

**УТВЕРЖДАЮ**



Ректор ФГБОУ ВО «Иркутский  
национальный исследовательский  
технический университет»,  
доктор технических наук, доцент

М.В. Корняков

« 9 » апреля 2026 г.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

### **Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет»**

Диссертация Фалеева Сергея Юрьевича на тему «Совершенствование технологии дробеударного формообразования обводообразующих деталей на основе цифровых решений» выполнена на кафедре технологии и оборудования машиностроительных производств (ТОМП).

Фалеев С.Ю. в 2019 году окончил Иркутский национальный исследовательский технический университет по специальности 15.03.06 «Мехатроника и робототехника» с присвоением квалификации бакалавра.

В 2021 году окончил Иркутский национальный исследовательский технический университет по специальности 09.04.01 «Информатика и вычислительная техника» с присвоением квалификации магистра.

В период подготовки диссертации Фалеев С.Ю. обучался в аспирантуре очной формы Иркутского национального исследовательского технического университета по специальности 2.5.6 «Технология машиностроения», окончил обучение в 2025 году.

Научный руководитель – Александр Андреевич Пашков, кандидат технических наук доцент кафедры технологии и оборудования машиностроительных производств ФГБОУ ВО «ИРНТУ»

#### **На заседании кафедры присутствовали:**

1. Алейников Д.П. к.т.н., доцент кафедры ТОМП;
2. Беломестных А.С. к.т.н., доцент кафедры ТОМП;
3. Дияк А.Ю., к.т.н., доцент кафедры ТОМП;
4. Дрожжин С. Н., ст. преподаватель кафедры ТОМП;
5. Зарак Т. В., к.т.н., доцент кафедры ТОМП;
6. Исаченко А. С., к.т.н., доцент кафедры ТОМП;
7. Казимиров Д. Ю., к.т.н., доцент кафедры ТОМП;
8. Каргапольцев С. К., д.т.н., профессор кафедры ТОМП;
9. Кольцов В. П., д.т.н., профессор кафедры ТОМП;
10. Ле Чи Винь, к.т.н., доцент кафедры ТОМП;
11. Майзель И. Г., к.т.н., доцент кафедры ТОМП;
12. Москвитин В. Н., к.т.н., доцент кафедры ТОМП;

13. Николаев А.Ю., к.т.н., доцент кафедры ТОМП;
14. Пашков А.А., к.т.н., доцент кафедры ТОМП;
15. Пярых А. С., к.т.н., доцент кафедры ТОМП;
16. Родыгина А. Е., к.т.н., доцент кафедры ТОМП;
17. Савилов А. В., к.т.н., доцент кафедры ТОМП;
18. Самойленко О.В., к.т.н., доцент кафедры ТОМП;
19. Свинин В.М., д.т.н., профессор кафедры ТОМП;
20. Солер Я. И., к.т.н., профессор-консультант кафедры ТОМП;
21. Стрелков А. Б., к.т.н., доцент кафедры ТОМП;
22. Чапышев А.П., к.т.н., доцент кафедры ТОМП;
23. Чашин Н. С., к.т.н., доцент кафедры ТОМП.

**Приглашенные лица:**

1. Димов Ю. В., д.т.н., профессор кафедры «Конструирование и стандартизация в машиностроении»;
2. Зайдес С. А., д.т.н., профессор кафедры «Материаловедения, сварочных и аддитивных технологий»;
3. Пономарев Б.Б., д.т.н., профессор, начальник управления по дополнительному образованию и социальной работе.

**По итогам обсуждения принято следующее заключение:**

Представленная Фалеевым С.Ю. диссертация обобщает самостоятельные исследования автора и является завершённым научным трудом, выполненным на актуальную тему по научной специальности 2.5.6. Технология машиностроения.

**Актуальность темы диссертационного исследования**

Крупногабаритные обводобразующие детали – монолитно-фрезерованные панели и обшивки монолитно-сборных панелей (далее – детали) применяются в конструкции самолётов и ракет, а также в судостроении.

Точность пространственной формы 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.

