

ЗАСЕДАНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 99.2.001.02

25 декабря 2024 г.

Повестка дня

**ЗАЩИТА ДИССЕРТАЦИИ Люшней Дмитрием Андреевичем
НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА ТЕХНИЧЕСКИХ
НАУК**

**«ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПНЕВМОДРОБЕСТРУЙНОГО
УПРОЧНЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ ЗА СЧЁТ
ПРИМЕНЕНИЯ РАЦИОНАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ И РЕЖИМОВ
ОБРАБОТКИ»**

Специальность:

2.5.6 – Технология машиностроения

Официальные оппоненты:

Тамаркин Михаил Аркадьевич – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Технология машиностроения» ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет», г. Ростов-на-Дону;

Швецов Алексей Николаевич – канд. техн. наук, доцент кафедры «Технология производства двигателей» ФГБОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королева», г. Самара;

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет», г. Волгоград

ЗАСЕДАНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 99.2.001.02

25 ДЕКАБРЯ 2024 г.

На заседании присутствовали члены Совета:

- | | | |
|---------------------|-------------------------------|---------------------------|
| 1. Табаков В.П. | д-р. техн. наук,
профессор | 2.5.5 - технические науки |
| 2. Веткасов Н.И. | д-р. техн. наук,
доцент | 2.5.6 - технические науки |
| 3. Булыжев Е.М. | д-р. техн. наук,
доцент | 2.5.6 - технические науки |
| 4. Горшков Б.М. | д-р. техн. наук,
профессор | 2.5.5 - технические науки |
| 5. Денисенко А. Ф. | д-р. техн. наук,
профессор | 2.5.5 - технические науки |
| 6. Киселев Е.С. | д-р. техн. наук,
профессор | 2.5.6 - технические науки |
| 7. Клячкин В.Н. | д-р. техн. наук,
профессор | 2.5.5 - технические науки |
| 8. Ковальногов В.Н. | д-р. техн. наук,
доцент | 2.5.6 - технические науки |
| 9. Лобанов Д.В. | д-р. техн. наук,
доцент | 2.5.6 - технические науки |
| 10. Носов Н.В. | д-р. техн. наук,
профессор | 2.5.6 - технические науки |
| 11. Унянин А.Н. | д-р. техн. наук,
доцент | 2.5.5 - технические науки |

Председатель диссертационного совета
д.т.н., профессор

Ученый секретарь диссертационного совета
д.т.н., доцент



Табаков В. П.

Унянин А. Н.

Председатель – д-р техн. наук, профессор Табаков В. П.

Уважаемые коллеги, на заседании нашего совета из состава 14 человек присутствует 11 человек. Кворум у нас 10 человек, кворум имеется. Повестка дня известна. Есть замечания, предложения? Проголосуем за нее. Единогласно.

По специальности 2.5.6 – Технология машиностроения на заседании присутствует 6 докторов наук, т.е. в этом плане наше заседание правомочно. Объявляется защита диссертации Люшни Дмитрия Андреевича на соискание ученой степени кандидата технических наук по теме: «Повышение эффективности пневмодробеструйного упрочнения деталей из титановых сплавов за счет применения рациональных условий и режимов обработки».

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет».

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Технология машиностроения, станки и инструменты» ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет» Носов Николай Васильевич.

Официальные оппоненты:

Тамаркин Михаил Аркадьевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технология машиностроения» ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет».

Швецов Алексей Николаевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология производства двигателей», ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королева».

Письменные согласия на оппонирование данной работы от них были своевременно получены.

Швецов Алексей Николаевич на заседании присутствует.

Тамаркин Михаил Аркадьевич на заседании диссертационного совета участвует по видеосвязи, о чем соответствующее заявление было получено. Прошу за данное решение проголосовать. Кто «за»? «Против»? Единогласно.

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет».

Слово предоставляется ученому секретарю – доктору технических наук Унянину Александру Николаевичу для оглашения документов из личного дела соискателя.

Ученый секретарь – д-р техн. наук, доцент Унянин А. Н.

Уважаемые коллеги! Соискателем Люшней Дмитрием Андреевичем в диссертационный совет представлены все документы, необходимые для

защиты кандидатской диссертации. Документы личного дела оформлены в соответствии с требованиями положения ВАК. Основные положения диссертации отражены Люшней Дмитрием Андреевичем в 8 печатных работах, в том числе 2 работы опубликованы в изданиях по списку ВАК, 1 работа – в издании, входящем в систему цитирования Scopus. Остальные работы в трудах конференций различного уровня. Диссертация прошла необходимую апробацию на научно-технических и научно-практических конференциях различного уровня. Диссертация представлена к защите 23 октября 2024 года. Объявление о защите размещено на сайте ВАК РФ 23 октября 2024 года.

Председатель – д-р техн. наук, профессор Табаков В. П.

Есть вопросы к Александру Николаевичу? Нет. К соискателю? Нет. Дмитрий Андреевич, Вам слово для изложения доклада Вашей работы.

Соискатель Люшня Д. А.

Добрый день, уважаемые члены диссертационного совета!

Представляю Вашему вниманию доклад на тему: «Повышение эффективности пневмодробеструйного упрочнения деталей из титановых сплавов за счет применения рациональных условий и режимов обработки» [Слайд 1].

Повышение надежности авиационной техники требует качественного улучшения поверхностного слоя деталей, от чего зависит их прочность и долговечность. Методы поверхностно-пластического деформирования, в частности обработка дробью, зарекомендовали себя как экономичные и эффективные технологии, особенно при обработке сложнопрофильных поверхностей [Слайд 2].

В авиационной промышленности применяются различные металлы и сплавы, однако наиболее востребованными являются высокопрочные титановые сплавы, такие как ВТ16, ВТ22, ВТ22И, ВТ23 и ВТ35. Они обладают уникальными свойствами, такими как высокая прочность и коррозионная стойкость при малом весе. По данным В. Н. Моисеева, помимо названных преимуществ, титановые сплавы должны обладать хорошей упрочняемостью. Как известно, предел прочности титановых сплавов находится примерно на одном уровне – от 1050 до 1150 МПа, однако их упрочняемость различна. Основным свойством, характеризующим упрочняемость титановых сплавов, является коэффициент стабилизации β -фазы. Он равен 0,8 для ВТ16 и 1,5 для ВТ35. В работе рассматривается титановый сплав ВТ22, коэффициент стабилизации β -фазы которого равен 1,2. Данный сплав широко распространен в производстве крупногабаритных деталей взлетно-посадочных устройств, таких как Коромысло, Траверса,

Тележка шасси. Доля использования данного сплава в производстве составляет примерно 40%, что объясняет его популярность при выборе материала для различных исследований [Слайд 3].

Направления повышения эффективности процесса ПДУ можно классифицировать следующим образом: применение оптимальных режимов упрочнения; обеспечение требуемого качества поверхности путем исследования пластических деформаций и остаточных напряжений; увеличение пятна контакта; варьирование количеством сопел; выбор материала дроби. Список ученых, занимавшихся данной проблематикой приведен на слайде [Слайд 4].

Параметры обработки, влияющие на напряженно-деформированное состояние поверхности, систематизировал и обобщил в форме таблицы Петросов В. В. Им было установлено, что наименьшее влияние оказывают твёрдость материала и расстояние до заготовки, однако в совокупности с другими параметрами обработки они так же оказывают влияние на конечный результат упрочнения [Слайд 5].

Несмотря на развитие технологий и промышленного оборудования в современных производствах довольно часто применяют типовые режимы обработки. Данные режимы основаны на усредненных данных, которые приведены в нормативно-справочной литературе и отраслевых стандартах. Такой подход не позволяет полноценно раскрыть потенциал нового оборудования и режимов обработки. В связи с этим обоснование оптимальных режимов упрочнения с помощью компьютерного моделирования становится особенно актуальной задачей [Слайд 6].

Научная новизна работы заключается в повышении эффективности процесса пневмодробеструйного упрочнения и обеспечение требуемых параметров качества поверхностного слоя с помощью разработки компьютерных моделей, описывающих взаимодействие потока дроби и обрабатываемой поверхности. Практическая ценность работы заключается в создании научно-обоснованных рекомендаций по упрочнению деталей, которые могут быть использованы в производственном процессе [Слайд 7].

Анализируя научные работы, можно сделать следующие выводы: основное внимание уделено влиянию режимов обработки на напряженно-деформированное состояние поверхности, однако физика самого процесса остается не изученной. В рассмотренных работах не было уделено внимание рассмотрению формы факела потока дроби, влиянию скорости движения сопла на напряженно-деформированное состояние поверхности при высокоскоростной обработке и тому, как именно дробь взаимодействует с поверхностью. Также в рассмотренных работах не были обнаружены

имитационные модели в динамической постановке, а приведенные зависимости не в полной мере раскрывают технологические возможности оборудования [Слайд 8].

Целью работы является повышение эффективности процесса пневмодробеструйного упрочнения деталей из титанового сплава и достижение требуемых параметров качества поверхности за счёт определения рациональных режимов поверхностно-пластического деформирования материала.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Разработать имитационные модели влияния потока дроби на обрабатываемую заготовку.

2. Провести численное моделирование влияния режимов обработки на напряженно-деформированное состояние поверхности.

3. Разработать регрессионные модели влияния режимов обработки на напряженно-деформированное состояние поверхности.

4. Провести экспериментальные исследования влияния режимов обработки на напряженно-деформированное состояние и микротвердость поверхности.

5. Разработать методику определения шероховатости крупногабаритных деталей на рабочем месте

6. Провести опытно-промышленные испытания в условиях действующего производства [Слайд 9].

В работе применяются следующие методы исследований: построение имитационных моделей, построение регрессионных моделей, измерение шероховатости опико-электронным методом и промышленные испытания [Слайд 10].

Первая имитационная модель предназначена для определения площади контакта потока дроби с заготовкой, с учетом застойной зоны в зависимости от режимов упрочнения. В ходе разработки имитационной модели было установлено, что она коррелирует со схемой свободной струи, представленной Балтером М. А. Исследование схемы свободной струи необходимо для понимания энергетического состояния потока дроби до того, как он войдет в контакт с поверхностью заготовки. Это включает в себя анализ формы факела потока дроби, распределение дроби в нем и ее скорости. Модель разработана комбинированным методом при помощи аналитической и имитационных моделей. За основу взята аналитическая модель, предложенная Лебедевым В. А., которая была рассчитана в соответствии с результатами имитационной модели, что позволило повысить

точность расчета. Формула приведена на слайде Основным недостатком аналитической модели является то, что она не учитывает явление застойной зоны – области, где скорость и давление дроби недостаточны для достижения требуемого напряженно-деформированного состояния заготовки. Компенсировать этот недостаток удалось использованием имитационной модели, которая учитывает различные явления в процессе обработки, в том числе, застойную зону [Слайд 11].

На слайде приведена графическая интерпретация взаимодействия потока дроби с заготовкой с учетом застойной зоны. Графическая интерпретация необходима для понимания того, как режимы обработки, такие как угол наклона сопла, расстояние до поверхности, скорость и диаметр дроби влияют на формирование застойной зоны и распределение площади пятна контакта. Эта информация необходима для оптимизации процесса упрочнения и минимизации возможных дефектов в процессе обработки [Слайд 12].

Вторая имитационная модель разработана для определения зависимости напряженно-деформированного состояния поверхности от режимов упрочнения. Она дала возможность детально проанализировать как скорость и диаметр дроби, угол наклона сопла влияют на остаточные напряжения, пластические деформации и глубину их залегания [Слайд 13].

Третья имитационная модель разработана путем импорта геометрических моделей в RockyDEM из КОМПАС-3D. Она необходима для определения влияния скорости движения сопла на величину пластических деформаций и остаточных напряжений. Использование геометрических моделей является довольно практичным, ввиду того, что позволяет в трехмерной постановке оценить процесс упрочнения и детально проанализировать влияние динамики сопла на напряженно-деформированное состояние заготовки [Слайд 14].

Скорость движения сопла рассчитывалась по формулам, приведенным на слайде. Значения формулы принимались на основе данных имитационной модели №2 [Слайд 15].

Анализ результатов первой имитационной модели показал, что при повышении расстояния L со 150 до 200 мм величина площади застойной зоны S повышается в 1,2...1,7 раз, площадь контакта дроби с заготовкой F повышается в среднем на 10 %. При изменении угла наклона дроби от 30^0 до 90^0 величина площади застойной зоны S понижается в 2,5 раза, площадь контакта дроби с заготовкой F понижается на 50...60 %. Угол распыла факела α_1 уменьшается в 2 раза, угол распыла ядра потока дроби α_2

уменьшается в 4 раза. При увеличении диаметра дроби d с 0,3 до 1,4 мм площадь застойной зоны S увеличивается в пределах 20...80 % [Слайд 16].

Анализ результатов второй имитационной модели дал возможность определить количество ударов дробью по поверхности, необходимое для достижения состояния насыщения поверхности напряжениями. Для этого необходимо 10-15 ударов со скоростью дроби 60 м/с и 6-8 ударов со скоростью 90 м/с. Также модель позволила установить предполагаемую глубину залегания максимума остаточных напряжений, которая находится на отметке 20 мкм [Слайд 17].

Также данная модель позволила установить влияние угла наклона сопла и скорости дроби на остаточные напряжения, глубину их залегания и величину пластических деформаций. Таким образом, при изменении угла наклона сопла α от 30^0 до 90^0 величина остаточных напряжений сжатия σ повысилась на 2...5 %, глубина залегания остаточных напряжений h_σ повышается в 2...4 раза, величина пластических деформаций $\varepsilon_{пл}$ увеличивается на величину 30...50 %. Изменение скорости дроби V от 60 до 90 м/с повышает остаточные напряжения сжатия σ незначительно – в пределах 7...9 %, глубина залегания остаточных напряжений h_σ увеличивается на 40...60 %, величина пластических деформаций $\varepsilon_{пл}$ повышается в 3,5...4 раза [Слайд 18].

Анализ результатов третьей имитационной модели позволил установить, что повышение скорости движения сопла до 1,3 мм/с понижает величину остаточных напряжений сжатия σ примерно на 10 %, величину пластических деформаций $\varepsilon_{пл}$ – на 12...60 %. Повышение скорости дроби V до 90 м/с повышает величину остаточных напряжений сжатия σ на 7...8 %, величина пластических деформаций $\varepsilon_{пл}$ повышается в 3 раза. Изменение расстояния L со 150 до 200 мм повышает величину остаточных напряжений сжатия σ на 2...5 % [Слайд 19].

Для определения влияния факторов обработки на напряженно-деформированное состояние заготовки с помощью разработанных имитационных моделей были разработаны регрессионные модели, которые включают пять переменных, приведенных в табл. №1: скорость и диаметр дроби, расстояние до поверхности заготовки, скорость движения и угол наклона сопла. Интервалы их варьирования приведены в табл. №2. В процессе расчета было установлено, что расстояние до поверхности, в соответствии с критерием Фишера, является незначимым, т.е. его влияние на напряженно-деформированное состояние, по сравнению с влиянием других факторов, минимально. В связи с этим данный фактор в дальнейших расчетах не участвует. Рассчитанные регрессионные модели были приведены к

линейному виду и внесены в табл. №3, по которой можно определить уровень их влияния на напряженно-деформированное состояние поверхности, что позволяет оптимизировать процесс обработки и повысить его эффективность [Слайд 20].

После этого в уравнения регрессии были подставлены значения режимов обработки, которые позволили определить рекомендуемые параметры упрочнения. Таким образом, при сохранении угла наклона сопла $\alpha = 60 \dots 90^\circ$, диаметре дроби $d = 0,3$ мм и расстоянии до поверхности $L = 180$ мм при скорости дроби $V = 60$ м/с скорость движения сопла должна составлять $V_c = 0,6$ мм/с; при скорости дроби $V = 90$ м/с – скорость движения сопла должна составлять $V_c = 0,8$ мм/с. Найденные режимы обработки позволили обеспечить требуемые технические условия на изготовление детали [Слайд 21].

Исследование деформаций проводилось после обработки одним соплом с использованием образцов-свидетелей и датчика Альмена — микронного индикатора с подставкой-фиксатором. Исследование показало, что при повышении диаметра дроби до $d = 1,4$ мм величина пластических деформаций $\varepsilon_{пл}$ повышается в 5...8 раз. Изменение угла наклона сопла α от 60° до 90° повышает пластические деформации $\varepsilon_{пл}$ на величину 27...40 %. Повышение скорости дроби до $V = 90$ м/с способствует повышению пластических деформаций $\varepsilon_{пл}$ на 60...80 % [Слайд 22].

Исследование остаточных напряжений проводилось на образцах-свидетелях по методу травления Давиденкова Н. Н., измерением остаточных напряжений на приборе АСБ-1, разработанным профессором Букатым С. А. Сравнение расчетных и экспериментальных значений показало, что коэффициент корреляции равен 0,96...0,98, что говорит о высокой точности расчета и адекватности построенных моделей, а разница расчетных и экспериментальных значений не превышает 16 % [Слайд 23].

