

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д212.210.01 НА БАЗЕ
ФГБОУ ВО «РЫБИНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АВИАЦИОННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ П.А. СОЛОВЬЕВА» ПО
ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ ДОКТОРА НАУК

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от 14.05.2019 № 230

О присуждении Никитину Сергею Петровичу, гражданину Российской Федерации, ученой степени доктора технических наук.

Диссертация «Математическое моделирование термомеханических процессов в зоне резания элементарных поверхностей при профильном глубинном шлифовании, обеспечивающее заданный предел выносливости лопаток турбин ГТД» по специальности 05.02.08 «Технология машиностроения» принята к защите 11.02.2019, протокол № 227-п, диссертационным советом Д212.210.01 на базе ФГБОУ ВО «Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева» по адресу 152934, г. Рыбинск, Ярославской области, ул. Пушкина, 53, действующего на основе приказа №714/нк от 02.11.2012 г.

Соискатель Никитин Сергей Петрович, 1962 года рождения, диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.02.07 «Технология и оборудование механической и физико-технической обработки» «Снижение уровня колебаний и динамических нагрузок в станочных приводах с планетарными механизмами» защитил в 1997 году, в диссертационном совете, созданном на базе ФГБОУ ВО «Московский государственный технологический университет «Станкин». Сдал кандидатский экзамен по научной специальности 05.02.08 «Технология машиностроения» в Пермском национальном исследовательском политехническом университете 10 октября 2018 г.

Работает доцентом кафедры «Инновационные технологии машиностроения» в ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет».

Диссертация выполнена на кафедре «Инновационные технологии машиностроения» в ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет».

Научный консультант – доктор технических наук, профессор **Макаров Владимир Федорович**, профессор кафедры «Инновационные технологии машиностроения» Пермского государственного национального исследовательского университета.

Официальные оппоненты:

Киселев Евгений Степанович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Технология машиностроения» ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный технический университет»;

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

Зверовщиков Александр Евгеньевич, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Технология машиностроения» ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет»

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация ОАО "Институт технологии и организации производства - НИИТ", г. Уфа в своем положительном заключении, подписанном членом научно-технического совета, доктором технических наук, профессором **Кудояровым Ринатом Габдулхаковичем** и утвержденном генеральным директором, доктором технических наук, профессором **Юрьевым Виктором Леонидовичем**, указала, что работа соответствует требованиям, предъявляемым к диссертациям по техническим наукам, а ее автор Никитин Сергей Пет-

рович заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 05.02.08 – «Технология машиностроения».

Соискатель имеет 81 опубликованную работу, в том числе 3 в издании, индексируемом в наукометрической базе данных *Scopus*, 19 - в рецензируемых научных журналах и изданиях, рекомендованных ВАК РФ; 1 авторское свидетельство на регистрацию программы для ЭВМ. В их числе:

1. Nikitin S.P. Dynamic Simulation of Machining, with Interaction of the Elastic and Thermal Systems / S.P. Nikitin // Russian Engineering Research. – 2008. – Vol. 28, № 9. – P. 896-900.

2. Nikitin S.P. Influence of technological parameters on the thermodynamic system of cutting equipment / S.P. Nikitin, V.K. Zal'taberg // Russian Engineering Research. – 2012. – Vol. 32, № 1. – P. 90-92.

3. Khanov A.M. Elastic and Thermal Dynamic Processes in the Grinding of Thermoprotective Coatings / A.M. Khanov, S.P. Nikitin, L.D. Sirotenko, E.O. Trofimov, E.V. Matyqullina // Russian Engineering Research. – 2015. Vol. 35, № 9. – P. 708-710. – DOI 10.3103/S1068798X5090087

4. Никитин С.П. Моделирование динамики процесса механической обработки с учетом взаимодействия упругой и тепловой систем станка (статья). // СТИН. - 2008. - №6. - С. 8-13.

5. Никитин С.П. Моделирование процесса резания при шлифовании с учетом взаимодействия упругой и тепловой систем. // Вестник УГАТУ. - Уфа, Россия, 2009.- Т. 12. - №4(33). - С. 61-65.

6. Никитин С.П. Влияние технологических параметров на характеристики теплодинамической системы технологического оборудования при резании / Никитин С.П., Зальцберг В.К. // СТИН. – 2011. - №10. - С. 15-18.

7. Никитин С.П. Влияние режимов резания на средние температуры при глубинном шлифовании. // Вестник УГАТУ. - Уфа, Россия, 2012.- Т.16. - №4(49). - С. 78-84.

8. Никитин С.П. Теоретическое исследование устойчивости при обработке шлифованием.// Вестник УГАТУ.- Уфа, Россия, 2013.-Т. 17. - №8(61).- С. 38-44.

