

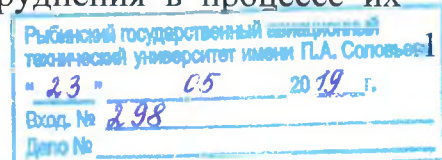
В диссертационный совет Д 212.210.01 при Федеральном
Государственном бюджетном образовательном учреждении
высшего образования «Рыбинский государственный авиационный
технический университет имени П. А. Соловьева»,
Ученому секретарю д.т.н. Надеждину И. В.
152934, Ярославская область, г. Рыбинск, ул. Пушкина, 53, ауд. Г-237.

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертацию **Кожиной Светланы Михайловны** «Повышение
эффективности обработки маложестких поверхностей проточной части
лопаток и моноколёс ГТД концевыми фрезами», представленную на соискание
ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.02.07 –
Технология и оборудование механической и
физико-технической обработки

1. Актуальность темы диссертации

Авиационные газотурбинные двигатели (ГТД) должны иметь высокую эксплуатационную надежность, долговечность и малые весовые характеристики, что вызывает ряд специфических особенностей, касающихся не только используемых материалов, но и технологии их производства. Так, детали авиационного двигателя изготавливают из особо прочных сталей и сплавов, которые относятся к труднообрабатываемым. Проточная часть лопаток и моноколес имеет ответственные рабочие поверхности, характеризующиеся малой шероховатостью, высокими геометрической точностью, физико-механическими показателями качества поверхностного слоя, при этом заготовка имеет тонкостенную конструкцию, малую изгибную и крутильную жесткость. Выше сказанное приводит к сложным условиям механической обработки и вызывает серьезные затруднения в процессе их



производства.

Диссертация Кожиной С. М. направлена на решение научно-технической задачи по обеспечению производительной прецизионной и бездефектной механической обработки податливыми концевыми фрезами сложно-профильных поверхностей проточной части лопаток ГТД и моноколёс, изготовленных из труднообрабатываемых материалов и имеющих низкую изгибную и крутильную жесткость. Поставленная задача весьма сложная, а её решение требует глубокого изучения термо-механических процессов, определения адекватных моделей, на основе которых возможна оптимизация и назначение режимов резания, обеспечивающих требуемое качество и повышение производительности. С учетом изложенного тему диссертации Кожиной С. М. следует признать актуальной и имеющей важное значение для машиностроения.

2. Структура и оформление диссертации

Диссертация состоит из следующих структурных элементов: введения, четырех глав, общих выводов, списка использованной источников и приложения. Общий объем работы включает 176 страниц, 110 рисунков, 14 таблиц и 116 наименований литературных источников. Диссертация и автореферат оформлены качественно.

3. Методы исследований, достоверность полученных результатов

В процессе исследований автором использованы научные методы теории резания материалов, технологии машиностроения, теории теплопередачи, сопротивления материалов, теории упругости и теории автоматического управления. Экспериментальные исследования проведены по стандартным методикам с использованием современных много осевых станков с ЧПУ и контрольно-измерительных приборов. Достоверность результатов исследований подтверждается корректным использованием научных положений фундаментальных и прикладных дисциплин, удовлетворительным

совпадением расчетных и экспериментальных данных, а также хорошей корреляцией с данными других ученых.

4. Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций

Общим результатом исследований Кожиной С. М. является достигнутое до 80 % повышение производительности профильного фрезерования проточной части лопаток ГТД и моноколёс и снижение технологической себестоимости операции на 15 %, уменьшение износа режущего инструмента в 3,0–3,5 раза при соблюдении требуемого качества обработанного поверхностного слоя. Столь высокие результаты получены на основе детального изучения параметров срезаемого слоя, моделирования температурно-силовых, деформационных и динамических процессов при концевом фрезеровании и оптимизации режимов резания.

Автором сформулированы 6 задач, по результатам их решения представлено 9 основных выводов. Обоснованность каждого из выводов заключения работы излагается ниже, при этом выводы в конце каждой главы диссертации оппонентом не были приняты во внимание, поскольку они отражены в основном в общих выводах по работе.

