

На правах рукописи

Мезенцев Максим Олегович

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ ГТД
КОНЦЕВЫМИ ФРЕЗАМИ С НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫМИ
ИЗНОСОСТОЙКИМИ ПОКРЫТИЯМИ**

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».

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор Полетаев Валерий Алексеевич.

Официальные оппоненты:

Годлевский Владимир Александрович, доктор технических наук, профессор кафедры экспериментальной и технической физики Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования Ивановский государственный университет;

Михрютин Олег Владимирович, кандидат технических наук, ведущий инженер открытого акционерного общества «НПО «Сатурн»».

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Пермский национальный исследовательский политехнический университет».

Защита диссертации состоится 11 сентября 2013 г. в 12 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, г. Рыбинск, Ярославской области, ул. Пушкина, 53, ауд. Г-237.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П. А. Соловьева».

Автореферат разослан 1 августа 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Конюхов Борис Михайлович

Общая характеристика работы

Актуальность работы. Важность проблемы обработки деталей авиационных газотурбинных двигателей обусловлена несколькими причинами: во-первых, используемыми в деталях ГТД материалами, обладающими специальными свойствами и труднообрабатываемыми при механической обработке; во-вторых, поверхности большинства деталей авиационных двигателей имеют сложную, в ряде случаев криволинейную форму, что накладывает определенные требования на геометрические параметры режущего инструмента и технологические возможности применяемого станочного оборудования. Примерами таких деталей являются лопатки компрессоров низкого и высокого давления и моноколеса.

Концевые фрезы с нанесенными на них наноструктурированными покрытиями обеспечивают более высокие скорости резания, существенное повышение производительности и качества обработки. Несмотря на определенные успехи, достигнутые в области разработки износостойких покрытий, остаются нерешенными вопросы, связанные с влиянием покрытий на работоспособность инструмента, работающего в условиях прерывистого резания. Не раскрыт механизм влияния износостойких покрытий на контактные процессы, тепловое и напряженное состояние режущего клина и изнашивание режущего инструмента. Не разработана методика оптимизации условий работы режущего инструмента с износостойким покрытием.

Разработка аналитической модели резания инструментами с наноструктурированными износостойкими покрытиями представляет собой решение научной задачи, имеющей значение для теории и практики обработки резанием. В связи с этим тема диссертационной работы, посвященной повышению работоспособности концевых фрез, работающих в условиях прерывистого резания, путем совершенствования инструментов с покрытием является актуальной.

Цель работы. Повышение эффективности обработки деталей ГТД концевыми фрезами с наноструктурированным износостойким покрытием.

Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие задачи.

1. Разработка математической модели концевой фрезерования с учетом особенностей резания и формирования стружки при обработке криволинейных поверхностей деталей ГТД.
2. Разработка математической модели разрушения наноструктурированного покрытия от термодинамических нагрузок, действующих на фрезу в процессе резания.
3. Проведение экспериментальных исследований температурно-силовых параметров резания.

4. Исследование влияния технологических параметров резания на стойкость инструмента с покрытием.

5. Разработка методики оптимизации операции концевое фрезерование фрезами с износостойким покрытием по минимуму себестоимости.

6. Разработка практических рекомендаций по использованию концевых фрез с наноструктурированными покрытиями в авиационном производстве.

Методы исследования. Теоретические исследования проводились с использованием теории резания, теории упругости, теории автоматического регулирования. Экспериментальные исследования проводились в лабораторных и производственных условиях, на специальном оборудовании с использованием системы автоматизированной обработки экспериментальных данных, при этом применялись методы планирования эксперимента и статистической обработки результатов.

На защиту выносятся:

- аналитическая модель определения силы резания и температуры при концевом фрезеровании;
- результаты исследования влияния технологических параметров концевое фрезерование на износ и стойкость фрез с износостойким покрытием;
- аналитическая модель разрушения наноструктурированных покрытий;
- методика определения оптимальных условий резания фрезами с износостойким покрытием.

Научная новизна. Разработана комплексная математическая модель концевое фрезерование, содержащая:

- математическую модель термодинамических явлений, происходящих при обработке концевыми фрезами, учитывающая пластическую деформацию обрабатываемого материала, и позволяющая определить, с учетом трения на контактных поверхностях, составляющие силы резания;
- динамическую модель разрушения наноструктурированного покрытия, учитывающая контактные деформации, происходящие в зоне резания, и определяющую систему ограничений области режимов резания;
- результаты экспериментальных исследований процесса концевое фрезерование, позволившие определить обрабатываемость группы материалов и установить параметры, необходимые для расчета составляющих силы резания и температуры.

Практическая ценность. На основе выполненных теоретических и экспериментальных исследований разработана методика оптимизации условий ре-

зания, обеспечивающая получение минимума себестоимости операции с учетом возможностей инструмента и станочного оборудования.