За рубежом основным методом, применяемым при изготовлении деталей, является дробеударное формообразование (ДУФ). Объем информации по промышленной реализации технологии ДУФ достаточно ограничен. Известно, что изготавливаемые детали должны проектироваться специально под данную технологию. Дробеударная обработка выполняется на автоматизированном оборудовании, позволяющем регулировать поток дроби в пространстве рабочей камеры. Процесс подготовки управляющих программ требует проведения большого объема опытных работ на натуральных образцах. При этом достигаемые показатели точности формы деталей при обработке на автоматизированном оборудовании относительно невысоки. Для достижения требуемой точности применяется доводочная обработка деталей при помощи ручных дробеструйных установок.

Перспективной отечественной разработкой являются комбинированный метод формообразования панелей и обшивок, предусматривающий раздельное образование продольной и поперечной кривизны контура деталей. При этом продольная кривизна образуется упругопластической гибкой обшивок или локальным пластическим деформированием подкрепляющих ребер панелей, а поперечная – обработкой дробью наружной поверхности деталей, т.е. посредством ДУФ.

Для реализации операции ДУФ Иркутским национальным исследовательским техническим университетом (ИРНИТУ) разработан ряд установок с ЧПУ серии УДФ, принципиальным отличием которых от импортного оборудования является использование рабочих органов контактного типа – дробемётных аппаратов и зачистных головок, при помощи которых реализуется полосовая обработка неподвижной детали. Это позволяет выполнять операционный контроль формы детали непосредственно в процессе обработки и открывает неограниченные возможности по достижению высоких показателей точности.

Актуальность исследования обусловлена опытом использования установок серии УДФ при формообразовании деталей с длиной до 15 метров в ручном режиме управления показал их преимущество перед прессовым методом в виде значительного увеличения производительности. Однако, в случае изготовления более крупногабаритных деталей, а также в связи с необходимостью значительного увеличения программ выпуска самолётов становится актуальной задача дальнейшего роста производительности процесса ДУФ. Данную задачу можно решить путём введения операции предварительного ДУФ, реализуемой на высокопроизводительном оборудовании проходного типа. Подобное оборудование в отечественной практике применяется для поверхностного

деформационного упрочнения и позволяет регулировать общую интенсивность потока дробы при перемещении детали через рабочую камеру.

Не менее актуальными является вопросы промышленной реализации процесса ДУФ в программном режиме управления, а также снижения трудоёмкости процесса подготовки производства и повышения точности расчёта параметров процесса ДУФ.

Перечисленные проблемы могут быть решены путём развития технологии ДУФ на оборудовании с ЧПУ за счёт применения цифровых решений на основе алгоритмов машинного обучения при выполнении технологических расчётов и подготовке управляющих программ.

**Цель 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.

#### **Основные научные результаты**

1. Результаты исследования по определению параметров микрорельефа обработанной дробью 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 дробы 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 дробы.

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 дробы 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 расчетной модели.

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

### **Конкретное личное участие автора в получении результатов научных исследований, изложенных в диссертации**

Автор выполнил систематизацию и анализ актуальных решений в сфере определения, назначения и моделирования режимных параметров ДУФ, обозначив их сильные и слабые стороны.

Самостоятельно разработана методика автоматического определения геометрии крупногабаритных деталей в CAD-системе. На основании полученных данных предложен алгоритм выбора маршрутов и режимов обработки с учетом геометрии сечений деталей, их кривизны и влияния напряженно-деформированного состояния для достижения требуемой формы детали.

Автор принимал непосредственное участие в научно-исследовательских, опытно-конструкторских и технологических работах по разработке и внедрению в производство на Казанском авиационном заводе имени С. П. Горбунова в рамках договора на тему: «Разработка комплексной технологии формообразования-упрочнения длинномерных панелей и обшивок»

### **Степень достоверности исследований**

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.

### **Научная новизна работы:**

1. Предложен усовершенствованный способ определения параметров микрорельефа обработанной дробью поверхности в виде фракционного состава отпечатков на основе анализа объемных 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 на основе известных параметров микрорельефа обработанной поверхности и фракционного состава дробы (п. 3 паспорта специальности 2.5.6).