Первый вывод диссертации отражает решение первой поставленной автором задачи и касается разработки модели взаимодействия инструмента и заготовки (формирования стружки) при концевом фрезеровании инструментом с радиусной рабочей поверхностью. Научное обоснование указанной модели изложено во второй главе на с. 48–67. Определены закономерности формирования сечения срезаемого слоя и длины контакта инструмента и заготовки. Установлены зависимости для расчета траектории движения вершины смежных режущих лезвий концевой фрезы, длины её контакта с выпуклой и вогнутой поверхностью заготовки, а также максимальной толщины срезаемого слоя a_{zmax} в функции глубины резания t , биения Δ режущих зубьев, углового шага φ_z режущих зубьев фрезы и безразмерных факторов D , D_1 , B и E .

Показано, что при увеличении названных выше факторов длина контакта фрезы и заготовки, а также толщина срезаемого слоя возрастает, что не вызывает сомнения. Автор определила условие равномерной работы фрезы, при котором контакт с заготовкой не прерывается, и установила формулу для расчета минимально допускаемой ширины строки, обеспечивающей это условие, что весьма важно для снижения динамической активности технологической системы и повышения точности обработанных поверхностей.

Второй вывод содержит решение второй поставленной задачи и касается разработки математической модели составляющих силы резания, возникающей при концевом фрезеровании лопаток ГТД с малой жесткостью. На основе этой модели определены деформации элементов технологической системы в зависимости от схемы закрепления заготовки. Обоснование второго вывода изложено на с. 67–76.

Разработана схема расчета сил с учетом криволинейного профиля режущего зуба концевой фрезы, застойной зоны и разделения потоков металла на стружку и подминаемый режущим клином слой. Определено условие перехода от подмятия металла к резанию, что позволило найти толщину срезаемой стружки, а затем и модели главной, радиальной составляющих силы резания и крутящего момента с учетом геометрии концевой фрезы. Исследования выполнены на базе теории резания металлов, при этом корректно использованы научные положения этой дисциплины и не вызывают сомнения.

Деформации нежестких лопаток и концевой фрезы в процессе обработки выполнены на основе найденных ранее составляющих силы резания и выбранной схемы базирования заготовки и обоснованы на с. 88–98. Определены деформации изгиба лопатки относительно осей x и y , а также суммарная деформация от изгиба и кручения пера лопатки под действием силы резания для консольного и портального закрепления заготовки.

Приведено сравнение максимальных деформаций лопатки и концевой фрезы, при этом установлено, что при консольном закреплении деформации заготовки в десятки раз больше деформаций фрезы, что необходимо учитывать при проектировании рассматриваемой технологической операции. Результаты расчетов значений деформаций хорошо согласуются с данными Маслова А.Р.

Третий вывод отражает решение также второй поставленной задачи и

посвящен разработке математической модели тепловых процессов для граничных условий 3-го рода и нестационарных условий концевой фрезерования. Обоснование третьего вывода изложено на с. 76–98. Разработана схема расчета температуры режущего клина, а тепловые потоки приложены к передней и задней поверхностям режущего клина. В результате решения уравнения теплопроводности методом источников получено распределение безразмерной температуры по задней и передней поверхности режущего клина. Моделирование температуры выполнено с использованием современного программного продукта Mathcad.

При расчете безразмерной температуры режущего клина автор учитывала многократное контактное взаимодействие зубьев концевой фрезы с заготовкой и определила число элементарных резов, при котором наступает установившийся тепловой режим. Описанные результаты исследований выполнены на основе теории теплопередачи, современного программного продукта и являются логическим продолжением исследований толщины срезаемого слоя и силовых характеристик процесса концевой фрезерования. Таким образом, третий вывод получил достаточное обоснование с использованием современного математического аппарата и компьютерного моделирования тепловых процессов.

