

МИНОБРАЗОВАНИЯ РОССИИ
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение
высшего образования

**«Пермский национальный
исследовательский
политехнический университет»
(ПНИПУ)**

614990, Пермский край, г. Пермь,
Комсомольский проспект, д. 29,
тел. 8(342) 219-80-67,
факс 8(342) 212-39-27, e-mail: rector@pstu.ru
<http://www.pstu.ru>

06.05.2019 № 457/УИИ
На № _____ от _____

УТВЕРЖДАЮ:

Проректор на науке и инновациям
ФГБОУ ВО «ПНИПУ», доктор
технических наук, профессор


Коротаев В.Н.
« _____ » _____ 2019 г.

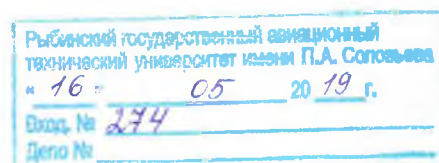


ОТЗЫВ

ведущей организации ФГБОУ ВО «ПНИПУ» на диссертационную работу
Кожиной Светланы Михайловны «Повышение эффективности обработки
маложестких поверхностей проточной части лопаток и моноколес гтд
концевыми фрезами» представленной на соискание ученой степени
кандидата технических наук в диссертационный совет Д212.210.01 по
специальности «05.02.07», «Технология и оборудование механической и
физико-технической обработки».

1. Актуальность избранной темы диссертации.

Лопаточный аппарат газотурбинных двигателей характеризуется, кроме сложности конструкции, большой трудоемкостью изготовления. В среднем его трудоемкость составляет 30-45% общей трудоемкости изготовления турбины. Поэтому совершенствованию операций изготовления элементов лопатки уделялось ранее и в настоящее время, повышенное внимание технологов и исследователей. В настоящее время для обработки рабочего профиля лопаток используется различное технологическое оборудование, в частности, фрезерные станки, работающие с применением копиров, или станки, в которых управление обработкой выполняют системы ЧПУ. Вопросы точности обработки в обоих вариантах ввиду многофакторности процесса еще до конца не изучены. Сложность проблем современного авиадвигателестроения обусловлена как трудностью обработки материалов деталей ГТД, сложностью их формы, так и высокими требованиями к точности и шероховатости поверхностей деталей.



Тема диссертации, избранная соискателем Кожиной С. М. посвящена решению безусловно актуальной проблемы современного авиационного машиностроения - повышению эффективности обработки маложестких поверхностей проточной части лопаток и моноколес ГТД концевыми фрезами посредством оптимизации технологических параметров. Стоит отметить, что несмотря на известное длительное использование на производстве метода фрезерования проточной части лопаток компрессоров ГТД и крыльчаток моноколес до настоящего времени нет методики расчета деформаций и соответствующих им допустимых значений глубины резания и подачи, что приводит к необходимости назначения режимов резания на основе эмпирического опыта познания в производственных условиях, требующих существенных материальных и временных затрат.

Поэтому тематика диссертационной работы соискателя Кожиной С.М. посвященная разработке аналитической модели обработки маложесткой части лопаток и моноколес ГТД концевыми фрезами представляет решение актуальной задачи, как для теории, так и для практики механической обработки.

2. Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.

В первой главе автором проведен достаточно глубокий подробный обзор и анализ результатов научных работ посвященных вопросам повышения эффективности обработки при концевом фрезеровании моноколес и лопаток компрессора ГТД выполненных отечественными и зарубежными учеными. На основе этого анализа сделаны вполне обоснованные обобщения, выводы и поставлены действительно необходимые, отвечающие теме и цели, основные задачи исследования.

Во второй главе представлены результаты теоретических исследований процесса концевой фрезеровки деталей с малой жесткостью. Проведенные аналитические исследования позволили автору установить ряд закономерностей формирования стружки: толщину срезов и длину контакта при взаимодействии инструмента и заготовки для процесса фрезерования инструментом со сферической рабочей частью с учетом подачи по криволинейной траектории.

