

На правах рукописи



**Фалеев Сергей Юрьевич**

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ  
ДРОБЕУДАРНОГО ФОРМООБРАЗОВАНИЯ  
ОБВОДООБРАЗУЮЩИХ ДЕТАЛЕЙ НА ОСНОВЕ  
ЦИФРОВЫХ РЕШЕНИЙ**

Специальность 2.5.6. Технология машиностроения

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Иркутск – 2026

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет»

**Научный руководитель:** **Александр Андреевич Пашков**  
кандидат технических наук, доцент,  
ФГБОУ ВО «Иркутский национальный  
исследовательский технический  
университет», доцент кафедры ТОМП  
«Технология и оборудование  
машиностроительных производств»

**Официальные оппоненты:** **Киричек Андрей Викторович**  
доктор технических наук, профессор  
ФГБОУ ВО «Брянский государственный  
технический университет»,  
главный научный сотрудник (г. Брянск)

**Илюшкин Максим Валерьевич**  
кандидат технических наук,  
АО «Ульяновский научно-  
исследовательский институт авиационной  
технологии и организации производства»,  
Зам. генерального директора по научному  
направлению (г. Ульяновск)

**Ведущая организация:** ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре  
государственный университет»  
(г. Комсомольск-на-Амуре)

Защита состоится 10 сентября 2026 года в 10<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета 24.2.307.01 в ФГБОУ ВО «ИРНТУ» по адресу: 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, корпус «К», конференц-зал. С диссертацией и авторефератом можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «ИРНТУ» и на официальном сайте университета [www.istu.edu](http://www.istu.edu).

Отзывы на автореферат (в 2-х экземплярах, подписанные и заверенные печатью организации) просим выслать по адресу: 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, ИРНТУ; Ученому секретарю диссертационного совета 24.2.307.01 Вулых Н.В.; e-mail: [vulix2011@yandex.ru](mailto:vulix2011@yandex.ru), тел./факс: 8(3952) 40-51-17.

Автореферат разослан «27» июля 2026 года.

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



Н.В. Вулых

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Актуальность темы исследования**

Крупногабаритные обводообразующие детали – монолитно-фрезерованные панели и обшивки монолитно-сборных панелей (далее – детали) применяются в конструкции самолётов и ракет, а также в судостроении. Точность пространственной формы данных деталей является важнейшим показателем качества выпускаемых изделий. Задача достижения высокой точности формы осложняется конструктивными особенностями деталей – тонкостенностью, наличием подкрепляющих элементов жёсткости, а также малой кривизной, для достижения которой требуется общая деформация, соизмеримая с упругой составляющей.

Для реализации процесса формообразования деталей на отечественных предприятиях применяют, как правило, прессовую гибку в передвижку в ручном режиме управления с последующей доводкой контура детали обдувкой дробью на ручных дробеструйных установках. Недостатками такой технологии являются низкая точность формы деталей при наличии огранки, высокая трудоемкость и зависимость от квалификации исполнителей. Таким образом, актуальной научной и практической задачей выступает разработка методики автоматизированного выбора режимов обработки крупногабаритных деталей на оборудовании с ЧПУ, базирующейся на данных об их геометрической форме.

### **Степень разработанности темы**

Анализ литературных источников показывает, что теоретические основы процесса дробеударного формообразования (ДУФ) достаточно изучены. Эффективность применения данной технологии подтверждена как в зарубежной, так и отечественной практикой, при этом нерешенным остаётся ряд проблем.

Для решения задач определения формоизменения деталей при ДУФ эффективным подходом является применение конечно-элементного моделирования с использованием эквивалентной нагрузки, формируемой в результате обработки дробью. Данную нагрузку задают в виде температурного расширения поверхностного слоя, предварительно рассчитанных деформаций или сил и т.д. Однако методики определения эквивалентной нагрузки с учётом реального микрорельефа зоны обработки и фракционного состава дроби весьма трудоёмки и требуют больших вычислительных ресурсов. Такие же недостатки характерны для моделирования формоизменения реальных крупногабаритных деталей при ДУФ и определения режимных параметров данного процесса.

Реализация серийной технологии ДУФ с разработкой оборудования проходного типа на основе зарубежных решений, нерациональна в связи с высокой сложностью подготовки производства и невозможностью

достижения требуемой точности формы деталей без ручной доводочной операции.

Отечественные установки контактного типа для дробеударного формообразования позволяют достичь высокой точности формы деталей, но их производительность при изготовлении крупногабаритных деталей недостаточна. Программное обеспечение для подготовки управляющих программ для данного оборудования, пригодное для промышленного применения, на сегодняшний день отсутствует.

**Цель диссертационной работы:** повышение эффективности производства обводообразующих деталей типа панелей и обшивок на основе совершенствования состава операций технологического процесса и создания методик автоматизированного расчёта параметров дробеударного формообразования на оборудовании с ЧПУ с применением алгоритмов машинного обучения.

#### **Задачи исследования**

1. Разработать методику и специальное программное обеспечение для автоматизированного анализа полученных с применением 3D-оптического профилометра изображений поверхностей, обработанных при ДУФ, с целью определения параметров микрорельефа, как совокупности отпечатков различных диаметров, зависящих от режимов обработки и особенностей применяемого оборудования.

2. Разработать методику и специальное программное обеспечение для определения эквивалентной нагрузки, процесса ДУФ, представляющей интегральную характеристику воздействия потока дроби на деталь, в виде распределений начальных напряжений и деформации в поверхностном слое с учётом реальных свойств материала, фракционного состава дроби и микрорельефа обработанной поверхности.

3. Выполнить конечно-элементное моделирование процесса ДУФ с приложением эквивалентной нагрузки к расчётным участкам в виде типовых конструктивных элементов деталей, обрабатываемых при ДУФ с одинаковыми режимами, с целью оценки взаимовлияния соседних участков и влияния последовательности обработки участков на формоизменение детали в целом.

4. Разработать методику и специальное программное обеспечение для автоматизированного анализа геометрических параметров детали по её САД модели с разбивкой детали на расчётные участки, формированием базы данных зависимостей кривизны данных участков от величины эквивалентной нагрузки процесса ДУФ и назначением режимов и маршрутов обработки деталей при ДУФ.

5. Разработать рекомендации по совершенствованию технологического процесса автоматизированного формообразования крупногабаритных обводообразующих деталей типа панелей и обшивок с применением дробеударного оборудования проходного типа для черновой

формообразующей обработки и оборудования контактного типа для доводочного дробеударного формообразования.