Сравнение экспериментальных и расчетных данных показало, что при повышении скорости дроби до $V = 90$ м/с величина остаточных напряжений сжатия повышается на 8...10 %, повышение скорости движения сопла V_c от 0,6 до 0,8 мм/с уменьшает величину остаточных напряжений сжатия на 7...10 % и как было сказано ранее, разница расчетных и экспериментальных значений не превышает 16 % [Слайд 24].

Исследование микротвердости проводилось по методу косо́го среза и послойному измерению микротвердости на твердомере Виккерса. Установлено, что повышение скорости дроби до $V = 90$ м/с способствует росту пластической деформации с 30 до 36 %, что незначительно, однако это говорит о том, что дробь глубже проникает в поверхность, что способствует

интенсификации пластических деформаций и, соответственно, росту микротвердости [Слайд 25].

Исследование шероховатости поверхности производилось для определения влияния скорости дробы на шероховатость. Первоначально эту тему исследовал Дрозд М. С. Он изучал, каким образом технологическая наследственность влияет на шероховатость поверхности в зависимости от скорости дробы. Им было установлено, что при достижении дробью скорости 80...90 м/с первоначальная шероховатость значительного влияния на результат обработки не оказывает [Слайд 26].

Исследование шероховатости проводилось с помощью профилографа в продольном и поперечном направлениях. Было установлено, что при изменении расстояния L со 150 до 200 мм величина шероховатости R_a возрастает в среднем на 30 % (25...35 %), при повышении скорости дробы V с 60 до 90 м/с шероховатость возрастает примерно на 30 %, значение шероховатости в продольном направлении меньше чем в поперечном на 5...12 % [Слайд 27].

Оптический метод исследования заключается в замере шероховатости при помощи ноутбука, камеры, закрепленной на магнитной стойке и программного обеспечения построения коррелограммы поверхности [Слайд 28].

Алгоритм построения коррелограммы следующий:

1. С помощью разработанной оптической системы фотографируется исследуемый участок реальной поверхности, получая цифровое изображение.

2. На цифровом изображении выделяется участок для анализа размером $K_1 \times K_2$.

3. Затем изображение преобразуется в бинарное: вычисляется средний уровень яркости, и все участки с яркостью выше среднего становятся белыми, а с яркостью ниже — черными.

4. Выбирается эталонный размер $N_1 \times N_2$, который сканирует поверхность. Для каждого пикселя эталон сравнивается с реальной поверхностью, вычисляется коэффициент корреляции, и строится корреляционная поверхность.

5. Корреляционная поверхность также преобразуется в бинарное изображение: на основе среднего уровня яркости, участки с яркостью выше среднего становятся белыми, а с яркостью ниже — черными.

6. В программном модуле проводится статистический анализ коэффициента корреляции, строится коррелограмма поверхности, по которой определяются амплитуда и средний шаг корреляционной поверхности.

7. Результаты анализируются и сравниваются с параметрами Ra или Sm, что позволяет найти функциональную зависимость между параметрами коррелогаммы и профилем поверхности. Выводится результат [Слайд 29].

Сравнение шероховатости поверхности профильным и оптическим методом приведено в таблице. Средний шаг коррелогаммы T_{cp} преобразован из пикселей в микроны и подставлен в формулу. Сравнение результатов показало, что при повышении скорости дроби V с 60 до 90 м/с шероховатость возрастает на 15...20 %, а повышение скорости движения сопла V_c от 0,6 до 1,2 мм/с повышает уровень шероховатости в 2,5 раза. Уровень шероховатости, замеренный оптическим методом, меньше чем замеренный профильным методом на 15...40 %. Таким образом, при повышении скорости движения сопла до 1,2 мм/с, величина Ra повысилась до 2,5...2,8 мкм, что близко к предельно допустимому уровню, равному 3 мкм, в связи с этим при скорости движения дроби $V = 90$ м/с скорость движения сопла рекомендуется выбирать не более 1,0 мм/с [Слайд 30].

Опытно-промышленная проверка показала, что экономический эффект при обработке со скоростью движения дроби $V = 90$ м/с составил 14329 руб. на одну деталь [Слайд 31].

Сравнительные технико-экономические показатели приведены в таблице. Из них видно, что в результате повышения скорости дроби при использовании одного сопла за счет минимизации застойной зоны удалось повысить площадь контакта дроби с заготовкой до 44 мм² и достичь состояния насыщения поверхности напряжениями за 6-8 ударов. Также было достигнуто незначительное повышение глубины упрочнения. Уровень шероховатости незначительно повышен, однако находится в пределах допустимых значений [Слайд 32].

Выводы по работе приведены на 33 и 34 слайде.

Всем спасибо за внимание [Слайд 35].

Председатель – д-р техн. наук, профессор Табаков В. П.

Вопросы пожалуйста. Д-р техн. наук Ковальногов В. Н.

Д-р техн. наук, доцент Ковальногов В. Н.

17-й слайд откройте. На слайде приведены графики остаточных напряжений, которые вызвали много вопросов. Вот, верхние графики. У Вас идет поверхностное упрочнение, т.е. должны формироваться остаточные сжимающие напряжения, а на графиках почему-то показаны положительные.

Соискатель Люшня Д. А.

Это связано с особенностью расчета в Ansys. Так как дробеструйная обработка формирует сжимающие напряжения, сделано допущение, что результат расчета – сжимающие напряжения.

Председатель – д-р техн. наук, профессор Табаков В. П.

Знак нужно было поставить.

Д-р техн. наук, доцент Ковальногов В. Н.

На нижнем графике они почему-то сжимающиеся, на верхних – растягивающиеся.

Соискатель Люшня Д. А.

Верхние графики были получены при расчете в Ansys, нижний – преобразован вручную.

Д-р техн. наук, доцент Ковальногов В. Н.

Зоны, закрасенные на верхних графиках, что за зоны такие?

Соискатель Люшня Д. А.

Это количество ударов, необходимых для достижения состояния насыщения.

Д-р техн. наук, доцент Ковальногов В. Н.

Что Вы понимаете под насыщением?

Соискатель Люшня Д. А.

Это максимальное значение напряжений, которые способна принять поверхность, после чего дальнейшее воздействие на поверхность величину этих напряжений повышать не будет. Следовательно, если мы значительно повысим уровень воздействия на поверхность, то может произойти её разрушение.

Д-р техн. наук, доцент Ковальногов В. Н.

Еще вопрос. Давайте посмотрим нижний график. На поверхности сжимающие напряжения, но это означает, что где-то в глубине они должны компенсироваться растягивающими напряжениями, соответственно знак эпюры должен меняться. Где у Вас это происходит?

Соискатель Люшня Д. А.

Это происходит на большей глубине, однако нас интересует глубина до 0,1 мм.

Д-р техн. наук, доцент Ковальногов В. Н.

Никаких предпосылок, что они будут переходить в другой знак нет. Т.е. они стабилизируются на одном уровне. С чем это связано?

Соискатель Люшня Д. А.

Особенность расчета.

Д-р техн. наук, профессор Киселев Е. С.

Какая тут особенность? Не понятно ничего.

Председатель – д-р техн. наук, профессор Табаков В. П.

Тенденция к переходу, вроде, есть.

Д-р техн. наук, доцент Ковальногов В. Н.

Это расчетные данные, я правильно понимаю?

Соискатель Люшня Д. А.

Да.

Д-р техн. наук, доцент Ковальногов В. Н.

И еще есть из другой области вопрос. Начиная с 11 слайда у Вас идет описание имитационных моделей. Трёх разных. При этом цветные картинки только предоставлены, никакой математики, никаких уравнений, формул нет. Что это за модели?

Соискатель Люшня Д. А.

Результаты расчета с применением моделей приведены в полной версии диссертации, сведенные в таблицы.

Д-р техн. наук, профессор Киселев Е. С.

Здесь почему их нет?

Д-р техн. наук, доцент Ковальногов В. Н.

Какие математические, дифференциальные уравнения, системы дифференциальных уравнений в их основе? Чем эти модели отличаются?

Соискатель Люшня Д. А.

Первая модель необходима для определения застойной зоны, расчет производится в Ansys Fluent. Вторая модель рассчитывается в Ansys Explicit Dynamics, необходима для определения остаточных напряжений, пластических деформаций и глубины их залегания. Третья модель рассчитывается в RockyDEM, это потоковая обработка дробью для определения остаточных напряжений и пластических деформаций. Соответственно, результаты моделирования были сведены в таблицы.

Д-р техн. наук, доцент Ковальногов В. Н.

Еще вопрос для моего общего развития. Вы говорили о повышении производительности Вашей пневмодробеструйной обработки. При резании понятно, интенсивность съема материала заготовки определяет производительность обработки, а здесь съема материала-то никакого нет. Как в Вашем случае определяется производительность обработки?

Соискатель Люшня Д. А.

По интенсивности обработки поверхности, т.е. большое влияние оказывает застойная зона. Если размеры застойной зоны значительны, то контакт дроби с поверхностью происходит не в полной мере и необходимое напряженно-деформированное состояние не достигается. В результате того, что мы уменьшили размеры застойной зоны, производительность повысилась.

Д-р техн. наук, доцент Ковальногов В. Н.

На поверхность должно быть определенное время воздействия, я правильно понимаю?

Соискатель Люшня Д. А.

Да.

Д-р техн. наук, доцент Ковальногов В. Н.

Больше вопросов нет. Спасибо.

Председатель – д-р техн. наук, профессор Табаков В. П.

Пожалуйста, еще вопросы.

Д-р техн. наук, доцент Лобанов Д. В.

Давайте я. Скажите пожалуйста. В докладе не прозвучало, но хотелось бы услышать. Дело в том, что перед поверхностно-пластической деформацией, скорее всего, происходили и другие методы подготовки поверхности и, зная о теории наследственности в технологии машиностроения, нужно понимать, что эти методы тоже оставляют какое-то напряженно-деформированное состояние. Оценивалось ли имеющееся до этого технологическая наследственность в Ваших моделях?

Соискатель Люшня Д. А.

Технологическая наследственность не учитывалась.

Д-р техн. наук, доцент Лобанов Д. В.

То есть Вы не сравнивали что было «до», когда поверхностные напряжения уже есть? Возможно в тех результатах, которые Вы получили, заранее уже были какие-то внутренние напряжения после точения или фрезерования. Это первый вопрос. Не учитывалось?

Соискатель Люшня Д. А.

Не учитывалось.

Д-р техн. наук, доцент Лобанов Д. В.

Второй вопрос. Представлено достаточно много графиков, в частности, на 27-й слайде, где Вы исследуете шероховатость. Не совсем понятно и не прозвучало, какая дисперсия тех значений, что Вы получали? Сколько было на самом деле повторений? Насколько велика эта дисперсия в экспериментальных точках? Возможно какие-то точки просто вылетели в результате влияния случайных факторов. Как оценить это? У Вас нет диапазона варьирования дисперсии (рассеивания значений). Подскажите пожалуйста, как Вы оценивали дисперсию?

Соискатель Люшня Д. А.

Дисперсию не оценивали.

Д-р техн. наук, доцент Лобанов Д. В.

Сколько повторений было у Вас в опыте? При получении, например, шероховатости.

Соискатель Люшня Д. А.

По три повторения на образец.

Д-р техн. наук, доцент Лобанов Д. В.

По три повторения, то есть минимально. Вы же провели соединения между точками, почему Вы не оценили в виде какой зависимости они расположены? Может это прямая, может какой-то полином или часть степенной функции? Как Вы оценили, насколько верно Вы выбрали те функции, которыми описываете этот процесс? Нет такого. Вы же понимаете, что могла быть кривая, могла быть прямая, могла быть часть параболы, которая на каком-то участке дала прямолинейную зависимость. Как Вы оценивали?

Соискатель Люшня Д. А.

Не оценивали.

Д-р техн. наук, доцент Лобанов Д. В.

У меня всё, спасибо.

Председатель – д-р техн. наук, профессор Табаков В. П.

Еще вопросы, пожалуйста.

Д-р техн. наук, профессор Горшков Б. М.

Скажите пожалуйста, когда Вы приводите анализ исследований, которые до Вас проводились, почему-то Вы не называете фамилии наших учителей. Это Папшев Д. Д., Кравченко Б. А., почему-то Вы обошли это стороной. Можно пояснить почему, какая-то причина была? Нет, причин не было? Но вообще нужно было упомянуть эти фамилии, достаточно известные. Написали книги, по которым мы учились, известные очень. Вот Вы называете Петросов В. В., он работал в нашем университете, занимался гидродробеструйной обработкой. Вы касались этого направления? Знаете о нем? У Вас пневмодробеструйная обработка, а гидродробеструйная, это сочетается?

Соискатель Люшня Д. А.

Да, сочетается. Схема свободной струи также применима к гидродробеструйной обработке, но с учетом особенностей обработки.

Д-р техн. наук, профессор Горшков Б. М.

То есть, учитывали. Спасибо.

Председатель – д-р техн. наук, профессор Табаков В. П.

У Вас всё? Еще вопросы.

Д-р техн. наук, доцент Булыжев Е. М.

Мы проводили обработку с помощью барабанов. Почему упор был сделан на дробеструйную обработку, а не дробеметную?

Соискатель Люшня Д. А.

На производстве стояла задача обработки именно в дробеструйной камере.

Д-р техн. наук, доцент Булыжев Е. М.

Хорошо, но производительность дробеструйной и дробеметной обработки сильно отличается, на порядки. Вы о производительности говорите, значит она имела для Вас важное значение. Если единичная деталь, тогда да.

Соискатель Люшня Д. А.

Детали данного типа единичные и на производстве дробеметная установка отсутствовала.

Д-р техн. наук, доцент Булыжев Е. М.

Больше вопросов нет.

Председатель – д-р техн. наук, профессор Табаков В. П.

Д-р техн. наук, Клячкин В. Н., пожалуйста.

Д-р техн. наук, профессор Клячкин В. Н.

Слайд по регрессиям откройте пожалуйста. Посмотрите, в первой таблице пять факторов, а далее только четыре. Один какой-то незначимый?

Соискатель Люшня Д. А.

Да, расстояние до заготовки.

Д-р техн. наук, профессор Клячкин В. Н.

Но Вы его варьировали в каком-то диапазоне?

Соискатель Люшня Д. А.

Его влияние минимально, поэтому была построена отдельная регрессионная модель без этого фактора.

Д-р техн. наук, профессор Клячкин В. Н.

Сколько опытов было?

Соискатель Люшня Д. А.

Всего 32 опыта.

Д-р техн. наук, профессор Клячкин В. Н.

То есть полный факторный эксперимент. Так, а вот по качеству моделей я не услышал ни одного слова. Какой коэффициент детерминации моделей?

Соискатель Люшня Д. А.

В данный момент ответить не могу, это указано в тексте диссертации.

Д-р техн. наук, доцент Булыжев Е. М.

Откройте диссертацию, почитайте.

Д-р техн. наук, профессор Клячкин В. Н.

Да, посмотрите в диссертации. Какими программными продуктами Вы пользовались для построения моделей?

Соискатель Люшня Д. А.

MS Excel.

Д-р техн. наук, профессор Клячкин В. Н.

Excel же выводит значение, в чем проблема? Потому что, когда строят модель, указывают ее характеристики, а здесь их нет.

Соискатель Люшня Д. А.

1,87.

Д-р техн. наук, профессор Клячкин В. Н.

Коэффициент детерминации больше единицы быть не может, Вы что-то другое называете. Он лежит в диапазоне от 0 до 1. Там окошко Excel с результатами анализов приведены? Там R^2 есть?

Соискатель Люшня Д. А.

Да, 0.9993.

Д-р техн. наук, профессор Клячкин В. Н.

Это почти точная модель. По всем пяти такого порядка значение R^2 ? У Вас пять моделей или четыре? Да, пять моделей.

Соискатель Люшня Д. А.

В работе указана одна из них, т.к. остальные рассчитаны по аналогичной системе.

Д-р техн. наук, профессор Клячкин В. Н.

Система-то аналогичная, а детерминация может быть совершенно разная, это же не вероятностная модель, а детерминированная модель у Вас. Ну и, потом, очень сомнительно в Ваших моделях, я их даже шесть насчитал, что все четыре фактора входят. А ведь наверняка в них имеется какой-нибудь незначимый. Какой-нибудь из Ваших четырех факторов наверняка, хотя бы в одной модели, окажется незначимым.

Д-р техн. наук, доцент Булыжев Е. М.

Он из пяти один незначимый как раз убрал.

Д-р техн. наук, профессор Клячкин В. Н.

Потому что получено шесть моделей, физически совершенно разные факторы по ним определяются и во всех фигурируют четыре Ваших переменных.

Председатель – д-р техн. наук, профессор Табаков В. П.

Может быть потому, что эти факторы между собой связаны.

Д-р техн. наук, профессор Киселев Е. С.

Здесь нет смешанных эффектов. В моделях нет смешанных эффектов.

Д-р техн. наук, профессор Клячкин В. Н.

Я подозреваю что просто проверка значимости не проводилась, хотя в Excel проводят проверку значимости. Теперь еще такая тонкость: вот в первой модели $71d$. Нашли? Параметр d – это диаметр. А в последней модели или в предпоследней – $2,18 \cdot 10^{-4}d$. Совершенно дикая разница, сомнения она вызывает. Когда Вы получаете такие сомнительные цифры, надо какое-то обоснование иметь.