Реализация результатов работы. Основные положения диссертации прошли проверку при внедрении процессов фрезерной обработки на малом предприятии ООО «Пико» и фирмы «Komatsu» при разработке и оптимизации технологических операций. Внедрение результатов исследования позволило понизить себестоимость обработки на 25-30%.

Апробация результатов работы. Основные положения и результаты диссертации доложены и обсуждены на Всероссийских научно-технических конференциях «Повышение эффективности механообработки на основе моделирования физических явлений» Рыбинск, 2009 и «Нанотехнологии в производстве авиационных газотурбинных двигателей летательных аппаратов и энергетических установок» Рыбинск, 2010.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 9 печатных работ; в том числе 3 статьи в изданиях рекомендованных ВАК, 6 тезисов докладов.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, общих выводов, списка использованных источников и приложения. Общий объем работы 163 страницы, 38 рисунков, 9 таблиц и 132 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 представлен анализ состояния проблемы повышения работоспособности концевых фрез путем нанесения износостойких покрытий. Рассмотрены особенности работы фрез, работающих в условиях прерывистого резания. Приведен анализ методов повышения работоспособности режущего инструмента. Показано, что наиболее эффективными методами нанесения износостойких покрытий на монолитные концевые фрезы являются методы физического осаждения покрытий (PVD). Рассмотрены механизмы формирования свойств износостойких покрытий, полученных методами PVD. Приведены методы совершенствования износостойких покрытий, в том числе и многослойных. Показано, что основной причиной потери работоспособности режущего инструмента с износостойким покрытием является разрушение покрытия в результате образования в нем трещин, являющихся следствием влияния термодинамических нагрузок и адгезионно-усталостных процессов. Отмечены нерешенные вопросы, связанные с отсутствием данных о механизме влияния износостойких покрытий на контактные процессы, тепловое и напряженное состоя-

ние режущего клина, методики оценки распределения температурных полей в режущем клине такого инструмента.

На основании анализа литературных источников и производственных проблем применения инструментов с износостойкими покрытиями поставлены цель и задачи исследования.

Во второй главе показаны особенности концевое фрезерования деталей, определившие характер исследовательской работы. Важным аспектом при моделировании фрезерования, включающим в себя разработку описания динамики процесса резания, является тот факт, что геометрические параметры среза при фрезеровании, в частности толщину стружки, необходимо рассматривать как функцию от угла поворота фрезы при ее движении вдоль траектории обработки. На операциях концевое фрезерования таких деталей как лопатка или моноколесо, используются различные траектории движения фрезы. Это необходимо для того, чтобы обеспечить необходимую геометрию детали и постоянное сечение среза в момент врезания фрезы в заготовку, а так же во время обработки радиусных переходов (рисунок 1).

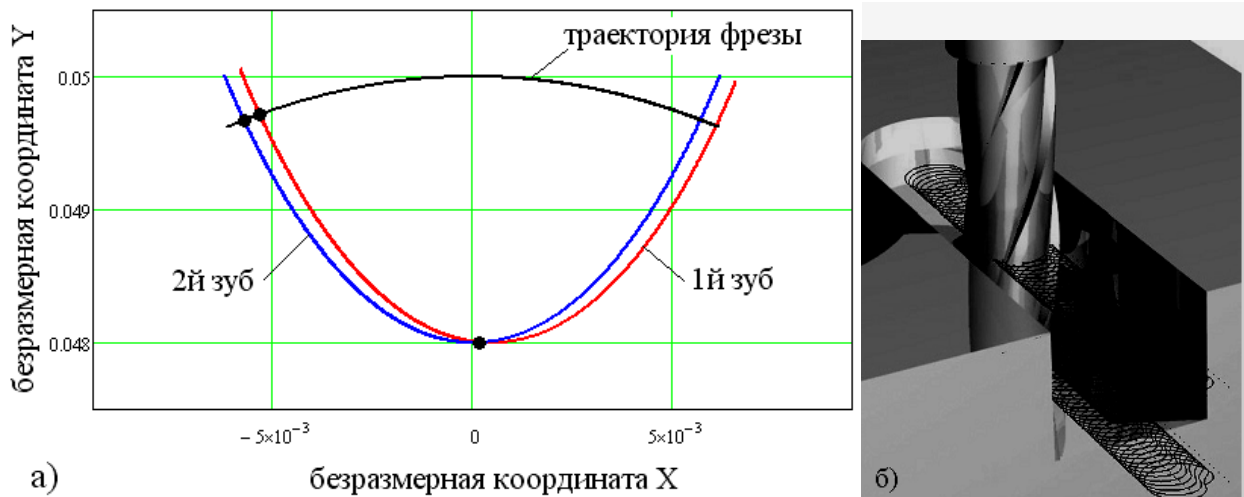


Рисунок 1. а) траектории зубьев фрезы в безразмерных координатах (сечение среза отмечено точками); б) – обработка паза с помощью спиралевидной траектории

Обработка инструментами с износостойкими покрытиями имеет много общего с резанием инструментами из твердого сплава, в частности, по контактными и термомеханическим явлениям. Однако имеется ряд особенностей, отличающих эти процессы. На процессе стружкообразования отражаются контактные взаимодействия инструмента с обрабатываемым материалом, которые во многом зависят от коэффициента трения между износостойким покрытием и обрабатываемым материалом.

