

На правах рукописи



Тарасов Сергей Сергеевич

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТОКАРНОЙ ОБРАБОТКИ
КРИВОЛИНЕЙНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДИСКОВ И КОЛЬЦЕВЫХ
ДЕТАЛЕЙ ГТД ИЗ ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ ЗА СЧЕТ
ПРИМЕНЕНИЯ ИНСТРУМЕНТА ИЗ РЕЖУЩЕЙ КЕРАМИКИ**

Специальность 05.02.07 – Технология и оборудование механической и физико-
технической обработки

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Рыбинск – 2013

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования: «Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П. А. Соловьева» на кафедре «Резание материалов, станки и инструменты имени С.С. Силина»

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор Волков Дмитрий Иванович

Официальные оппоненты:

Михайлов Станислав Васильевич, доктор технических наук, профессор кафедры «Технология машиностроения» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Костромской государственной технологической академии»;

Украженко Константин Адамович, доктор технических наук, профессор кафедры «Технология машиностроения» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Ярославский государственный технологический университет».

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Уфимский государственный авиационный технический университет».

Защита состоится 27 ноября 2013 года в 15 часов на заседании диссертационного совета Д212.210.01 в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования: «Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П. А. Соловьева» по адресу: 152934, Ярославская область, г. Рыбинск, ул. Пушкина 53, главный корпус РГАТУ, ауд. 237.

Автореферат разослан 25 октября 2013 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Конюхов Борис Михайлович

Общая характеристика работы

Актуальность работы. Поиск технологических решений, позволяющих совместить высокое качество и высокую производительность в производстве деталей газотурбинных двигателей (ГТД), по-прежнему является острой проблемой, методы решения которой определяют конкурентоспособность предприятия, одной из основных задач которого является внедрение мероприятий, направленных на непрерывное снижение издержек производства. Своевременное освоение новых технологических процессов изготовления деталей авиационных двигателей является необходимым условием динамичного развития предприятия. Развитие конструкций ГТД приводит к расширению использования при их изготовлении деталей, имеющих криволинейные и сложнопрофильные поверхности и изготовленных из труднообрабатываемых жаропрочных сплавов. Их высокие физико-механические характеристики позволяют поднять эксплуатационные свойства изделия в целом, но, одновременно с этим, новые материалы обладают худшей обрабатываемостью резанием традиционно применяемыми в производстве инструментами из твердого сплава, что увеличивает стоимость и время технологического процесса изготовления большинства деталей. Применение на операциях механической обработки инструмента из режущей керамики позволяет повысить производительность обработки, однако при необходимости обеспечить высокое качество обработки на криволинейных поверхностях дисков турбины и кольцевых деталей возникают проблемы с разрушением инструмента.

Инструменты из режущей керамики позволяют производить обработку на скоростях резания порядка 2-6 м/с, при этом существенно повысить производительность обработки. Анализ физических и эксплуатационных свойств инструментов из режущей керамики в сравнении с инструментом из твердого сплава показал, что данные инструментальные материалы хотя и имеют более высокую теплостойкость, дающую возможность использовать более высокие скорости резания, но уступают по изгибной прочности, а, следовательно, подвержены сколам.

Исследование возможностей повышения работоспособности режущей керамики позволило существенно повысить эффективность токарной обработки дисков и кольцевых деталей газотурбинных двигателей из жаропрочных материалов с учетом их профиля. Поэтому данная работа направлена на решение важных производственных задач и, в свою очередь, является актуальной.

Цель работы. Повышение эффективности токарной обработки криволинейных поверхностей дисков и кольцевых деталей ГТД из жаропрочных сплавов за счет применения инструмента из режущей керамики.

Для достижения поставленной цели в данной работе решаются следующие задачи:

1. Разработка математической модели высокоскоростного резания инструментами из режущей керамики с учетом криволинейности траектории обработки. Определение параметров сечения среза и составляющих сил резания при обработке сложнопрофильных поверхностей.
2. Разработка математической модели тепловых процессов высокоскоростного резания инструментами из режущей керамики.

3. Проведение экспериментальных исследований сил резания, температуры, параметра износа по задней поверхности и шероховатости обработанной поверхности при точении криволинейных поверхностей.
4. Разработка и создание методики по оптимизации обработки керамическими инструментами, обеспечивающей минимум себестоимости.
5. Разработка рекомендаций по эффективному использованию инструментов из режущей керамики в машиностроительном производстве и авиационной промышленности.

Методы исследования. Теоретические исследования выполнялись с использованием фундаментальных положений теории резания, теории теплопередачи. Экспериментальные исследования проводились как в лабораторных условиях на специальном оборудовании, так и в производственных. При этом были использованы методы статистической обработки полученных результатов и планирования экспериментов.

На защиту выносятся:

- аналитическая модель определения параметров сечения среза и составляющие силы резания при обработке криволинейных поверхностей с учетом несвободного резания;
- математическая модель тепловых процессов при высокоскоростном точении инструментами из режущей керамики с учетом теплообмена со смазочно-охлаждающей жидкостью, вводимой в зону обработки при высоком давлении;
- результаты исследования параметров износа по задней поверхности инструмента и шероховатости обрабатываемой поверхности при точении жаропрочных сплавов инструментами из режущей керамики;
- методика определения оптимальных условий токарной обработки жаропрочных сплавов инструментами из режущей керамики.