6. Выполнить экспериментальные исследования по проверке адекватности результатов моделирования процесса ДУФ на конструктивно-подобных образцах деталей.

7. Оценить ожидаемую экономическую эффективность внедрения автоматизированной технологии дробеударного формообразования в производство деталей типа крупногабаритных панелей и обшивок.

#### **Научная новизна**

1. Предложен усовершенствованный способ определения параметров микрорельефа обработанной дробью поверхности в виде фракционного состава отпечатков на основе анализа объёмных изображений, полученных с применением 3D-оптического профилометра, с использованием машинного зрения и алгоритмов машинного обучения (п. 3 паспорта специальности 2.5.6).

2. Выявлены закономерности формирования напряженно-деформированного состояния от параметров внедрения сферической дроби в обрабатываемую поверхность, на основе которых проведено конечно-элементное моделирование данного процесса с автоматической подготовкой расчетного файла со случайной генерацией координат и скоростей соударения, полученных по результатам анализа микрорельефа обработанной поверхности и фракционного состава дроби (п. 3 паспорта специальности 2.5.6).

3. Установлены зависимости компонента кривизны расчетных участков деталей типа панелей и обшивок от режимных параметров процесса дробеударного формообразования с использованием при конечно-элементном моделировании эпюр начальных напряжений и деформаций в качестве эквивалентной нагрузки, представляющей интегральную характеристику воздействия потока дроби на поверхностный слой детали (п. 3 паспорта специальности 2.5.6).

4. Предложена математическая модель с использованием алгоритмов машинного обучения для определения формоизменения крупногабаритных деталей типа панелей и обшивок при дробеударном формообразовании на основе базы данных зависимостей кривизны расчетных участков деталей от их начального напряженно-деформированного состояния, связанного с режимными параметрами процесса обработки дробью (п. 2-3 паспорта специальности 2.5.6).

#### **Теоретическая и практическая значимость работы**

1. Разработана математическая модель процесса формирования начального напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя детали, подвергнутой дробеударному формообразованию, с учетом случайного характера диаметра дробин-инденторов, координат отпечатков и скоростей соударения. Данная модель использована для

установления зависимости параметров эпюр начальных напряжений и режимов процесса дробеударного формообразования на основе нового подхода, где в качестве эквивалентной нагрузки выступают эпюры начальных напряжений и деформаций в поверхностном слое, с учетом последовательности обработки участков детали.

2. Сформулированы технологические рекомендации для осуществления процесса автоматизированного формообразования крупногабаритных обводообразующих деталей типа панелей и обшивок с применением дробеударного оборудования проходного типа для черновой формообразующей обработки и оборудования контактного типа для доводочного дробеударного формообразования. Апробация результатов подтверждена актом внедрения на предприятии машиностроительной отрасли АО «Туполев».

### **Методология и методы исследования**

Исследование свойств материала выполнялось на испытательной машине BiSS UTM-100 kN. Моделирование процессов дробеударного формообразования с использованием конечных – элементов, в среде нелинейного конечно-элементного анализа LSTC LS-Dyna Version R10. Разработка программы по назначению маршрутов обработки и модуля автоматизированного получения геометрии детали в CAD системе выполнялось в среде разработки Visual Studio 2022 на языке программирования C#. Реализация задач в области машинного обучения и компьютерного зрения осуществлялась в среде VS Code на языке программирования Python. Для определения фракционного состава дроби был использован стенд машинного зрения NI SMART CAMERA 1764.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Результаты исследования по определению параметров микрорельефа обработанной дробию поверхности в виде фракционного состава отпечатков с использованием разработанного способа анализа объёмных изображений, полученных с применением 3D-оптического профилометра, с использованием машинного зрения и алгоритмов машинного обучения.

2. Методика и результаты конечно-элементного моделирования процесса множественного внедрения сферической дроби в закреплённую пластину с целью определения напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя, с автоматической подготовкой расчетного файла со случайной генерацией координат и скоростей соударения на основе известных параметров микрорельефа обработанной поверхности и фракционного состава дроби.

3. Методика и результаты конечно-элементного моделирования в виде зависимостей компонент кривизны типовых конструктивных элементов деталей типа панелей и обшивок от режимных параметров процесса дробеударного формообразования с использованием эпюр

начальных напряжений и деформаций в качестве эквивалентной нагрузки, представляющей интегральную характеристику воздействия потока дроби на поверхностный слой детали.

4. Расчётная модель и программное обеспечение с использованием алгоритмов машинного обучения для определения формоизменения крупногабаритных деталей типа панелей и обшивок при дробеударном формообразовании на основе базы данных зависимостей кривизны расчетных участков деталей от их начального напряженно-деформированного состояния, связанного с режимными параметрами процесса обработки дробью.

5. Результаты экспериментального исследования технологического процесса дробеударного формообразования деталей типа оребренных панелей для проверки работоспособности разработанной расчётной модели.

6. Рекомендации по реализации серийного технологического процесса формообразования обводообразующих деталей типа панелей и обшивок на оборудовании с ЧПУ.

**Достоверность** подтверждена сходимостью полученных результатов моделирования и экспериментальных исследований. Действительность выводов подтверждается практической реализацией результатов. Экспериментальные результаты получены с использованием современного высокоточного аналитического оборудования: оптического профилометра Bruker Contour GT-K1, стенда машинного зрения NI SMART CAMERA 1764 и универсальной сервогидравлической испытательной машине ViSS UTM-100 kN.

#### **Апробация работы**

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на: VIII международной конференции «Проблемы механики современных машин» (г. Улан-Удэ, 2022 г.); XVI международной научно-практической конференции «Современные авиационные технологии. International Conference on Aviation Engineering» (г. Иркутск, 2023 г.); XIII и XV Всероссийских научно-технических конференциях с международным участием «Жизненный цикл конструкционных материалов» (г. Иркутск, 2023 и 2025 гг.).

**Публикации:** По теме диссертации опубликовано 7 научных работ, в том числе 3 статьи – в ведущих научных рецензируемых изданиях, определенных ВАК Министерства науки и высшего образования РФ, 4 статьи – в сборниках научных конференций.

#### **Структура и объем работы**

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, включая 17 таблиц и 96 рисунков, заключения, списка литературы из 138 наименований, списка сокращений. Работа содержит 194 страницы машинописного текста и 7 приложений.