Четвертый вывод отражает решение третьей поставленной задачи и касается разработки динамической модели процесса концевой фрезерования нежестких заготовок с учетом деформации основных элементов технологической системы. Обоснование четвертого вывода приведено на с. 98–106, оно выполнено с использованием метода передаточных функций. Исследована динамика пера лопатки в условиях переменной её жесткости и вариации силы резания. На основании расчетов устойчивости динамической модели с использованием программного продукта Mathcad определены изменения предельной ширины среза и сформулированы ограничения режимов концевой фрезерования, обеспечивающие устойчивость стохастического процесса резания.

Пятый вывод посвящен исследованию динамики концевой фрезерования, определению влияния основных факторов процесса на запас устойчивости системы в случае работы по «следу». Задача по решению этого вопроса в работе не сформулирована, и оно выполнено дополнительно.

Динамика концевое фрезерования исследована с использованием программного продукта Mathcad. Запас устойчивости системы при внешнем возбуждении от следов предшествующей обработки обоснован на (с. 106–113). Установлены ограничения режимов концевое фрезерования лопаток при работе «по следу», которые обеспечивают устойчивость концевое фрезерования нежестких лопаток ГТД.

Шестой вывод касается экспериментальных исследований механических характеристик ряда износостойких покрытий концевых фрез и влияния покрытий на уменьшение износа, повышение работоспособности и производительности обработки. Задача по решению этого вопроса в работе не сформулирована, и оно выполнено дополнительно. Обоснование механических характеристик износостойких покрытий режущего инструмента приведено на с. 122–129.

Седьмой вывод отражает решение четвертой задачи и относится к многофакторным планируемым экспериментальным исследованиям и обоснованию (с. 129–144) уравнений регрессии для составляющих силы резания и температуры в функции режимов концевое фрезерования для группы титановых сплавов ОТ4, ВТ3-1, ВТ6, ВТ9. Обоснование средств оснащения экспериментов, методик их проведения, результаты и их анализ приведены на с. 114–144. Используются 4-х и 5-ти осевые обрабатывающие центры с ЧПУ, современные методики подготовки, проведения и статистической обработки данных экспериментов, современная контрольно-измерительная аппаратура, гамма концевых фрез с износостойкими покрытиями и без таковых. Следует отметить большой объем подготовительной работы и экспериментальных исследований, выполненных автором, в т. ч. нанесение износостойких покрытий концевых фрез и контроль их качественных характеристик.

Достигнуто снижение износа фрезы в 3,0–3,5 раза, повышение минутной подачи и производительности обработки. Получена зависимость для расчета скорости резания и стойкости инструмента при концевом фрезеровании титановых сплавов при заданной величине допустимого его износа, а также адекватные многофакторные модели составляющих силы резания и температуры в функции режимов концевое фрезерования титановых сплавов ОТ4, ВТ3-1, ВТ6, ВТ9, что способствует достижению поставленной цели и представляет

собой важную научную и практическую информацию, необходимую при проектировании высоко эффективных процессов концевой фрезерования лопаток ГТД и пазов моноколёс. Получена удовлетворительная сходимость расчетных и экспериментальных значений составляющих силы резания и температуры. Таким образом, обоснование экспериментальной части диссертации выполнено автором в достаточной мере.

Восьмой вывод отражает решение пятой задачи и относится к разработке методики оптимизации обработки лопаток и моноколес ГТД концевыми фрезами, определению режимов резания, отвечающих выбранной целевой функции. Обоснование восьмого вывода приведено на с. 145–154. Отличительной особенностью методики является учет динамики процесса резания. Оптимизация режимов концевой фрезерования маложестких заготовок проведена с использованием разработанных и проверенных на адекватность математических моделей, характеризующих силовые, тепловые, контактные и деформационные процессы в зоне резания.

Девятый вывод отражает решение шестой задачи и относится к разработке рекомендаций по концевому фрезерованию моноколёс и лопаток компрессора ГТД. Рекомендации основаны на результатах теоретических и экспериментальных исследований и присутствуют в методике оптимизации процесса концевой фрезерования лопаток ГТД и пазов моноколёс (с. 148 – 159).