9. Никитин С.П. Математическое моделирование шлифовального станка с учетом взаимодействия упругой, тепловой подсистем и рабочего процесса. // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. - Самара, изд-во Самарского научного центра РАН, 2013.- Т. 15. - №4(2). - С. 391-395.

10. Макаров В.Ф. Влияние условий формообразования на качество поверхностного слоя лопатки при глубинном профильном шлифовании. / Макаров В.Ф., Никитин С.П. // Научно-технические технологии в машиностроении. - 2015. - №8 (50) - С. 38-44.

11. Макаров В.Ф. Повышение качества и производительности при профильном глубинном шлифовании турбинных лопаток. / Макаров В.Ф., Никитин С.П. // Научно-технические технологии машиностроения. - 2016 - №5(59) – С. 17-24.

12. Макаров В.Ф. Кинематика формообразования элементарных поверхностей при глубинном профильном шлифовании турбинной лопатки (статья). / Макаров В.Ф., Никитин С.П. // Вестник Рыбинского гос. авиац. технологического университета им. П.А. Соловьева. -2017. - №1(40) – С. 173...181.

13. Макаров В.Ф. Повышение эффективности профильного глубинного шлифования лопаток турбин на многокоординатных станках с ЧПУ. / Макаров В.Ф., Никитин С.П. // Научно-технические технологии машиностроения. – 2018. - №4(82) – С. 21-28.

В научных публикациях представлена методология обеспечения заданного предела выносливости лопаток турбин при глубинном шлифовании на основе дифференциации исходного профиля на элементарные поверхности и математического моделирования термомеханических процессов в зоне обработки элементарных поверхностей профиля, способ дифференциации обрабатываемого профиля на элементарные поверхности, способ выбора критической элементарной поверхности, метод прямой аналогии для описания профильного глубинного шлифования в виде термомеханической системы, математическая модель термомеханической системы при глубинном шлифовании.

На диссертацию и автореферат поступил 21 положительный отзыв:

1. к.т.н., Ингеманссон Александр Роналдович, главный технолог АО «Федеральный научно-производственный центр «Титан-Баррикады», г. Волгоград. Замечания:

1. В автореферате не приведены сведения о сравнении эффективности рассматриваемой технологии получения сложных поверхностей лопаток газотурбинных двигателей способом глубинного шлифования по сравнению с развивающейся технологией аддитивного производства лопаток ГТД из металлических порошков;

2. В автореферате не приведены сведения о том, как предложенная методология многоэтапного определения режимов и параметров обработки, предусматривающая возможную необходимость промежуточных корректировок технологии при выявлении неустойчивости, позволит снизить затраты по сравнению с принятым на сегодняшний день технологическим проектированием. При этом в пункте 11 выводов по работе упоминается, что использование методологии позволяет уменьшить время на технологическую подготовку производства в 1,5-2 раза;

3. В автореферате не приведены сведения о примере расчета экономического эффекта от реализации предлагаемых мероприятий по сравнению с принятой на сегодняшний день технологией;

4. В автореферате присутствует неточность: в заключении по шестой главе упоминается ожидаемый экономический эффект до 2 млн.руб., а в пункте 11 выводов по работе - до 20 млн. руб.

2. д.т.н., проф. Смыслов Анатолий Михайлович, ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» г. Уфа. Замечания:

1. Следует отметить недостаточное подтверждение выдвинутой гипотезы о причинно-следственной связи предела выносливости с режимами глубинного шлифования.

2. На графике (рис.12), демонстрирующем различие показателей качества поверхностного слоя после глубинного шлифования, на поверхности указаны

растягивающие остаточные напряжения, что несколько расходится с данными других авторов, отмечающих наличие сжимающих остаточных напряжений.

3. Некоторые рисунки автореферата в черно-белом изображении (рис.1, 12) не позволяют в полной мере оценить представленную информацию.

3. д.т.н., проф. Ямников Александр Сергеевич, ФГБОУ ВО Тульский государственный университет, г. Тула. Замечание:

1. На с. 28 реферата указано, что подача на черновой правке меньше, чем на чистовой в 2 раза, что противоречит общепринятым режимам.

4. д.т.н., проф. Кропоткина Елена Юрьевна, ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет «СТАНКИН», г. Москва. Замечания:

1. Не ясно, в какой степени при математическом моделировании глубинного шлифования учитывается твердость шлифовального круга, которая значительно влияет на показатели качества поверхностного слоя.

2. Не ясно, как в линейной модели термомеханической системы удалось отразить влияние изменения скорости круга и сечения стружки на источники тепла в тепловой подсистеме.