Диссертация подготовлена на кафедре технологии и оборудования машиностроительных производств федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет».

### **КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** представлен краткий анализ текущего состояния исследуемой проблемы и степени её научной разработанности, обоснована актуальность проведённого исследования, сформулированы цель и задачи работы, а также раскрыты научная новизна, теоретическая и практическая значимость полученных результатов.

**В первой главе** представлены конструктивные особенности монолитно фрезерованных обшивок и панелей с подкрепляющим каркасом, дан обзор технологических методов обеспечения точности формы при изготовлении данных деталей. Приведены анализ результатов теоретических и экспериментальных исследований в области ДУФ с использованием цифровых решений.

Технологические особенности процесса формообразования крупногабаритных обводообразующих деталей и применяемого оборудования представлены в работах: Барретта С. (Barrett C.), Боумана Д. (Vaughman D.), Вюстефельда Ф. (Wuestefeld F.), Коопа Р. (Koop R.), Мацнева В.Н., Пашкова А.Е., Рамати С. (Ramati S.), Шелкова В.С., Шевнюка В.Ю. и других.

Результаты теоретических и экспериментальных исследований, процесса дробеударного формообразования, включая способы моделирования, представлены в работах: Барагетти С. (Baragetti S.), Гарипи А. (Garipery A.), Дияка А.Ю., Зхуо Чен (Zhuo Chen), Малащенко А.Ю., Мяо Х. (Miao H.), Пашкова А.А., Юзхи Лиу (Yizhe Liu) и других.

Показано, что технологический процесс ДУФ и возникающее при этом напряженно-деформированное состояние обрабатываемых деталей достаточно изучены. С развитием метода конечных элементов появились новые возможности по численному моделированию процесса обработки дробью с целью определения напряженно-деформированного состояния при единичном или массовом внедрении дроби. Однако для предсказания формоизменения крупногабаритных деталей таким способом в производственных условиях имеющихся вычислительных мощностей недостаточно. Более эффективными является подход к моделированию, основанный на приложении к конечно-элементной модели детали эквивалентной нагрузки, представляющей интегральную характеристику воздействия потока дроби на деталь. Для реализации данного подхода с учётом случайного характера параметров микрорельефа обработанной поверхности необходима разработка соответствующих методик и программного обеспечения (ПО).

**Вторая глава** посвящена решению комплекса вопросов, направленных на совершенствование расчётных методик и создание специального программного обеспечения для конечно-элементного моделирования процесса ДУФ.

Определение механических свойств материала обрабатываемых деталей, для конечно-элементного моделирования, выполнено на универсальной испытательной машине ViSS UTM-100 kN.

В качестве эквивалентной нагрузки процесса ДУФ предложено рассматривать эпюры начальных напряжений и деформации в поверхностном слое после обработки дробью. Расчёт эквивалентной нагрузки выполнен с учётом фракционного состава дроби и параметров микрорельефа обработанной поверхности.

Фракционный состав дроби, применяемой при ДУФ, определён путем измерения партий дроби с использованием камеры с техническим зрением National Instruments Smart Camera 1764.

Анализ микрорельефа обработанной поверхности в виде совокупности отпечатков дроби разных диаметров, связанных с режимами ДУФ и особенностями потока дроби, создаваемого технологическим оборудованием, выполнен на основе объёмных изображений, полученных с применением высокоточного 3D-оптического профилометра Bruker Contour GT-K1. Для сокращения времени обработки данных при определении параметров микрорельефа, ранее осуществлявшимся методом ручной обводки отпечатков в графическом редакторе, разработан способ автоматизированного анализа изображений, представляющих совокупность пикселей разного цвета. Для разделения пикселей изображения на кластеры по цвету разработано программное обеспечение, где использовано машинное обучение (МО) на основе модели гауссовых смесей и библиотеки OpenCV компьютерного зрения.

Методика автоматизированного определения фракционного состава применяемой дроби, а также микрорельефа обработанной поверхности представлена на рисунке 1.

Расчёт эквивалентной нагрузки выполнен методом конечно-элементного моделирования процесса множественного внедрения дроби в закреплённую пластину. Для снижения трудоёмкости процесса моделирования разработано специальное программное обеспечение для автоматической подготовки расчетного файла со случайной генерацией координат и скоростей соударения с учётом фракционного состава дроби, режимов обработки и параметров микрорельефа обработанной поверхности, а также для определения параметров эквивалентной нагрузки в виде эпюр начальных напряжений и деформации (рисунок 2).

В качестве исходных данных для расчёта использована база данных в виде совокупности полиномиальных зависимостей диаметра и глубины отпечатков от скорости дроби рабочего диапазона, полученных путём

конечно-элементного моделирования процессов единичных внедрений дроби в материал детали.