Таким образом, научные положения, выводы и рекомендации получили достаточное обоснование, что подтверждается результатами теоретических и экспериментальных исследований

5. Научная новизна работы

Заключаются в теоретических и экспериментальных моделях параметров срезаемого слоя, тепловых, силовых и упруго-деформационных процессов, протекающих при концевом фрезеровании сложных пространственных поверхностей маложестких лопаток ГТД и пазов моноколёс, на основе которых обоснованы и реализованы режимы концевой фрезерования, обеспечивающие

повышение производительности, периода стойкости фрезы, уменьшение износа и технологической себестоимости изделий.

6. Значение результатов исследований для теории резания металлов

Значение для теории резания металлов имеют:

- закономерности, описывающие параметры срезаемого слоя и составляющих силы резания, разработанные для концевого фрезерования профильных внешней и внутренней поверхностей со значительными перепадами радиусов кривизны, а также установленные при этом пути снижения динамической активности технологической системы можно использовать при анализе процессов профильного фрезерования также других сложно-профильных поверхностей;
- методика и программное обеспечение многоуровневой оптимизации, учитывающие динамику процесса профильного фрезерования и позволяющие определить режим резания, обеспечивающий заданный период стойкости режущего инструмента, максимально возможную производительность и минимум технологической себестоимости, рекомендуется использовать при разработке виброустойчивых процессов концевого фрезерования других материалов;

Результаты исследования могут быть распространены на процессы профильного фрезерования сложных пространственных поверхностей других заготовок, выполненных из труднообрабатываемых материалов в условиях низкой жесткости элементов технологической системы.

7. Значение результатов исследования для практики и производства

Наиболее значимыми для производства являются технологические решения по повышению производительности концевого фрезерования, периода стойкости режущего инструмента и снижению технологической себестоимости, а также методика и программное обеспечение многоуровневой оптимизации режимов резания. Алгоритм оптимизации и пакет прикладных программ, разработанные на основе полученных моделей процесса концевого

фрезерования лопаток ГТД, также имеют практическую полезность для автоматизации проектирования технологической операции. Результаты работы используются в учебном процессе Рыбинского государственного авиационного технического университета имени П. А. Соловьева.

8. Публикации и апробация работы

По теме диссертации опубликовано 4-е научные работы в рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК РФ.

9. Личный вклад соискателя

Личный вклад соискателя в диссертационную работу заключается в обосновании актуальности, цели и задач исследования; разработке аналитических зависимостей, моделей и алгоритма; проведении экспериментов, обработке и анализе их результатов, а также разработке научных рекомендаций и методики многоуровневой оптимизации режима профильного фрезерования лопаток ГТД и пазов крыльчатки моноколёс. О личном вкладе соискателя в диссертацию свидетельствуют научные статьи, опубликованные в рецензируемых журналах, включенных в список ВАК.

10. Замечания по диссертации

1. Название второй главы диссертации раскрыто частично, поскольку разработка модели обработки лопаток характеризуется значительно большим числом моделей, нежели рассмотренных автором.

2. При разработке математических моделей срезаемого слоя и составляющих силы резания во второй главе большое количество формул и графиков содержит безразмерные физические величины, что затрудняет восприятие материала. Несмотря на достоинства представления результатов в безразмерном виде, автору следовало бы ограничить их количество и привести графики в абсолютных единицах измерения факторов и параметров процесса.

3. На странице 94 диссертации автор определяет по формуле (2.73) упругие деформации δ_{ϕ} инструмента (концевой фрезы) под действием силы резания P_p , при этом допускает неверную расшифровку символа J_{ϕ} как осевого момента инерции фрезы, т. е. твердого тела (см. страницу 95, вторая строка сверху). Символ J_{ϕ} следовало расшифровать как приведенный осевой момент инерции поперечного сечения концевой фрезы, а в формуле (2.74) вместо диаметра $d_{\text{хв}}^4$ хвостовика следовало указать приведенный диаметр $d_{\text{пр}}^4$ концевой фрезы.

4. На странице 50, рисунке 2.2 один и тот же радиус фрезы обозначен через R и $(R+\Delta)$, причем не расшифровано, что такое Δ . Вместо радиуса заготовки указан радиус детали R_d . В формулах (2.5) и (2.6) изменение координат x_2 , y_2 следовало бы представить также в функции времени фрезерования с учетом вращательного движения фрезы.

