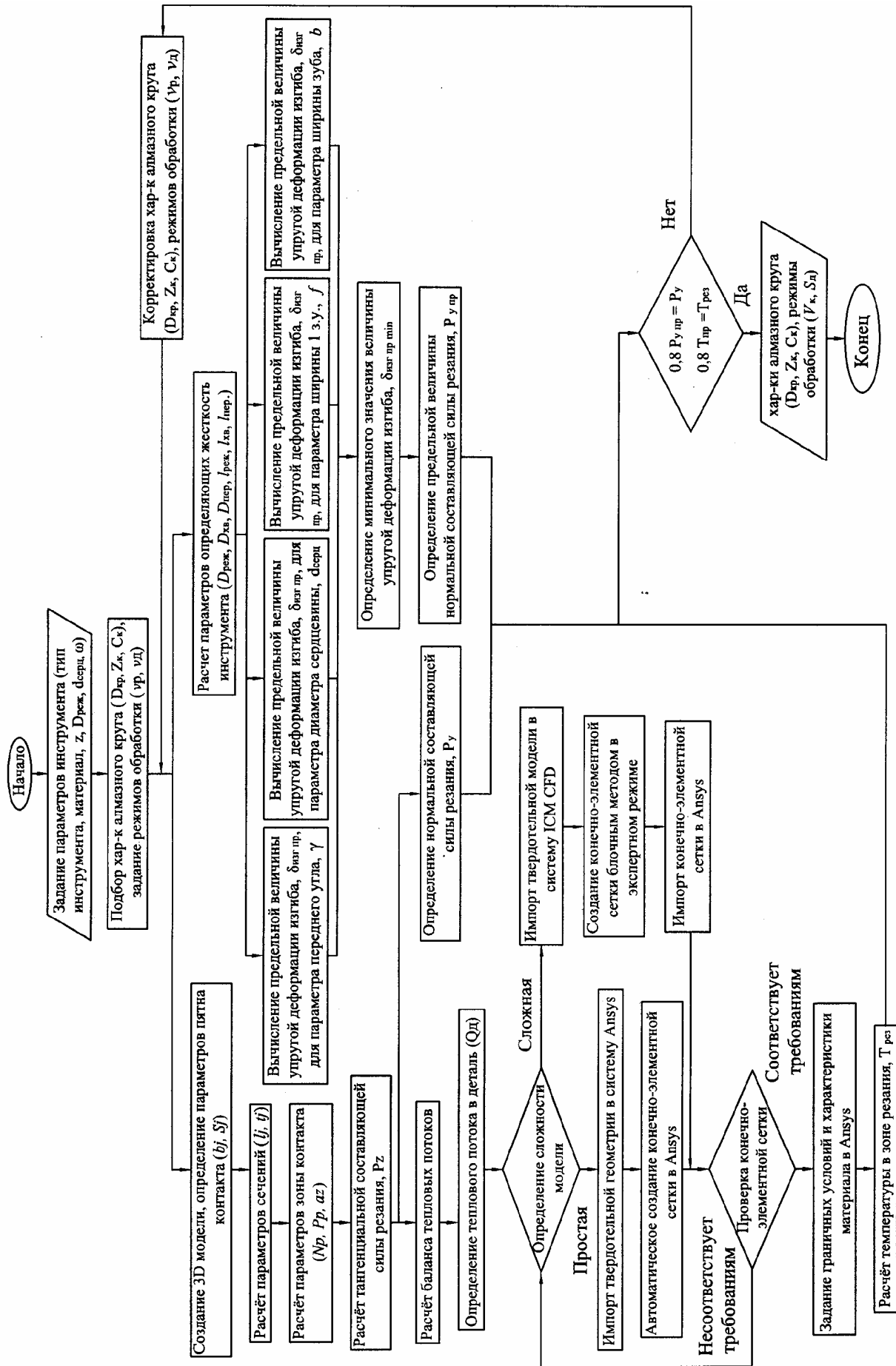


Рисунок 13 - Алгоритм определения оптимальных режимов резания

заданной точности геометрических параметров обрабатываемого инструмента. Описывается программное обеспечение, с помощью которого была реализована данная методика.

Целевой функцией при оптимизации будет являться максимум производительности $\Pi(x)$

$$\max \Pi(x), x \in x_{\partial}, \text{ где } \Pi = \sum_{j=1}^n t_j \cdot b_j \cdot v_{\partial}; \quad (8)$$

$$x_{\partial} = \{\Phi(x_i) \geq 0, x_{i\min} \leq x_i \leq x_{i\max}\}; \quad \Phi(x_i) = \begin{cases} \delta_{np}(x_i) \leq \delta_{\max} \\ \Theta_{np}(x_i) \leq \Theta_{\max} \end{cases}; \quad x = \{v_{\kappa}; v_{\partial}; t; b_{\kappa}; C_{\kappa}; Z_{\kappa}\}. \quad (9)$$

Параметры t_j и b_j являются константами и зависят от формы канавки, параметров шлифовального круга и заготовки. Поэтому ключевым параметром, определяющим производительность, является подача при резании.

С целью применения разработанной методики на производстве, математическая часть исследования была оформлена в виде программы расчета в системе MathCad, позволяющей рассчитывать режимы обработки при шлифовании спиральной канавки концевой инструмента из твердого сплава.