Д-р техн. наук, профессор Киселев Е. С.

Вот к этим же моделям вернемся, обратите внимание. Коэффициенты, которые при скорости в м/с там какие-то наночисла – $0,0008126V_c$, $0,000657V_c$, а единицы измерения, вот здесь вот, глубина залегания упругих деформаций – мм. Это значит у Вас скорость оказывает влияние на глубину в нанометрах?

Соискатель Люшня Д. А.

Глубина залегания остаточных напряжений не столь значительна, как величина самих остаточных напряжений, поэтому и коэффициенты довольно сильно отличаются.

Д-р техн. наук, профессор Киселев Е. С.

Ну это и означает, что скорость фактически не оказывает никакого влияния. И не только на этот показатель, а у Вас в выводах сказано, что скорость движения – это один из значимых факторов. Как Вы получили это? Глубина залегания остаточных напряжений, приведены 5...нет, 7 цифр для этого показателя. Глубина залегания остаточных напряжений. Значит на глубину остаточных напряжений не оказывает никакого влияния, да? Значит, на глубину залегания упругих деформаций не оказывает никакого влияния, на пластическую деформацию никакого влияния. Еще один фактор Вы отбросили. Тут совершенно не понятно.

Соискатель Люшня Д. А.

На глубину остаточных напряжений наибольшее влияние оказывает диаметр дроби.

Д-р техн. наук, профессор Киселев Е. С.

Я про скорость спрашиваю. Я спрашиваю про скорость, м/с. Один из тех значимых показателей, о которых Вы в выводах говорите, что надо скорость увеличивать. И здесь же, давайте обратимся к 12 слайду. Совсем непонятно мне. 17-й, прошу прощения. Вот обратите внимание. 0 ударов, 0 остаточных напряжений. Если нет ударов, то нисколько, а вот дальше достаточно одного удара и остаточные напряжения подскочили до 450 МПа.

На первом графике. Как так может быть-то. Ваши графики. То же самое на втором графике. Ничего не могу понять. Вы немножко обдумывали, какие иллюстрационные материалы на доклад диссертации выписываете? Тут совершенно какая-то ересь, извините за выражение. Этот вопрос Вам задавали на семинаре. Как так может быть. Я уже не говорю о вопросах, которые Владислав Николаевич задавал по остаточным напряжениям. Я так понимаю, это какая-то имитационная модель, которую мы не видим. Какие-то расчеты она дала. А есть у Вас где-то проверка адекватности имитационной модели, Вы ее осуществляли?

Соискатель Люшня Д. А.

Нет.

Д-р техн. наук, профессор Киселев Е. С.

Вы взяли какую-то заграничную программу, ввели исходные значения, получили какие-то несуразные графики и мы должны поверить?

Председатель – д-р техн. наук, профессор Табаков В. П.

Вы же говорили про адекватность моделей, в конце доклада.

Соискатель Люшня Д. А.

Сравнение расчетных и экспериментальных результатов, где указан коэффициент корреляции, представлено на слайде 23.

Д-р техн. наук, профессор Киселев Е. С.

Я хочу посмотреть расчеты. Я хотел посмотреть расчеты и сравнить с результатами эксперимента. Я не знаю, что там он забыл. Еще интересный вопрос. Я не могу понять по результатам расчета микротвердости. График сейчас найду. Значит у Вас увеличивается скорость движения дроби, а микротвердость уменьшается. Да-да, вот это, 25 слайд. Как это вообще может быть?

Соискатель Люшня Д. А.

На слайде показано как происходит повышение микротвердости с увеличением глубины.

Д-р техн. наук, профессор Киселев Е. С.

Что там происходит? Происходит перенаклеп? Тогда это брак.

Соискатель Люшня Д. А.

Нет. Мы скорость повышаем и, соответственно, повышается значение микротвердости.

Д-р техн. наук, профессор Киселев Е. С.

А до какого момента оно должно быть? До тех пор, пока пластичность не исчерпается. У Вас какие-то соображения на этот счет есть? А если мы 200 м/с дадим? Вот такая фамилия как Смелянский В. М. Вам известна? Вот он там подробно эти вопросы описывал и зависимости есть. Когда наступает

исчерпание пластической деформации и твердость резко падает. Вот здесь это надо как-то связать. И еще один вопрос. Это самарская школа использует такие приборы – оптико-электронные комплексы для измерения параметров шероховатости. Включите 28-й слайд.

Вот Вы здесь получили какую-то кривую, обозвали ее «коррелограмма поверхности», а чем она отличается от профилограммы? Значит на чертежах Ваших деталей будут ставить параметры коррелограммы?

Соискатель Люшня Д. А.

Коррелограмма также показывает значения шероховатости. Всё это подробно описано в пособии Носова Н. В. и Абрамова А. Д.

Д-р техн. наук, профессор Киселев Е. С.

Нет, ну Вы-то должны показать какие-то взаимосвязи. Или на чертежах данные коррелограммы будут приводить?

Соискатель Люшня Д. А.

Перевод значений коррелограммы в значения шероховатости производится по формуле $Ra = Tcr^2/(32 \cdot r)$. Также приведено сравнение с профильным методом.

Д-р техн. наук, профессор Киселев Е. С.

Ну а Вы почему не вышли в Вашей работе на стандартные параметры шероховатости. Понимаю, прибор такой, но в конечном итоге Вы должны прийти к стандартным критериям оценки шероховатости.

Соискатель Люшня Д. А.

После обработки значений коррелограммы значения шероховатости в микронах приведены в таблице.

Д-р техн. наук, профессор Киселев Е. С.

Вот Вы кривую нарисовали, там вообще не понятно, что это значит. Коэффициент корреляции. Похож на профилограмму. А что это такое «коэффициент корреляции»? Нам это не интересно. Нам интересна именно шероховатость, и производственникам, и всем остальным. Почему Вы не сделали то, что требуется в производстве, а используете какую-то терминологию, которая используется не в практике, а узкими специалистами?

Д-р техн. наук, доцент Булыжев Е. М.

Тарировочный график нужно было сделать.

Д-р техн. наук, профессор Киселев Е. С.

Я догадываюсь, что в пособии Носова Н. В. всё это есть, но он должен всё это показать.

Председатель – д-р техн. наук, профессор Табаков В. П.

Скажите пожалуйста, эта методика разработана для каких деталей? Для чего предназначена эта методика?

Соискатель Люшня Д. А.

Для измерения шероховатости крупногабаритных деталей и сложных поверхностей.

Председатель – д-р техн. наук, профессор Табаков В. П.

У Вас довольно большой объем материала, но везде констатация без пояснений. Допустим, Вы увеличиваете скорость дробы с 60 до 90 м/с, и говорите, что это приводит к снижению остаточных напряжений, так?

Соискатель Люшня Д. А.

Напряжения повышаются.

Председатель – д-р техн. наук, профессор Табаков В. П.

18-й плакат. Да, правильно, извините, повышаются. А с увеличением скорости движения сопла – снижаются. Скорость движения дробы сделали 90 м/с, а скорость движения сопла какая?

Соискатель Люшня Д. А.

При увеличении скорости дробы скорость движения сопла также должна быть выше.

Председатель – д-р техн. наук, профессор Табаков В. П.

Напряжения с увеличением скорости дробы снижаются?

Соискатель Люшня Д. А.

Напряжения при повышении скорости дробы повышаются.

Председатель – д-р техн. наук, профессор Табаков В. П.

Откройте 19-й плакат. Вот где две позиции: 0,015 и 1,3.

Соискатель Люшня Д. А.

При увеличении скорости движения сопла напряжения уменьшаются.

Председатель – д-р техн. наук, профессор Табаков В. П.

Уменьшаются. Так вот вопрос, напряжения в уже готовом изделии какие должны быть, большие или маленькие, хорошо это или плохо, к чему нужно стремиться?

Соискатель Люшня Д. А.

К требованиям на деталь.

Председатель – д-р техн. наук, профессор Табаков В. П.

Я понимаю, что к требованиям. Может Вы где-то говорили. Есть плакат, где показана старая технология и предлагаемая? Чем они отличаются?

Соискатель Люшня Д. А.

Скоростью дробы, давлением воздуха, количеством сопел,

эффективной площадью покрытия, количеством ударов по поверхности и значениями в результате обработки.

Председатель – д-р техн. наук, профессор Табаков В. П.

Количество ударов, равное 6 ... 8, это, наверное, то, о чем спрашивал профессор Клячкин В. Н., почему эффективность повышается при скорости 90 м/с. Вопрос по микротвердости, где косой срез. Кажется, когда Вы делали доклад на нашем семинаре, я говорил Вам, что для меня формула понятна, а название нет. Степень пластической деформации определяют в процентном соотношении. И написано микротвердость H . Я всегда студентов учу, что это степень упрочнения материала. Была микротвердость такая-то, в середине детали, наверху сделали больше, поделили, умножили. Но почему Вы это называете степенью пластической деформации? Речь-то идет о микротвердости. Вот если бы Вы сказали так: «я измерял таким-то образом пластические деформации по глубине», то а я понимаю, что их замерить невозможно. А тут они в формуле указаны. Нужно говорить, что это степень упрочнения материала.

Соискатель Люшня Д. А.

В различной литературе по-разному трактуется. Где-то это описано как микротвердость, где-то степень пластических деформаций.

Председатель – д-р техн. наук, профессор Табаков В. П.

Почему повышение скорости привело к незначительному, но повышению микротвердости? Было 750 МПа, а стало почти 850 МПа. Причина в чем?

Соискатель Люшня Д. А.

Дополнительно вносятся напряжения, повышается пластическая деформация.

Председатель – д-р техн. наук, профессор Табаков В. П.

Евгений Михайлович говорит, что там энергия какая-то выделяется. Во время удара шарика.

Соискатель Люшня Д. А.

Да, энергия удара возрастает.

Председатель – д-р техн. наук, профессор Табаков В. П.

В автореферате пишете, что повышение незначительное. Сколько процентов?

Соискатель Люшня Д. А.

Микротвердости? Шесть процентов.

Председатель – д-р техн. наук, профессор Табаков В. П.

Так, хорошо. Еще вопросы, пожалуйста. Нет вопросов?

Д-р техн. наук, доцент Веткасов Н. И.

Есть вопрос. Скорость движения сопла варьировали в диапазоне от 0,015 до 1,3 мм/с. Это, получается, в 100 раз увеличили. Нет ли здесь какой-либо ошибки?

Соискатель Люшня Д. А.

Нет, такой диапазон назначался целенаправленно.

Д-р техн. наук, доцент Веткасов Н. И.

А с какой погрешностью Вы исследовали остаточные напряжения?

Соискатель Люшня Д. А.

Какой это слайд?

Д-р техн. наук, доцент Веткасов Н. И.

В автореферате приведено. При постоянной скорости дроби и повышении скорости движения сопла, при диаметре дроби 0,3 мм напряжения снижаются на 7...10 %. Это значимое снижение или нет?

Соискатель Люшня Д. А.

Снижение не значимое.

Председатель – д-р техн. наук, профессор Табаков В. П.

Есть еще вопросы. Нет вопросов?

Д-р техн. наук, доцент Булыжев Е. М.

Есть вопрос. Скажите пожалуйста, дробеструйные методы обладают рядом недостатков. Вы знаете эти недостатки?

Соискатель Люшня Д. А.

Повреждение поверхности из-за перенаклепа и раскола дроби при ударе.

Д-р техн. наук, доцент Булыжев Е. М.

Ну это понятно. А сама эксплуатация дробеструйной установки чем сопровождается?

Соискатель Люшня Д. А.

Сильный износ сопла.

Д-р техн. наук, доцент Булыжев Е. М.

Сильнейший износ сопел, верно. Вот поэтому стремятся перейти к дробеметной обработке. Спасибо.

Председатель – д-р техн. наук, профессор Табаков В. П.

Есть еще вопросы? Вопросов больше нет. Будем технический перерыв делать? Нет. Тогда продолжаем. Присаживайтесь. Слово предоставляется научному руководителю Носову Н. В.

Д-р техн. наук, профессор Носов Н. В.

Уважаемые коллеги, Люшня Д. А. обучался в университете г. Алчевск, Луганской обл., но в связи со сложными обстоятельствами он перевелся в

Самарский государственный технический университет. Учился сперва в бакалавриате, потом в магистратуре. Магистратуру окончил в 2019 году. Обучаясь в магистратуре, он показал свое желание и умение проводить научные исследования, особенно ему удавались процессы моделирования различных технологических процессов, поэтому он был принят в аспирантуру, которую окончил в 2023 г. Получилось так, что первым его руководителем был Кургузов Ю. И., который работал в направлении ППД, но руководителя пришлось сменить, им стал я. Это не моя ключевая область, поэтому пришлось разбираться заново.

Люшня Д. А. поступил в аспирантуру, закончил ее в 2023 году по специальности «Технология машиностроения». Его диссертация посвящена актуальной теме, которая была необходима производству. Очень длительный процесс дробеструйной обработки, крупногабаритная деталь. Нужно обрабатывать от 2,6 до 4 м² поверхности детали и решить проблему повышения производительности пневмодробеструйного упрочнения. Автором был поставлен ряд задач, которые позволили повысить производительность процесса, снизить себестоимость операции дробеструйной обработки и те поставленные задачи, которые он решал, я считаю, их выполнил. Корректность поставленных задач совпала с теми теоретическими положениями и экспериментальными исследованиями, которые проводились как в лабораториях нашего института, так и в производственных лабораториях, где выпускают шасси самолета. Эти экспериментальные исследования являются достаточным основанием для признания достоверности выводов и научно-обоснованных рекомендаций.

В процессе работы над диссертацией аспирант Люшня Д. А. проявил себя как высококвалифицированный и инициативный научный работник, способный решать сложные технические задачи в области имитационного моделирования технологических процессов упрочнения.

Считаю, что диссертационная работа Люшни Д. А. является законченной научно-исследовательской работой и аспирант Люшня Д. А. достоин присуждения ученой степени кандидат технических наук по специальности 2.5.6 – Технология машиностроения.

Председатель – д-р техн. наук, профессор Табаков В. П.

Спасибо, Николай Васильевич. Слово предоставляется ученому секретарю Унянину А. Н. для оглашения заключения и отзыва ведущей организации.

Ученый секретарь – д-р техн. наук, доцент Унянин А. Н.

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет», на кафедре «Технология машиностроения, станки

и инструменты», которая приняла заключение по диссертационной работе Люшни Д. А. Носов Н. В. уже изложил квалификацию соискателя – в 2019 г. Люшня Д. А. закончил магистратуру, в 2023 г. закончил очную аспирантуру, по направлению подготовки 15.06.01 «Машиностроение», профиль 2.5.6 – Технология машиностроения. Научный руководитель – Носов Н. В., д.т.н., профессор, профессор кафедры «Технология машиностроения, станки и инструменты», Самарского государственного технического университета.

По результатам рассмотрения диссертации принято следующее заключение:

Актуальность работы заключается в том, что надежность и долговечность крупногабаритных деталей из титановых сплавов в значительной степени зависят от упрочнения поверхностного слоя. Одним из основных методов повышения надежности деталей является дробеструйная обработка.

Несмотря на большой опыт практического применения методов поверхностного пластического деформирования для упрочнения деталей и исследований в области поверхностного пластического деформирования, до сих пор не разработано научно-обоснованных рекомендаций управления эффективностью ПДУ крупногабаритных деталей из титановых сплавов за счет применения рациональных режимов обработки. Поэтому тема диссертационной работы, направленная на повышение эффективности процесса ПДУ, является актуальной.

Степень достоверности изложенных в работе результатов обеспечивается: обоснованным изучением достаточного объема научно-технической информации, корректностью поставленной задачи, корректным использованием применяемого математического аппарата и вводимых допущений и гипотез, а также подтверждается согласованностью данных имитационного моделирования с результатами экспериментальных исследований.

Научная новизна полученных результатов, положений и выводов:

1. Разработаны имитационные модели процесса ПДУ для определения эффективной площади контакта потока дроби с поверхностью заготовки.

2. Разработаны имитационные модели процесса ПДУ для определения остаточных напряжений и накопленной деформации в поверхностном слое заготовки.

3. Разработаны имитационные модели процесса ПДУ для определения напряжённо-деформированного состояния поверхностного слоя заготовок с учётом скорости движения распыляющего сопла и скорости насыщения предельной пластической деформации.

4. Результаты численного моделирования влияния процесса ПДУ на напряженно-деформированное состояние поверхностного слоя заготовки при предельных режимах обработки.

5. Регрессионные модели влияния режимов ПДУ на параметры напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя заготовки.

6. Методика исследования шероховатости поверхности крупногабаритных деталей сложных пространственных форм с помощью оптико-электронного комплекса и идентификации параметров структуры с параметрами шероховатости, полученных оптическим и профильным методами.

Практические результаты диссертационной работы:

1. Разработка рекомендаций по определению рациональных условий и режимов упрочнения поверхностного слоя деталей при ПДУ, обеспечивающих повышение производительности и требуемых параметров качества поверхностей деталей из титановых сплавов.

2. Разработка инженерной методики по измерению шероховатости поверхностей крупногабаритных деталей сложных пространственных форм.