3. Установлены зависимости компонент 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 дробы 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:**

1. Разработана расчетная 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 реализации 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».

#### **Внедрение научных результатов.**

Научные результаты использованы на предприятии машиностроительной отрасли – Филиал АО «Туполев» - Казанский авиационный завод им. С.П. Горбунова.

## **Полнота изложения диссертации в работах, опубликованных автором**

Основное содержание диссертационной работы и ее результатов полностью отражена в 7 научных и научно-технических работах автора.

### **В изданиях, входящих в перечень ВАК:**

1. 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. 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. 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:**

1. Автоматизация процесса анализа формы крупногабаритных деталей сложной формы по трехмерным моделям / **С. Ю. Фалеев**, А. А. Пашков, М. Ю. Рыжков // VIII международная конференция проблемы механики современных машин: Сборник статей конференции, оз. Байкал, 04–09 июля 2022 года. – Улан-Удэ: Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления. – 2022. – С. 554-562.

2. 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, 03–07 июля 2023 года. – Иркутск: Иркутский национальный исследовательский технический университет. – 2023. – С. 38-44.

3. 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, 16 мая 2023 года. – Иркутск: Иркутский национальный исследовательский технический университет. – 2023. – С. 24-29.

4. 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, 13–15 мая 2025 года. – Иркутск: Иркутский национальный исследовательский технический университет – 2025. – С. 101-107.

Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на восьмой международной конференции. «Проблемы механики современных машин» (г. Улан-Удэ, «Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления» 4 июля 2022), первой Региональной конференции «iPolytech Conference» (г. Иркутск, ИРНТУ 23-25 ноября 2022), XVI Международной научно-практической конференции «Современные авиационные технологии». «International Conference on Aviation Engineering» (г. Иркутск, ИРНТУ 03-07 июля 2023 года), XIII Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Жизненный цикл конструкционных материалов (от получения до утилизации)» (г. Иркутск, ИРНТУ 16 мая 2023 года), XV Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Жизненный цикл конструкционных материалов» (г. Иркутск, ИРНТУ 13-15 мая 2025 года).

### **Выводы**

Диссертация Фалеева Сергея Юрьевича «Совершенствование технологии дробеударного формообразования обводообразующих деталей на основе цифровых решений» является законченной научной работой, выполненной на актуальную тему. Диссертация обобщает самостоятельные исследования автора. Выдвинутые им положения представляют собой научно обоснованные технологические разработки, обеспечивающие решение важных прикладных задач. При выполнении диссертационной работы Фалеев Сергей Юрьевич продемонстрировал качества грамотного, самостоятельного и инициативного научного работника.

На расширенном заседании кафедры «Технологии и оборудования машиностроительных производств» приняты следующие решения:

1. Признать, что по актуальности изученной проблемы, научной новизне, теоретической и практической полезности полученных результатов работа С.Ю. Фалеева «Совершенствование технологии дробеударного формообразования обводообразующих деталей на основе цифровых решений» представляет собой научно-квалификационную работу, которая соответствует критериям, установленным в п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней»;

2. Рекомендовать к защите диссертационную работу С.Ю. Фалеева «Совершенствование технологии дробеударного формообразования обводообразующих деталей на основе цифровых решений» в диссертационном

совете 24.2.307.01 при ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет» на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.6. Технология машиностроения.

Результаты голосования о рекомендации Фалеева С.Ю. к защите в диссертационном совете 24.2.307.01.

«за» – 26 чел.;

«против» – 0 чел.;

«воздержалось» – 0 чел.

Протокол № 08 от 08.04.2026 г.

Председатель расширенного заседания  
кафедры «Технология и оборудование  
машиностроительных производств»  
д.т.н., профессор

Пашков А.Е.

Секретарь заседания

Пискунова Ю.Ю.

Подпись *Пашкова А.Е./Пискуновой Ю.Ю.*  
**ЗАВЕРЯЮ**  
Общий отдел ФГБОУ ВО «ИРНИТУ»  
*В.С. Лукичева* *технич. обл. обл. г. об.*