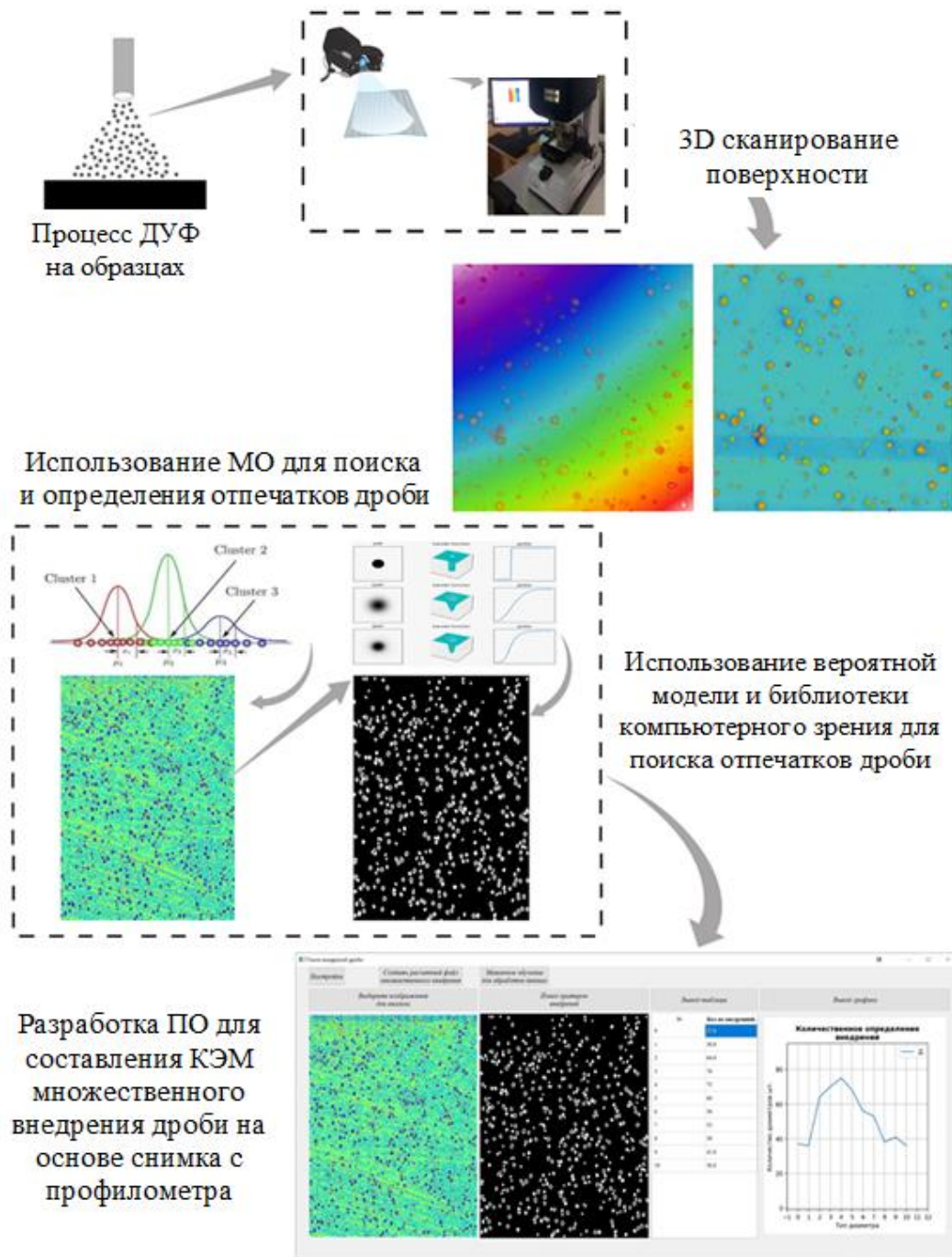
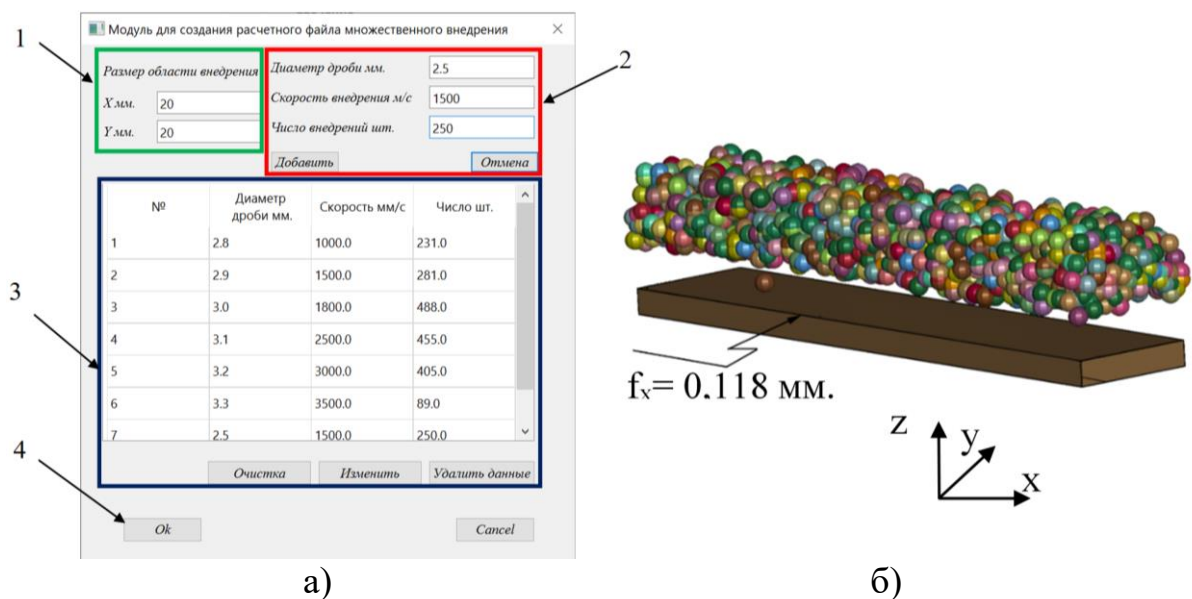


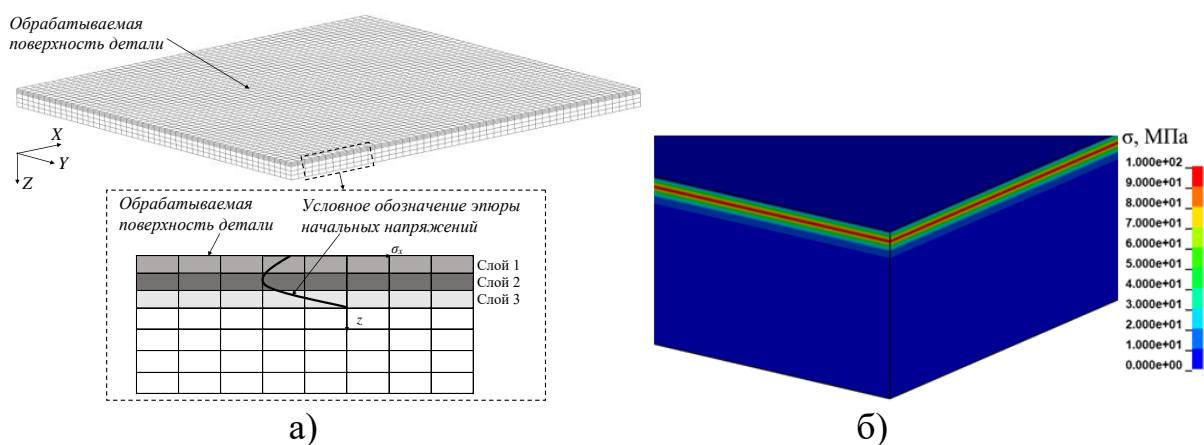
Рисунок 1 – Схема автоматизированного анализа фракционного состава дроби и микрорельефа поверхности, обработанной при ДУФ

На основе определённых параметров эквивалентной нагрузки выполнено конечно-элементное моделирование процесса ДУФ образцов, имитирующее растяжение поверхностного слоя путем искусственного создания в нём эпюр начальных напряжений и деформаций (рисунок 3).