3. Опытно-промышленная проверка разработанной технологии, выполненная в производственных условиях ОАО «Авиаагрегат» (г. Самара), которая подтвердила повышение производительности ПДУ деталей из титановых сплавов, за счет применения предлагаемых режимов в 1,2 – 1,4 раза по сравнению с заводской технологией. Результаты исследований внедрены в учебный процесс подготовки магистров по направлению 15.04.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств».

Диссертация соответствует паспорту научной специальности 2.5.6 – Технология машиностроения (технические науки). Перечисляются пункты областей исследования, по которым диссертация соответствует данной научной специальности.

Заключение принято на расширенном заседании кафедры «Технология машиностроения, станки и инструменты».

На заседании присутствовали 11 сотрудников СамГТУ, в том числе 3 доктора технических наук. Результаты голосования: за – 11 человек, против – нет, воздержались – нет. Подписал заключение А. Р. Галлямов, к.т.н., доцент, заведующий кафедрой «Технология машиностроения, станки и инструменты» СамГТУ и Первый проректор – проректор по научной работе ФГБОУ ВО «СамГТУ» М. В. Ненашев.

Председатель – д-р техн. наук, профессор Табаков В. П.

Так. Хорошо. Теперь отзыв ведущей организации.

Ученый секретарь – д-р техн. наук, доцент Унянин А. Н.

В диссертационный совет поступил отзыв ведущей организации на диссертационную работу Люшни Д. А. Ведущая организация – Волгоградский государственный технический университет.

Во-первых, в отзыве приведены сведения о структуре диссертации.

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цели и задачи работы, научная новизна и практическая значимость работы, методология исследования, представлены основные научные положения, выносимые на защиту, приведены сведения по апробации работы.

В первой главе представлен литературный обзор и анализ современных проблем совершенствования технологии упрочнения деталей из титановых сплавов. Проведенный анализ показывает, что отсутствуют научно обоснованные методики и рекомендации по оптимизации режимов упрочнения, выбору рациональных условий применения дробеструйной обработки, формирования качества поверхности.

Во второй главе описан разработанный комплекс имитационных моделей, предназначенных для исследования влияния потока сжатого воздуха с дробью при ПДУ на напряженно-деформированное состояние поверхности заготовки.

В третьей главе приведены результаты имитационного моделирования процесса ПДУ с использованием моделей, которые разработаны во второй главе.

В четвертой главе представлены результаты экспериментальных исследований влияния режимов ПДУ на формирование остаточных напряжений, пластических деформаций и микротвердости в поверхностном слое. Приведены параметры технологического режима обработки при проведении экспериментов.

В пятой главе приведены описание методики и результаты исследования микрогеометрии поверхности после ПДУ. Исследования микрорельефа проведены контактным профильным методом (использовался профилограф-профилометр) и бесконтактным (использовался оптико-электронный метод).

В шестой главе приведены результаты оценки эффективности предлагаемой технологии ПДУ, которая подтверждена опытно-промышленными испытаниями в условиях предприятия ОАО «Авиаагрегат» (г. Самара).

В заключении сформулированы основные результаты исследования.

Так же отмечается актуальность работы. В условиях современного рынка и конкуренции важное место принадлежит совершенствованию технологического процесса упрочнения крупногабаритных деталей из титановых сплавов с целью повышения производительности обработки и качества поверхностей. Это обусловлено тем, что существующие технологии построены на практическом опыте, режимы и условия обработки не оптимизированы, нет чёткого представления о влиянии режимов пневмодробеструйной обработки на обеспечение точности, формирование требуемой шероховатости поверхности, микротвердости и остаточных напряжений в поверхностном слое, а также на пространственные отклонения при изготовлении сложных поверхностей крупногабаритных деталей, в частности деталей взлетно-посадочных устройств. Разработка методик, расчетных моделей и технологий по совершенствованию процессов упрочнения являются важными научными задачами, имеющими реальное применение на производстве.

Что касается научной новизны. В отзыве говорится, что научная новизна заключается следующем: решена научно-производственная задача повышения производительности и обеспечения качества обработки изделий из титановых сплавов за счет рационального назначения технологических режимов обработки. Новые научные результаты состоят в том, что:

- разработан комплекс имитационных моделей процесса ПДУ, описывающих систему взаимосвязей между общими условиями и технологическим режимом обработки, и оценками результатов моделируемого процесса;

- экспериментально обосновано согласование результатов исследования микрорельефа апробированным контактным и предложенным бесконтактным методами и доказана корректность количественных оценок параметров микрорельефа поверхности сложного профиля, обработанной ПДУ, получаемых бесконтактным методом.

Теоретическая значимость результатов заключается в разработке комплекса имитационных моделей, учитывающих влияние условий и режима процесса ПДУ на формирование параметров качества поверхностей деталей и производительность процесса.

Практическая значимость результатов и рекомендации по использованию:

- разработаны практические рекомендации по определению рациональных условий упрочнения поверхностного слоя деталей при ПДУ, режимов и условий ПДУ, обеспечивающих требуемые параметры качества обработки поверхностей изделий из титанового сплава;

- разработаны практические рекомендации по бесконтактному измерению шероховатости на поверхностях крупногабаритных деталей сложных пространственных форм на рабочем месте.

Практическая значимость подтверждается результатами опытно-промышленных испытаний разработанной технологии в условиях действующего производства и внедрением результатов исследования в учебный процесс подготовки магистров по направлению 15.04.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств».

Достоверность и обоснованность основных результатов и выводов обеспечена корректностью постановки задач, обоснованным использованием аналитических зависимостей, строгостью использованного математического аппарата, корректной постановкой экспериментов и подтверждается качественным и количественным соответствием теоретических исследований с экспериментальными данными, использованием апробированных методов и средств измерения, обоснованностью принятых допущений и ограничений, применением сертифицированного программного комплекса, адекватностью полученных эмпирических зависимостей, хорошей сходимостью результатов численных и экспериментальных исследований между собой, а также с данными других исследователей.

Выводы по работе строго соотносятся с соответствующими задачами исследования и имеют теоретическое и экспериментальное подтверждение. Далее делается вывод и заключение, что каждый вывод строго обоснован.

Соответствие специальности. Проведенные автором исследования и их результаты соответствуют формуле и областям исследования, определенным в паспорте научной специальности 2.5.6 – Технология машиностроения.

По работе имеется ряд замечаний – как по существу, так и формальных.

Замечания по существу работы:

1. Одной из отличительных особенностей работы является разработка и активное применение комплекса «имитационных» моделей процесса ПДУ. В чем, с точки зрения автора, состоит различие между имитационными, аналитическими и статистическими моделями? Во всех трех моделях предполагается описание системы взаимосвязей между входными (общие условия и технологический режим обработки) и выходными (шероховатость, производительность, оценка напряженно-деформированного состояния обработанной поверхности) параметрами.

2. При построении имитационных моделей процесса ПДУ автор не учитывает технологическую наследственность.

3. В диссертационной работе приведены линейные математические модели процесса ПДУ, отражающие взаимосвязь между количественными оценками условий обработки и параметрами качества поверхностного слоя, предназначенные для определения рациональных режимов ПДУ. Однако, в работе отсутствует явное указание на этап обработки (черновая или чистовая) и не приведено обоснование выбора математической спецификации модели – неясно, почему для расчетов предлагается именно линейная модель.

4. В диссертации не приведено обоснование выбора схемы взаимодействия потока дроби с поверхностью детали – как следствие, влияние геометрических размеров и формы обрабатываемых поверхностей на качество обработанной поверхности не рассматривается.

5. Несмотря на явную новизну подхода к теоретическому определению площади застойной зоны при взаимодействии факела дроби с обрабатываемой поверхностью, автор не рассматривает потери энергии при соударении дроби с обрабатываемой поверхностью.

6. Необходимо более строгое обоснование выбора метода исследования напряженно-деформированного состояния поверхности после ПДУ – неясно, почему автор использует исследование только тангенциальных напряжений на поверхности образцов-свидетелей.

7. В работе глубоко исследованы вопросы формирования микрорельефа обработанной поверхности, и важные аспекты напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя и определены диапазоны рациональных режимов ПДУ. Однако, исследованию степени пластической деформации при предлагаемых режимах упрочнения уделено недостаточно внимания.

Формальные замечания:

8. В тексте диссертации орфографические ошибки.

9. Кривые на графиках сравнения расчетных данных и экспериментально полученных результатов построены с отступлениями от общепринятых рекомендаций. В частности, на расчетных гладких кривых показаны маркеры точек, что характерно для экспериментальных зависимостей. В то же время, на экспериментальных графиках маркеры соединены гладкой линией, что обычно делается на расчетных графиках. Кроме того, на экспериментальных зависимостях не показаны «отсечки» погрешностей.

Вывод делается такой: указанные замечания не снижают общей ценности диссертационной работы и не влияют на значимость теоретических и практических результатов исследования. Замечания носят

рекомендательный характер и могут быть учтены автором при планировании дальнейших исследований.

Заключение о соответствии диссертации:

1. Диссертация выполнена на актуальную тему. Научные результаты, полученные автором, вносят существенный вклад в развитие и направление совершенствования высокоэффективных методов обработки деталей авиационной техники из титановых сплавов за счет оптимизации режимов пневмодробеструйного упрочнения и прогнозирования параметров качества поверхности. Работу можно классифицировать как перспективное направление развития науки и техники. Выводы обоснованы. Исследование имеет характер завершенной научно-квалификационной работы, в которой содержится решение проблемы, имеющей практическое применение в современном машиностроении.

2. Автореферат корректно и полно отражает содержание диссертации.

3. Проведенные автором исследования и их результаты по содержанию, научной новизне и практической значимости соответствуют паспорту научной специальности 2.5.6 – Технология машиностроения.

4. Содержание исследования достаточно полно отражено в открытой печати в опубликованных автором научных работах, в том числе, в изданиях, рекомендованных ВАК Министерства науки и высшего образования РФ.

Учитывая значимость материалов диссертации для науки и практики, актуальность тематики, личный вклад соискателя, уровень обсуждения результатов в печати и на конференциях, следует признать диссертационную работу «Повышение эффективности пневмодробеструйного упрочнения деталей из титановых сплавов за счет применения рациональных условий и режимов обработки» по своему содержанию, объему, актуальности, научной и практической значимости, соответствующей требованиям ВАК Министерства науки и высшего образования РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям и определенным пунктами 9–14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. за № 842 с изменениями на 25.01.2024 г., а ее автора, Люшню Дмитрия Андреевича, заслуживающим присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.6 – Технология машиностроения.

Отзыв обсуждался и одобрен на расширенном заседании кафедры «Технология машиностроения» ВолГТУ с участием кафедр «Автоматизация технологических процессов» и «Технология и оборудование машиностроительных производств» Волжского политехнического института. В обсуждении работы приняли участие 16 преподавателей, в т. ч. 6 докторов

и 8 кандидатов технических наук по специальностям 05.02.07 (2.5.5), 05.02.08 (2.5.6) и 05.13.06 (2.3.3).

Отзыв подписал заведующий кафедрой «Технология машиностроения» ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет» Чигиринский Юлий Львович.

Утвердил отзыв Кузьмин Сергей Викторович, Первый проректор Волгоградского государственного технического университета.

Председатель – д-р техн. наук, профессор Табаков В. П.

Что касается отзывов на автореферат. Их поступило 8, все они положительные. Если нет возражений, то Александр Николаевич зачитает обзор отзывов. Нет возражений?

Д-р техн. наук, доцент Ковальногов В. Н.

Можно обзор не зачитывать. В раздаточном материале все есть, замечательно.

Председатель – д-р техн. наук, профессор Табаков В. П.

Давайте сначала проголосуем, а там решим. Единогласно. Ну и, раз члены совета говорят, что замечания в раздаточном материале есть, сразу предоставим слово соискателю.

Д-р техн. наук, доцент Ковальногов В. Н.

Оппонент потом?

Председатель – д-р техн. наук, профессор Табаков В. П.

Да. Дмитрий Андреевич, пожалуйста, ответ на замечания ведущей организации, заключение организации и отзывы на автореферат. Только коротко.

Соискатель Люшня Д. А.

Замечание Волгоградского государственного технического университета.

Председатель – д-р техн. наук, профессор Табаков В. П.

Дмитрий Андреевич, давайте так договоримся. Те замечания, с которыми согласны, говорите «я согласен». Не нужно весь отзыв зачитывать, здесь все записано, иначе много времени займет. Ответы, если есть, тоже зачитывайте, т.к. замечания у нас есть перед глазами.

Соискатель Люшня Д. А.

Ответ на первое замечание. В данных исследованиях использовалась комбинация имитационной и аналитической моделей.

Ответ на второе замечание. С замечанием согласен.

Ответ на третье замечание. Рассматриваемые режимы ПДУ титановых сплавов соответствовали режимам окончательной обработки. В работе

применяется линейная модель, так как она является часто используемой и наиболее изученной.

Ответ на четвертое замечание. Моделирование площади контакта при ПДУ показало, что расхождение площади контакта реальной и плоской поверхностей составило не более 12%.

Ответ на пятое замечание. С замечанием согласен.

Ответ на шестое замечание. С замечанием согласен.

Ответ на седьмое замечание. С замечанием согласен.

Замечания ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет им. С. П. Королёва». Швецов Алексей Николаевич.

Председатель – д-р техн. наук, профессор Табаков В. П.

Секундочку. Отзывы на автореферат.

Соискатель Люшня Д. А.

Замечание ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет», профессор Зайдес Семен Азикович.

Ответ на первое замечание. При скоростях больше 90-100 м/с происходит раскол стальной дроби, у которой диаметр более 0,6 мм.

Ответ на второе замечание. Графики указаны в тексте диссертации на рис. 4.7 - 4.8.

Ответ на третье замечание. С замечанием согласен.

ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет». Доцент Валерий Васильевич Полтавец и профессор Владимир Владиленович Гусев.

Ответ на первое замечание. С замечанием согласен.

Ответ на второе замечание. В ПО Ansys присутствует вид анализа Total Deformation, позволяющий определить значения пластической (накопленной) деформации.

Ответ на третье замечание. Указанное явление при построении имитационных моделей не учитывалось.

Ответ на четвертое замечание. С замечанием согласен.

Ответ на пятое замечание. Экономический эффект достигается за счет увеличения производительности ПДУ и уменьшения расхода дроби.

ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет». Доктор технических наук, Ардашев Дмитрий Валерьевич.

Ответ на первое замечание. Объектом исследования является ПДУ. Актуальность ПДУ крупногабаритных деталей состоит в том, что в заводских условиях процесс обработки производится с большой трудоемкостью и расходом дроби.

Ответ на второе замечание. Предметом моделирования являются

закономерности формирования НДС при ПДУ, факторами – режимы упрочнения, а параметрами – параметры напряженно-деформированного состояния поверхности.

Ответ на третье замечание. Параметры структуры поверхности указаны в соответствии с ГОСТ Р ИСО 4287-2014. Это амплитуда и шаг автокорреляционной функции, значения которых связаны с величиной шероховатости Ra поверхности.

Ответ на четвертое замечание. С замечанием согласен.

ФГБОУ ВО «Курганский государственный университет». Профессор Курдюков Владимир Ильич.

Ответ на первое замечание. С замечанием согласен.

Ответ на второе замечание. Регрессионные модели были построены по методу планирования многофакторного эксперимента.

Ответ на третье замечание. С замечанием согласен.

ФГБОУ ВО «Поволжский государственный технологический университет», Республика Марий Эл, г. Йошкар-Ола. Доцент Алибеков Сергей Якубович.

Замечаний нет.

ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет». Профессор Бурлаченко Олег Васильевич.

Одно замечание. Ответ на замечание. Производительность процесса зависит от скорости подачи сопла.

ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет». Доцент Зверев Егор Александрович.

Одно замечание. С замечанием согласен.

ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет». Профессор Зверовщиков Александр Евгеньевич и профессор Зверовщиков Владимир Зиновьевич.

Ответ на первое замечание. Сопло изготовлено из карбида бора.

Ответ на второе замечание. Насыщение поверхностного слоя пластическими деформациями связано с режимами дробеструйной обработки.

Ответ на третье замечание. Не определялась. Использовались данные заводской лаборатории.

У меня всё.

Председатель – д-р техн. наук, профессор Табаков В. П.

Слово для отзыва предоставляется официальному оппоненту, д.т.н., профессору Тамаркину Михаилу Аркадьевичу. Михаил Аркадьевич, пожалуйста.

Официальный оппонент – д-р техн. наук, профессор Тамаркин М. А.

Добрый день, уважаемый Владимир Петрович, уважаемые члены Диссертационного совета. Прежде всего, хочу поблагодарить Вас за возможность поработать вместе с Вами. Тем более, что Леонид Викторович был у меня первым оппонентом по докторской. 30 лет назад я у Вас на объединенном заседании кафедры докторскую докладывал. Что касается отзыва, тут очень подробно, на 10 страницах, я прошу Вашего разрешения в изложении.

Председатель – д-р техн. наук, профессор Табаков В. П.

Да, пожалуйста. Основные моменты.

Официальный оппонент – д-р техн. наук, профессор Тамаркин М. А.