5. На с. 6, в пункте «Публикации» автореферата отмечено, что результаты исследования представлены 4-мя статьями ВАК и 2-мя тезисами докладов, однако ни в основных публикациях в конце автореферата, ни в списке использованных источников в диссертации тезисы не указаны.

6. Термин «...многокоординатная обработка...» на станках с ЧПУ по мнению оппонента не корректен, поскольку он не отражает фактического формообразования сложных пространственных поверхностей на станках с ЧПУ. Такое формообразование может быть реализовано при одновременном использовании 4-х или 5-ти осей координат, т. е. при много осевой обработке, а не многокоординатной.

7. При обозначении направлений рабочих движений фрезы на рис. 2.1, с. 48 диссертации не соблюдены требования ГОСТ 25762-83 «Обработка резанием. Термины, определения и обозначения общих понятий».

8. В списке использованных источников 66 из 116 старше 2000 года и нет источников из Интернета-ресурса.

9. Встречаются орфографические (на с. 46, 49 и др.) и синтаксические ошибки (с. 19 и др.).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Отмеченные замечания не затрагивают существа научных положений, представленных к защите, не отрицают основных выводов, сформулированных соискателем. Кожина С. М. провела теоретические и экспериментальные исследования в объеме, вполне достаточном для решения задач и достижения поставленной цели. Диссертация характеризуется логическим изложением материала и глубоко аргументированным обоснованием принятых технологических и технических решений.

Основные результаты работы в достаточной мере опубликованы в ведущих научных журналах. Содержание текстов автореферата и диссертации адекватно отражают ключевые моменты исследования, в особенности в части обоснования защищаемых положений и выводов. При исследовании контактного взаимодействия концевой фрезы с лопаткой ГТД и крыльчаткой моноколёс, моделировании термо-силовых процессов автор использовала современный программный продукт Mathcad, что позволило получить достоверные и важные для теории и практики концевой фрезерования результаты.

В целом диссертация выполнена на высоком методическом и научном уровне. Предложенные научно-обоснованные решения способствуют дальнейшему развитию процессов концевой фрезерования сложных пространственных поверхностей в условиях низкой жесткости технологической системы и рекомендуются к использованию в процессах производства других сложно-профильных изделий на много осевом оборудовании с ЧПУ.

Диссертация Кожиной С. М. представляет собой качественно выполненную и завершенную научно-квалификационную работу, в которой на основании проведенных исследований разработаны теоретические положения,

совокупность которых можно квалифицировать как решение научно-технической задачи, имеющей хозяйственное значение – разработано научное, технологическое и методическое обеспечение высоко производительного концевое фрезерования труднообрабатываемых материалов заготовок со сложными пространственными поверхностями в условиях низкой изгибной и крутильной жесткости основных элементов технологической системы.

По актуальности темы, новизне, достоверности результатов, научной и практической значимости диссертация отвечает требованиям, предъявляемым ВАК РФ, а также пункта 9 «Положения о присуждении ученых степеней» к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук, а **Кожина Светлана Михайловна** заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.02.07 – «Технология и оборудование механической и физико-технической обработки».

ОФИЦИАЛЬНЫЙ ОППОНЕНТ:

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Технология машиностроения» ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых» (ВлГУ), тел.(4922)47-99-24, Специальность: 05.03.01 – Процессы механической и физико-химической обработки, станки и инструмент.

E-mail: prof_gusev@mail.ru

600000, РФ, г. Владимир, ул. Горького, 87.

06.05.2019 г.

Гусев Владимир
Григорьевич

ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых (ВлГУ),

600000, Россия, г. Владимир, ул. Горького, 87

Тел. (4922)53-25-55, 47-97-37, 47-99-24. Факс (4922)53-25-55,

<http://www.vlsu.ru>

Подпись д.т.н., проф. Гусева В. Г. удостоверяю:
секретарь Ученого Совета ВлГУ



Коннова Татьяна
Григорьевна