Научная новизна. Разработана математическая модель высокоскоростной токарной обработки жаропрочных материалов инструментами из режущей керамики с учетом криволинейности траектории обработки. В том числе:

- определены параметры сечения среза и составляющие силы резания при обработке сложнопрофильных поверхностей дисков и кольцевых деталей с учетом несвободного резания;
- разработана математическая модель тепловых процессов при высокоскоростном точении инструментами из режущей керамики с учетом теплообмена со смазочно-охлаждающей жидкостью, вводимой в зону обработки при высоком давлении;
- выполнены экспериментальные исследования процесса высокоскоростного точения инструментами из режущей керамики группы жаропрочных сплавов, которые позволили определить не только их обрабатываемость резанием, но и установить параметры, которые были

использованы при расчете составляющих силы резания, температуры, износа по задней поверхности.

Практическая ценность. На основе проведенных теоретических и экспериментальных исследований разработана методика оптимизации условий резания при высокоскоростной токарной обработке криволинейных поверхностей дисков и кольцевых деталей ГТД из жаропрочных сплавов инструментами из режущей керамики, с обеспечением минимальной себестоимости изготавливаемых деталей, заданных параметров износа по задней поверхности и шероховатости с учетом возможностей программного обеспечения и станочного оборудования.

Реализация результатов работы. Основные положения диссертационной работы прошли проверку при внедрении процессов высокоскоростной токарной обработки деталей из жаропрочных сплавов инструментами из режущей керамики на предприятии ОАО «НПО Сатурн». Внедрение результатов исследования в производство позволило получить экономический эффект 381 тыс. руб.

Апробация результатов работы. Основные положения и результаты диссертации доложены и обсуждены на Всероссийских научно-технических конференциях: «Авиадвигатели XXI века» Москва, ЦИАМ им. П.И. Баранова 2010, «Будущее машиностроение России» Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана 2011, 2012 и «Научноёмкие технологии в машиностроении и авиадвигателестроении» Рыбинск, РГАТУ имени П.А. Соловьева 2012.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 9 печатных работ, в том числе 6 статей. Из них 4 статьи опубликованы из них в центральных изданиях, рекомендованных ВАК.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, общих выводов, списка использованных источников и приложений. Общий объем работы 178 страниц, 52 рисунка, 15 таблиц и 135 наименований литературы.

Основное содержание работы

Во введении обосновывается актуальность выбранной темы диссертационной работы, кратко сформулированы цели и задачи исследований, научная новизна и практическая значимость работы.

В первой главе приводится анализ современного состояния обработки жаропрочных сплавов керамическим инструментом. Приведены свойства инструментальных материалов из режущей керамики и их технологические возможности, показаны направления развития. Показано, что при высокоскоростной обработке жаропрочных сплавов инструментом из режущей керамики наблюдается процесс элементного стружкообразования. Обоснована необходимость исследования тепловых процессов при точении инструментом из режущей керамики в связи с её пониженной теплопроводностью по сравнению с твердосплавным инструментом, так как высокая температура в зоне резания может привести к снижению стойкости инструмента.

На основании анализа литературных источников и производственных проблем применения керамических инструментов поставлены цель и задачи исследования.

Во второй главе представлена разработка математической модели резания инструментами из режущей керамики.

В производстве деталей газотурбинных двигателей при обработке жаропрочных материалов инструментом из режущей керамики наибольшее распространение получили пластины круглой формы. Данные типы пластин не только просты в изготовлении, но и экономически эффективны по сравнению с другими формами пластин, так как имеют до 10 режущих кромок. При точении круглыми пластинами (с небольшими глубинами резания по отношению к радиусу при вершине) в работе формирования стружки помимо главной режущей кромки в работе принимает участие и вспомогательная, что указывает на процесс несвободного резания. В этом случае по сравнению с процессом свободного прямоугольного резания материалов возникают трудности, связанные с определением ширины (b_1) и толщины (a_1) сечения среза, от которых зависит величина силы резания.

При обработке дисков турбины наиболее часто сочетается обработка их полотен и ступиц, причем геометрическая форма детали такова, что необходимо обработать не только прямолинейные участки, но и радиусы, поэтому траектория движения режущего инструмента складывается из попеременных прямолинейных и криволинейных участков (рисунок 1).

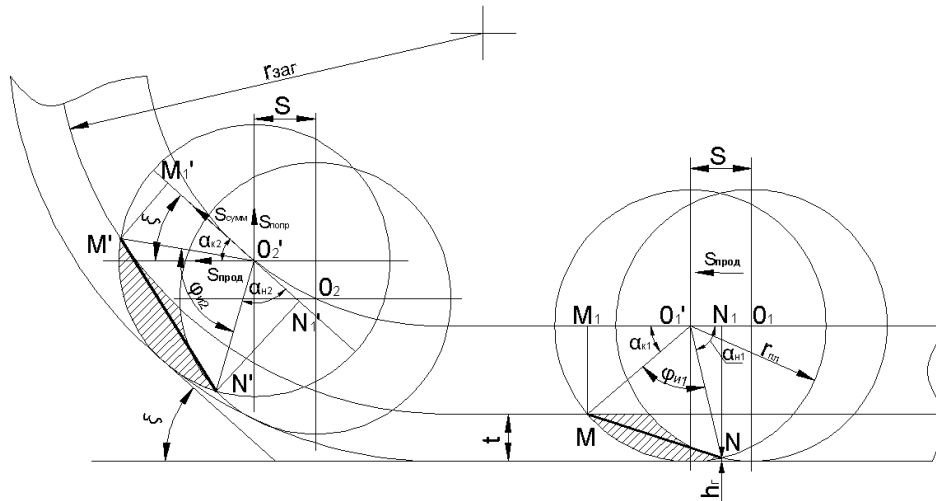


Рисунок 1 – Изменение сечение среза при точении круглыми пластинами из керамики при обработке криволинейных поверхностей.