Значит, во-первых, рассмотрены общие сведения о диссертации. Если говорить об актуальности. Сейчас все ответственные детали проходят упрочняющую обработку и детали фасонного профиля, в основном, проходят динамическими методами ППД. При этом возникает довольно много теоретических трудностей. К сожалению, мы не можем создать единую четкую теорию динамических методов обработки ППД, потому что наши механики и математики еще не решили контактную задачу взаимодействия сферического индентора с деформируемым полупространством. Строго решена только задача взаимодействия усеченного конуса с этим полупространством, что мы более-менее используем при абразивной обработке. Что касается обработки ППД, то такие детали сложной конфигурации обрабатывают либо вибрационной обработкой, либо дробеструйной обработкой, но вибрационная обработка дает скорость до 1 м/с, а дробеструйная на порядки больше, поэтому для ответственных деталей из титановых сплавов она, в основном, и применяется. При этом нужно сказать, что современные возможности новых программных продуктов позволяют проводить исследования на более высоком уровне. Вот, в частности, автор использует пакет RockyDEM, который многие вопросы, которые мы не могли ранее решить, позволяет решить при обработке ППД. Вот недавно я оппонировал в Санкт-Петербурге докторскую по исследованию шероховатости, там указано, что уже можно услышать около 20 параметров шероховатости, технологи оперируют 40 параметрами шероховатости, метрологи 150 параметров шероховатости уже придумали, поэтому очень трудно их все сравнивать.

Что касается научной школы. Все мы ППД начинаем от И. В. Кудрявцева, если это дробеструйная обработка – то это Саверин М. М., самые первые испытания, где-то 1965-го года. Потом появилась школа Смелянского В. М., но это больше по статическим методам обработки, ее

сейчас успешно продолжает профессор Гольдштейн, они как раз занимаются исчерпанием ресурса пластичности. Автору повезло, что ведущей организацией является Волгоградский технический университет, потому что там школа Дрозда М. С., который создал понятие «динамическая твердость» именно в этих процессах, что очень важно и продолжает профессор Сидякин Ю. И., они сейчас новый критерий внедряют, такой как «интенсивность деформации». Поэтому исследования самарской школы также важны и вносят определенную лепту в разработку общих закономерностей динамических методов обработки и, в частности, дробеструйной обработки. На основании анализа информации автор правильно обосновал цель и задачи исследований, обосновал научные положения, выводы и рекомендации, достоверность полученных результатов изложена, значимость для науки и практики полученных автором результатов. На основании проведенных теоретических и экспериментальных исследований автором установлена взаимосвязь режимов и условий упрочнения с качеством обрабатываемой поверхности, остаточными напряжениями, степенью пластической деформации, микрогеометрией поверхности. Установлено влияние режимов обработки на производительность пневмодробеструйного упрочнения и себестоимость операции упрочнения крупногабаритных деталей из титановых сплавов. Исследования показали, что повышение скорости дробы с 60 до 90 м/с повысило производительность в 1,2 – 1,4 раза. Результаты исследования оформлены в виде расчетных таблиц, графиков и диаграмм, которые достаточно корректно оценивают результаты сравнения теоретических и экспериментальных исследований.

Полученные результаты можно расценивать как новые научные знания, вносящие вклад в технологию машиностроения.

Далее подробно идет анализ некоторых позиций и выводов.

Практическая ценность работы заключается в разработке и научном обосновании рекомендаций для определения режимов и условий пневмодробеструйного упрочнения, обеспечивающих требуемые параметры качества поверхностей деталей. Разработан оптико-электронный комплекс по измерению шероховатости на поверхностях крупногабаритных деталей сложной формы. Проведена опытно-промышленная апробация разработанной технологии.

Предложенные и обоснованные автором технико-технологические решения могут быть рекомендованы для промышленного применения при упрочнении крупногабаритных деталей из высокопрочных титановых сплавов.

Дальше идет оценка содержания диссертации подробно по всем главам. Затем подтверждена достоверность всех выводов автора и подчеркивается, что практическая ценность материалов исследования состоит в возможности их использования при проектировании операций пневмодробеструйного упрочнения в условиях действующего производства и, также, материалы автора могут быть использованы в учебном процессе.

Вот подробно замечания, которые сделаны по работе:

1. Задачи, решаемые в диссертациях, ставятся на основе материала ВТ22, однако не понятно на какой основе сделан этот выбор, т.к. высокопрочных титановых сплавов значительное количество.

2. Не приведены методики КЭ-анализа. В частности, ничего не сказано про этапы выполнения анализа, необходимого для решения задачи; разбиение модели на конечные элементы (какая у них форма?). Не понятно также, каким образом решали задачу идентификации профиля остаточных напряжений и добавления этого профиля в модель конечных элементов.

3. В разделе «Имитационное моделирование» приведены рекомендации по выбору режимов ПДУ для плоских поверхностей, но отсутствует переход по выбору режимов для криволинейных цилиндрических поверхностей и поверхностей сложной формы. Нужно обосновать, возможно ли такое допущение?

Но это члены совета уже заметили. Дальше.

4. Следует привести в порядок терминологию. Необходимо пояснить, что означают понятия, «глубина деформационного воздействия», «эквивалентные упругие деформации» и т.п.

5. В работе используется скорость дроби при упрочнении 90 м/с, но не сказано, чем ограничивается такая скорость шариков.

Так же члены совета уже обратили на это внимание.

6. Следовало бы подробно пояснить почему результаты расчетов остаточных напряжений получаются положительными, что приведено в соответствующих таблицах и графиках.

Кратко автор в дискуссии мне это изложил, но и мне, и членам совета сразу бросилось в глаза, что там не тот знак.

7. На рис. 3.24 и 3.25 максимальные значения остаточных напряжений, формируемых при скорости 60 и 90 м/с отличаются незначительно. Пояснить, с чем это связано.

8. В описании методики исследования шероховатости поверхности оптическим методом неясно как выбирались размеры эталона, а также отсутствует объяснение по влиянию освещенности исследуемой поверхности на параметры автокорреляционной функции. Какова погрешность измерения

параметров шероховатости с помощью оптико-электронного комплекса? В каких случаях его применение необходимо?

Указанные замечания носят частный характер и не снижают значимости выполненных исследований. Актуальность работы, её научная новизна, практическая и теоретическая полезность полученных в ней результатов не вызывают сомнений.

Работа соответствует паспорту научной специальности 2.5.6 по пунктам области исследования: 3, 4, 7, и 9.

Полученные результаты достаточно полно представлены в опубликованных научных трудах автора.

Заключение. Несмотря на приведенные замечания, диссертация Люшни Дмитрия Андреевича является самостоятельной, завершённой научно-квалификационной работой, отвечающей требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации, в которой содержится системные теоретико-экспериментальные исследования.

Диссертация Люшни Дмитрия Андреевича представляет собой завершённую научно-квалификационную работу, содержащую решение актуальной научной и практической задачи в области повышения эффективности процесса пневмодробеструйного упрочнения крупногабаритных деталей из титановых сплавов. Работа выполнена автором самостоятельно. Полученные результаты достоверны, выводы и заключения обоснованы. Работа написана доходчиво, в целом грамотно и аккуратно оформлена.

Диссертационная работа «Повышение эффективности пневмодробеструйного упрочнения деталей из титановых сплавов за счет применения рациональных условий и режимов обработки» по своему содержанию, объёму, актуальности, научной и практической значимости соответствует требованиям ВАК Министерства науки и высшего образования РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.6 – Технология машиностроения. Спасибо.

Председатель – д-р техн. наук, профессор Табаков В. П.

Спасибо, Михаил Аркадьевич. Так, Дмитрий Андреевич, ответы на замечания оппонента.

Соискатель Люшня Д. А.

Ответ на первое замечание. Титановый сплав ВТ22 был выбран основным при проведении исследований, используя данные В. Н. Моисеева.

Д-р техн. наук, профессор Киселев Е. С.

Кто такой Моисеев?

Соискатель Люшня Д. А.

Исследователь титановых сплавов.

Д-р техн. наук, профессор Киселев Е. С.

Да их миллион.

Председатель – д-р техн. наук, профессор Табаков В. П.

Надо все-таки указать причину, почему всё-таки ВТ22, а не ВТ1-0, допустим.

Соискатель Люшня Д. А.

Это наиболее распространенный сплав на предприятии и как раз была проблема по исследованию упрочнения детали именно из этого сплава.

Председатель – д-р техн. наук, профессор Табаков В. П.

Хорошо, дальше.

Д-р техн. наук, профессор Киселев Е. С.

Так кто такой Моисеев?

Д-р техн. наук, профессор Носов Н. В.

Монография Моисеева В. Н. «Титановые сплавы».

Председатель – д-р техн. наук, профессор Табаков В. П.

Так, давайте дальше по ответам на замечания оппонента.

Соискатель Люшня Д. А.

Ответ на второе замечание. Этапы построения моделей описаны в п. 2.3. Предварительное напряженное состояние образцов не учитывалось.

Ответ на третье замечание. В реальных условиях форма поверхности криволинейная, при этом расхождение площади контакта реальной и плоской поверхностей составило не более 12%.

Председатель – д-р техн. наук, профессор Табаков В. П.

Вы проводили такие исследования? Откуда 12 % взялось?

Соискатель Люшня Д. А.

В диссертации есть соответствующая страница.

Председатель – д-р техн. наук, профессор Табаков В. П.

Нет, на вопрос надо более корректно ответить. Вы проводили исследование?

Соискатель Люшня Д. А.

Да.

Председатель – д-р техн. наук, профессор Табаков В. П.

Вот. Это другое дело.

Соискатель Люшня Д. А.

Ответ на четвертое замечание. С замечанием согласен.

Ответ на пятое замечание. При скоростях более 90...100 м/с происходит раскол стальной дроби, у которой диаметр более 0,6 мм.

Ответ на шестое замечание. Учитывая то, что дробеструйная обработка формирует в поверхностном слое остаточные напряжения сжатия, полученные значения были приняты, соответственно, за напряжения сжатия.

Ответ на седьмое замечание. Это связано с тем, что сравнивались 2 режима, которые позволяли достигать предельных допустимых напряжений при скорости 60 м/с за 10-15 ударов дроби, а при 90 м/с за 6-8 ударов.

Ответ на восьмое замечание. Размер эталона зависит от высоты шероховатости и в нашем случае для Ra до 3 мкм использовался эталон 10 x 10 пикс. Вопросы освещенности подробно рассмотрены в работах Носова Н. В., Абрамова А. Д.

У меня всё.

Председатель – д-р техн. наук, профессор Табаков В. П.

Михаил Аркадьевич, Вам было слышно нормально?

Официальный оппонент – д-р техн. наук, профессор Тамаркин М. А.

Да, нормально.

Председатель – д-р техн. наук, профессор Табаков В. П.

Ответы Вас удовлетворили?

Официальный оппонент – д-р техн. наук, профессор Тамаркин М. А.

Да, достаточно. Достаточно полно ответил.

Председатель – д-р техн. наук, профессор Табаков В. П.

Спасибо большое. Спасибо, садитесь.

Слово для отзыва предоставляется официальному оппоненту, к.т.н., доценту Швецову Алексею Николаевичу.

Официальный оппонент – канд. техн. наук, доцент Швецов А. Н.

В отзыве отмечена общая характеристика работы и соответствие диссертации паспорту научной специальности. Отмечено, что выполнена работа в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Самарский государственный технический университет». Структура диссертации, сколько страниц, приложений, сколько работ опубликовано. Дальше, непосредственно, по структуре.

Во введении диссертационной работы обоснована актуальность темы работы и изложена степень её разработанности, сформулирована цель и представлены задачи исследования, определены объект и предмет исследования, изложены научная новизна, теоретическая значимость и практическая ценность работы, содержатся сведения о методах и средствах исследования, определены положения, выносимые на защиту, приведены

сведения о достоверности полученных результатов, апробации результатов работы, публикациях, структуре и объеме диссертации.

В первой главе на основе найденной научной и научно-технической литературы дана характеристика процесса пневмодробеструйного упрочнения и показана область его применения на примере взлётно-посадочного устройства самолёта ИЛ 476. Приведен анализ пневмодробеструйного упрочнения, рассмотрены способы подачи рабочего тела к обрабатываемой поверхности, приводится конструкция эжектора, а также рассмотрены факторы, влияющие на скорость смеси, диаметр отпечатка, степень поверхностной деформации. Рассмотрены существующие регрессионные и эмпирические модели, позволяющие определить микротвёрдость поверхности, максимальные напряжения в зоне контакта, шероховатость поверхности в зависимости от режимов упрочнения. Приводятся работы в которых рассматривается решение контактных задач с использованием теории упругости. Выполнен анализ существующих конечно-элементных моделей, используемых для процессов упрочнения. Рассмотрено влияние дробеструйной обработки на остаточные напряжения и микротвёрдость поверхностного слоя, а также на шероховатость поверхности. На основе проведенного системного анализа сформулированы соответствующие выводы.

Во второй главе представлены имитационные модели процесса пневмодробеструйного упрочнения, приводятся исходные данные и программное обеспечение, используемое для численного моделирования. Первая имитационная модель получена с использованием модуля Fluid Flow в программном комплексе ANSYS, используемом для расчета жидкостных и воздушных сред. Полученная автором диссертации модель позволяет определить площадь контакта потока дроби с поверхностью заготовки с учётом образования застойных зон, в зависимости от угла наклона сопла, скорости и диаметра дроби, физических свойства материала и расстояния до обрабатываемой поверхности. Вторая имитационная модель, полученная с использованием модуля Explicit Dynamics, в ANSYS, позволяет рассмотреть задачу в условиях явной динамики. Данная модель позволяет получить численным методом остаточные напряжения, упругие и остаточные деформации, а также глубину их залегания, при этом процесс моделируется как процесс точечного контакта потока дроби с поверхностью заготовки и с учётом накопленной пластической деформации. Третья имитационная модель, полученная с использованием программы RockyDEM, позволяет определить напряжённо-деформированное состояние поверхностного слоя заготовок с учётом скорости движения рабочих тел, распыляющихся соплом

со скоростью насыщения предельной пластической деформации, при этом учитывается влияние многократного ударного воздействия на поверхность образца.

В третьей главе представлены результаты, полученные с использованием имитационных моделей, представленных во второй главе.

В четвёртой главе представлены результаты натуральных экспериментов, связанных с определением деформации на образцах-свидетелях, определением остаточных напряжений, а также исследования, связанные с определением микротвёрдости по глубине поверхностного слоя.

В пятой главе представлены результаты исследования шероховатости поверхности с применением профильного и оптического методов.

В шестой главе представлены результаты опытно промышленной проверки на ОАО «Авиаагрегат» при пневмодробеструйном упрочнении таких деталей, как траверса, цапфа, тяга. Приводится технико-экономическое рассмотрение себестоимости на операции пневмодробеструйного упрочнения, который подтверждает экономическую оправданность повышения скорости дробы.

В заключении изложены результаты исследований, а в приложениях А и Б представлены соответствующие акты внедрения результатов диссертационной работы в учебный процесс и опытно-промышленной проверки пневмодробеструйной обработки детали «Траверса».

Материалы диссертационной работы имеют структурированную последовательность изложения, обладают внутренним единством, изложены с использованием современного понятийного аппарата.

Основные научные положения, выносимые автором диссертации на защиту, были доложены и обсуждены на 6 конференциях различного уровня, в том числе на международных и всероссийских, что говорит о достаточно хорошей апробации работы.

Диссертация соответствует пунктам 3, 4, 7 и 9 области исследований паспорта специальности 2.5.6 – Технология машиностроения.

Автореферат в полной мере соответствует содержанию диссертации.

Актуальность работы. Для повышения сопротивления усталости деталей машин, в том числе деталей стоек шасси взлётно-посадочных устройств, а, следовательно, их надежности и долговечности, используют различные методы упрочняющей обработки. К данным методам обработки относится метод пневмодробеструйного упрочнения, получивший достаточно широкое распространение при обработке сложнопрофильных деталей и деталей, имеющих достаточно большие габаритные размеры. Данный процесс поверхностно-пластического деформирования способствует

формированию в поверхностном слое деталей благоприятных сжимающих остаточных напряжений, стабилизирует величину шероховатости поверхности, а также предотвращает образование концентраторов напряжений. Также преимуществом данного метода упрочнения является то, что он не допускает существенного перенаклёпа поверхностного слоя. Процесс пневмодробеструйного упрочнения осуществляется при скоростях дроби порядка 60 м/с и при небольших величинах подачи сопла, в связи с этим трудоемкость для данного процесса достаточно высокая.

С целью повышения производительности процесса пневмодробеструйного упрочнения в работе приведены имитационные модели, регрессионные зависимости, позволяющие определить рациональные условия обработки с обеспечением требуемого качества обработанных поверхностей, исследовано влияние режимов обработки на образование застойных зон, что в свою очередь является актуальной задачей.

Степень обоснованности и достоверность научных положений и выводов. На основе анализа отечественной и зарубежной научной и научно-технической литературы соискателем сформулированы тема диссертационной работы, цель и задачи исследований. Достоверность результатов диссертационной работы обеспечивается обоснованностью принятых допущений и ограничений в регрессионных и имитационных моделях, использованием известных методов расчёта, применением сертифицированных программных продуктов, адекватностью полученных регрессионных зависимостей, проверенных по критериям достоверности.