Заключение

1 Разработанная математическая модель зоны контакта при алмазном глубинном шлифовании спиральной канавки концевой инструмента, позволила определить влияние геометрических параметров инструмента, профиля и характеристик шлифовального круга, на количество зерен, участвующих в процессе резания и их геометрию срезов. Установлено, что при данном методе обработки параметры среза единичным зерном меньше в среднем на 30 %, а количество зерен, участвующих в резании больше, чем при традиционном глубинном шлифовании.

2 Полученная математическая модель силовых процессов при алмазном глубинном шлифовании спиральной канавки осевого инструмента из твердого сплава, позволила установить влияние режимов обработки, геометрических параметров инструмента, профиля и характеристик шлифовального круга на величину составляющих силы шлифования, возникающей в процессе обработки.

3 Исследование баланса механической и тепловой энергии, при алмазном глубинном шлифовании спиральной канавки осевого инструмента из твердого сплава, позволило установить характер распределения тепла, уносимого стружкой, поступающего в абразивный инструмент, отводимого охлаждающей жидкостью и заготовкой в зависимости от режимов резания. Установлено, что количество тепла отводимого в шлифовальный круг в 3 раза больше, чем при традиционном глубинном шлифовании.

4 Разработанная методика расчёта температур методом конечных

элементов позволила определить особенности температурного поля в зоне резания, а также численного значения температуры в любой точке поверхности обрабатываемой заготовки. Установлено, что температура, возникающая в зоне обработки, ниже чем при других методах шлифования и составляют порядка 200-500 °С.

5 Разработанная модель определения упругих деформаций заготовки, при шлифовании спиральной канавки монолитного инструмента из твердого сплава, позволила определить влияние числа зубьев и формы канавки на деформацию обрабатываемого инструмента. Наибольшее влияние на деформацию изгиба оказывает форма спиральной канавки, в меньшей степени угол наклона спирали.

6 Проведена экспериментальная проверка разработанных математических моделей тепловых и силовых процессов, а также их влияния на точность геометрических параметров инструмента. Расхождение теоретических и экспериментальных данных составило не более 10 %, что позволяет установить правомерность применения данных моделей для определения режимов резания.

7 Методика оптимизации режимов резания при алмазном глубинном шлифовании спиральной канавки концевой инструмента, разработанная на основе экспериментальных и теоретических исследований теплофизических процессов, позволила подобрать более производительные режимы резания для инструмента различных типоразмеров и формы спиральной канавки, при условии обеспечения точности геометрических параметров. Увеличение производительности обработки спиральной канавки цилиндрической фрезы с количеством зубьев равным 4 и диаметром 16 мм составило 38%.

Список публикаций по теме диссертации

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК

1 **Волков, Д. И.** Моделирование тепловых процессов при алмазном глубинном шлифовании монолитного твердосплавного инструмента [Текст] / Д. И. Волков, Б. В. Цветков, Е. В. Цветков // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. - Уфа: УГАТУ, 2013. - №8 (61) - С. 123-129.

2 **Цветков, Б. В.** Определение упругой деформации изгиба заготовки из сплава H10F при шлифовании спиральной канавки монолитного осевого инструмента [Текст] / Б. В. Цветков, Д. И. Волков// Вестник Рыбинского государственного авиационного технического университета имени П. А. Соловьёва: Сборник научных трудов. - Рыбинск, 2016. - №3 (38). - С.32-37.

3 **Волков, Д. И.** Развитие технологии глубинного шлифования деталей газотурбинных двигателей [Текст] / Д. И. Волков, Н. В. Полуглазкова, Б. В. Цветков // Вестник Рыбинского государственного авиационного технического университета имени П. А. Соловьёва: Сборник научных трудов. - Рыбинск,

2017. - №1 (40). - С.78-86.

Публикации в других изданиях

4 **Цветков, Б. В.** Обеспечение постоянства качества инструмента для обработки авиационных деталей на МОЦ [Текст] / Б. В. Цветков, Д. И. Волков // XXXVIII Гагаринские чтения. Научные труды международной молодежной научной конференции. - Москва: МАТИ-РГТУ, 2012. - С. 245-246.

5 **Цветков, Б. В.** Методика расчета температур в зоне резания при шлифовании канавки монолитного твердосплавного инструмента [Текст] / Б. В. Цветков, Д. И. Волков // XXXIX Гагаринские чтения. Научные труды международной молодежной научной конференции. - Москва: МАТИ-РГТУ, 2013. - С. 89-91.

6 **Цветков, Б. В.** Формирование геометрии монолитного твердосплавного инструмента для обработки деталей ГТД [Текст] / Б. В. Цветков, Д. И. Волков // Современные материалы, техника и технология: Материалы 3-й Международной научно-практической конференции. - Курск: ЮЗГУ, 2013. - С. 253-257.

7 **Цветков, Б. В.** Методика определения максимальных температур, возникающих в зоне резания при алмазном глубинном шлифовании монолитного твердосплавного инструмента [Текст] / Б. В. Цветков, Д. И. Волков // Современные тенденции в технологиях металлообработки и конструкциях металлообрабатывающих машин и комплектующих изделий: Межвузовский научный сборник. - Уфа: УГАТУ, 2013. - С. 44-47.

8 **Волков, Д. И.** Влияние упругой деформации изгиба при шлифовании спиральной канавки на геометрические параметры концевой инструмента [Текст] / Д. И. Волков, Б. В. Цветков // Современные материалы, техника и технология, научно-практический рецензируемый журнал. - Курск: ЮЗГУ, 2017. - №3 (11). – С. 137-143.