Применительно к условиям концевой фрезеровки деталей ГТД, имеющих малую жесткость, автором получена математическая модель для расчета составляющих силы резания, позволившая установить деформации компонентов технологической системы в зависимости от схемы закрепления

детали.

Разработана модель тепловых процессов для граничных условий 3-го рода и нестационарных условий концевое фрезерования позволила соискателю установить, что температура в режущем лезвии изменяется циклически и может существенно влиять на хрупкое разрушение покрытия и режущего лезвия, а также ограничивать стойкость инструмента.

Исследования динамической модели процесса концевое фрезерования позволили определить ограничения для области режимов фрезерования, при которых обеспечивается устойчивость процесса обработки. Исследованы особенности поведения технологической системы в части динамики пера лопатки с переменной жесткостью. В результате исследований запаса устойчивости системы при внешнем возбуждении от следов предшествующей обработки Кожиной С. М. установлены ограничения, накладываемые на режимы фрезерования в случае обратной связи при работе по «следу». Установлены ограничения на предельное сечение среза в зависимости от параметров обрабатываемой детали.

Проведенные соискателем экспериментальные исследования влияния отдельных параметров режима фрезерования по предельным сечениям среза удовлетворительно согласуются с результатами расчетов по разработанным математическим моделям и подтверждают возможность их дальнейшего использования при оптимизации условий обработки. Поэтому выводы диссертации №4, 5, являются полностью обоснованными и экспериментально подтвержденными.

В третьей главе автором диссертационной работы представлены результаты экспериментальных исследований процесса концевое фрезерования, приведена методика экспериментальных исследований, дано описание используемой контрольно-измерительной аппаратуры и технологического оборудования. Экспериментальные работы проведены в лаборатории кафедры «Мехатронных систем и процессов формообразования имени С.С. Силина» РГАТУ имени П.А. Соловьева», а также в производственных условиях ПАО «ОДК - Сатурн». В качестве обрабатываемых материалов автором выбрана группа титановых сплавов OT4, BT3-1, BT6, BT9, применяемых для изготовления моноколес и лопаток компрессора ГТД. Экспериментальные исследования процесса концевое фрезерования титановых сплавов проведены с использованием инструмента, как без покрытия, так и с покрытиями (AlCrN, AlTiN, (AlSiTi)N, TiN/NbN) по задней поверхности фрез.

В результате исследований Кожиной С. М. были определены механические характеристики ряда износостойких покрытий режущего

инструмента и установлено влияние покрытий на работоспособность концевых фрез: снижение износа в 3-3,5 раза, повышение минутной подачи при допустимом износе по задней поверхности 0,2 мм в 2 раза, что позволяет увеличить производительность обработки до 80%. На основе обработки экспериментальных данных исследований износа фрез с покрытиями и без них автором получена зависимость для расчетного определения скорости резания и стойкости инструмента при концевом фрезеровании титановых сплавов для заданной величина допустимого износа инструмента. Получены регрессионные модели, позволили определить составляющие силы резания и температуру резания в зависимости от режимов концевое фрезерования для группы титановых сплавов OT4; VT3-1; VT6; VT9. Сопоставление результатов расчета силы резания и температуры резания с результатами экспериментов показали их удовлетворительное совпадение с погрешностью, не превышающей 24 %, что подтверждает достоверность полученных моделей. Таким образом, представленные в работе выводы 6, 7 вполне обоснованы.

В четвертой главе приводится предложенная автором методика оптимизации операций концевое фрезерования моноколес и лопаток компрессора ГТД по технико-экономическим показателям и параметрам качества. Для оптимизации условий фрезерования лопаток и моноколес, Кожиной С. М. разработана методика, позволяющая учесть динамику процесса фрезерования, в условиях ограниченной жесткости обрабатываемой детали, также влияние следов от предшествующей обработки. Автором предложена многоуровневая система расчета технологических условий концевое фрезерования, позволяющая осуществлять доработку расчетных блоков применительно к условиям конкретного предприятия (заказчика), а также использовать их при оптимизации операций концевое фрезерования моноколес и лопаток ГТД. На основе проведенных теоретических и практических исследований соискателем предложены технологические рекомендации концевое фрезерования моноколес и лопаток компрессора ГТД, которые позволяют снизить себестоимость обработки в среднем на 15% и повысить производительность на 20%.