5. д.т.н., проф. Радкевич Михаил Михайлович, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», г. Санкт-Петербург. Замечания:

1. В автореферате нечетко указаны границы для оценки устойчивости термомеханической системы при математическом моделировании глубинного шлифования (стр. 26).

2. Неясно, насколько представленный метод моделирования термомеханических процессов в зоне обработки имеет универсальный характер и возможно ли его использование для других методов обработки и других материалов.

3. На рисунке 12а показано влияние схемы шлифования на изменение распределения остаточных напряжений по глубине слоя h . Из рисунка не понятно, была ли проведена статистическая обработка результатов, поскольку графики построены по одной точке.

4. Желательно, рекомендации по разработке технологии глубинного шлифования на многокоординатных станках с ЧПУ довести до нормативных документов. Из текста автореферата - это не следует.

6. д.т.н., проф. Попов Михаил Егорович, ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет», г. Ростов-на-Дону. Замечания:

1. Назначение режимов обработки для всего обрабатываемого профиля на основе выбора наиболее критической поверхности не всегда может быть экономически и функционально целесообразным, так как на других поверхностях профиля эти показатели будут завышенными и не требоваться исходя из функционального назначения поверхности, а в ряде случаев могут оказывать отрицательное влияние на функционирование.

2. В работе недостаточно раскрыта роль СОЖ в формировании характеристик термомеханической системы станка для глубинного шлифования.

7. д.т.н. проф. Марков Андрей Михайлович, ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет», г. Барнаул. Замечания:

1. Из автореферата непонятно, как проводились проверки модели по критерию Пирсона - рис. 6 автореферата и текст на стр. 16 (обозначения приведены для критерия Стьюдента, а критическое значение 5,99 в таблицах найти не удалось).

2. Также непонятно, что представляет собой функция Γ в правой части дифференциальных уравнений общей модели динамической системы (формула (4) автореферата). Поэтому непонятно:

- какие допущения были сделаны при разработке этой модели;
- является ли модель термомеханической системы линейной;
- как проводилась проверка ее устойчивости по критерию Найквиста и что собой представляет структурная схема системы;
- что конкретно рассчитывает разработанная автором программа и чем эти расчеты отличаются от результатов моделирования в 81тиИпк.

3. В автореферате автор заявляет, что в работе использована схема формообразования, предложенную Ю.К. Новоселовым, но никакой дополнительной информации об этом не приводит.

4. Также непонятно, как используются в работе регрессионные зависимости (5) - (8), какова их точность и возможно ли их использование в динамике.

8. д.т.н., проф. Гузеев Виктор Иванович, ФГБОУ ВО «Южно-уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)», г. Челябинск. Замечания:

1. В теоретической модели контактное взаимодействие шлифовального круга и обрабатываемой поверхности сложного профиля слишком идеализировано.

2. Не отображено, как учитывались особенности отвода тепла из зоны резания с СОТС при использовании высокопористых кругов.

9. д.т.н., проф. Болдырев Александр Иванович, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», г. Воронеж. Замечания:

1. Вопросы устойчивости процесса глубинного шлифования являются достаточно дискуссионными до настоящего времени, поэтому объяснение возрастания температуры в зоне резания только нарушением устойчивости термомеханической системы, на наш взгляд, не вполне доказано;

2. Не совсем понятно, в каких случаях использовать для прогноза показателей качества поверхностного слоя теоретические модели, а когда - экспериментальные;

3. В списке публикаций по теме диссертации, приведенном на с. 30-32, приведены работы, которые в основном, выполнены в соавторстве; список не отражает объем публикаций в печатных листах и не ясно, какая доля принадлежит лично автору исследования.

10. д.т.н., проф. Гусев Владимир Григорьевич, ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет им. А. Г. и Н. Г. Столетовых», г. Владимир. Замечания:

1. автор предложил рациональные режимы профильного шлифования лопаток ГТД, но не уделил внимания оптимизации режимов резания, что не позволяет использовать в полной мере имеющиеся потенциальные возможности в повышении эффективности исследуемого процесса обработки сложных ответственных деталей на современном многоосевом шлифовальном оборудовании с ЧПУ.

11. д.т.н., проф. Хандожко Александр Владимирович, ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет», зав. каф. Металлорежущие станки и инструменты», г. Брянск. Замечания:

1. В тексте автореферата не в полной мере просматривается, как автор решает задачу, вынесенную в название работы: «...обеспечивающее заданный предел выносливости лопаток турбин...". В тексте речь идет, в основном, об обеспечении определенных параметров качества поверхности, но не свойств детали (материала).