При таком переходе в процессе обработки происходит изменение направления вектора подачи s . Вследствие этого помимо величины продольной подачи $s_{пр}$ возникает поперечная подача $s_{попр}$, действующая в радиальном направлении, происходит увеличение не только величины суммарной подачи $s_{сумм}$ и толщины сечения среза a_1 , но и возрастание составляющих силы резания, которое может повлиять на работоспособность режущей пластины из минералокерамики. Следовательно, на процесс обработки существенно влияет радиус кривизны обрабатываемой поверхности заготовки $r_{заг}$.

Величина суммарной подачи $s_{\text{сумм}}$ на криволинейном участке определялась как отношение: $s_{\text{сумм}} = s_{\text{пр}} / \cos \delta$. С учетом исследований в области несвободного резания и кривизны обрабатываемой поверхности основные параметры сечения среза при обработке криволинейных участков имели вид:

$$a_1 = m \cdot \left(\frac{s}{\cos \delta} - \frac{f_{\Gamma}}{t} \right), \quad b_1 = \frac{t}{m}, \quad (1)$$

где δ – угол между касательной к траектории движения центра пластины и прямой, характеризующей прямолинейный участок, град; $m = t/MN$ – безразмерный коэффициент, зависящий от геометрических параметров инструмента, подачи s и глубины t ; f_{Γ} – площадь сечения сформировавшихся гребешков неровностей на обработанной поверхности, м^2 ; MN – длина отрезка, соединяющего две крайние точки работающих участков режущих кромок инструмента, м.

При обработке с небольшими глубинами резания по отношению к радиусу пластины параметры f_{Γ} и m могут быть определены зависимостями:

$$m = \sqrt{(A_1)^2 + (A_2)^2}; \quad A_1 = 1 - P + \frac{1}{2} \cdot \sqrt{4 \cdot P^2 - \Pi^2}; \quad A_2 = \sqrt{2 \cdot P - 1} + \frac{\Pi}{2};$$

$$\Pi = \frac{s}{t}; \quad P = \frac{r_{\text{пл}}}{t}; \quad f_{\Gamma} = r_{\text{пл}} \cdot (1 - \cos f) \cdot s - \frac{r_{\text{пл}}^2}{2} \cdot (2f - \sin 2f); \quad f = \arcsin\left(\frac{\Pi}{2 \cdot P}\right), \quad (2)$$

где Π и P – безразмерные параметры, характеризующие технологические условия анализируемого случая токарной обработки.

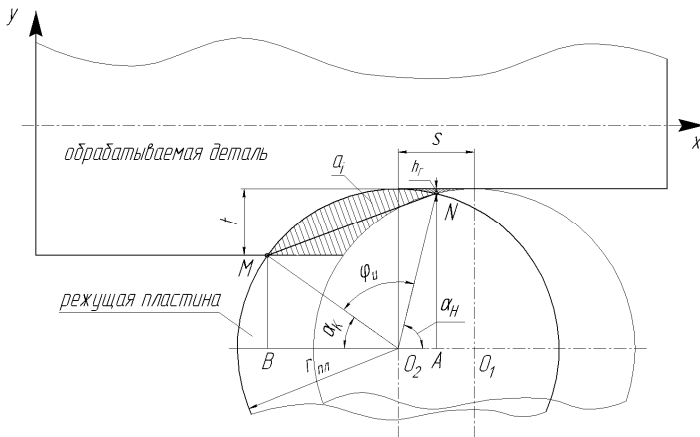


Рисунок 2 – Схема к определению толщины и ширины сечения среза при несвободном резании.

На величину отрезка MN и, следовательно, на угол ϕ_u влияют углы начальной α_H и конечной α_K точек траектории движения режущей пластины (рисунок 2).

Значения начальных и конечных углов траектории движения режущей пластины зависят от конкретных условий обработки, и определяются следующими

выражениями:

$$a_H = \arcsin\left[1 - 0,125 \left(\frac{\Pi}{P}\right)^2\right]; \quad a_K = \arcsin\left(1 - \frac{1}{P}\right). \quad (3)$$

Принимая во внимание криволинейность траектории процесса резания и, введя соответствующие подстановки, величина MN определялась зависимостью:

$$MN = \frac{r_{заг}}{K_r} \cdot \left\{ 1 - 0,125 \left(\frac{\Pi}{K_r \cdot P \cdot \cos d} \right)^2 \right\} \cdot \frac{1}{P} \cdot \sqrt{2 \frac{P}{K_r} - 1} + \left(1 - \frac{1}{P} \right) \cdot \frac{\Pi}{K_r \cdot P \cdot \cos d} \cdot \sqrt{(0,5)^2 - \left(0,125 \frac{\Pi}{K_r \cdot P \cdot \cos d} \right)^2} \quad (4)$$

где $r_{заг}$ – радиус кривизны обрабатываемой заготовки, м $r_{пл}$ – радиус режущей пластины, м; K_r – безразмерный радиус кривизны поверхности, равный отношению $r_{заг}$ к $r_{пл}$; $\Pi=(s/t)$ и $P=(r_{пл}/t)$ – безразмерные параметры, характеризующие технологические условия анализируемого случая токарной обработки.

Средние величины толщины и ширины сечения среза, определенные с учетом криволинейности траектории при точении круглыми пластинами:

$$a_c = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^{i=n} a_i; b_c = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^{i=n} b_i; b_1 = \frac{t}{m}; m = \frac{t}{MN}, \quad (5)$$

где MN – определяется зависимостью (5).

На графиках рисунок 3 представлены зависимости ширины сечения среза b_1 от параметров P , K_r .