В этих условиях представляет интерес сравнительная экспресс-оценка триботехнических характеристик реальной зоны контакта. Величина коэффициен-

та, численно равная отношению тангенциальной P_Z и радиальной P_Y составляющих силы резания, изменяется в соответствии с экстремальной зависимостью, причем минимальное значение коэффициента соответствует молекулярной составляющей трения μ .

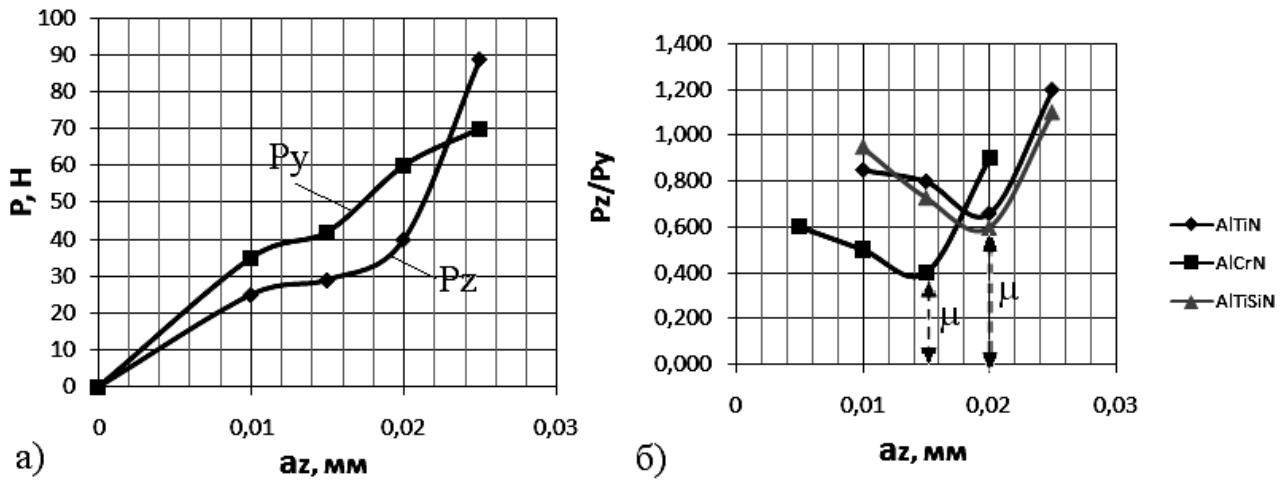


Рисунок 2. а) влияние толщины среза на параметры P_Z , P_Y ; б) влияние сечения среза на коэффициент трения μ при резании материала Сталь 45

По мере врезания зуба фрезы в заготовку, чисто упругий контакт переходит в упругопластический, что сопровождается формированием стружки. На осциллограммах силы резания (рисунок 2а) этот момент идентифицируется по увеличению тангенциальной составляющей P_Z . Из рисунка 2б видно, что покрытие AlCrN обладает лучшими триботехническими характеристиками по сравнению с другими покрытиями, поэтому при чистовых видах обработки покрытие AlCrN более эффективно как с точки зрения повышения износостойкости инструмента, так и исходя из критерия минимальной шероховатости обработанной поверхности.

При фрезеровании режущее лезвие вступает в контакт с обрабатываемым материалом в охлажденном состоянии и за короткое время контакта подвергается быстрому нагреву. В это время поглощение тепловой энергии инструментом происходит особенно интенсивно.

Для инструмента тепловые источники, действующие на передней поверхности, являются неподвижными. Схема расчета температурного поля в режущем лезвии представлена на рисунке 3. Твердое тело, моделирующее режущий клин, ограничено двумя плоскостями. Начало системы координат $XOYZ$ размещено на вершине клина в центральной точке режущего лезвия. Передняя и задняя поверхности лезвия ориентированы соответственно в направлениях оси Y и Z .

$\Delta = \rho_a \cdot 1.25 \cdot \left(\sqrt{\frac{b_1}{\sin \alpha}} + 0.8 \cdot \frac{h_3}{\rho_a} \right)$ – ширина контакта по задней поверхности, м; Δ_0 – половина ширины контакта, м; α – задний угол, рад; h_3 – износ по задней поверхности, м; ρ_a – радиус округления режущей кромки, м.

Суммарная температура в режущем лезвии от действия тепловых источников по передней и задней поверхности определялась суммированием полученных выражений.