Выводы 8, 9 обоснованы и подтвержденные большим количеством экспериментальных исследований.

Таким образом, обоснованность научных положений и общих выводов диссертации Кожиной С. М. в целом подтверждается приведенными в работе результатами теоретических и экспериментальных исследований.

3. Достоверность и новизна полученных результатов

Достоверность и обоснованность основных положений, выводов и рекомендаций данной работы определяется использованием фундаментальных положений теории резания, теория упругости, теория автоматического управления, а также современных положений технологии машиностроения, динамики технологических систем с применением методов математической статистики, теории вероятности, многофакторного планирования и регрессионного анализа. Кроме того, достоверность теоретических положений подтверждена в работе достаточно хорошим совпадением с результатами экспериментальных исследований, успешным внедрением и использованием результатов работы на ведущем авиационном предприятии РФ ПАО «ОДК - Сатурн» при разработке и оптимизации технологических операций концевой фрезеровки моноколес и лопаток компрессора ГТД из титановых сплавов.

Научная новизна работы заключается в следующем:

Впервые представлена разработанная автором научно обоснованная концепция повышения эффективности обработки маложестких поверхностей проточной части лопаток и моноколес ГТД концевыми фрезами посредством оптимизации технологических параметров.

Таким образом, работа Кожиной С. М. содержит достоверные результаты и имеет новизну в части аналитических исследований.

4. Значимость результатов работы для науки и практики

Ценность результатов диссертационной работы для науки определяется тем, что впервые установленные закономерности формирования стружки: толщину срезов и длину контакта при взаимодействии инструмента и заготовки для процесса фрезеровки инструментом со сферической рабочей частью с учетом подачи по криволинейной траектории. Диссертантом получена математическая модель расчета составляющих сил резания и температуры применительно к условиям концевой фрезеровки деталей, имеющих малую жесткость позволившая установить деформации компонентов технологической системы в зависимости от схемы закрепления детали. Разработана динамическая модель позволившая определить зону устойчивости процесса концевой фрезеровки деталей при переменной жесткости с учетом режимов обработки и характеристик инструмента. Полученная модель тепловых процессов для граничных условий 3-го рода и нестационарных условий концевой фрезеровки позволила установить, что температура в режущем лезвии изменяется циклически и может существенно

влиять на хрупкое разрушение покрытия и режущего лезвия, а также ограничивать стойкость инструмента.

Практическая ценность работы

В результате теоретических и экспериментальных исследований разработаны методика и алгоритм оптимизации технологических операций концевое фрезерования моноколес и лопаток компрессора ГТД, обеспечивающая получение минимальной себестоимости обработки при заданных ограничениях. Система ограничений учитывает конструкцию и динамические характеристики детали, инструмента и технологического оборудования. Определены зоны устойчивости процесса обработки, которые позволили разработать рекомендации, к режимам реализации процесса, конструктивным параметрам инструмента и оборудования. Разработан пакет прикладных программ для оптимизации условий концевое фрезерования. Внедрены в производство ПАО «ОДК - Сатурн» технологические рекомендации концевое фрезерования моноколес и лопаток компрессора ГТД, которые позволяют снизить себестоимость обработки в среднем на 15% и повысить производительность на 20%.

5. Общая оценка работы

5.1. Степень завершенности и качество оформления

Рецензируемая диссертация представляет собой завершенную работу и состоит из введения, четырех глав, основных выводов, списка литературы и приложений. Работа составляет 176 страниц, включает 113 рисунков, 14 таблиц и 116 наименований литературы.

Язык и стиль работы технически грамотный. Изложение материала логически и структурно обосновано, разделы работы взаимосвязаны. Текстовый материал хорошо подготовлен и иллюстрирован. В целом оформление соответствует новым стандартам.