Научная новизна. Научной новизной обладают следующие положения диссертационной работы: имитационная модель процесса пневмодробеструйного упрочнения для определения площади контакта потока дроби с поверхностью заготовки с учётом образованием застойных зон; имитационная модель процесса пневмодробеструйного упрочнения для определения остаточных напряжений и накопленной деформации в поверхностном слое заготовок при точечном воздействии дроби; имитационная модель процесса пневмодробеструйного упрочнения для определения напряжённо-деформированного состояния поверхностного слоя заготовок с учётом скорости движения распыляющего сопла и скорости насыщения предельной пластической деформации; методика исследования шероховатости поверхности крупногабаритных деталей сложных пространственных форм с помощью оптико-электронного комплекса на рабочем месте и идентификации параметров структуры с параметрами шероховатости.

Практическая ценность и реализация работы. Среди разработок, полученных в процессе выполнения диссертационной работы, практическую ценность представляют: имитационные модели процесса пневмодробеструйного упрочнения для определения площади контакта потока дроби с поверхностью заготовки с учётом образования застойных зон, остаточных напряжений и накопленной деформации в поверхностном слое заготовок при точечном воздействии дроби, напряжённо-деформированного состояния поверхностного слоя заготовок с учётом скорости движения распыляющего сопла и скорости насыщения предельной пластической деформации; регрессионные модели влияния режимов пневмодробеструйного упрочнения на параметры напряженно-деформационного состояния поверхностного слоя заготовок; рекомендации для определения рациональных условий упрочнения поверхностного слоя деталей из титановых сплавов при пневмодробеструйном упрочнении; режимы и условия пневмодробеструйного упрочнения, обеспечивающие требуемые параметры качества поверхности деталей; рекомендации по измерению шероховатости на поверхностях крупногабаритных деталей сложных пространственных форм на рабочем месте; результаты опытно-промышленной проверки на ОАО «Авиаагрегат» при пневмодробеструйном упрочнении детали «Траверса» (акт опытно промышленной проверки), а материалы диссертационной работы нашли применение в учебном процессе Самарского государственного технического университета (подтверждено актом об использовании результатов научно-исследовательской работы в образовательной деятельности).

Общие замечания по диссертационной работе. Несмотря на достаточно высокий уровень, диссертационная работа Люшни Дмитрия Андреевича не лишена некоторых недостатков:

1. В первой главе автором диссертации приводятся, какие результаты были достигнуты авторами других работах и что в данных работах не учитывается, однако не на все литературные источники в тексте данной главы присутствуют библиографические ссылки, автор диссертации в некоторых ссылках ограничивается только упоминанием фамилий авторов упоминаемых работ. В данной главе следовало бы приводить все литературные источники, без исключения, которые автор диссертации анализировал в ходе своей научной работы.

2. К сожалению, автором рассматривается только одна группа обрабатываемых материалов – титановые сплавы, производство деталей авиационной техники не ограничивается применение только этой группы

материалов, в производстве стоек шасси самолётов ИЛ-476 также используются высокопрочная сталь 30ХГСН2А-ВД.

3. В подразделе 2.3 при построении имитационной модели № 1 отмечается, что при построении учитывались скорость дробы, диаметр дробы и угол распыла, а при построении имитационной модели не ясно, какие именно параметры процесса пневмодробеструйного упрочнения учитывались в данной модели, и какие допущения принимались.

4. Из подраздела 3.1 не ясно, какие виды напряжений (нормальные, касательные эквивалентные) рассматривались и в каком направлении (окружном, осевом, радиальном). Также автором при анализе результатов моделирования не отмечается какой характер, сжатия или растяжения имеют полученные численным методом остаточные напряжения. О каких напряжениях идет речь?

5. Из результатов расчёта напряжённо-деформированного состояние полученного с использованием имитационных моделей №2 и №3 приведенных в таблицах 3.4, 3.5, 3.6 возникает вопрос, подтверждаются ли данные результаты, с результатами натуральных исследований соискателя, либо с работами других авторов, рассмотренных в ходе литературного анализа.

6. На рисунке 4.8 представлены результаты натуральных и численных экспериментов, расхождение результатов составляет порядка 50 %, автор объясняет эти результаты уменьшением числа многократных воздействий на обрабатываемую поверхность, не совсем понятно, почему они увеличиваются при этом. Из рисунка 4.9 не ясно, какие именно напряжения сравнивались, максимальные или напряжения на поверхности?

7. Автор диссертации в конце раздела 1.5 утверждает, что не существует методик, позволяющих оценить шероховатость на крупногабаритных деталях сложной формы. Вопрос заключается в том, что достаточно ли глубоко соискателем произведен литературный анализ, позволяющий так однозначно говорить, что по результатам литературного анализа в рассмотренных работах подобных исследований найдено не было.

8. Глава 4 имеет название «Исследование остаточных напряжений поверхности после пневмодробеструйного упрочнения», но кроме остаточных напряжений в данной главе рассматриваются деформации образцов после упрочняющей обработки, а также приводятся исследования микротвёрдости. Почему нельзя было дать обобщенное название главы?

9. Каким образом при опытно-промышленной проверки на детали «Траверса» контролировались полученные результаты микротвёрдости, глубины упрочнения, максимальной величины остаточных напряжений и глубины её залегания и шероховатости поверхности.

Указанные замечания не снижают общего положительного впечатления от выполненной диссертации.

Заключение по диссертационной работе. Диссертационная работа Люшня Дмитрия Андреевича является завершённой научно-квалификационной работой, выполненной на актуальную тему и обладающей как научной новизной, так и практической значимостью. Она направлена на повышение эффективности пневмодробеструйного упрочнения деталей из титановых сплавов за счёт применения рациональных условий и режимов обработки, испытывающих знакопеременные нагрузки, такие как траверсы взлетно-посадочных устройств самолетов и т.д., путём определения рациональных условий и режимов обработки. Диссертационная работа в полной мере отвечает требованиям ВАК Министерства науки и высшего образования РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям и определенным пунктами 9 – 14 «Положения о присуждении ученых степеней утвержденного постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. за № 842 в редакции от 25.01.2024 г. Считаю, что Люшня Дмитрий Андреевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.6 – Технология машиностроения.

Председатель – д-р техн. наук, профессор Табаков В. П.

Спасибо, Алексей Николаевич. Дмитрий Андреевич, ответьте на замечания, можете поближе подойти к микрофону.

Соискатель Люшня Д. А.

Ответ на первое замечание. С замечанием согласен.

Ответ на второе замечание. Исследование процесса ПДУ высокопрочных сталей является целью дальнейших исследований.

Ответ на третье замечание. Режимы, которые применялись при построении модели №2, можно увидеть в таблице 3.4.

Ответ на четвертое замечание. В качестве критерия напряжённого состояния принимали напряжения по Мизесу, которые представляют комбинацию трех главных напряжений. Учитывая то, что дробеструйная обработка формирует в поверхностном слое остаточные напряжения сжатия, полученные значения были приняты, соответственно, за напряжения сжатия.

Ответ на пятое замечание. Результаты сравнения расчетных и экспериментальных замеров приведены на рис.4.4 – 4.5, 4.7 – 4.8, 4.9 – 4.10.

Ответ на шестое замечание. На рисунке 4.8 величина экспериментальных значений в некоторых точках больше 50 %. Это связано с тем, что скорость движения сопла при расчете равнялась 0, при эксперименте скорость сопла составляла 0,8 мм/с.

С седьмым замечанием согласен.

С восьмым замечанием согласен.

Ответ на девятое замечание. Оценка напряженно-деформированного состояния при пневмодробеструйном упрочнении деталей проводилась с помощью образцов-свидетелей.

У меня всё.

Председатель – д-р техн. наук, профессор Табаков В. П.

Алексей Николаевич, Вас удовлетворяет ответ?

Официальный оппонент – канд. техн. наук, доцент Швецов А. Н.

Да.

Председатель – д-р техн. наук, профессор Табаков В. П.

Всё, спасибо. Присаживайтесь. Так, ну что, приступаем к моменту обсуждения диссертации. Кто хочет выступить?

Д-р техн. наук, доцент Веткасов Н. И.

Давайте сделаем технический перерыв.

Председатель – д-р техн. наук, профессор Табаков В. П.

Технический перерыв мы сделаем для голосования. Я предлагал технический перерыв – сказали не нужно. Срочно? Плохо?

Д-р техн. наук, профессор Киселев Е. С.

Владимир Петрович, давайте сделаем.

Председатель – д-р техн. наук, профессор Табаков В. П.

Терпимо?

Д-р техн. наук, доцент Веткасов Н. И.

Ну, желательно.

Д-р техн. наук, профессор Киселев Е. С.

Давайте сделаем на 5-7 минут.

Председатель – д-р техн. наук, профессор Табаков В. П.

Объявляется технический перерыв на 5 минут.

Технический перерыв

Председатель – д-р техн. наук, профессор Табаков В. П.

Так, продолжаем. Кто хочет выступить?

Д-р техн. наук, доцент Лобанов Д. В.

Давайте я.

Председатель – д-р техн. наук, профессор Табаков В. П.

Пожалуйста. Доктор наук Лобанов Д. В.

Д-р техн. наук, доцент Лобанов Д. В.

Надо понимать, что работа, конечно же, кандидатская, что она имеет как положительные, так и отрицательные стороны. Чего не хватило, то,

конечно же, хотелось бы сведений о формировании эксплуатационных характеристик того изделия, которое Дмитрий Андреевич представил, возможно, в сравнении с другими методами упрочнения и повышения эксплуатационных характеристик. Это было бы, все-таки, убедительно, с точки зрения того, что эти методы, предложенные соискателем, имеют эффект. Еще не хватило того, что структурные изменения можно было бы подтвердить с помощью либо оптической микроскопии, либо растровой электронной микроскопии, что позволило бы получить окончательные результаты, сопоставимые с теми, которые есть в моделях, которые есть в экспериментальных исследованиях, но это, наверное, задача для дальнейшей работы соискателя, для более детального изучения процесса.

Что импонирует в работе Дмитрия Андреевича, то что она достаточно разносторонняя. Она имеет и некие цифровые двойники, которые позволяют с одной стороны сократить время исследований и материальные ресурсы, ну и, конечно, оценить, с какой-то долей вероятности, те процессы, которые могут происходить в различных материалах. Сегодня, опять-таки, говорилось, что можно проверить на этих же имитационных моделях какие-то другие материалы, задав им другие свойства и тем самым подтвердить или опровергнуть гипотезы развития этой теории. Имеется, конечно же, некая взаимосвязь, которая тоже импонирует, имитационных, аналитических и регрессионных моделей, что, в конечном итоге, позволило автору сформировать и практические рекомендации, что достаточно ценно для промышленности, потому как эти рекомендации предложены на научно-обоснованной базе.

В целом, работа представляется как целостное исследование, я буду голосовать положительно. Считаю, работа достаточно убедительно доказывает, что Дмитрий Андреевич готов к своей дальнейшей работе и представил работу в полном объеме. Спасибо.

Председатель – д-р техн. наук, профессор Табаков В. П.

Спасибо. Кто еще?

Д-р техн. наук, профессор Горшков Б. М.

Можно я.

Председатель – д-р техн. наук, профессор Табаков В. П.

Борис Михайлович, пожалуйста.

Д-р техн. наук, профессор Горшков Б. М.

Уважаемые члены Совета, мы заслушали работу, заслушали оппонентов, руководителя и из этого многое прояснилось, для меня, по крайней мере. Например, при выступлении научного руководителя было сказано, что понимается под крупногабаритными деталями, где эти размеры,

какие площади необходимо обрабатывать, потому что в связи с этим возникает необходимость определения чем и как обрабатывать. Если большая площадь – необходимо повышать производительность. Это было очень интересно и стало понятно. Второй момент – выступление оппонента. Оппонент сказал: «а где это применяется?», потому что то, что делали – хорошо, но для чего это делалось? Какие эти исследования? Где они применимы? Они, оказывается, применимы в авиации. Они применимы в конкретном самолете – ИЛ 476. Решаются вопросы надежности, тем более, шасси самолета, имеющего большие размеры – это очень важно. Поэтому то, что проделал Ваш соискатель – я считаю, что это достойная работа. Полная, законченная работа. Я буду голосовать «за» и приглашаю Вас поддержать меня.

Председатель – д-р техн. наук, профессор Табаков В. П.

Спасибо. Александр Федорович, пожалуйста.

Д-р техн. наук, профессор Денисенко А. Ф.

Во-первых, то, что было задано много вопросов, практически каждый задал, говорит о том, что тема достаточно интересная и вызывает массу вопросов. Но, как всегда, есть положительные стороны, есть отрицательные. Чего не хватило мне и, во многом, это объясняет то количество вопросов, которые были заданы другими – это злополучный 20-й плакат, на котором регрессионные модели представлены. Я не увидел, откуда появились уровни факторов. Вот единственное, что я нашел и услышал потом, это что больше 90 м/с происходит разрушение дроби. Но, обратите внимание, какой был указан размер дроби – 0,6 мм, а что мы видим по уровню факторов – 1,4 мм. Откуда такой уровень взялся – я не услышал обоснования этих уровней. И, второе, что в целях работы фигурируют рациональные режимы. Каким образом выбирались и предлагались именно рациональные режимы – как-то это осталось за кадром. Собственно, решается многофакторная, многокритериальная задача и мы знаем, что в этом случае, при оптимизации, мы не получаем оптимальную модель, мы получаем Парето-оптимальные решения, область. Так вот, надо было говорить, как из этой области выбираются не оптимальные, а рациональные режимы. Вот это, к сожалению, осталось в стороне, но, наверное, дает основу для того, чтобы провести дальнейшие исследования. Что мне понравилось. Если мы посмотрим на все последние диссертации и исследования, то для ряда технологических процессов то, что невозможно было сделать раньше, сейчас появляется возможность использования численного моделирования, использования прикладных пакетов, эти вещи расширить, понять и делать соответствующие выводы. И, как мы увидели в этой работе, соискатель

вполне владеет этими современными пакетами и делает из них соответствующие выводы. Поэтому, я думаю, что его работа не заканчивается, ее можно продолжать и совершенствовать. Я буду голосовать «за» и призываю всех поддержать соискателя в достижении искомой ученой степени.

Председатель – д-р техн. наук, профессор Табаков В. П.

Спасибо. Александр Федорович. Профессор Киселев Евгений Степанович, пожалуйста.

Д-р техн. наук, профессор Киселев Е. С.

Хочу продолжить дискуссию, которую начал с Владимиром Петровичем. В любой работе любые члены Диссертационного совета, сколько скажут сделать замечаний, столько и сделают. Так и по этой работе. Ну мне не нравится, то что он там с остаточными напряжениями не разобрался до конца. Очень не нравится. Но я завидую ему, то что он хорошо владеет программными продуктами, которые позволяют делать абсолютно всё. Не нравятся ответы на замечания оппонентов, ну, что такое «взял VT22, вот Моисеев какой-то рекомендовал». VT22 это титановый сплав, который используется уже лет 40 и использовался еще в Ташкенте на ИЛ 476 и сейчас, по сути говоря, титан этот, который он обрабатывает, он старый и выпускается уже достаточно давно. Для сравнения, я уже говорил на семинаре, есть в г. Нижний Новгород завод «Гидромаш». Он делает аналогичные детали для зарубежных самолетов Boeing, Airbus, ну, и, кое-что еще. Так вот, там используется совершенно другой титановый сплав – 555. Говорят, что он намного и прочнее, и трудности в его обработке просто несоизмеримы, в сравнении с этим. Тут прямо надо сказать, что выбран этот сплав потому, что достаточно широко используется на отечественных самолетах. Так и надо сказать, чего ссылаться на Моисеева, который написал эту книжку лет 30 назад и мы, значит, будем его цитировать, а значит, этого лучше не надо. Все идет у нас каждый год абсолютно другое, меняется. Сделал замечание Владимир Николаевич Клячкин, Александр Федорович сказал по регрессионным моделям, там что-то совсем неладное. Мне кажется, немножко ему не хватает опыта, квалификации в этом плане. Но, в целом, несмотря на то, что можно сделать 50 или 70 замечаний, я считаю, что эту работу можно рекомендовать к присуждению ученой степени кандидата технических наук.

Председатель – д-р техн. наук, профессор Табаков В. П.

Так, спасибо, Евгений Степанович. Есть еще желающие? Нет. Слово предоставляется соискателю для заключительного слова. Пожалуйста, Дмитрий Андреевич.

Соискатель Люшня Д. А.

Хочу поблагодарить, в первую очередь, своего научного руководителя Носова Николая Васильевича за огромную проделанную работу и его труд. Оппонентов Тамаркина Михаила Аркадьевича и Швецова Алексея Николаевича за интерес к моей работе, Крупенникова Олега Геннадьевича и Унянина Александра Николаевича за их консультации и сопровождение в процессе подготовки защиты и, конечно, весь состав Диссертационного совета за интерес к работе и озвученные замечания, которые будут учтены в моей дальнейшей деятельности и, конечно, за активное обсуждение. Всем спасибо.

Председатель – д-р техн. наук, профессор Табаков В. П.