2. Автор, анализируя колебательные процессы при шлифовании, не уточняет схем и способов базирования и закрепления детали, которые могут оказывать влияние, сопоставимое с параметрами процесса шлифования.

3. На с. 21 автор отмечает, что на поверхности детали формируется слой с растягивающими нормальными остаточными напряжениями. На с. 22, 23 речь идет уже о сжимающих остаточных напряжениях на поверхности. Неясно, удалось ли автору организовать процесс шлифования так, чтобы на поверхности были именно сжимающие нормальные остаточные напряжения или знак напряжений определяется в ходе расчета по зависимости (7), с. 22 ?

4. К тесту автореферата есть замечания формального характера. Например, из формулировки выдвинутой научной гипотезы (с. 5) следует, что профильная шлифовка замка лопатки возможна только на многокоординатных станках с ЧПУ. Эта задача вполне успешно решается и на специальных станках (с ЧПУ и без). На с. 21 приведены значения микротвердости, выраженные в единицах НВ. Рекомендовано использовать для правки ролики производства Кабардино-Балкарии (завод, характеристики ?).

12. д.т.н., проф. Козлов Александр Михайлович, ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет, г. Липецк. Замечания:

1. из автореферата неясно, почему сначала в работе используется термин «критическая элементарная поверхность», по которой назначаются режимы резания для всей операции (с. 12), а затем вводится термин «**наиболее** критическая поверхность» (с. 17) и чем они отличаются;

2. что понимается под термином «устойчивость термомеханической системы» (с. 17), по каким критериям она определяется и в каких пределах допустима? Из автореферата неясно, как применялся критерий Найквиста - для системы, которая разомкнутом состоянии устойчива, или для системы, которая содержит неустойчивые элементы;

3. на с. 18 упоминается «передаточная характеристика процесса шлифования», однако ее математическое выражение в тексте не приводится;

4. на с. 28 автореферата автор отмечает, что целесообразно применять СОТС под давлением, однако какова величина рекомендуемого давления, не указано;

5. в качестве технологической рекомендации по внедрению новой методологии обеспечения качества, автор рекомендует, при необходимости, использовать дробеметную установку. Однако размер дроби не позволит упрочнить угловые поверхности профиля замка лопатки турбины.

13. д.т.н., проф. Степанов Юрий Сергеевич, ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева», г. Орел. Замечания:

1. Не совсем ясно, как в математической модели термомеханической системы отображается тепловой поток в заготовку от разных источников энергии: энергии деформации и силы трения по задней поверхности зерна.

2. Не совсем ясно, как учитывалось влияние дисбаланса шлифовального круга на характеристики качества поверхностного слоя и как обеспечивалась балансировка абразивного инструмента после каждой правки.

3. Остаточные напряжения определялись по методу академика Н.Н. Давиденкова. Не ясно, сколько образцов-пластин вырезалось для построения эпюр распределения остаточных напряжений по глубине поверхностного слоя.

14. д.т.н., проф. Репко Александр Валентинович, Воткинский филиал ФГБОУ ВО «Ижевский государственный технический университет», г. Воткинск. Замечания:

1. Не оговорены методы и точность получения исходных данных для математической модели термомеханической системы станка.

2. Не ясно, как учтены при моделировании колебания в термомеханической системе, вызванные наводимой волнистостью и дисбалансом шлифовального круга.

15. д.т.н., проф. Блюменштейн Валерий Юрьевич, ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф.Горбачева», г. Кемерово. Замечания:

1. Сложной и несколько размытой представляется формулировка цели работы.

2. Автор использует термин «проход» при принятом в настоящее время термине «рабочий / вспомогательный ход».

3. Известно, что остаточные напряжения - это тензорная характеристика. Из автореферата непонятно, о каких компонентах остаточных напряжений идет речь; что собой представляют другие компоненты?

16. д.т.н., профессор Вайнер Леонид Григорьевич, ФГБОУ ВО Тихоокеанский государственный университет, г. Хабаровск. Замечания:

1. Из реферата не ясно, какие зависимости использованы для определения удельного числа зерен в зоне контакта шлифовального круга с заготовкой при глубинном шлифовании.

2. Выделение элементарных поверхностей обрабатываемого профиля не позволяет точно оценить пятно контакта шлифовального круга с заготовкой, 3-D моделирование здесь более предпочтительно.

17. д.т.н., проф. Зубарев Юрий Михайлович, ФГБОУ ВО «С-Петербургский

политехнический университет Петра Великого», г. Санкт-Петербург. Замечания:

1. Не совсем ясно, чем определяется выбор экспоненциальной модели распределения припуска при профильном глубинном шлифовании.

2. В своей работе автор базируется на зависимостях А.Н. Резника, Ю.К. Новосельцева, которые относятся к условиям маятникового шлифования, особенности профильного глубинного шлифования в автореферате отражены недостаточно.