а – модуль автоматизированного создания конечно элементной модели множественного внедрения; б – внедрение дроби и оценка стрелы прогиба

Рисунок 2 – Расчетная модель процесса множественного внедрения дроби



а - схема подготовки сетки конечных элементов детали; б - конечно-элементная модель

Рисунок 3 – Схема создания в поверхностном слое эпор начальных напряжений и деформаций

Данный подход позволяет добиться значительной экономии вычислительных ресурсов и повышения точности расчётов за счёт исключения принятия допущений, связанных с определением сосредоточенной силы и координаты точки её приложения. При этом появляется возможность моделировать процесс ДУФ реальных деталей с переменными геометрическими параметрами, представляемых в виде совокупности расчётных участков, обрабатываемых с неизменными режимами.

**В третьей главе** представлены результаты исследования технологического процесса ДУФ.

Проведено экспериментальное исследование по автоматизированному определению параметров микрорельефа поверхности, обработанной при ДУФ. Для этого были подготовлены образцы из алюминиевого сплава В95пчТ2, обрабатываемая поверхность которых была отполирована для снижения погрешности измерений. Измерения выполнялись на оптическом профилометре Bruker Contour GT-K1. На полученных изображениях проводилось определение параметров микрорельефа с ручной обводкой отпечатков в САД-системе и обработкой данных в Microsoft Excel. Полученный ряд диаметров отпечатков сравнивался с результатами автоматизированного определения параметров микрорельефа с применением разработанного программного обеспечения. Установлено, что погрешность автоматизированного определения параметров микрорельефа в сравнении с ручным методом не превышает 8%.

Выполнена проверка адекватности методики конечно-элементного моделирования процесса ДУФ путём экспериментального исследования на образцах-пластинах, образцах расчётных участков деталей типа подкреплённых панелей, представляющих совокупность подкрепляющего ребра и полотна, а также на конструктивно-подобных образцах, включающих ряд расчётных участков.

Предварительно проводилась серия конечно-элементных расчетов по моделированию процесса ДУФ образцов с использованием разработанных методик с определением стрел прогиба в зависимости от эквивалентной нагрузки. Схема обработки конструктивно-подобного образца в виде расчётных участков, объединенных в полосы, приведена на рисунке 4.

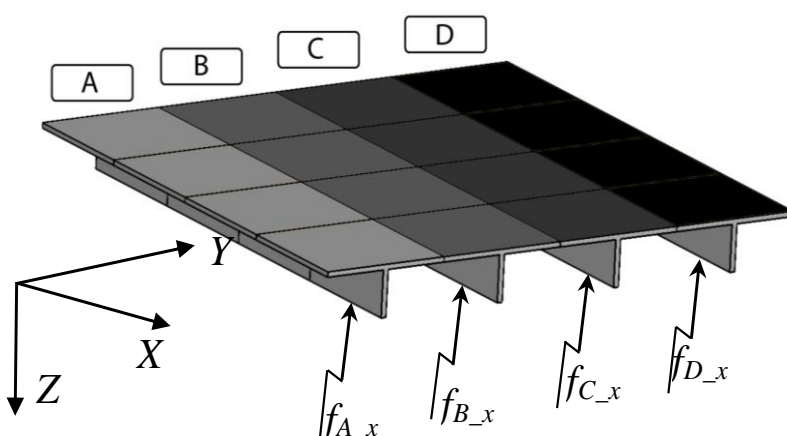


Рисунок 4 – Схема моделирования процесса дробеударного формообразования для оценки взаимовлияния соседних участков

Дробеударное формообразование образцов осуществлялось с использованием инструмента для пневмодинамической обработки дробью,

закрепленного на фланце робота-манипулятора для обеспечения стабильной скорости подачи (рисунок 5).

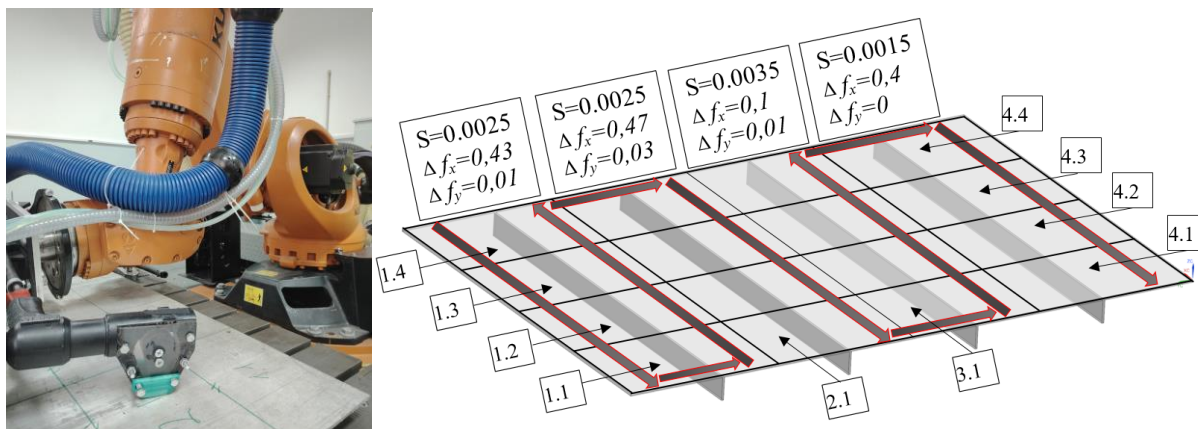


Рисунок 5 – Дробеударное формообразование с использованием инструмента для пневмодинамической обработки дробью

Относительная погрешность между расчётными и экспериментальными результатами определения стрелы прогиба расчетного участка на базе в 200 мм не превышает 0,13 мм при допустимом отклонении контура деталей 0,5 мм.