Спасибо. Переходим к голосованию. Поступили предложения по составу счетной комиссии. Счетная комиссия из профессоров Денисенко Александра Федоровича, Клячкина Владимира Николаевича и Булыжева Евгения Михайловича. Нет возражений? Нет. Прошу проголосовать. Кто за? Единогласно. Прошу счетную комиссию приступить к работе. Объявляется технический перерыв на голосование.

Технический перерыв. Счетная комиссия организует тайное голосование.

Председатель – д-р техн. наук, профессор Табаков В. П.

Слово предоставляется председателю счетной комиссии.

Д-р техн. наук, доцент Булыжев Е. М.

Протокол №1 заседания счетной комиссии от 25 декабря 2024 года, избранной диссертационным советом 99.2.001.02. Состав избранной комиссии: Денисенко А. Ф., Булыжев Е. М., Клячкин В. Н.

В состав диссертационного совета дополнительно введены – 0 человек, присутствовало на заседании – 11 членов совета, в том числе докторов наук по профилю рассматриваемой диссертации – 6, роздано бюллетеней – 11, осталось не розданных бюллетеней – 3. В урне оказалось – 11, за – 11, против – 0, недействительных – 0.

Председатель – д-р техн. наук, профессор Табаков В. П.

Прошу проголосовать за данный протокол. Кто за? Кто против? Воздержался? Нет. Таким образом, на основании тайного голосования: за – 11, против – нет, недействительных бюллетеней – нет, объединенный диссертационный совет, созданный на базе Ульяновского государственного технического университета и Тольяттинского государственного университета признает, что диссертация Люшни Дмитрия Андреевича представляет собой

научно-квалификационную работу, в которой содержится решение актуальной задачи повышения эффективности пневмодробеструйного упрочнения деталей из титановых сплавов за счет применения рациональных условий и режимов обработки, имеющей существенное значение для развития технологий машиностроения. Диссертация соответствует критериям установленным в разделе II (п. 9 – 14) «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. за № 842 с изменениями в редакции от 25.01.2024 г., и присуждает Люшне Дмитрию Андреевичу ученую степень кандидата технических наук по специальности 2.5.6 – Технология машиностроения.

Разрешите мне от имени нашего совета и себя лично поздравить Вас, Дмитрий Андреевич, с успешной защитой диссертации, пожелать Вам дальнейших успехов.

Соискатель Люшня Д. А.

Спасибо.

Председатель – д-р техн. наук, профессор Табаков В. П.

Продолжаем наше заседание. У членов совета имеется проект заключения по диссертации Люшни Д. А. Есть предложение принять его за основу. Нет возражений? Нет. Принимается.

Обсуждение заключения

Председатель – д-р техн. наук, профессор Табаков В. П.

Есть предложение принять заключение с учетом тех замечаний, которые возникли в процессе обсуждения. Прошу проголосовать за данное заключение. Кто за? Против? Воздержался? Принимается единогласно.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ОБЪЕДИНЕННОГО ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА
99.2.001.02, СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО
УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «УЛЬЯНОВСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ» И
ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ТОЛЬЯТТИНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
МИНИСТЕРСТВА НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ ПО
ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ
КАНДИДАТА ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета
от 25.12.2024 г. № 84

О присуждении Люшне Дмитрию Андреевичу, гражданину Луганской Народной Республики, ученой степени кандидата технических наук.

Диссертация «Повышение эффективности пневмодробеструйного упрочнения деталей из титановых сплавов за счет применения рациональных условий и режимов обработки» по специальности 2.5.6 – Технология машиностроения (технические науки) принята к защите 23.10.2024 г., протокол № 83, объединенным диссертационным советом 99.2.001.02, созданным на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения (ФГБОУ) высшего образования (ВО) «Ульяновский государственный технический университет», ФГБОУ ВО «Тольяттинский государственный университет», Министерства науки и высшего образования РФ, по адресу 432027, г. Ульяновск, ул. Северный Венец, 32, действующим на основе приказов № 123/нк от 17.02.2015 г., № 561 от 03.06.2021, № 859/нк от 12.07.2022 г. и № 250/нк от 20.03.2024 г.

Соискатель Люшня Дмитрий Андреевич, 17 января 1996 года рождения.

В 2019 году с отличием окончил Самарский государственный технический университет по направлению 15.04.05 «Конструкторско-

технологическое обеспечение машиностроительных производств» и получил степень магистра.

В 2023 году окончил очную аспирантуру федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Самарский государственный технический университет» по направлению подготовки 15.06.01 «Машиностроение», специальность 2.5.6 – Технология машиностроения.

Диссертация выполнена на кафедре «Технология машиностроения, станки и инструменты» ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет» Министерства науки и высшего образования РФ.

Научный руководитель – Носов Николай Васильевич, профессор, д.т.н., профессор кафедры «Технология машиностроения, станки и инструменты» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Самарский государственный технический университет».

Официальные оппоненты:

1. Тамаркин Михаил Аркадьевич доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технология машиностроения» ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет», г. Ростов-на-Дону.

2. Швецов Алексей Николаевич кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология производства двигателей» ФГБОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева», г. Самара.

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет», г. Волгоград., в своем положительном заключении, рассмотренном и единогласно одобренном на расширенном заседании кафедры «Технология машиностроения» ВолгГТУ с участием кафедр «Автоматизация технологических процессов» ВолгГТУ и «Технология и оборудование машиностроительных производств» Волжского

политехнического института (ВПИ, филиал ВолгГТУ), протокол № 2 от 24 октября 2024 г., указала, что диссертация Люшни Дмитрия Андреевича является законченным научным исследованием. В обсуждении работы приняли участие 16 преподавателей, в том числе 6 докторов и 8 кандидатов технических наук по специальностям 05.02.07 (05.03.01, 2.5.5), 05.02.08 (2.5.6) и 05.13.06 (2.3.3).

В Заключении, подписанном заведующим кафедрой «Технология машиностроения» ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет» д.т.н., профессором Юлием Львовичем Чигиринским, специальности: 05.02.08 – «Технология машиностроения»; 05.13.06 – «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами в машиностроении» и утвержденным Первым проректором Волгоградского государственного технического университета членом-корр. РАН, профессором, д.т.н. Кузьминым Сергеем Викторовичем указано, что диссертация Люшни Д.А. на тему «Повышение эффективности пневмодробеструйного упрочнения деталей из титановых сплавов за счет применения рациональных условий и режимов обработки» представляет собой завершённую научно-квалификационную работу, в которой на основании выполненных автором исследований изложены научно-обоснованные конструкторско-технологические решения по повышению эффективности пневмодробеструйного упрочнения деталей из титановых сплавов для развития авиационной промышленности.

По результатам работы над диссертацией автором опубликовано восемь печатных работ, в том числе три статьи в журналах из Перечня, рекомендованного ВАК РФ. Автореферат соответствует содержанию диссертационной работы.

Учитывая значимость материалов диссертации для науки и практики, актуальность тематики, личный вклад соискателя, уровень обсуждения результатов в печати и на конференциях, следует признать диссертационную работу «Повышение эффективности пневмодробеструйного упрочнения

деталей из титановых сплавов за счет применения рациональных условий и режимов обработки» по своему содержанию, объему, актуальности, научной и практической значимости, соответствующей требованиям ВАК Министерства науки и высшего образования РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям и определенным пунктами 9 – 14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства

Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. за № 842 с изменениями на 25.01.2024 г., а ее автор, Люшня Дмитрий Андреевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.6 – Технология машиностроения .

Наиболее значимые работы соискателя по теме диссертации:

1. Кургузов, Ю. И. Движение микрочастиц в воздушной среде при пневмодробеструйной обработке / Ю. И. Кургузов, Д. А. Люшня // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2020. – Т. 22. № 3(95). – С. 120 – 126.

2. Носов, Н. В. Исследование структуры сложных поверхностей деталей после дробеструйной обработки / Н. В. Носов, Д. А. Люшня // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2023. – Т.24. № 4(2). – С. 104 – 108.

3. Nosov, N. V. Investigation of residual stresses during processing of GTE blades with microbeads / N. V. Nosov, Y. I. Kurguzov, D. A. Lyushnya // Materials Science Forum. – 2021. – Vol. 1037 MSF. – P. 547 – 551.

4. Люшня, Д. А. Исследование энергетической составляющей при пневмодробеструйном упрочнении / Д. А. Люшня // Высокие технологии в машиностроении : Материалы XIX всероссийской научно-технической конференции с международным участием, Самара, 10–11 ноября 2022 года / Отв. редактор Р.Г. Гришин. – Самара: Самарский государственный технический университет, 2022. – С. 108 – 110.

5. Люшня, Д. А. Исследование процесса дробеструйной обработки с применением DEM-FEM подхода / Д. А. Люшня // Материаловедение, формообразующие технологии и оборудование 2022 (ICMSSTE 2022) : Материалы международной научно-практической конференции, Ялта, 16–19 мая 2022 года / Отв. редактор В.В. Дядичев. – Симферополь: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского" (Медицинская академия имени С.И. Георгиевского - структурное подразделение), 2022. – С. 531 – 537.

6. Люшня, Д. А. Исследование неполной линейной регрессионной модели эффективности пневмодробеструйного упрочнения / Д. А. Люшня, В. А. Дмитриев // Высокие технологии в машиностроении : Материалы XX всероссийской научно-технической конференции с международным участием, Самара, 9–10 ноября 2023 года / Отв. редактор Р.Г. Гришин. – Самара: Самарский государственный технический университет, 2023. – С. 68 – 74.

На диссертацию и автореферат поступили отзывы:

1. Отзыв ведущей организации – **ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет»**, г. Волгоград, подписанный д.т.н., профессором, заведующим кафедрой Ю.Л. Чигиринским и утвержденный Первым проректором по ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет», г. Волгоград, членом-корр. РАН, профессором, д.т.н. Кузьминым Сергеем Викторовичем.

Отзыв положительный, имеются ряд замечаний – как по существу, так и формальных.

Замечания по существу работы:

1. Одной из отличительных особенностей работы является разработка и активное применение комплекса «имитационных» (гл. 2, 3) моделей процесса ПДУ. В чем, с точки зрения автора, состоит различие между имитационными, аналитическими и статистическими моделями? Во всех

трех моделях предполагается описание системы взаимосвязей между входными (общие условия и технологический режим обработки) и выходными (шероховатость, производительность, оценка напряженно-деформированного состояния обработанной поверхности) параметрами.

2. При построении имитационных (гл. 2, 3) моделей процесса ПДУ автор не учитывает технологическую наследственность.

3. В диссертационной работе приведены (табл. 1, стр. 13 автореф.; ф. 3.9, стр. 94, табл. 3.9, стр. 97 дисс.) линейные математические модели процесса ПДУ, отражающие взаимосвязь между количественными оценками условий обработки и параметрами качества поверхностного слоя, предназначенные для определения рациональных режимов ПДУ. Однако, в работе отсутствует явное указание на этап обработки (черновая или чистовая) и не приведено обоснование выбора математической спецификации модели – неясно, почему для расчетов предлагается именно линейная модель.

4. В диссертации не приведено обоснование выбора схемы взаимодействия потока дроби с поверхностью детали – как следствие, влияние геометрических размеров и формы обрабатываемых поверхностей на качество обработанной поверхности не рассматривается.

5. Несмотря на явную новизну подхода к теоретическому определению площади застойной зоны (гл. 2) при взаимодействии факела дроби с обрабатываемой поверхностью, автор не рассматривает потери энергии при соударении дроби с обрабатываемой поверхностью.

6. Необходимо более строгое обоснование выбора метода исследования напряженно-деформированного состояния поверхности после ПДУ – неясно, почему автор использует исследование только тангенциальных напряжений на поверхности образцов-свидетелей.

7. В работе глубоко исследованы вопросы формирования микрорельефа обработанной поверхности, и важные аспекты напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя и определены диапазоны

рациональных режимов ПДУ. Однако, исследованию степени пластической деформации при предлагаемых режимах упрочнения уделено недостаточно внимания.

Формальные замечания:

8. В тексте диссертации встречаются (например, на стр. 105 «образцов свидетелей», на стр. 106 «образов-свидетелей» вместо «образцов-свидетелей» и др.) орфографические ошибки.

9. Кривые на графиках сравнения расчетных данных и экспериментально полученных результатов (рис. 4.7, 4.8, стр. 108...109 дисс.) построены с отступлениями от общепринятых рекомендаций. В частности, на расчетных гладких кривых (линии 1) показаны маркеры точек, что характерно для экспериментальных зависимостей. В то же время, на экспериментальных графиках (линии 2) маркеры соединены гладкой линией, что обычно делается для расчетных зависимостей. Кроме того, на экспериментальных зависимостях 14 не показаны «отсечки» погрешностей. Указанные замечания не снижают общей ценности диссертационной работы и не влияют на значимость теоретических и практических результатов исследования. Замечания носят рекомендательный характер и могут быть учтены автором при планировании дальнейших исследований.

2. Отзыв официального оппонента – **Тамаркина Михаила Аркадьевича**, д.т.н., профессора, заведующего кафедрой «Технология машиностроения» ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет»,
г. Ростов-на-Дону.

Отзыв положительный, со следующими замечаниями. Работа в целом производит хорошее впечатление, однако следует отметить некоторые вопросы и замечания, в том числе редакционного характера:

1. Задачи, решаемые в диссертации, ставятся на основе материала ВТ22, однако не понятно на какой основе сделан этот выбор, т.к. высокопрочных титановых сплавов больше.

2. Не приведены методики КЭ-анализа. В частности, ничего не сказано про этапы выполнения анализа: физические характеристики объектов, необходимые для решения задачи; разбиение модели на конечные элементы (какую форму конечных элементов, тип разбиения и размеры элементов использовали), ограничения, нагрузки и т.д. Не понятно также, каким образом решали задачу идентификации профиля остаточных напряжений и добавления этого профиля в модель конечных элементов.

3. В разделе «Имитационное моделирование» приведены рекомендации по выбору режимов ПДУ для плоских поверхностей, но отсутствует переход по выбору режимов для криволинейных цилиндрических поверхностей и поверхности сложной формы. Нужно обосновать, возможно ли такое допущение?

4. Следует привести в порядок терминологию. Необходимо пояснить, что означают понятия «вносимые напряжения», «глубина деформационного воздействия», «общая деформация», «эквивалентные упругие деформации» и др.

5. В работе используется скорость дроби при упрочнении 90 м/с, но не сказано, чем ограничивается такая скорость шариков.

6. На процессы упрочнения и формирования остаточных напряжений влияет не только силовой, но и температурный фактор. При ударах шариков о поверхность заготовки температура ее поверхности повышается. Учитывается ли это в используемых в программных комплексах?

7. На рис. 3.24 и 3.25 максимальные значения остаточных напряжений, формируемых при скорости 60 и 90 м/с отличаются незначительно? С чем это связано?

8. В описании методики исследования шероховатости поверхности оптическим методом неясно как выбирались размеры эталона (дисс., стр. 40), а также отсутствует объяснение по влиянию освещенности исследуемой поверхности на параметры автокорреляционной функции. Какова погрешность измерения параметров шероховатости с помощью оптико-

электронного комплекса? В каких случаях его использование необходимо?

Указанные замечания носят частный характер и не снижают значимости выполненных исследований. Актуальность работы, её научная новизна, практическая и теоретическая полезность полученных в ней результатов не вызывают сомнений.

В целом приведенные замечания не снижают научной новизны, практической ценности полученных результатов и общей положительной оценки диссертационной работы.

3. Отзыв официального оппонента – **Швецова Алексея Николаевича**, к.т.н., доцента кафедры технологий производства двигателей, ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва» (Самарский университет). Защитил кандидатскую диссертацию по специальности 05.07.05.

Отзыв положительный, со следующими замечаниями. Несмотря на достаточно высокий уровень, диссертационная работа Люшни Дмитрия Андреевича не лишена некоторых недостатков:

1. В первой главе автором диссертации приводятся какие результаты были достигнуты авторами других работах и что в данных работах не учитывается, однако не на все литературные источники в тексте данной главы присутствуют библиографические ссылки, автор диссертации в некоторых ссылках ограничивается только упоминанием фамилий и инициалов авторов упоминаемых работ. В данной главе следовало бы приводить все литературные источники, без исключения, которые автор диссертации анализировал в ходе своей научной работы.

2. К сожалению, автором рассматривается только одна группа обрабатываемых материалов – титановые сплавы, производство деталей авиационной техники не ограничивается применение только этой группы материалов, в производстве стоек шасси самолётов ИЛ-476 также используются высокопрочная сталь 30ХГСН2А-ВД.

3. В подразделе 2.3 при построении имитационной модели № 1 отмечается, что при построении учитывались скорость дроби, диаметр дроби и угол распыла, а при построении имитационной модели №2 не ясно, какие именно параметры процесса пневмодробеструйного упрочнения учитывались в данной модели, и какие допущения принимались.

4. Из подраздела 3.1 не ясно, какие виды напряжений (нормальные, касательные эквивалентные) рассматривались и в каком направлении (окружном, осевом, радиальном). Также автором при анализе результатов моделирования не отмечается какой характер, сжатия или растяжения имеют полученные численным методом остаточные напряжения. О каких напряжениях идет речь?