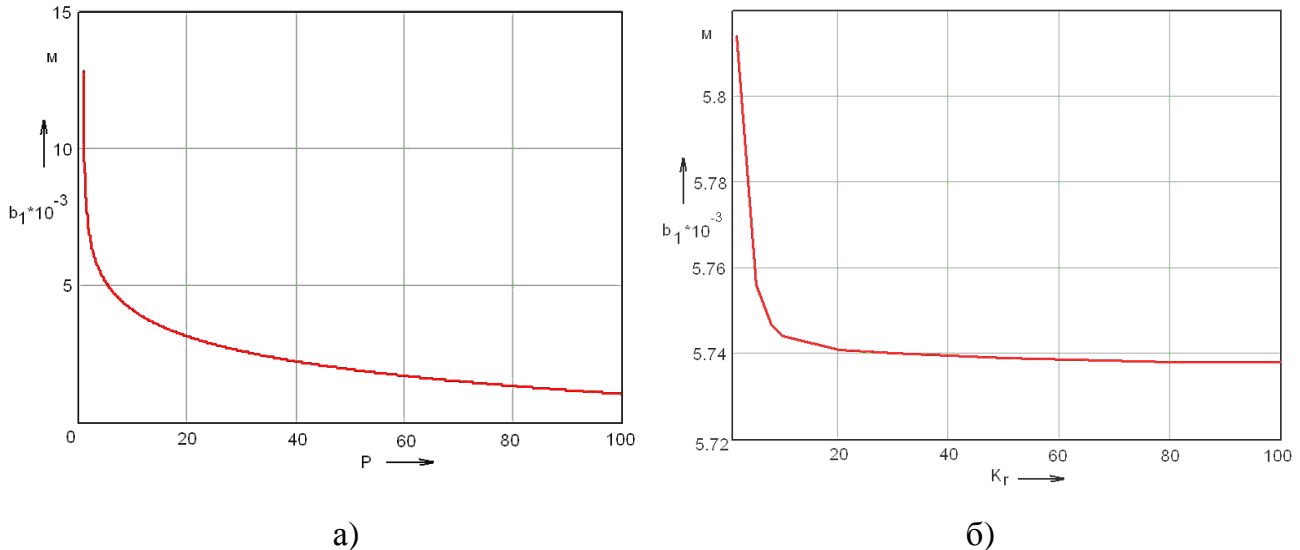


Рисунок 3 – Графики зависимости ширины сечения среза b_1 от параметров P (а) и K_r (б) при точении круглой пластиной из керамики типа *RNGN 120700E*, условия обработки: $r_{заг}=20$ мм, $r_{пл}=6,35$ мм, $s=0,1$ мм/об, $\delta=45^\circ$.

Из анализа графиков, можно сделать вывод о том, что при соотношениях $r_{пл}/t < 100$ и $r_{заг}/r_{пл} < 20$ необходимо учитывать изменения траектории движения инструмента. Это очень важно при точении пластинами из режущей керамики, так как вследствие своих физико-механических свойств, при колебаниях толщины и ширины сечения среза вероятен риск разрушения режущей пластины и снижения ее размерной стойкости.

Тепловые явления, происходящие не только в поверхностном слое обрабатываемого материала, но и на контактных площадках передней и задней поверхности инструмента, могут оказать определяющее влияние на характер

распределения температуры в режущем лезвии. Поэтому для эффективного использования инструмента из режущей керамики при обработке жаропрочных сплавов необходимо применение высоконапорного охлаждения.

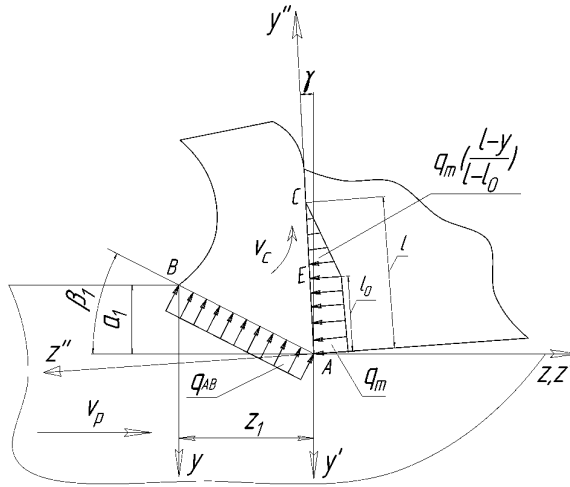


Рисунок 4 – Схема расчета температурного поля зоны пластических деформаций и в стружке

В представленной работе решения теплофизических задач производились методом источников тепла, отличающиеся с учетом теплообмена со смазочно-охлаждающей жидкостью на контактных поверхностях режущего лезвия.

Определение температурного поля в условной плоскости сдвига и зоне вторичных пластических деформаций производилось посредством схемы, показанной на рисунок 4.

Выражение для расчета температуры в условной плоскости сдвига записывалось в виде зависимостей от безразмерных критериев подобия в следующем виде:

$$q_{AB} = \frac{q_{AB}}{p \cdot cr_M \cdot v_p} \int_{Z-B}^{Z+B} \exp[-z] \cdot K_0 \left[\sqrt{(Z \cdot B)^2 + z^2} \right] dz, \quad (6)$$

где $\xi = [v_p \cdot (x - x_0)] / 2a_M$, $Z = (v_p \cdot z) / 2a_M$ – безразмерные координаты; $B = \text{tg} \beta_1$ – тангенс угла наклона условной плоскости сдвига; $B = (v_p \cdot b) / 2a_M$ – безразмерная полуширина источника; K_0 – модифицированная функция Бесселя 2 рода нулевого порядка.