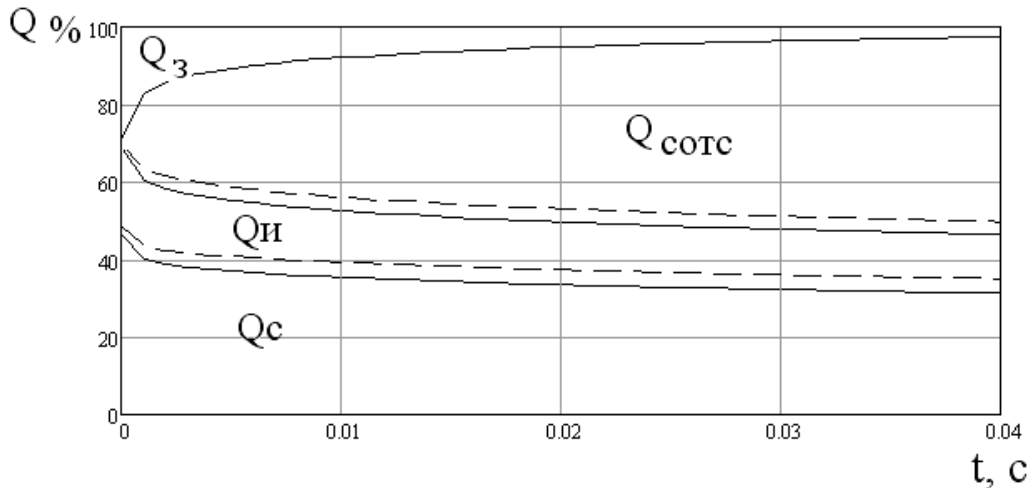


Рисунок 4. Результаты расчета баланса энергии при концевом фрезеровании: покрытие Al-Ti-N, $v_p = 2$ м/с; $t = 1,5$ мм; $\alpha_0 = 20$ Вт/(м²·К)

На рисунке 4 показан баланс тепловой энергии при концевом фрезеровании, пунктирной линией показан баланс энергии при резании твердосплавными фрезами без покрытия. Из рисунка видно, что при использовании износостойкого покрытия доля тепла, уходящая в зуб фрезы уменьшается примерно на 5%.

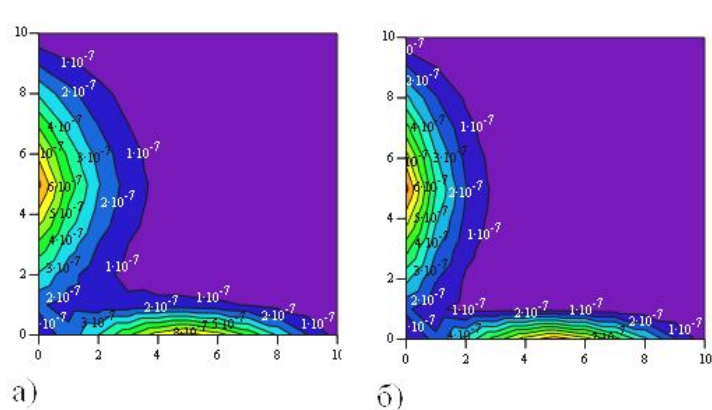


Рисунок 5. Безразмерное температурное поле в режущем клине: а) фреза без покрытия, б) фреза с покрытием Al-Ti-N

уменьшается. И в конце выхода зуба фрезы из заготовки основная часть тепла уносится СОТС (~50%). На основании баланса энергии был произведен расчет

при использовании износостойкого покрытия доля тепла, уходящая в зуб фрезы уменьшается примерно на 5%. Анализ уравнения баланса энергии при концевом фрезеровании показывает, что в момент врезания большая часть тепла поступает в стружку (~50%), затем, по мере резания, количество тепла, уходящего в зуб фрезы и в стружку,

температурного поля режущего лезвия с учетом средней интенсивности теплового потока (рисунок 5).

В процессе работы инструмента покрытие подвергается воздействию термодинамических нагрузок, вследствие чего в нем возникают микротрещины, которые приводят к разрушению покрытия. Процесс появления и роста трещин связан с особенностями структуры покрытия. Наиболее важным элементом структуры наноматериалов, во многом определяющим их свойства, являются границы зерен. На границах, являющихся местами концентрации напряжений и пониженной прочности, могут быть облегчены процессы зарождения и распространения трещин.

В наиболее опасном случае расположения линейного дефекта, представляющего собой зародышевую трещину, ориентированную нормально к поверхности и нагружаемую равномерно распределёнными растягивающими напряжениями (рисунок 6а), количественная оценка напряженного состояния покрытия определяется коэффициентом интенсивности напряжений K_1 :

$$K_1 = 2\sigma_z \sqrt{L_{mp}}, \quad (2)$$

где σ_z – результирующие растягивающие напряжения, Па; $L_{тр}$ – размер зародышевой трещины, м.

