

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 «ИРНИТУ»

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. Чащин 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). Объём 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 рёбер 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 дроби 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: совершенствование структуры и научно-методического обеспечения технологического процесса дробеударного формообразования обводообразующих деталей типа панелей и обшивок на оборудовании с ЧПУ на основе создания новых расчетных методик, базирующихся на МО и направленных на повышение адекватности конечно-элементного моделирования процесса ДУФ, а также программного обеспечения для назначения режимных параметров и генерации управляющих программ.

Основные научные результаты

1. Методику автоматизированного определения параметров микрорельефа поверхности, обработанной при ДУФ, в виде фракционного состава отпечатков на основе анализа объёмных изображений, полученных с применением 3D-оптического профилометра с применением машинного обучения (МО) на основе модели гауссовых смесей (Gaussian Mixture Models) и библиотеки OpenCV компьютерного зрения.

2. Методику и результаты конечно-элементного моделирования процесса множественного внедрения сферической дроби в закреплённую пластину для получения эпюры начальных напряжений (НН) и деформаций с автоматической подготовкой расчетного файла со случайной генерацией координат и скоростей соударения на основе определённых параметров микрорельефа обработанной поверхности.

3. Методику конечно-элементного моделирования процесса ДУФ расчётных участков (РУ) деталей с использованием в качестве эквивалентной нагрузки эпюр НН и деформаций в поверхностном слое детали, связанных с режимными параметрами процесса обработки дробью. Методика позволяет формировать базы данных зависимостей кривизны РУ деталей от параметров НН, определяемых режимами обработки. Результаты апробации разработанной методики в виде прогнозирования формоизменения образцов-пластин и конструктивно-подобных образцов, подвергнутых ДУФ, с определением зависимости изменения кривизны смежных обрабатываемых участков.

4. Программное обеспечение для анализа геометрических параметров детали по САД модели с последующим назначением режимов и траекторий обработки и генерации управляющих программ для оборудования 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 САД-системе. На основании полученных данных предложен алгоритм выбора маршрутов и режимов обработки с учётом геометрии сечений деталей, их кривизны и влияния напряжённо-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 BiSS UTM-100 kN.

Научная новизна работы:

1. Предложена методика автоматизированного определения параметров микрорельефа обработанной поверхности в виде фракционного состава отпечатков на основе анализа объёмных изображений обработанной поверхности, полученных с применением 3D-оптического профилометра, с применением машинного зрения и алгоритмов машинного обучения

(п. 3 паспорта специальности 2.5.6).

2. Предложена методика и выполнено конечно-элементное моделирование процесса множественного внедрения сферической дроби в закреплённую пластину из материала детали для получения эпюр начальных напряжений и деформаций с автоматической подготовкой расчетного файла со случайной генерацией координат и скоростей соударения на основе

определённых параметров микрорельефа обработанной поверхности (п. 3 паспорта специальности 2.5.6).

3. Предложена методика конечно-элементного моделирования процесса дробеударного формообразования расчетных участков в виде типовых конструктивных элементов деталей с использованием в качестве эквивалентной нагрузки эпюр начальных напряжений и деформаций в поверхностном слое детали, связанных с режимными параметрами процесса обработки дробью (п. 3 паспорта специальности 2.5.6).

4. Созданы алгоритмы с использованием машинного обучения на основе базы данных зависимостей кривизны расчетных участков деталей типа панелей и обшивок от начального напряженно-деформированного состояния для назначения режимных параметров процесса дробеударного формообразования с применением оборудования проходного типа для черновой формообразующей обработки и оборудования контактного типа для доводочной обработки (п. 2-3 паспорта специальности 2.5.6).

Теоретическая и практическая значимость:

1. Разработана математическая модель процесса формирования начального НДС поверхностного слоя детали, подвергнутой ДУФ, с учетом случайного характера диаметра дробинки-индентора, координат отпечатков и скоростей соударения. Данная модель использована для установления зависимости параметров эпюры НН и режимов процесса ДУФ на основе нового подхода, основанного на использовании в качестве эквивалентной нагрузки эпюры НН, ступенчато внедряемых в поверхностный слой детали, с учетом последовательности обработки участков детали.

2. Сформулированы технологические рекомендации для осуществления процесса формообразования 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 ДУФ.

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. – DOI 10.18503/1995-2732-2023-21-2-102-113.

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. – DOI 10.24412/2071-6168-2024-12-282-283.

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. – DOI 10.26730/1999-4125-2025-2-57-67.

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. – DOI 10.53980/9785907599055_554.

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. 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, 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, ИРНИТУ 23-25 ноября 2022), XVI Международной научно-практической конференции «Современные авиационные технологии». «International Conference on Aviation Engineering» (г. Иркутск, ИРНИТУ 03-07 июля 2023 года), XIII Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Жизненный цикл конструкционных материалов (от получения до утилизации)» (г. Иркутск, ИРНИТУ 16 мая 2023 года), XV Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Жизненный цикл конструкционных материалов» (г. Иркутск, ИРНИТУ 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.