5.2 Полнота публикации результатов работы

Основные результаты и положения диссертации Кожиной С. М. прошли апробацию на различных научно-технических конференциях и семинарах. По материалам диссертации опубликовано 6 печатных работ, в том числе 4 работы в ведущих рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ.

5.3 Оценка автореферата

В автореферате кратко изложены все основные научные положения диссертации, включая выводы. Содержание автореферата полностью соответствует представленной диссертации и требованиям ВАК РФ.

6. Замечания по работе

1. Как при определении ограничения по устойчивости процесса фрезерования ф. (2.82) учитывается жесткость режущего инструмента?

2. В работе указывается, что износостойкие покрытия могут оказывать существенное влияние на процесс фрезерования. Как методика оптимизации режимов фрезерования учитывает различные износостойкие покрытия?

3. При фрезеровании инструментами с радиусной рабочей частью скорость резания изменяется вдоль режущей кромки фрезы. Возникает вопрос, какое значение скорости резания автор принимает при выдаче рекомендаций, записываемых в технологическую карту обработки детали?

4. Во время проведения экспериментальных исследований, диссертантом использовались фрезы только двух диаметров, с одинаковым количеством зубьев. С чем связано данное ограничение номенклатуры используемых фрез?

5. Полученные диссертантом регрессионные зависимости температуры резания и составляющих силы резания от режимов обработки проведены только для группы титановых сплавов, и не ясно, могут ли использоваться для других материалов?

6. На странице 143, в выводе 1, диссертант среди прочего говорит, что проведенные исследования позволяют увеличить производительность обработки **на 80%**. На странице 158 диссертационной работы, автор пишет, что исследования показали увеличение производительности обработки **на 20 %** и снижение себестоимости на 15%. В общих выводах работы (страница 161, вывод б), говорится, что проведенные исследования позволяют увеличить производительность обработки **до 80%**. Это также представлено в копии акта внедрения, страница 176. Вероятно, автор работы допустил ошибку в 1 выводе на странице 143. В итоге какой экономический эффект (рублей в год) для ПАО «ОДК - Сатурн» принесли результаты диссертационной работы Кожиной Светланы Михайловны?

7. Заключение

На основании вышеизложенного считаю, что рассматриваемая диссертация Кожиной С. М. по глубине теоретических исследований и практической ценности является завершенной научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований разработаны теоретические положения, совокупность которых можно

квалифицировать как решение крупной научной проблемы связанной с повышением эффективности механообработки в машиностроении, внедрение результатов которой имеет существенное значение для развития экономики страны и повышения ее обороноспособности.

Диссертационная работа соответствует специальности 05.02.07 – «Технология и оборудование механической и физико-технической обработки», удовлетворяет требованиям п. 9-11, 13, 14 «Положения о присуждении ученых степеней» ВАК Министерства образования и науки Российской Федерации (утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. №842), предъявляемым к диссертациям, представленным на соискание ученой степени кандидата наук. Автор диссертации Кожина Светлана Михайловна заслуживает присуждения ей ученой степени кандидата технических наук.

Отзыв подготовлен на основании заключения кафедры «Материалы, технологии и конструирования машин» ФГБОУ ВО «ПНИПУ» по результатам обсуждения диссертации на заседании, протокол № 2 от 29 апреля 2019 г.

Доктор технических наук, профессор
кафедры «Материалы, технологии и
конструирования машин»

«Пермского национально исследовательского
политехнического университета»

Муратов Карим Равилевич 

Шифр и наименование научной специальности: 05.02.08 - Технология машиностроения.

614990, г Пермь, улица Комсомольский проспект, 29.

Тел.: +7(342)2198-023, E-mail: detali@pstu.ru

Подпись доктора технических наук,
профессора кафедры «МТ и КМ» Муратова Карима Равилевича
удостоверяю:

Учёный секретарь Учёного Совета ПНИПУ,
к.ист.н, доцент

 Макаревич Владимир Иванович