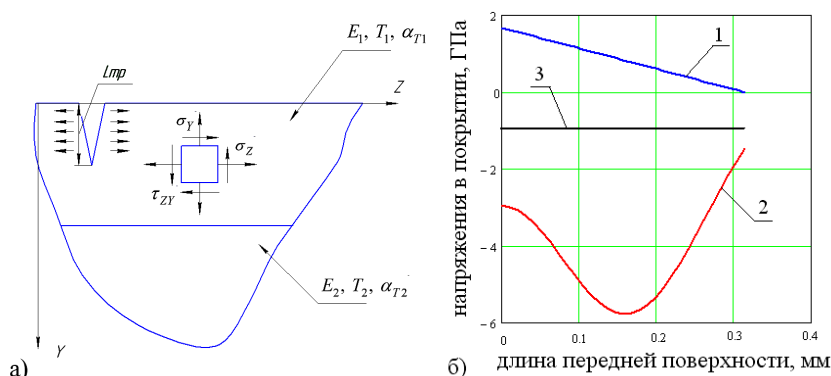


Рисунок 6. а) – схема напряженного состояния износостойкого покрытия; б) – распределение напряжений в покрытии (Al, Ti)N по передней поверхности: 1 – напряжения от силы резания P_z ; 2 – термические напряжения; 3 – остаточные напряжения

Из-за малого размера зерен и высокой плотности границ зерен в покрытии не может реализоваться чисто транскристаллитное разрушение. Характер развития трещины в поликристалле и соответственно условия реализации транс- или интеркристаллитного разрушения определяются соотношением когезионной γ_0 и зернограничной γ_e энергий разрушения

При более тщательном анализе следует различать области собственно границ зёрен и тройных стыков зёрен, поскольку последние имеют некоторые отличия в своём строении. Их объёмные доли равны:

$$f_{z.z.} = \frac{2 \cdot p}{d_3} \cdot \left(1 - \frac{p}{d_3}\right)^2, \quad f_{z.z.} + f_{m.c.} = 1 - \left(1 - \frac{p}{d_3}\right)^2. \quad (3)$$

При распространении трещины в материале эффективная энергия разрушения равна:

$$\gamma^* = 2 \cdot \gamma_0 - (f_{z.z.} + f_{m.c.}) \cdot \gamma_e. \quad (4)$$

Если плоскость распространения трещины перпендикулярна оси приложения внешнего напряжения σ_z и ее вершина отклоняется от своей траектории, для клинообразной трещины, ориентированной под углом θ к плоскости основной, локальные коэффициенты напряжений k_1 и k_2 (рисунок 7) равны:

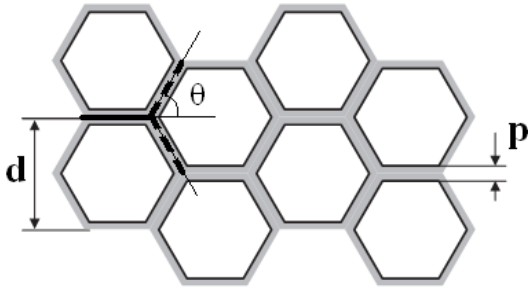


Рисунок 7 Схематическое изображение зеренной и зернограничной структурных составляющих покрытия

Условие развития трещины вдоль грани зерна под углом θ к основной плоскости:

$$k_1^2 + k_2^2 \geq \frac{2 \cdot E \cdot \gamma^*}{(1 - \nu^2)}. \quad (5)$$

$$k_1 = \cos^3\left(\frac{\theta}{2}\right) \cdot K_1; \quad (6)$$

$$k_2 = \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \cdot \cos^2\left(\frac{\theta}{2}\right) \cdot K_1; \quad (7)$$

где $E = 2G \cdot (1 + \nu)$ — модуль упругости, Па; ν — коэффициент Пуассона; G — модуль сдвига, Па.

При условии:

$$K_1 \geq K_{1c} = \left[\frac{2 \cdot E \cdot \gamma_0}{(1 - \nu^2)} \right]^{1/2}, \quad (8)$$

трещина будет развиваться в объеме зерна, что приведет к транскристаллитному типу разрушения.

Теоретические модели определения сил резания и температуры позволили имитировать напряженное состояние системы «покрытие-подложка», характеризующее работу режущего инструмента. С помощью экспресс-оценки пар трения покрытие-обрабатываемый материал удалось определить влияние состава покрытия на процесс резания. Динамическая модель разрушения позволила выявить ограничения, которые необходимо накладывать при выборе режимов резания, а так же показала, что за счет варьирования структурных параметров (размер зерна) можно повысить коэффициент трещиностойкости покрытия.

В третьей главе для подтверждения теоретических моделей были проведены экспериментальные исследования процесса концевой фрезерования. Описана методика экспериментальных исследований, дано описание используемой аппаратуры. Применялись планы ПФЭ 2² и ПФЭ 2⁴. Выполнены иссле-

дования составляющих силы резания и влияния технологических параметров операции концевой фрезерования на износ фрез.

Сравнение результатов расчета силы резания и экспериментальных данных позволили сделать заключение об их удовлетворительном совпадении с погрешностью не более 10 %, что подтверждает достоверность разработанной модели.