Температурное поле в стружке рассматривается как результат действия группы движущихся источников: источника AB , действующего в зоне первичных пластических деформаций, и источника AC , который образуется в результате трения на поверхности контакта стружки с режущим инструментом. (Рисунок 4). Выражение для расчета температурного поля в стружке представлено в виде зависимости:

$$q^c(x; y; z) = q_{AB}(x; z) + q_1 = q_{AB}(x; z) + \frac{2q_m}{p \cdot cr_M \cdot v_c} \times \int_{Y-B}^{Y+B} \exp(-z) \cdot K_0 \left[\sqrt{Z^2 + z^2} + \sqrt{\frac{Z^2 + z^2}{(L-L_0)^2}} \right] \times \left\{ \frac{\int_0^\infty \exp(bZ) \cdot K_0 \left[\sqrt{Z^2 + z^2} + \sqrt{\frac{Z^2 + z^2}{(L-L_0)^2}} \right] dZ}{K_0 \left[\sqrt{Z^2 + z^2} + \sqrt{\frac{Z^2 + z^2}{(L-L_0)^2}} \right]} \right\} dz, \quad (7)$$

где $\xi=[v_c \cdot (x-x_0)]/2a_M$, $Y=(v_c \cdot y)/2a_M$, $Z=(v_c \cdot z)/2a_M$ – безразмерные координаты; $Bi=(\alpha_0 \cdot l)/\lambda_M$ – критерий Био, характеризующий теплообмен на поверхности тела; $Pe=(v_c \cdot l_w)/a_M$ – критерий подобный Пекле, характеризующий скорость движения источника тепла; $\beta=(Bi/Pe)$ – безразмерный комплекс, характеризующий интенсивность теплообмена; $B=\text{tg}\beta_1$ – тангенс угла наклона условной плоскости сдвига; $L=(v_c \cdot l)/2a_M$ – безразмерная длина контакта стружки с режущим лезвием в направлении оси Y ; $L_0=(v_c \cdot l_0)/2a_M$ – безразмерная длина пластического контакта; $B=(v_c \cdot b)/2a_M$ – безразмерная полуширина источника.

Выражение для расчета температурного поля заготовки на задней контактной площадке представлялось в виде зависимости аналогично рассмотренному температурному полю в стружке:

$$q^3(X;Z) = q_{AB}(x; z) + \frac{q_{3m}}{p \cdot cr_M \cdot v_p} \times$$

$$\times \int_{z-B}^{z+B} \exp(-z) \cdot K_0 \left[\sqrt{Y^2 + z^2} + \sqrt{\frac{Y^2 + z^2}{(H-H_0)^2}} \right] \times$$

$$\times \left\{ \frac{\int_0^\infty \exp(bY) \cdot K_0 \left[\sqrt{Y^2 + z^2} + \sqrt{\frac{Y^2 + z^2}{(H-H_0)^2}} \right] dY}{K_0 \left[\sqrt{Y^2 + z^2} + \sqrt{\frac{Y^2 + z^2}{(H-H_0)^2}} \right]} \right\} dz \quad (8)$$

где $H=(v_p \cdot \Delta)/2a_M$ – безразмерная длина контакта стружки с режущим лезвием в направлении оси Z ; $H_0=(v_p \cdot \Delta_0)/2a_M$ – безразмерная длина пластического контакта в направлении оси Z ; $B=(v_p \cdot b)/2a_M$ – безразмерная полуширина источника.

Схема расчета температуры в режущем лезвии представлена на рисунке 5.

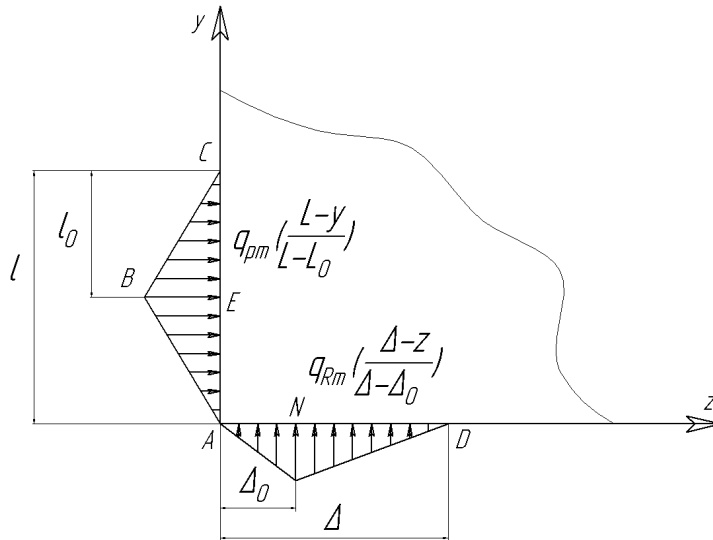


Рисунок 5 – Схема расчета температурных полей в режущем лезвии.

Температурное поле в режущем клине определяется зависимостью:

$$\begin{aligned}
 q_p = & \frac{2q_{pm} \cdot a_p}{p \cdot I_p v_p \cdot \exp(v_p)} \int_{Y-B}^{Y+B} \exp[-z] \cdot K_0 \left[\sqrt{Z^2 + z^2} \cdot 2 \cdot \left(\frac{1}{L_0} + \frac{1}{L-L_0} \right) \right] \times \\
 & \times \{1 - b \exp(bZ) \frac{\int_{\infty}^{\infty} \{ \exp(bZ) K_0 \left[\sqrt{Z^2 + z^2} \cdot 2 \cdot \left(\frac{1}{L_0} + \frac{1}{L-L_0} \right) \right] dz}{K_0 \left[\sqrt{Z^2 + z^2} \cdot 2 \cdot \left(\frac{1}{L_0} + \frac{1}{L-L_0} \right) \right]} \} dz + \\
 & + \frac{2q_{Rm} \cdot a_p}{p \cdot I_p v_p \cdot \exp(v_p)} \int_{Z-B}^{Z+B} \exp[-z] \cdot K_0 \left[\sqrt{Y^2 + z^2} \cdot 2 \cdot \left(\frac{1}{H_0} + \frac{1}{H-H_0} \right) \right] \times \\
 & \times \{1 - b \exp(bY) \frac{\int_{\infty}^{\infty} \{ \exp(bY) K_0 \left[\sqrt{Y^2 + z^2} \cdot 2 \cdot \left(\frac{1}{H_0} + \frac{1}{H-H_0} \right) \right] dz}{K_0 \left[\sqrt{Y^2 + z^2} \cdot 2 \cdot \left(\frac{1}{H_0} + \frac{1}{H-H_0} \right) \right]} \} dz
 \end{aligned} \tag{9}$$