5. Из результатов расчёта напряжённо-деформированного состояния, полученного с использованием имитационных моделей №2 и №3 приведенных в таблицах 3.4 – 3.6 возникает вопрос, подтверждаются ли данные результаты, с результатами натурных исследований соискателя, либо с работами других авторов, рассмотренных в ходе литературного анализа.

6. На рисунке 4.8 представлены результаты натурных и численных экспериментов, расхождение результатов составляет порядка 50%, автор объясняет эти результаты уменьшением числа многократных воздействий на обрабатываемую поверхность, не совсем понятно, почему они увеличиваются при этом. Из рисунка 4.9 не ясно, какие именно напряжения сравнивались, максимальные или напряжения на поверхности?

7. Автор диссертации в конце раздела 1.5 утверждает, что не существует методик, позволяющих оценить шероховатость на крупногабаритных деталях сложной формы. Вопрос заключается в том, что достаточно ли глубоко соискателем произведен литературный анализ, позволяющий так однозначно говорить. Может быть, стоило говорить, что по результатам литературного анализа в рассмотренных работах подобных исследований найдено не было.

8. Глава 4 имеет название «Исследование остаточных напряжений поверхности после пневмодробеструйного упрочнения», но кроме остаточных напряжений в данной главе рассматриваются деформации образцов после упрочняющей обработки, а также приводятся исследования микротвёрдости. Почему нельзя было дать обобщенное название главы?

9. Каким образом при опытно-промышленной проверки на детали «Траверса» контролировались полученные результаты микротвёрдости, глубины упрочнения, максимальной величины остаточных напряжений и глубины её залегания и шероховатости поверхности.

Указанные замечания не снижают общего положительного впечатления от выполненной диссертационной работы.

4. **Отзыв из политехнического института ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)», г. Челябинск, подписанный Ардашевым Дмитрием Валерьевичем, д.т.н., профессором кафедры «Технологии автоматизированного машиностроения».**

Отзыв положительный, со следующими замечаниями.

1. Не обоснован объект исследования. В чем состоит актуальность рассмотрения процесса ПДУ применительно именно к крупногабаритным сложнопрофильным деталям из титановых сплавов?

2. Формулировка первого, второго и третьего аспектов научной новизны: «Имитационная модель процесса ПДУ для определения ...». Неясно, что именно является предметом моделирования, что является фактором, что параметром.

3. Формулировка шестого аспекта научной новизны. Говорится о методике по исследованию шероховатости поверхности и идентификации (установление тождественности) параметров структуры с параметрами шероховатости. Структура чего? Какие параметры структуры имеются ввиду? Следовало назвать эти параметры?

4. Теоретическая значимость исследования обычно состоит в предложении новой теории по рассматриваемой теме (подтверждению или

опровержению гипотезы) или новых подходов к решению существующей проблемы. В данном случае теоретическая значимость исследования повторяет научную новизну.

5. Отзыв из ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет», г. Донецк, подписанный Полтавцом Валерием Васильевичем, д.т.н., доцентом, заведующим кафедрой мехатронных систем машиностроительного оборудования и Гусевым Владимиром Владиленовичем, д.т.н., профессором, профессором кафедры мехатронных систем машиностроительного оборудования.

Отзыв положительный, со следующими замечаниями.

1. Вызывает некоторые сомнения указание автором в качестве положений, выносимых на защиту, имитационных моделей, регрессионных моделей и методик. Более обоснованным, на наш взгляд, было бы выделение в качестве таких положений тех закономерностей и взаимосвязей явлений, которые были установлены автором с помощью данных моделей и методик.

2. Из автореферата не ясно, каким образом в модели точечного контакта дроби с поверхностью заготовки и модели взаимодействия потока дроби с поверхностью заготовки учитывалась накопленная пластическая деформация.

3. Для титановых ($\alpha+\beta$)-сплавов, к которым относится сплав ВТ22, из которого были изготовлены исследуемые автором образцы-свидетели, характерно явно выраженное изменение физико-механических свойств при высоких скоростях деформирования. Учитывалось ли такое изменение в разработанных имитационных моделях?

4. Утверждение автора на стр. 16, что «с увеличением скорости дроби с 60 до 90 м/с величина R_a повышается на 15-20%» не согласуется с результатами, приведенными в таблице 2, согласно которым параметр R_a не увеличивается, а уменьшается.

5. Из автореферата не понятно, за счет каких слагаемых себестоимости получен экономический эффект в расчете на одну деталь (стр. 17) с учетом

того, что при увеличении давления воздуха, скорости дроби и скорости движения сопла энергетические затраты возрастут.

6. **Отзыв из ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет»**, г. Иркутск, подписанный **Зайдесом Семёном Азиковичем**, д.т.н., профессором, профессором кафедры материаловедения, сварочных и аддитивных технологий ИРННТУ, заслуженного работника ВШ РФ.

Отзыв положительный, со следующими замечаниями.

1. В подразделе «Актуальность» автор отмечает, что при скорости 90 м/с, происходит раскол дроби и снижается долговечность упрочненных изделий. Однако исследования проведены именно на такой скорости дроби, и не указаны параметры и режимы, которые устраняют указанные недостатки.

2. В автореферате не представлены графики распределения остаточных напряжений по глубине упрочненного слоя, не указан их вид и какие значения (максимальные или на поверхности) показаны на представленных в автореферате рисунках.

3. В подразделе «Структура и объем диссертационного исследования» указано, что диссертация состоит из 6 глав, но в автореферате отражено только 5 глав.

7. **Отзыв из ФГБОУ ВО «Курганский государственный университет»**, г. Курган, подписанный **Курдюковым Владимиром Ильичем**, д.т.н., профессором, профессором кафедры «Машиностроение».

Отзыв положительный, со следующими замечаниями.

1. Предметом исследований являются, все же закономерности формирования напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя деталей из титановых сплавов при пневмодробеструйном упрочнении, а не сам процесс исследования этих закономерностей, как указано в автореферате.

2. Нет описания методики оптимизации условий и режимов операции ПДУ хотя эта оптимизация является целью работы.

Здесь, на мой взгляд, автору просто необходимо было использовать метод математического планирования оптимального многофакторного эксперимента. Это позволило бы значимо сократить трудоемкость исследований и повысить степень достоверности их результатов.

3. Не приведено объяснения физической сути явлений, протекающих в зоне обработки в следствии которых, автором получены те или иные результаты воздействия входных факторов на выходные параметры процесса ПДУ. Например, почему:

- при повышении скорости дроби с 60 до 90 м/с при диаметре дроби 0,3 мм остаточные напряжения увеличиваются с 750 – 780 МПа до 800 – 810 МПа, а колебания остаточных напряжений связаны с изменением угла наклона сопла и не превышают 5 – 7 %?

- повышение скорости движения сопла способствует снижению интенсивности насыщения поверхности пластической деформацией, которое компенсируется повышением скорости дроби для обеспечения требуемого уровня остаточных напряжений и пластических деформаций?

8. **Отзыв из Поволжского государственного технического университета, г. Йошкар-Ола, подписанный Алибековым Сергеем Якубовичем, д.т.н., доцентом, заведующим кафедрой машиностроения и материаловедения. Отзыв положительный, замечаний не имеется.**

9. **Отзыв из Волгоградского государственного технического университета, г. Волгоград, подписанный Бурлаченко Олегом Васильевичем, д.т.н., профессором, заведующим кафедрой технологии строительного производства института архитектуры и строительства.**

Отзыв положительный, со следующими замечаниями.

К замечаниям по работе следует отнести отсутствие (по крайней мере в автореферате) четко сформулированных критериев, которые позволяют установить функциональные зависимости производительности ПДУ от различных факторов и, собственно, самих зависимостей в виде математической модели.

10. Отзыв из ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет», г. Новосибирск, подписанный Зверевым Егором Александровичем, к.т.н., доцентом, доцентом кафедры проектирования технологических машин.

Отзыв положительный, со следующими замечаниями.

В качестве замечания по автореферату можно указать то, что регрессионные зависимости параметров напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя (табл. 1) являются линейными, хотя использование математического планирования второго порядка позволило бы получить более точные уравнения. Указанное замечание не носит принципиального характера и не влияет на общую положительную оценку автореферата диссертации. Достоверность результатов исследования и обоснованность рекомендаций не вызывает сомнений, публикации в достаточной мере отражают суть работы.

11. Отзыв из ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет», г. Пенза, подписанный Зверовщиковым Александром Евгеньевичем, д.т.н., профессором, заведующим кафедрой «Технологии и оборудование машиностроения» и Зверовщиковым Владимиром Зиновьевичем, д.т.н., профессором, профессором кафедры «Технологии и оборудование машиностроения».

Отзыв положительный, со следующими замечаниями:

1) из какого материала предполагается изготавливать сопло устройства для обеспечения его износостойкости при увеличении давления сжатого воздуха более чем в два раза, а скорости дроби на одну треть по сравнению с производственной технологией?

2) непонятно, что автор подразумевает под выражением «насыщение поверхностного слоя пластическими деформациями», так на с.10 автореферата он называет это явление «момент постоянства напряжений», а на с.17, табл.3 - «количество ударов до предельной пластической деформации»;

3) из автореферата неясно, определялась ли для титановых сплавов предельно допустимая интенсивность динамического воздействия (ударов) дроби на единицу площади обрабатываемой поверхности, после которой начинается «перенаклеп» металла с разрушением поверхностного слоя.

Указанные замечания не снижают положительной в целом оценки исследований, выполненных автором.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается широкой известностью их достижений в области упрочняющих технологий машиностроения, наличием научных разработок, публикаций в рецензируемых журналах и вкладом в развитие данного направления исследований, обладают достаточной квалификацией, позволяющей оценить новизну представленных на защиту результатов, их научную и практическую значимость, обоснованность и достоверность полученных выводов. В ведущей организации и организациях, в которых осуществляют свою деятельность официальные оппоненты, выполнен значительный объем научных исследований, связанных с изучением процессов упрочнения, рассматриваемых соискателем в диссертационной работе.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

разработаны научно обоснованные рекомендации по выбору рациональных режимов пневмодробеструйного упрочнения (ПДУ) заготовок деталей из титановых сплавов;

разработаны имитационные модели процесса пневмодробеструйного упрочнения для определения площади контакта потока дроби с обрабатываемой поверхностью с учетом застойной зоны, определения напряжённо-деформированного состояния поверхностного слоя заготовок при точечном воздействии дроби и при воздействии потока дроби с учетом скорости движения распыляющего сопла и скорости насыщения предельной пластической деформации;

разработана регрессионная модель по определению параметров напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя заготовки в зависимости от условий и режима ПДУ;

предложена инженерная методика определения шероховатости поверхностей крупногабаритных деталей сложных пространственных форм с помощью оптико-электронного комплекса;

доказана эффективность применения рациональных режимов ПДУ при обработке заготовок крупногабаритных деталей из титановых сплавов и возможность повышения производительности процесса упрочнения;

введено понятие "застойная зона", позволяющее определять эффективную площадь контакта потока дроби с заготовкой в зависимости от условий и режимов ПДУ.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

доказана возможность повышения производительности ПДУ крупногабаритных деталей из титановых сплавов за счет рациональных режимов упрочнения, полученных на основании имитационного моделирования процесса взаимодействия потока дроби с поверхностью заготовки;

применительно к проблематике диссертации результативно использованы имитационные модели процесса ПДУ при взаимодействии потока дроби с обрабатываемой поверхностью для определения площади контакта, остаточных напряжений и накопленной деформации в поверхностном слое заготовки, а также многофакторное планирование процесса ПДУ для получения регрессионной модели влияния режимов упрочнения на напряженно-деформированное состояние поверхности;

изложены результаты численного моделирования, которые позволили спрогнозировать основные направления совершенствования технологии ПДУ, обеспечивающие требуемые характеристики качества поверхностного слоя;

раскрыты закономерности формирования напряженно-деформированного состояния поверхностей деталей из титановых сплавов в зависимости от режимов и условий ПДУ;

изучены факторы, оказывающие доминирующее влияние на напряженно-деформированное состояние поверхности при ПДУ и определена их значимость;

проведена модернизация известных зависимостей по определению площади контакта потока дроби с поверхностью заготовки через нахождение динамических параметров потока струи и площади застойной зоны.

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

разработаны и внедрены научно-обоснованные рекомендации по модернизации технологии ПДУ деталей из титановых сплавов, которые подтверждены опытно-промышленной проверкой в условиях предприятия ОАО «Авиаагрегат» (г. Самара), а также в учебном процессе при подготовке магистров по направлению «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств» в ФГБОУ ВО СамГТУ;

определены перспективы использования разработанных имитационных моделей для определения рациональных режимов ПДУ других заготовок из титановых сплавов различных конструкций;

представлены технологические решения по повышению производительности ПДУ;

разработаны рекомендации для определения рациональных условий и режимов упрочнения поверхностного слоя деталей при ПДУ, обеспечивающих требуемые параметры качества поверхностей деталей.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

для экспериментальных работ использованы современные измерительные сертифицированные средства, показана достаточная статистическая воспроизводимость результатов исследований, выполненных по разработанным соискателем методикам;

теория подтверждается согласованностью теоретических выводов и данных численного моделирования с результатами экспериментальной проверки, обоснованностью принятых допущений и ограничений, использованием известных методов расчёта, адекватностью полученных зависимостей, а также согласованностью с данными других исследователей;

идея диссертационного исследования базируется на учете влияния режимов и условий ПДУ на формирование напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя и качество поверхности;

использовано сравнение результатов, полученных соискателем, с экспериментальными данными натуральных экспериментов и других ученых по тематике диссертационной работы.

установлено качественное и количественное соответствие авторских результатов исследования с результатами, представленными в научной литературе по данной тематике;

использованы современные информационные базы и научно-техническая литература по проектированию технологии ПДУ крупногабаритных деталей из титановых сплавов.

Личный вклад соискателя состоит в:

непосредственном участии на всех этапах написания диссертации, определении цели и задач исследований, непосредственном участии в выполнении научных исследований, как теоретического, так и экспериментального характера, необходимых для решения поставленных задач и достижения цели диссертационной работы:

разработке имитационных моделей процесса ПДУ; **разработке** регрессионной модели влияния режимов упрочнения на параметры напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя заготовки; **разработке плана экспериментальных работ** по оценке влияния режимов и условий ПДУ на качество поверхности заготовок из титановых сплавов; **разработке** инженерной методики исследования шероховатости поверхностей крупногабаритных деталей сложных пространственных форм с

помощью оптико-электронного комплекса на рабочем месте; интерпретации и обобщении полученных данных, апробации и внедрении результатов исследования; **подготовке** основных публикаций по выполненной работе.

В ходе защиты диссертации соискателем Люшней Дмитрием Андреевичем даны аргументированные ответы на заданные ему в ходе заседания вопросы. Вопросы и ответы на них приведены в стенограмме заседания диссертационного совета.

Результаты исследований рекомендуется использовать:

на предприятиях машиностроительной отрасли, занимающихся изготовлением крупногабаритных деталей из титановых сплавов, на предприятиях авиационной промышленности;

в проектно-конструкторских и научно-исследовательских институтах, занимающихся разработкой новых технологий упрочнения деталей из титановых сплавов;

в высших учебных заведениях при подготовке специалистов, бакалавров и магистров направления «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств».

Диссертация охватывает основные вопросы поставленной научной задачи и соответствует критерию внутреннего единства, что подтверждается наличием плана исследований и основной идейной линии, взаимосвязью поставленных задач и полученных результатов, содержит новые научные результаты, свидетельствующие о личном вкладе автора диссертации в науку.

В диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем ученой степени работах, в которых изложены научные результаты.

Диссертационный совет пришел к выводу, что диссертация представляет собой научно-квалификационную работу, которая содержит решение актуальной задачи повышения эффективности пневмодробеструйного упрочнения деталей из титановых сплавов за счет

применения рациональных условий и режимов обработки, имеющей существенное значение для развития технологии машиностроения.

Диссертационная работа Люшни Д.А. соответствует критериям, установленным в разделе II, п.п. 9 – 14 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. за № 842 с изменениями в редакции от 25.01.2024 г.

На заседании 25 декабря 2024 г. диссертационный совет принял решение присудить Люшни Дмитрию Андреевичу ученую степень кандидата технических наук по специальности 2.5.6 – Технология машиностроения (технические науки).

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 11 человек, из них 6 докторов наук по специальности 2.5.6 – Технология машиностроения (технические науки), участвующих в заседании, из 14 человек, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту 0 человек, проголосовал: за присуждение ученой степени – 11 человек, против – нет, недействительных – нет.

Председатель – д-р техн. наук, профессор Табаков В. П.

Дмитрий Андреевич, разрешите мне от имени совета еще раз поздравить Вас с успешной защитой, с пожеланием дальнейших творческих успехов.

Уважаемые члены диссертационного совета! Благодарю всех за участие. Защита окончена, заседание объявляется закрытым. Всем большое спасибо!

Председатель диссертационного совета
д.т.н., профессор



Handwritten signature of V. P. Tabakov
14.01.24г.

Табаков В. П.

Ученый секретарь диссертационного совета
д.т.н., доцент

Handwritten signature of A. N. Unyanin
14.01.24г.

Унянин А. Н.