3. В эмпирических зависимостях степенные показатели представлены с третьим знаком после запятой, что вряд ли повышает точность вычисления, ведь погрешность экспериментальных данных составляет 6...8 и до 10%.

4. При рассмотрении волнистости на рабочей поверхности круга не учитывается упругие деформации самого зерна в связке, что для крупнозернистых кругов весьма актуально.

5. Некоторые замечания по терминологии:

а) не многопроходное шлифование, а многоходовое;

б) съем не за проход, а за рабочий ход;

в) не высокопористые круги, а крупнопористые.

18. д.т.н., проф. Рахимянов Харис Магсуманович, зав. каф. «Технология машиностроения» ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет», г. Новосибирск. Замечания:

1. В описании научной новизны исследования заявлен способ дифференциации обрабатываемого профиля лопаток ГТД на элементарные поверхности (стр. 6 автореферата). Однако в тексте автореферата не представлены какие-либо особенности заявленному способа. В связи с этим оценить новизну и научный уровень данного пункта не представляется возможным.

2. На стр. 19-21 автореферата автор сообщает о проведении экспериментальных исследований влияния условий глубинного шлифования на величину остаточных напряжений в поверхностном слое при обработке сложнопрофильных поверхностей. Для оценки величины напряжений использовался ме-

тод Н.Н Давиденкова. При этом не раскрывается методика, каким образом данный метод автор смог применить к сложнопрофильным поверхностям.

3. На стр. 28 представлена информация о применении поверх постного пластического деформирования для обеспечения требований по сопротивлению усталости с использованием дробеметной установки. Не ясно, каким образом исследование процессов, происходящих в поверхностном слое при глубинном шлифовании путем математическую моделирования, связано с применением ГШД, и для чего в автореферате приведены данные сведения.

4. Следует отметить недостаточное качество оформления рисунков в автореферате. Так, часть символов совершенно невозможно прочитать (рис. 1, рис. 2, г стр. 11, рис 4,5 стр.14. рис.8, стр. 19.). Имеющие место словосочетания и выражения: «операционное счисление» (стр. 7), «довольно фундаментально» (стр.9), «достоверность результатов обеспечивается согласием с экспериментальными данными» (стр.8), предложение «Это позволяет использовать для классификации движения формообразования» (стр. 11-12) и др. говорят о слабой проработке текста автореферата.

19. д.т.н., проф. Афонин Андрей Николаевич, профессор каф. материаловедения и нанотехнологий НИУ «БелГУ», г. Белгород. Замечания:

1. Из работы неясно, каково влияние взаимного расположения элементарных поверхностей на термомеханические условия их шлифования.

2. Не ясна причина, по которой увеличение степени наклепа обработанной поверхности приводит к снижению предела выносливости детали.

3. При моделировании тепловых процессов с помощью МКЭ целесообразно было бы просчитать сам процесс теплообразования при шлифовании, что позволяют сделать современные программные продукты.

20. д.т.н., проф. Бочкарёв Петр Юрьевич, проф. каф. «Техническая механика и детали машин» ФГБОУ ВО «СаратГТУ» им. Ю.А. Гагарина, г. Саратов. Замечания:

1. В тексте автореферата целесообразно уточнение, что технология профильного глубинного шлифования влияет на формирование

параметров качества поверхностного слоя и, как следствие, обеспечивает заданный предел выносливости лопаток турбин, являющийся эксплуатационной характеристикой.

2. Недостаточно ясно представлена модель, реализующая этап изучения устойчивости процесса глубинного шлифования (стр. 26) при определении рациональных режимов резания.

21. д.т.н., Шендеров Илья Борисович, зам. генерального директора по науке АО «ПНИТИ», г. Пермь. Замечания:

1. В формулировке научной гипотезы назначение рациональных режимов резания признается единственным способом обеспечения установленных показателей качества, а не одним из ряда направлений, включая конструкторские и металлургические решения. Кроме того, понятие «рациональные» не поясняется, так что его можно рассматривать неоднозначно. Например, если под рациональным понимать решение, минимизирующее какой-то функционал, то рациональный режим резания будет характеризоваться только одним набором показателей. Таким образом, формулировка научной гипотезы не подразумевает обеспечение устойчивости качества продукции к допустимым случайным отклонениям технологических характеристик от заданных.

2. В автореферате приведены уравнения регрессии (5)-(8), построенные по полученным автором опытным данным, но не приводятся сведения об оценке погрешности этих статистических уравнений.