Экспериментальные исследования износостойкости покрытий проводились в условиях прерывистого резания концевыми твердосплавными фрезами из сплава Н10F при обработке титанового сплава ВТЗ-1, коррозионно-стойкой стали 12Х18Н10Т и алюминиевого сплава АК8. В качестве критерия затупления инструмента был принят максимальный линейный износ по главной задней поверхности $h_z = 0,2$ мм (рисунок 8).

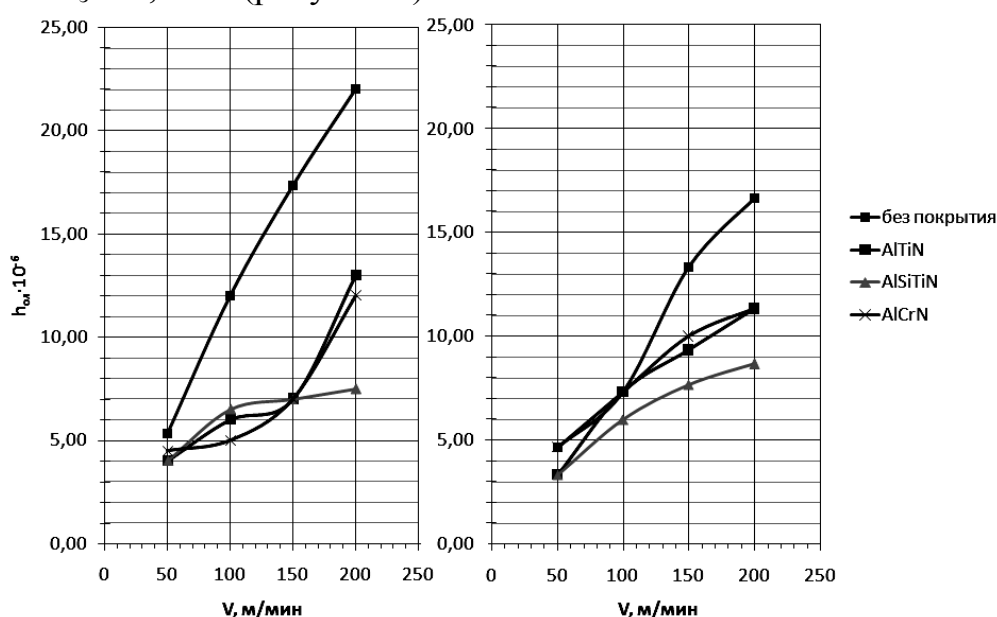


Рисунок 8. Зависимость относительного линейного износа фрез по задней поверхности в зависимости от скорости резания ($s_z = 0,055$ мм/об; $t = 1$ мм): а) коррозионная сталь 12Х18Н10Т; б) титанового сплава ВТЗ-1.

На рисунке 8 представлены графики зависимости относительного линейного износа по задней поверхности фрез с различными покрытиями в зависимости от скорости резания при обработке титанового сплава ВТЗ-1 и коррозионно-стойкой стали 12Х18Н10Т. На скоростях резания 50-150 м/мин разница в износе у покрытий минимальна, однако с увеличением скорости покрытие AlTi-SiN, за счет более высокой твердости, показывает более лучший результат.

В таблице 1 приведены исследования влияния размеров зерна покрытия на физико-механические характеристики покрытия. Выявлено что покрытия с одинаковой твердостью могут различаться по величине модуля упругости, а также по стойкости к упругой деформации разрушения (H/E) и сопротивлению

пластической деформации (H^3/E^2). Чем больше сопротивление пластической деформации, тем большей энергией разрушения обладает покрытие.

Таблица 1. Механические свойства покрытия $AlTiSiN$ нанесенного при различных давлениях.

Свойства покрытия	Импульсные параметры			
	0,15 Па	0,2 Па	0,25 Па	0,3 Па
Наноидентационная твердость, ГПа	36,3 ±3,8	37 ±3,9	38 ±3,3	40 ±2,9
Модуль Юнга, ГПа	256,8± 26,3	262,6± 31,9	268± 32,5	270± 30,4
H^3/E^2	0,725	0,735	0,764	0,878
Средний зармер зерна, нм	20	17	14	10