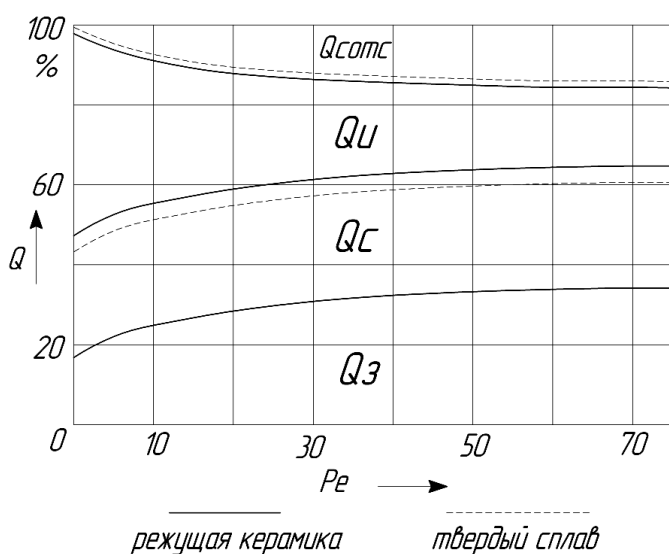


Рисунок 6 – Баланс теплоты при точении жаропрочного материала ХН77ТЮР инструментом из режущей керамики и твердым сплавом:

$$v = 2,7 \text{ м/с}; s = 0,15 \text{ мм/об}; t = 1,5 \text{ мм};$$

$$\alpha_0 = 2 \cdot 10^5 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

высоких скоростях резания существенно повышается значение охлаждения, также снижается доля тепла, отводимого в инструмент, особенно в связи с низким коэффициентом теплопроводности инструмента из режущей керамики по сравнению с инструментом из твердого сплава. Поэтому для эффективной работы инструментом из режущей керамики рекомендуется интенсивная подача смазочно-охлаждающей жидкости при высоком давлении.

В связи с пониженной теплопроводностью керамики, исследование тепловых процессов при точении инструментом из режущей керамики становится более актуальным. Выполненный (рисунок 6) анализ уравнения баланса энергий при точении инструментом из режущей керамики показал, что увеличение скорости резания и толщины сечения среза приводит к нарастанию относительной доли тепла, отводимой в стружку и заготовку и в меньшей степени в режущее лезвие по сравнению с инструментом из твердого сплава.

Результаты расчета баланса тепловой и механической энергий показывают, что при

В третьей главе приводятся результаты экспериментальных исследований процесса точения жаропрочных сплавов инструментами из режущей керамики. Представлена методика экспериментальных исследований, дано описание используемой аппаратуры. Применялись планы ПФЭ 2^2 и ПФЭ 2^3 . Выполнены исследования составляющих силы резания, температуры, износа по задней поверхности режущего инструмента и шероховатости обработанной поверхности.

Выполнены экспериментальные исследования составляющих сил резания, которые позволили определить параметры процесса точения жаропрочных сплавов.

Результаты экспериментальных исследований температуры резания жаропрочных сплавов инструментами из режущей керамики, проведенные с использованием лазерного пирометра Optris P20 2M, показали, что погрешность расчетов температуры и экспериментальных данных не превышала 20%. В исследованном диапазоне скоростей резания при точении рассмотренных в диссертационной работе жаропрочных материалов среднеинтегральная температура θ_p не превышала 1050°C , что гарантирует достаточную теплостойкость керамического инструмента.

Исследования влияния технологических параметров процесса на износ инструмента (рисунок 7) позволили получить зависимость:

$$h_3 = C_{kr} \cdot C_h \cdot \left(\frac{v_p}{v_0} \right)^{k_1} \cdot (D)^{k_2} \cdot (t)^{k_2+k_3}, \quad (10)$$

где v_p – скорость резания, м/с v_0 – оптимальная скорость резания для исследуемого материала, м/с; D - критерий, характеризующий сечение среза; t – глубина резания, мм; C_{kr} – коэффициент, учитывающий криволинейность поверхности; C_h, k_1, k_2, k_3 – эмпирические коэффициенты.

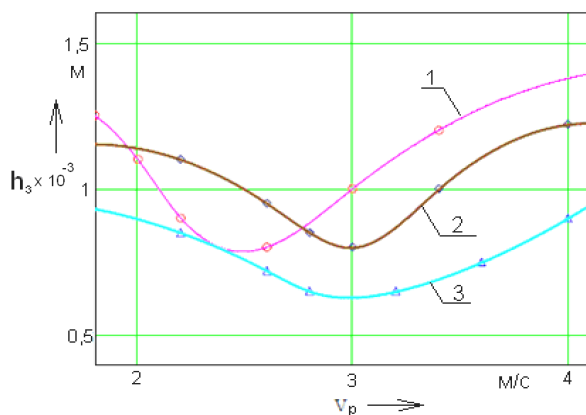


Рисунок 7 – Зависимость износа по задней поверхности от скорости резания при условиях: $s = 0,1$ мм/об, $t=1,2$ мм $K_r=3$; 1 – ВЖЛ12У-ВИ; 2 ХН62ЮМКТЮ; 3 – ХН78Т.