3. Предложенная автором модель (3)-(8) учитывает глубину шлифования, скорость перемещения заготовки, характеристику твердости шлифовального круга. Из

описания не ясно, существенно ли влияние на выходные данные скорости шлифовального круга и характеристик теплоотводящей среды (свойств, расхода).

4. Судя по пункту 2 «Общих выводов», конечной целью работы является управление параметром шероховатости и пределом усталости материала поверхностного слоя. Связь первой из этих характеристик с непосредственно из-

меряемыми параметрами процесса резания описывается уравнением регрессии (5), а вторая - с помощью промежуточных уравнений (6) и (7). Из текста не ясно, какая экономия в экспериментальных исследованиях здесь получена.

5. В описании содержания главы 4 приводятся противоречивые утверждения: на стр. 21 - «степень наклепа мало изменяется от варьируемых параметров» - глубины резания и скорости заготовки; на стр. 22 - «с увеличением глубины шлифования степень наклепа возрастает, с возрастанием скорости детали степень наклепа уменьшается».

Численные значения не приводятся, поэтому судить о степени влияния наклепа на усталостную прочность материала по формуле (8) затруднительно. Судя по отрицательному знаку коэффициента влияния, наклеп снижает предел выносливости.

6. По формуле (8) получается, что растягивающие остаточные напряжения в поверхностном слое детали повышают интегральный предел выносливости. Возможно, неверно указан знак «+» у коэффициента влияния или под значением «максимальных остаточных напряжений сжатия в поверхностном слое» автор предполагает абсолютную величину напряжений.

7. В разделе «Общие выводы», п. 9 на стр. 29, один из выводов сформулирован не конкретно: «обеспечение устойчивости процесса ... на основе ... использования критерия Найквиста», без указания допустимых значений критерия.

8. Во второй части этого пункта «Общих выводов» приводятся рекомендации для обработки заготовок из сплава ЖС26-ВИ, а в формулах (5) и (7), используемых для реализации этих рекомендаций, приведены полученные опытным путем корреляционные зависимости для сплава ЖС26УВИ.

В этой же рекомендации записано ограничение: при чистовом проходе параметр шероховатости Ra не должен превышать значений 0,63...2,5 мкм, а из пункта 2 «Общих выводов» следует, что заданные показатели качества (видимо, конструкторской документацией) - Ra не более 0,63 мкм, что существенно ниже уровня, указанного в пункте 6.

9. Представленная работа выполнена применительно к заданной конструкторской документации детали из конкретного заданного материала. Поскольку речь идет о массовом производстве деталей ответственного назначения, такой большой объем проведенных исследований оправдан. Однако из представленных данных не ясно, в какой степени полученные результаты, кроме общих методических решений, могут использоваться при изготовлении иных деталей и из иных материалов.

Выбор официальных оппонентов обосновывается их достижениями, известностью в области технологии машиностроения, наличием публикаций в ведущих журналах, глубокими профессиональными знаниями, что позволяет им определить научную новизну и практическую ценность результатов исследований.

Выбор ведущей организации обосновывается тем, что основным видом деятельности этой организации являются научные исследования и разработки в области технологии изготовления деталей авиационных двигателей, термодинамики и технологии нестационарной механической обработки, стабилизации технологических параметров, разработки специализированного оборудования с числовым программным управлением для лезвийной и абразивной обработок лопаток газотурбинных двигателей.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

разработана методология обеспечения заданного уровня предела выносливости лопаток турбин при профильном глубинном шлифовании с помощью математического моделирования термомеханических процессов в зоне обработки элементарных поверхностей сложного профиля;

предложены способ дифференциации обрабатываемого профиля на элементарные поверхности при реализации профильного глубинного шлифования с целью формирования расчетной схемы и выбора наиболее критической поверхности обрабатываемого профиля для назначения научно-обоснованных режимов резания; метод прямой аналогии для представления профильного

глубинного шлифования в виде термомеханической системы, отображающей упруго-деформационные и тепловые процессы в станке, и позволяющей прогнозировать устойчивость и выходные параметры процесса глубинного шлифования, а также других видов механической обработки; математическая модель термомеханической системы при глубинном шлифовании, позволяющая выбрать наиболее критическую элементарную поверхность, по которой назначаются рациональные режимы обработки всего обрабатываемого профиля лопатки; регрессионная модель, устанавливающая зависимость предела выносливости от параметров качества поверхностного слоя, позволяющая прогнозировать значение предела выносливости лопаток турбины на этапе технологической подготовки; модель рационального съема припуска при глубинном шлифовании на основе экспоненциальной зависимости величины припуска от номера прохода.