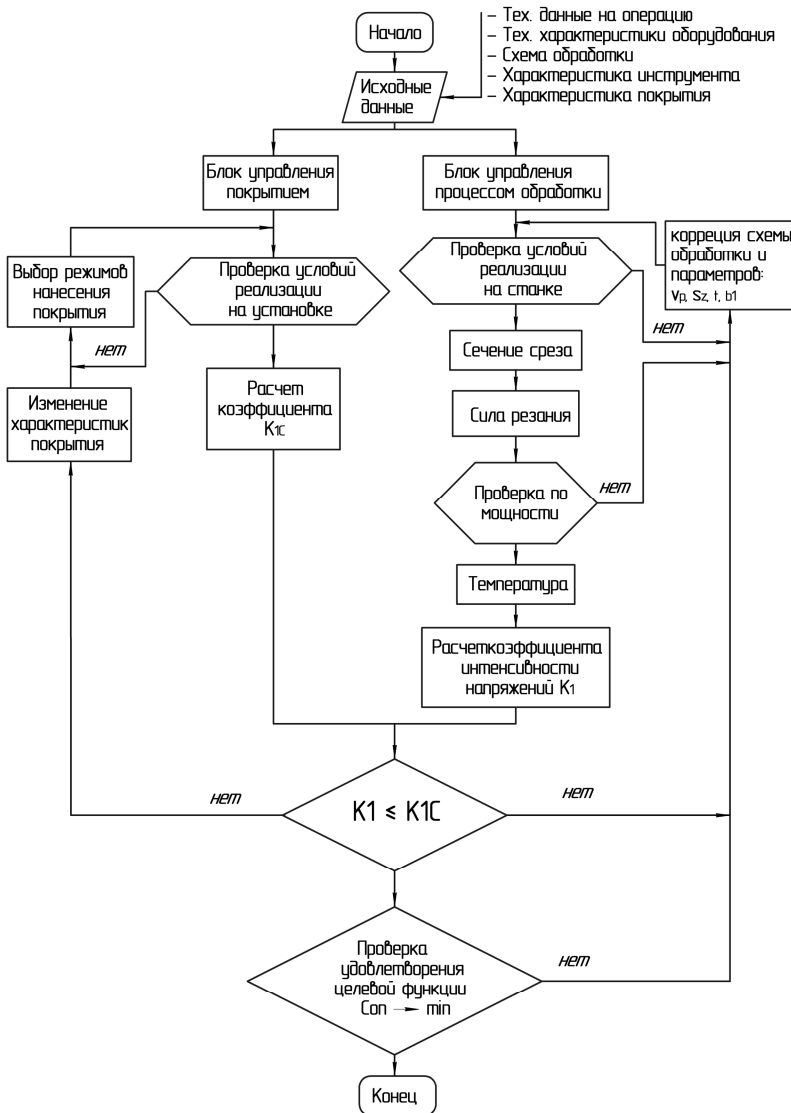


Рисунок 9. схема определения режимов резания и выбора износостойкого покрытия

Можно сделать вывод, что структура покрытия, в частности размер зерна, имеет большое влияние на характеристики покрытия. Уменьшение размера зерна с 20 до 10 нм дает оценку повышения удельной энергии разрушения покрытия на 10-20%. Таким образом, за счет выбора состава и оптимизации структуры покрытия можно повысить режимы резания на операциях концевой фрезерования.

В четвертой главе приводится методика оптимизации операций фрезерования по минимуму себестоимости.

На рисунке 9 представлена схема расчета режимов резания. Данная методика разработана на ос-

нове математического анализа механических явлений, сопровождающих процесс концевого фрезерования, и с учетом свойств износостойких покрытий. Данная методика была внедрена на малом предприятия ООО «Пико» при изготовлении ряда деталей.

Целевая функция по переменной доле себестоимости имеет вид:

$$C_{он.пер} = E \cdot t_m + \frac{(t_{см} + t_n) \cdot E + C'_u}{T} \cdot k_m \rightarrow \min, \quad (9)$$

где E – сумма зарплаты основных рабочих и всех амортизационных отчислений, отнесенных к минуте работы станка $t_{см}$, t_n – время на смену и наладку нормально изношенного инструмента за период его стойкости, мин; k_m – коэффициент, учитывающий непосредственное резание в машинном времени.

Эффективность от внедрения выразилась в увеличении производительности процесса концевого фрезерования за счет увеличения скорости резания и экономии времени на смену инструмента и, как следствие, уменьшения количества переналадок станка, так как стойкость режущих кромок, за счет выбора износостойкого покрытия, превышала стойкость инструмента со стандартным покрытием. В среднем повышение эффективности технологических операций выразилось в увеличении производительности и снижении себестоимости обработки на 25-30%.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Разработанная модель расчета параметров сечения среза позволяет рассчитать углы входа и выхода зуба фрезы, а так же определить толщину сечения среза при концевого фрезерования с учетом криволинейности траектории движения фрезы.

2. Разработанная модель для расчета силы резания, учитывающая пластическое подмятие обрабатываемого материала, позволила определить усилия резания на операциях концевого фрезерования.

3. Решение тепловой задачи с граничными условиями 3-го рода, моделирующей температурное поле в инструменте с износостойким покрытием, позволило установить характер изменения температур на поверхности режущего клина при резании и определить особенности изменения баланса энергии.

4. Разработанная модель динамического разрушения износостойкого покрытия позволяет оценить способность покрытия сопротивляться пластической деформации и росту трещин в нем при действующих термодинамических нагрузках, что позволяет осуществить выбор состава и структуры покрытия.