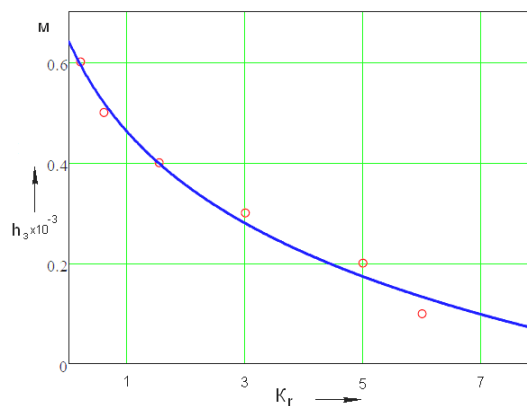


Рисунок 8 – Зависимость коэффициента K_r от износа по задней поверхности при точении криволинейной поверхности детали из жаропрочного сплава ХН78Т.

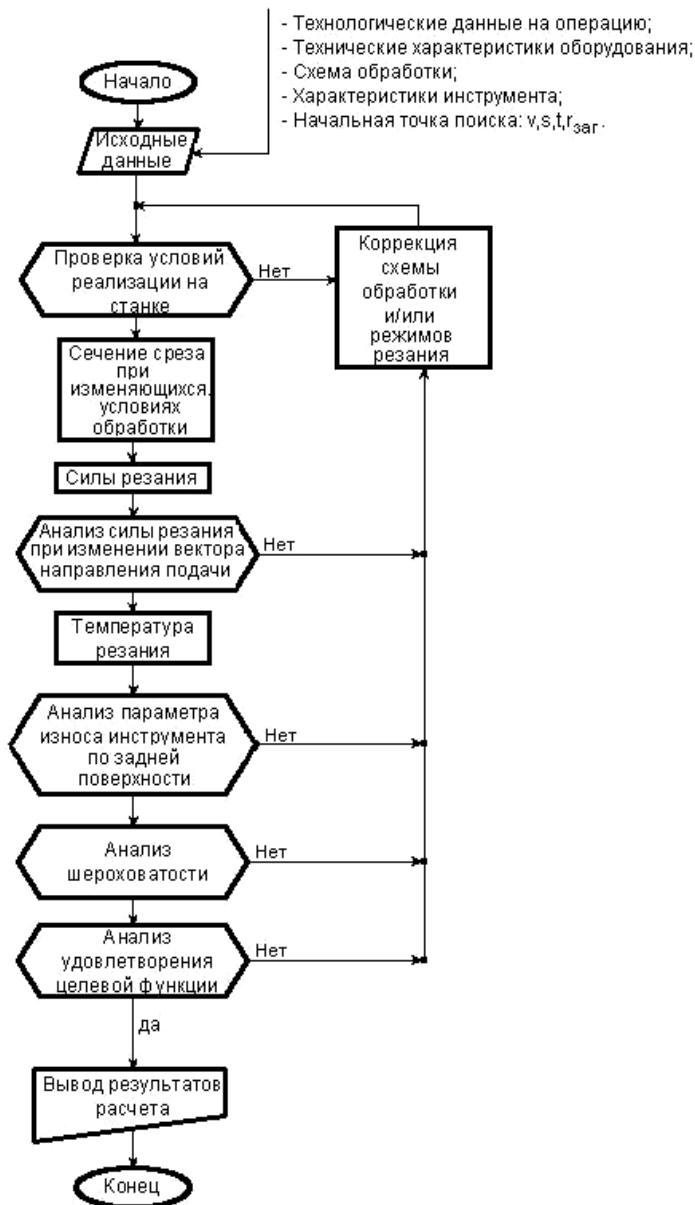
Экспериментальные исследования шероховатости обработанной поверхности позволили получить эмпирические зависимости для определения параметров Ra и Rz при точении жаропрочных сплавов инструментом из режущей керамики:

$$Ra = 0,249 \cdot (Pe \cdot E)^{0,27} \cdot D^{0,35} \quad (11)$$

$$Rz = 0,012 \cdot Pe^{1,6} \cdot E^{1,5} \cdot D^{-0,06} \quad (12)$$

где E – критерий, характеризующий остроту режущей кромки.

В четвертой главе приводится методика оптимизации операций точения инструментами из режущей керамики по минимуму себестоимости. Основные



преимущества при точении жаропрочных сплавов инструментом режущей керамики связаны с повышением режимов механической обработки, значительным увеличением производительности и снижением расхода режущих пластин. В ряде случаев при обработке жаропрочных сплавов керамическим инструментом может быть достигнут более высокий съем металла по сравнению с обработкой твердосплавным инструментом.

На рисунке 9 представлена схема расчета режимов резания при точении инструментом из режущей керамики.

В рамках данной работы основной критерием оптимизации являлся параметр переменной доли себестоимости технологической операции $C_{оп.пер}$. При этом целевая функция имела следующий вид:

Рисунок 9 – Схема расчета режимов точения жаропрочных сплавов керамическим инструментом.

$$C_{оп.пер} = E_{зарп.} \cdot t_M + \frac{(t_{сМ} + t_H) \cdot E + C'_и \cdot k_M \cdot t_M}{T} \rightarrow \min, \quad (13)$$

где $E_{зарп.}$ – сумма зарплаты основных производственных рабочих и всех амортизационных отчислений, отнесенных к минуте работы станка; $t_{сМ}$, t_H – время на смену и наладку нормально изношенного инструмента за период его стойкости, мин; k_M – коэффициент, учитывающий непосредственное резание в машинном времени; $C'_и$ – сумма затрат на один период стойкости режущего инструмента.

Теоретические и практические результаты работы были внедрены на предприятии «ОАО «НПО«Сатурн» при обработке деталей авиационной и наземной тематики из жаропрочных сплавов.