При конечно-элементном моделировании процесса ДУФ на конструктивно-подобных образцах деталей типа подкреплённых панелей установлено, что при обработке всей поверхности конструктивно-подобных образцов с одинаковыми режимами отклонений стрел прогибов обособленных расчётных участков в сравнении с расчётными участками в составе конструктивно-подобного образца не превышают 5 %. Исследование по ДУФ конструктивно-подобных образцов с переменной кривизной показало, что соответствующие отклонения не более 10 %. Из этого следует, что при определении режимов ДУФ реальных деталей расчёты с применением разработанной методики можно выполнять на расчётных участках, обрабатываемых с неизменными режимами, без учёта влияния соседних расчётных участков и последовательности обработки детали в целом.

**Четвертая глава** посвящена разработке рекомендаций по организации серийного автоматизированного производства крупногабаритных обводообразующих деталей на оборудовании с ЧПУ.

Задачу повышения производительности предложено решить путём разделения технологического процесса ДУФ на операции черновой обработки на высокопроизводительной установке проходного типа (УПТ) с получением промежуточного контура детали с постоянной поперечной кривизной и доводочной обработки на установке контактного типа (УКТ) до достижения требуемой точности формы.

Исходными данными для расчёта технологических параметров процесса ДУФ, являются геометрические параметры детали, содержащиеся в её CAD модели, а также тарифовочные параметры технологического оборудования – база данных зависимостей эквивалентной нагрузки от режимов и условий обработки, которая формируются для всех материалов обрабатываемых деталей и фракционных составов применяемой дроби и представляют собой набор зависимостей параметров эквивалентной нагрузки от времени обработки (рисунок 6).

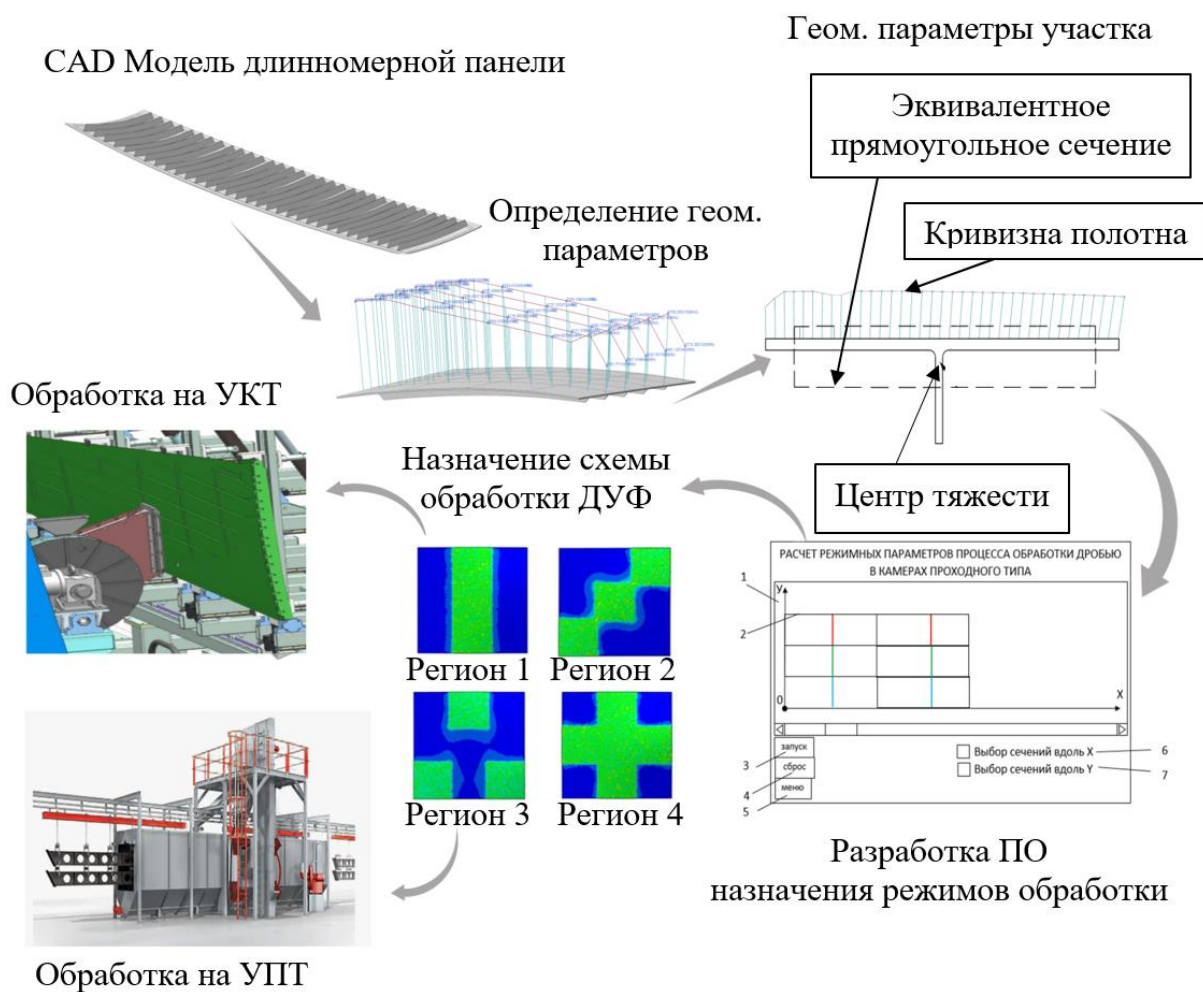


Рисунок 6 – Схема назначения режимов ДУФ

Определение геометрических параметров детали необходимо выполнить в CAD-программе для каждого расчётного участка. Для снижения трудоёмкости данного этапа расчёта разработан программный модуль, автоматизирующий разбиение CAD модели детали на расчётные участки (рисунок 7) с формированием соответствующей базы данных.