доказана возможность технологического обеспечения предела выносливости и повышения качества поверхностного слоя лопаток турбин ГТД путем задания рациональных режимов резания при профильном глубинном шлифовании на многоосевых станках с ЧПУ за счет определения наиболее критичной элементарной поверхности обрабатываемого профиля лопатки и прогноза параметров обработки на основе математического моделирования термомеханических процессов в зоне резания.

введены понятия устойчивости термомеханической системы при глубинном шлифовании, которая определяет качество обработки и предел выносливости лопаток турбин; критической элементарной поверхности обрабатываемого профиля, выявляемой с помощью математического моделирования термомеханических процессов в зоне резания и позволяющей назначать режимы глубинного шлифования на основе прогноза устойчивости технологического процесса профильного глубинного шлифования.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

доказаны основные закономерности профильного глубинного шлифования на многокоординатных станках с ЧПУ и взаимосвязи технологических ре-

жимов глубинного шлифования с условиями формообразования элементарных поверхностей заготовки (фактические припуски, составляющие силы резания, средние температуры и удельные тепловые потоки), параметрами качества поверхностного слоя и пределом выносливости лопаток турбин;

применительно к проблематике диссертации результативно (эффективно, то есть с получением обладающих новизной результатов) использованы основные положения теории резания материалов и технологии машиностроения, методы подобия, математического и физического моделирования физических процессов. Теоретические исследования проводились на основе системного анализа, с использованием теории автоматического управления, математического моделирования, компьютерных технологий, основ теории шлифования и резания. Экспериментальные исследования проводились в специальных лабораторных и производственных условиях с использованием современных станков, лабораторного и измерительного оборудования. Для обработки экспериментальных данных применялись современные информационные технологии, методы планирования эксперимента и регрессионный анализ.

изложены основные положения методологии обеспечения заданного уровня предела выносливости лопаток турбин при профильном глубинном шлифовании на основе дифференциации исходного профиля на элементарные поверхности и математического моделирования термомеханических процессов в зоне резания; дифференциации обрабатываемого профиля на элементарные поверхности и формирования расчетной схемы с целью математического описания процесса профильного глубинного шлифования и выбора наиболее критической поверхности для задания научно-обоснованных режимов резания; прямой аналогии для описания профильного глубинного шлифования в виде термомеханической системы, отображающей упруго-деформационные и тепловые процессы в станке, и позволяющей прогнозировать устойчивость и выходные параметры процесса глубинного шлифования, а также других видов механической обработки;

раскрыты взаимосвязи между режимами профильного глубинного шлифования и характеристиками круга с качеством поверхностного слоя, пределом выносливости турбинной лопатки, которые обеспечивают возможность управления эксплуатационными показателями деталей на этапе технологической подготовки производства;

изучены причинно-следственные связи процессов в термомеханической системе при профильном глубинном шлифовании лопаток турбин, влияние их на показатели качества поверхностного слоя и предел выносливости лопаток турбин;

проведена модернизация станка ЛШ220 с ЧПУ для проведения экспериментальных исследований составляющих силы резания в лабораторных условиях, станка ELB-SS13L с ЧПУ для исследования средней температуры шлифования елочного хвостовика лопатки турбины; электродинамического стенда ВЭДС–200А для испытаний специальных образцов-имитаторов первой впадины елочного хвостовика.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

разработаны и внедрены инженерная методика и алгоритм задания режимов резания при профильном глубинном шлифовании, обеспечивающие требуемые показатели качества обработки и предела выносливости лопаток турбин; компьютерная программа «ПАН», позволяющая на этапе технологической подготовки производства прогнозировать точность обработки и качество поверхностного слоя при профильном глубинном шлифовании на многоосевых станках с ЧПУ (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016661193); критерии выбора критической элементарной поверхности и назначения режимов глубинного шлифования; в ОАО «Машиностроитель»; переданы для внедрения в АО «ОДК-ПМ» и АО «ОДК-Авиадвигатель» г. Пермь; а также в учебный процесс при подготовке бакалавров и магистров по специальности «Технология машиностроения» в ПНИПУ. Использование методологии в АО «ОДК-Авиадвигатель» и АО

«ОДК-ПМ» позволяет уменьшить время на технологическую подготовку производства (в 1,5-2 раза), повысить производительность изготовления при обеспечении качества и сопротивления усталости турбинных лопаток (до 2 раз). Общий экономический эффект от реализации мероприятий и снижения дефектов при глубинном шлифовании лопаток турбин составит не менее 20 млн. руб. в год.

определены области практического использования методологии обеспечения заданного уровня предела выносливости лопаток турбин при разработке технологии профильного глубинного шлифования на многоосевых станках с ЧПУ опорных поверхностей лопаток турбин газотурбинных двигателей ПС-90А, ПД-14, ПД-35 на основе математического моделирования термомеханических процессов в зоне обработки элементарных поверхностей.