В ходе работы разработаны рекомендации по выбору траектории движения инструмента, режимов обработки и марок инструментов из режущей керамики при обработке различных деталей из жаропрочных сплавов.

Эффективность от внедрения данных научно-технических разработок заключалась в повышении эффективности лезвийной обработки жаропрочных материалов инструментом из режущей керамики за счет увеличения скорости резания и снижения машинного времени обработки, что обеспечило не только уменьшения расхода режущего инструмента, но и снижение затрат на него. В среднем, повышение эффективности технологических операций выразилось в увеличении производительности на 30% и снижении себестоимости обработки на 15%.

Экономический эффект от внедрения разработок составил 381000 рублей.

Общие выводы по диссертации

1. Разработанная модель определения параметров сечения среза и составляющих силы резания позволила определить параметры сечения среза и составляющие силы резания при обработке криволинейных и сложнопрофильных поверхностей дисков и кольцевых деталей ГТД. Определены границы, при которых необходимо учитывать кривизну обрабатываемой поверхности детали.

2. Разработанная математическая модель тепловых процессов с учетом теплообмена со смазочно-охлаждающей жидкостью, вводимой в зону обработки при высоком давлении, позволила определить температуру и баланс механической и тепловой энергии при высокоскоростном резании инструментами из режущей керамики.

3. Проведенные экспериментальные исследования процесса высокоскоростного точения группы жаропрочных сплавов инструментом из минералокерамики позволили определить не только их обрабатываемость резанием, но и установить параметры, которые были использованы при расчете составляющих силы резания, что дает возможность прогнозировать характеристики процесса обработки инструментом из режущей керамики при заданных в производстве технологических условиях.

4. Исследования шероховатости позволили экспериментально получить зависимости для определения шероховатости поверхности в области высокоскоростного точения жаропрочных сплавов инструментом из режущей керамики.

5. Разработанная методика оптимизации операций точения инструментом из режущей керамики позволила учесть широкий комплекс факторов, в том числе и разработать рекомендации для выбора характеристик инструмента, а также оптимизировать условия обработки по минимуму себестоимости операции.

6. Разработанные практические рекомендации для технологий точения инструментом из режущей керамики позволили уменьшить себестоимость операций на 15% и повысить производительность обработки на 30% при обеспечении требуемых параметров шероховатости.

Список публикаций в изданиях, рекомендованных ВАК

1. **Тарасов, С. С.** Повышение эффективности токарной обработки деталей ГТД из жаропрочных никелевых сплавов керамическим инструментом [Текст] / С.С.Тарасов, А.А. Коряжкин // Справочник. Инженерный журнал.-2012-№11.- С.14-19.

2. **Волков, Д. И.** Применение высокоскоростной токарной обработки для изготовления деталей из жаропрочных никелевых сплавов керамическим инструментом [Текст] / Д. И. Волков, С. Л. Проскуряков, С. С. Тарасов// Вестник РГАТУ.-2012-№2.-С.134-137

3. **Волков, Д. И.** Расчетное определение параметров сечения среза при высокоскоростной токарной обработке криволинейных поверхностей деталей ГТД из жаропрочных никелевых сплавов [Текст] / Д. И. Волков, С. С. Тарасов// Вестник РГАТУ.-2013-№1.-С.61-68

4. **Коряжкин, А. А.** Повышение эффективности процесса токарной обработки криволинейных поверхностей деталей из жаропрочных сплавов керамическим инструментом [Текст] / А. А. Коряжкин, С. С. Тарасов //СТИН. – №8. – 2013. – С.23 – 27.

Список публикаций по теме диссертации в других изданиях

1. **Тарасов, С.С.** Оптимизация режимов резания при обработке деталей из жаропрочных сталей и сплавов керамическим инструментом [Текст] / С.С. Тарасов // Авиадвигатели XXI века: материалы конференции: тез.докл.-М;ЦИАМ, 2010-С.37.

2. **Тарасов, С.С.** Повышение эффективности обработки деталей из жаропрочных материалов керамическим инструментом [Текст] / С. С. Тарасов

// Будущее машиностроения России: материалы конференции : тез.докл. М; МГТУ им. Баумана, 2011- С.25-26.

3. **Тарасов, С.С.** Динамика упругой технологической системы при высокоскоростном точении деталей ГТД из жаропрочных никелевых сплавов керамическим инструментом с учетом нестационарности процесса [Текст] С. С. Тарасов, А. А. Коряжкин // Научные технологии в машиностроении и авиадвигателестроении: мат. IV междунар. конф.-Рыбинск:РГАТУ,2012-С.30-36.

4. **Тарасов, С.С.** Применение керамического инструмента как перспективное направление в области высокоскоростной токарной обработки деталей ГТД из жаропрочных никелевых сплавов [Текст] / С. С. Тарасов// Будущее машиностроения России: материалы конференции:тез.докл. М; МГТУ им. Баумана, 2012-С.16-18.

5. **Тарасов, С.С.** Анализ тепловых процессов при точении деталей ГТД из жаропрочных сплавов керамическим инструментом [Текст] / Д. И. Волков, С. С. Тарасов// Техника и технологии: пути инновационного развития: мат. III междунар. конф.-Курск:Юго-Зап. Гос. ун-т, 2013-С.60-63.

Зав. РИО М. А. Салкова

Подписано в печать 25.10.2013.

Формат 60×84 1/16. Уч.-изд. л. 1. Тираж 90. Заказ 251.

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

Адрес редакции: 152934, г. Рыбинск, ул. Пушкина, 53

Отпечатано в множительной лаборатории РГАТУ имени П. А. Соловьёва
152934, г. Рыбинск, ул. Пушкина, 53