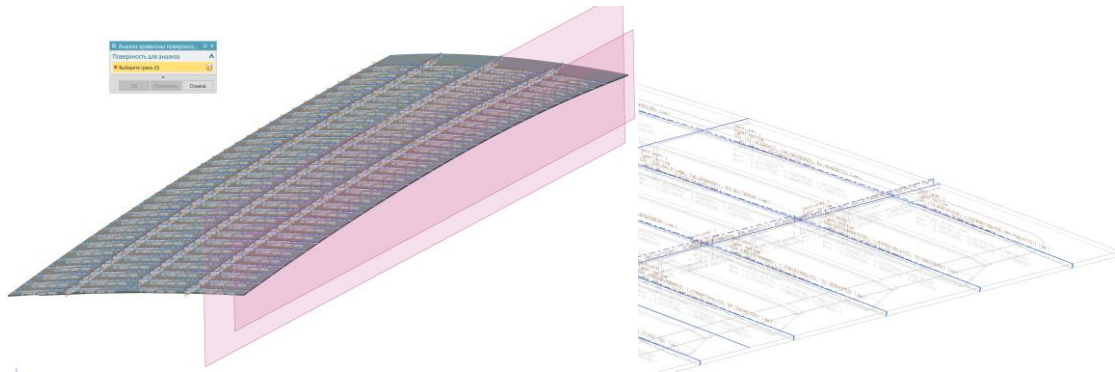
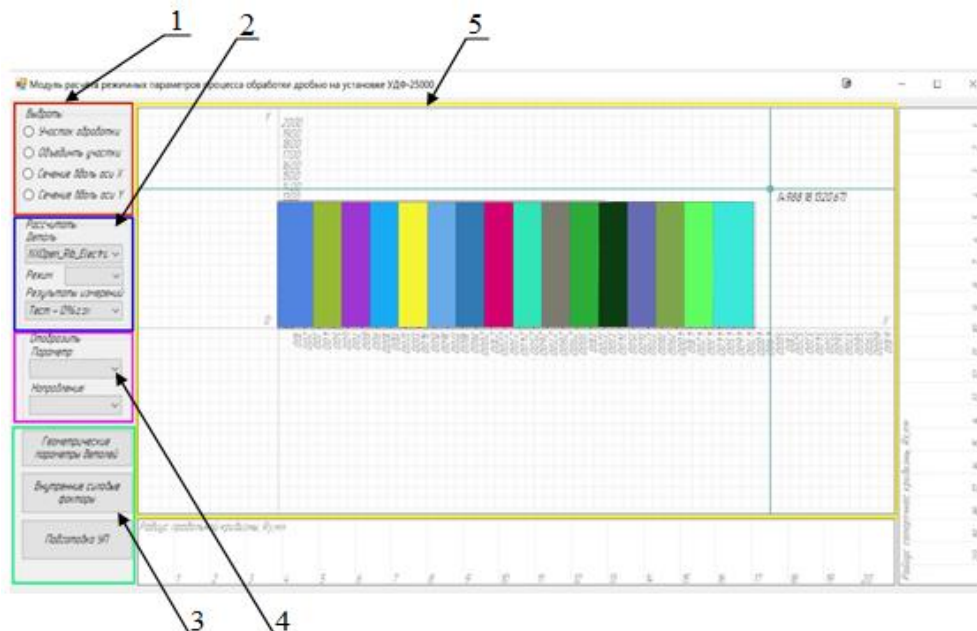


Рисунок 7 – Разбиение CAD модели детали на РУ

Для прогнозирования формоизменения отдельных расчётных участков разработано программное обеспечение с использованием алгоритмов машинного обучения, в котором обучение модели выполняется на основе базы данных зависимостей кривизны расчётных участков от режимов обработки. С целью оптимизации взаимодействия с алгоритмами машинного обучения и базы данных, разработано специализированное программное обеспечение, которое позволяет автоматически назначать режимы обработки для отдельных расчётных участков детали и формировать маршрут обработки на основе анализа их кривизны.

Для установок УПТ алгоритм предусматривает объединение соседних полос в случае, если разница в их кривизне незначительна. Объединённые полосы обрабатываются в едином режиме, что сокращает общее время обработки (рисунок 8).



1 – выбор параметра для анализа детали; 2 – выбор детали и режимных параметров обработки; 3 – выбор отображаемых параметров детали; 4 – выбор деталей с РУ и вывод УП; 5 – рабочая область с отображением 2d CAD детали (вид сверху)

Рисунок 8 – Главное окно программы назначения маршрутов обработки операции ДУФ

Для установок УКТ строятся траектории обработки в виде раstra. При этом для каждого расчётного участка индивидуально задаётся оптимальный режим обработки, учитывающий его геометрические параметры.

Применение цифровых решений на этапе технологической подготовки для обоих типов установок для ДУФ позволяет оптимизировать маршруты и режимы обработки. Внедрение средств автоматизации существенно сокращает время анализа геометрии и расчёта режимов обработки деталей, что положительно влияет на общую эффективность производства.

Эффективность предлагаемого технологического процесса формообразования панелей и обшивок определяется снижением трудоёмкости обработки деталей за счёт автоматизации. Оценочный расчёт экономического эффекта приведён в таблице 1.

Таблица 1 – Расчет экономического эффекта от внедрения автоматизированной технологии формообразования панелей и обшивок

Наименование	Базовый показатель на одно изделие	Расчетный показатель на одно изделия
Итого трудозатраты на производство одного комплекта панелей и обшивок	1887 н/ч	471,75 н/ч
Итого затраты на производство одного комплекта панелей и обшивок (цена 1-ого н/ч 2500 руб.)	4 717 500 руб.	1 179 375 руб.
Экономический эффект на комплект панелей и обшивок		3 538 125 руб.

Дополнительный экономический эффект может быть получен за счёт снижения трудоёмкости сборочных работ в связи с повышением точности формы деталей.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результатом выполнения диссертационной работы является решение актуальной для машиностроительной отрасли научно-технической задачи, направленной на разработку серийной технологии изготовления обводообразующих деталей типа панелей и обшивок. В работе достигнута цель по повышению эффективности процесса производства данных деталей, на основе совершенствования состава технологических операций и создания методик автоматизированного определения параметров процесса дробеударного формообразования на оборудовании с ЧПУ. При этом получены следующие научные выводы и практические результаты:

1. Исследованы закономерности формирования микрорельефа поверхности, обработанной при ДУФ, с установлением зависимостей параметров микрорельефа, как совокупности отпечатков различных

диаметров, от режимов обработки, особенностей применяемого оборудования и фракционного состава используемой дроби. Для решения задачи определения параметров микрорельефа предложен метод и разработано специальное программное обеспечение для автоматизированного анализа полученных с применением 3D-оптического профилометра изображений поверхностей, обработанных при ДУФ. При разработке программного обеспечения использованы алгоритмы машинного обучения, где для разделения пикселей изображения на кластеры по цвету использована модель гауссовых смесей и библиотека OpenCV компьютерного зрения.