5. Проведенные экспериментальные исследования процесса концевого фрезерования различных сплавов позволили определить их обрабатываемость и

установить параметры, необходимые для расчета составляющих силы резания и температуры, что дает возможность прогнозировать характеристики процесса обработки при заданных в производстве технологических условиях.

6. Проведенные исследования структурных параметров покрытий показали, что за счет модификации свойств можно получать сверхтвердые покрытия с различным сочетанием упругих и пластических характеристик, что позволяет легко подбирать покрытия для конкретных целей и задач. Это позволяет расширить область их применения на операциях механической обработки, где возникают нагрузки, приводящие к разрушению обычных покрытий, в частности при фрезеровании заготовок из труднообрабатываемых материалов с большими толщинами среза.

7. Разработанная методика оптимизации операций концевой фрезерования позволила учесть широкий комплекс факторов и разработать рекомендации для выбора характеристик инструмента и станочного оборудования для обработки, а также оптимизировать условия обработки по минимуму себестоимости операции при обеспечении заданных параметров качества.

8. Разработанные практические рекомендации для технологий фрезерования позволили в среднем снизить себестоимость операций на 25-30% при обеспечении требуемой точности и шероховатости обработанной поверхности.

Основные публикации

Статьи в журналах, входящих в перечень ВАК

1. Мезенцев М.О. Курочкин А.В. Исследование эффективности Монолитных твердосплавных фрез с наноструктурированным покрытием AlSiTiN [Текст] / М. О. Мезенцев, А. В. Курочкин, // Инженерный журнал. – 2009.– №4. – С. 62 – 65.

2. Мезенцев М.О. Образование усталостных трещин в наноструктурированном покрытии на режущем инструменте [Текст] / М.О. Мезенцев // Вестник РГАТУ имени П. А. Соловьева. – Рыбинск: РГАТА, 2011. – № 2 (20). – С. 120-124.

3. Рыкунов А. Н. Условия эффективной эксплуатации твердосплавного инструмента с износостойкими покрытиями [Текст] / А. Н. Рыкунов, М.О. Мезенцев // Вестник РГАТУ имени П. А. Соловьева. – Рыбинск: РГАТА, 2012. – № 2 (23). – С. 138-144.

Другие публикации по теме диссертации.

1. Мезенцев М.О. Исследование сверхтвердого многокомпонентного покрытия (Al, Si, Ti)N [Текст] / М. О. Мезенцев. // Повышение эффективности ме-

ханообработки на основе моделирования физических явлений: Материалы Всероссийской научно-технической конференции. - Рыбинск: РГАТА, 2009. - Ч. 2. - С. 56–61

2. Мезенцев М.О. влияние наноструктурированных покрытий на силы резания при концевом фрезеровании [Текст] / М. О. Мезенцев. // Нанотехнологии в производстве авиационных газотурбинных двигателей летательных аппаратов и энергетических установок (ГТД-нанотехнологии 2010): Материалы Всероссийской конференции с элементами научной школы для молодежи. – Рыбинск: РГАТА имени П.А. Соловьева, 2010. – 140 с.

3. Мезенцев М.О. Влияние износостойких покрытий на износ при прерывистом резании [Текст] / М. О. Мезенцев. //Материалы V Всероссийской молодежной научной конференции «Мавлютовские чтения» Уфа: УГАТУ, 2011. С. 62–63.

4. Мезенцев М.О. Повышение эффективности концевое фрезерование труднообрабатываемых материалов [Текст] / М.О. Мезенцев // Автоматизация и энергосбережение машиностроительного и металлургического производств, технология и надежность машин, приборов и оборудования: Материалы седьмой международной научно-технической конференции. – Вологда, 2012. – 395 с.

5. Мезенцев М.О. Повышение эффективности концевое фрезерование титановых сплавов за счет нанесения наноструктурированных износостойких покрытий на режущий инструмент [Текст] / М. О. Мезенцев. //Материалы IV международной научно-технической конференции «Наукоемкие технологии в машиностроении и авиадвигателестроении» Рыбинск: РГАТУ, 2012. С. 199–202.

6. Свидетельство о регистрации объекта интеллектуальной собственности № 10-277. Проектирование и изготовление износостойких покрытий для твердосплавного режущего инструмента, применяемого для обработки деталей авиационных газотурбинных двигателей из труднообрабатываемых материалов [Текст] / Д. И. Волков, В. А. Полетаев, В. В. Михрютин, А. В. Курочкин, М. О. Мезенцев; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО «РГАТА имени П. А. Соловьева», заявл. 29.06.2010 г.

Зав. РИО М. А. Салкова

Подписано в печать 11.07.2013 г.

Формат 60x84 1/16. Уч.-изд. л. 1. Тираж 100. Заказ 170.

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

152934, г. Рыбинск, ул. Пушкина, 53

Отпечатано в множительной лаборатории РГАТУ имени П. А. Соловьева

152934, г. Рыбинск, ул. Пушкина, 53