созданы система типовых математических моделей основных подсистем термомеханической системы при глубинном шлифовании на основе метода прямой аналогии для компьютерной программы ПАН; рекомендации по использованию компьютерной программы ПАН для анализа динамического качества термомеханической системы; набор программ в *MathCAD* и *Excel* для подготовки исходных данных математических моделей, расчета показателей качества поверхностного слоя и предела выносливости, которые позволяют технологу назначать научно-обоснованные режимы резания при профильном глубинном шлифовании, обеспечивающие требуемые показатели качества обработки и заданный предел выносливости лопаток турбин.

представлены технологические рекомендации по выбору характеристик шлифовального круга и режимов резания на основе итерационной модели назначения режимов шлифования для обеспечения заданных показателей качества каждой из обрабатываемых элементарных поверхностей сложного профиля.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

для экспериментальных работ - результаты получены на сертифицированном оборудовании, при обработке экспериментальных данных использова-

лось сертифицированное программное обеспечение, апробированные пакеты прикладных программ, общепринятые методы исследования процессов резания.

теория построена на известных, проверяемых данных, используемых в технологии машиностроения и теории резания, и согласуется с опубликованными результатами компьютерного моделирования и экспериментальными данными, в том числе других авторов.

идея базируется на практике и анализе проблем профильного глубинного шлифования опорных поверхностей лопаток в АО «ОДК-Авиадвигатель», «ОДК-ПМ» и других предприятиях авиационного двигателестроения, необходимости повышения надежности и снижения трудоемкости изготовления газотурбинных двигателей.

использованы сравнения авторских данных и данных, полученных ранее, по исследованию профильного глубинного шлифования опорных поверхностей лопаток ГТД и других деталей машиностроения.

установлено качественное соответствие полученных автором результатов с результатами работ, выполненных ранее, в частности, Волковым Д.И., Киселевым Е.С., Полетаевым В.А., Поповым А.Н., Резниковым А.Н., *Tawakoli T., Werner, G.* и др.;

использованы современные методики сбора и обработки исходной информации с обоснованием подбора объектов наблюдения и измерения.

Личный вклад соискателя состоит в:

в разработке методологии обеспечения заданного уровня предела выносливости лопаток турбин при профильном глубинном шлифовании на основе математического моделирования термомеханических процессов в зоне обработки элементарных участков поверхности сложного профиля, включающий:

- математическую модель глубинного шлифования, описывающей взаимодействие упруго-силовых, тепловых и рабочего процессов при обработке элементарного участка поверхности сложного профиля;

- способ дифференциации обрабатываемого профиля на элементарные поверхности и формирования расчетной схемы процесса профильного глубинного;

- метод прямой аналогии для представления профильного глубинного шлифования в виде термомеханической системы, отображающей упруго-деформационные и тепловые процессы в станке;

- модель рационального съема припуска при глубинном шлифовании на основе экспоненциальной зависимости величины припуска от номера прохода;

- методику и алгоритм задания режимов резания при профильном глубинном шлифовании;

- компьютерную программу «ПАН», позволяющую на этапе технологической подготовки оценить влияние режимов резания на формирование показателей качества поверхностного слоя при профильном глубинном шлифовании;

- обработку и интерпретацию экспериментальных данных, выполненных при участии автора;

- написание и оформление рукописи диссертации, подготовку основных публикаций по выполненной работе.

На заседании 14.05.19. диссертационный совет принял решение присудить **Никитину Сергею Петровичу** ученую степень доктора технических наук.

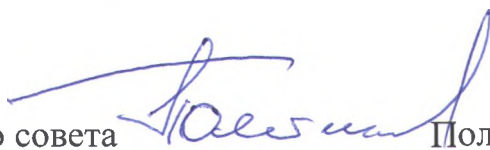
В диссертации представлена совокупность научно-обоснованных технических и технологических решений по обеспечению предела выносливости и качества поверхностного слоя турбинных лопаток при глубинном профильном шлифовании на многоосевых станках с ЧПУ, внедрение которых представляет значительный вклад в развитие современного авиадвигателестроения. Диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, которая соответствует критериям, установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней, утвержденным постановлением Правительства

Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842 (п.9), а её автор заслуживает присуждения ученой степени доктора наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 17 человек, из них 6 докторов наук 05.02.08 - Технология машиностроения, участвовавших в заседании, из 21 человека, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту 0 человек, проголосовали: за 17, против 0, недействительных бюллетеней 0.

Председатель

диссертационного совета



Полетаев Валерий Алексеевич

Ученый секретарь

диссертационного совета



Наеждин Игорь Валентинович

15.05.2019г.