2. Методом конечно-элементного моделирования исследованы особенности процесса ДУФ, представляющего множественное внедрение дроби в обрабатываемую поверхность со случайным характером координат и скоростей соударений. Для автоматической подготовки конечно-элементной модели на основе известных режимов обработки, параметров микрорельефа обработанной поверхности и фракционного состава дроби разработано специальное программное обеспечение с использованием базы исходных данных в виде совокупности полиномиальных зависимостей диаметра и глубины отпечатков от скорости дроби, полученных моделированием процессов единичных внедрений дроби в материал детали. Конечно-элементное моделирование позволило определить эквивалентную нагрузку процесса ДУФ, представляющая интегральную характеристику воздействия потока дроби на деталь в виде распределений начальных напряжений и деформации в поверхностном слое.

3. Изучены закономерности формоизменения расчётных участков, представляющих типовые конструктивные элементы деталей, обрабатываемые при ДУФ с одинаковыми режимами. Для этого выполнено конечно-элементное моделирование процесса ДУФ путём приложения эквивалентной нагрузки к моделям обособленных участков и к участкам в составе модели реальной детали. При этом обоснована возможность моделирования процесса ДУФ типовых обводообразующих деталей нагружением расчётных участков, без учёта влияния соседних участков и последовательности обработки детали в целом. Для автоматизации расчёта формоизменения расчётных участков разработано специальное программное обеспечение с использованием машинного обучения.

4. Созданы методики и специальное программное обеспечение для определения параметров процесса дробеударного формообразования, обеспечивающие:

- автоматизированное получение из САД модели детали необходимых для расчета режимов обработки при дробеударном формообразовании геометрических параметров расчетных участков: приведенной толщины, моментов инерции и координат центров тяжести сечений, стрелы прогиба продольной и поперечной;

- калибровку оборудования для дробеударного формообразования путём определения фракционного состава применяемой дроби и параметров микрорельефа обработанной поверхности, зависящих от режимов обработки с формированием соответствующих баз данных;

- формирование зависимостей кривизны типовых расчетных участков деталей от эквивалентной нагрузки, соответствующей режимам и условиям ДУФ с формированием соответствующей базы данных;

- назначение на основе полученной базы данных режимов и маршрутов дробеударного формообразования конкретных деталей и составления управляющих программ для реализации черновой и доводочной операций дробеударного формообразования на оборудовании с ЧПУ. Данный подход позволяет отказаться от моделирования обработки деталей в САЕ-системах и значительно сократить потребность в вычислительных ресурсах.

5. В ходе проведённых численных и экспериментальных исследований доказана применимость и высокая эффективность разработанных методик и программного обеспечения. В качестве подтверждения получен акт внедрения в АО «Туполев».

6. Разработаны и обоснованы рекомендации по организации серийного автоматизированного производства крупногабаритных обводообразующих деталей на оборудовании с ЧПУ. Задачу повышения производительности предложено решить путём разделения технологического процесса дробеударного формообразования на операции черновой обработки на высокопроизводительной установке проходного типа с получением промежуточного контура детали с постоянной поперечной кривизной и доводочной обработки на установке контактного типа до достижения требуемой точности формы. Сформулированы основные требования к применяемому оборудованию и содержанию технологических операций. Обоснована экономическая эффективность внедрения автоматизированной технологии дробеударного формообразования в производство деталей типа крупногабаритных панелей. Внедрение решения обеспечивает значительный экономический эффект при формообразовании одной детали - около 3,5 млн рублей.

*Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы.*

- Создание нейросетевых моделей, позволяющих по требуемой форме детали и известным параметрам оборудования автоматически подбирать оптимальные режимы ДУФ (скорость, расход дроби, время обработки, траектория обработки) без итерационного моделирования.

- Разработка модуля для сквозного цикла моделирования: от САД-модели детали до генерации управляющих программ для оборудования с ЧПУ с обратной связью по результатам промежуточного контроля геометрии.

- Совершенствование методов промежуточного контроля формы с учетом влияния способов закрепления и силы собственного веса детали.

## **СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### **В рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ:**

1. Пашков, А. Е. Разработка методики анализа геометрических параметров длинномерных панелей / А. Е. Пашков, А. А. Пашков, С. Ю. Фалеев, О. В. Самойленко // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2023. – Т. 21, № 2. – С. 102-113.

2. Пашков, А. Е. Конечно-элементное моделирование процесса дробеударного формообразования с использованием внутренних силовых факторов процесса обработки / А. Е. Пашков, А. А. Пашков, С. А. Антипин С. Ю. Фалеев, О. В. Самойленко // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2024. – № 12. – С. 282-287.

3. Пашков, А. А. Определение входных параметров моделирования технологического процесса зачистки лепестковым кругом / А. А. Пашков, О. В. Самойленко, А. А. Дук, С. Ю. Фалеев, Д. П. Алейников // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2025. – № 2(168). – С. 57-67.

### **В прочих изданиях:**

4. Фалеев, С. Ю. Автоматизация процесса анализа формы крупногабаритных деталей сложной формы по трехмерным моделям / С. Ю. Фалеев, А. А. Пашков, М. Ю. Рыжков // Проблемы механики современных машин: материалы VIII международной конференции. – Улан-Удэ – 2022. – С. 554-562.

5. Фалеев, С. Ю. Применение современных технологий в области дробеударной обработки / С. Ю. Фалеев, О. А. Русинов // Современные авиационные технологии. International Conference on Aviation Engineering: материалы XVI международной научно-практической конференции. – Иркутск – 2023. – С. 38-44.

6. Пашков, А. А. Разработка программного модуля расчета режимных параметров процесса дробеударного формообразования-упрочнения / А. А. Пашков, С. Ю. Фалеев, Н. И. Астахов // Жизненный цикл конструкционных материалов (от получения до утилизации): материалы XIII Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. – Иркутск – 2023. – С. 24-29.

7. Пашков, А. А. Сравнение технологий дробеударного и автоклавного формообразования авиационных панелей / А. А. Пашков, С. Ю. Фалеев, И. С. Павлов // Жизненный цикл конструкционных материалов: Материалы XV Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. – Иркутск – 2025. – С. 101-107.

Подписано в печать 14.05.2026. Формат 60 x 90 / 16.  
Бумага офсетная. Печать цифровая. Усл. печ. л. 1,25.  
Тираж 100 экз. Зак. 43. Поз. плана 2н.

Отпечатано в типографии Издательства  
ФГБОУ ВО «Иркутский национальный  
исследовательский технический университет»  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83