

На правах рукописи



Самойленко Олег Викторович

**ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТОЧНОСТИ ФОРМЫ МАЛОЖЕСТКИХ
ДЕТАЛЕЙ ТИПА ПЛАСТИН С ПОДКРЕПЛЕНИЕМ,
УПРОЧНЯЕМЫХ ДРОБЬЮ С ПРЕВЕНТИВНЫМ
ДЕФОРМИРОВАНИЕМ**

Специальность 2.5.6. Технология машиностроения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Иркутск – 2023

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

Научный руководитель:

Пашков Андрей Евгеньевич
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Иркутский национальный
исследовательский технический
университет», заведующий кафедрой
«Технология и оборудование
машиностроительных производств»

Официальные оппоненты:

Киричек Андрей Викторович
доктор технических наук, профессор ФГБОУ
ВО «Брянский государственный технический
университет»,
проректор по перспективному развитию
(г. Брянск)

Решетникова Ольга Павловна
кандидат технических наук, доцент ФГБОУ
ВО «Саратовский государственный
технический университет имени Гагарина
Ю.А.», доцент кафедры «Технология
машиностроения» (г. Саратов)
ФГБОУ ВО «Донской государственный
технический университет» (г. Ростов-на-
Дону)

Ведущая организация:

Защита состоится 21 декабря 2023 года в 10⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета 24.2.307.01 в ФГБОУ ВО «ИРНИТУ» по адресу: 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, корпус «К», конференц-зал.

С диссертацией и авторефератом можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «ИРНИТУ» и на официальном сайте университета www.istu.edu.

Автореферат разослан «31» октября 2023 года.

Отзывы на автореферат в 2-х экземплярах, подписанные и заверенные печатью организации, просим выслать по адресу: 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, ИРНИТУ; Ученому секретарю диссертационного совета 24.2.307.01 Вулых Н.В.

Е-mail: vulix2011@yandex.ru

Тел./факс: (3952) 40-51-17.

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



Н.В. Вулых

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Детали типа пластин с подкреплением из алюминиевых сплавов широко применяются в конструкции изделий авиастроения, судостроения ракетостроения и ряда других отраслей промышленности. В целях повышения эксплуатационного ресурса ответственных деталей применяется поверхностное деформационное упрочнение ударными методами. Для деталей с большими габаритными размерами наиболее распространённым способом упрочнения является дробеударная обработка.

Известной проблемой является неуправляемое искажение пространственной формы (коробление) подкреплённых деталей малой жёсткости в виде отклонения от плоскостности и саблевидности, возникающих при обработке.

После фрезерования коробление устраняют, в основном, правкой прессовой гибкой. Главными недостатками данного метода являются зависимость от квалификации исполнителей и высокая вероятность брака из-за образования трещин. Лучшие результаты дают методы правки местным пластическим деформированием, одним из которых является раскатка роликами элементов подкрепляющего набора деталей, в связи с хорошей управляемостью, отсутствием пружинения и исключением риска трещинообразования.

Наибольшую сложность представляет обеспечение точности пространственной формы упрочняемых деталей. Пластическая деформация поверхностных слоёв под воздействием дроби выражается в их удлинении, что приводит к короблению детали. Данное явление можно рассматривать как проявление технологической наследственности операции дробеударного упрочнения.

Эффективным решением проблемы нежелательных отклонений пространственной формы маложёстких подкреплённых деталей является управление технологическим наследованием в процессе дробеударного упрочнения, путём превентивного деформирования, т.е. внесения в деталь расчётного предискажения формы, компенсирующего её коробление. Использование для превентивного деформирования раскатки роликами элементов подкрепляющего набора деталей обеспечивает преимущества перед существующими способами деформирования подкреплённых деталей по качеству и производительности.

Актуальность темы исследования определяется высокими требованиями к качеству наиболее сложных, ответственных и дорогостоящих деталей, типа пластин с подкреплением. При изготовлении данных деталей необходимо обеспечить заданные показатели точности пространственной формы и ресурса. Одновременное достижение данных показателей представляет проблему в связи с тем, что применяемое для

повышения усталостной долговечности деталей дробеударное упрочнение, вызывает коробление деталей. Правка упрочненных деталей методами упругопластического деформирования недопустима, т.к. может привести к потере упрочняющего эффекта. Разработка технологических решений по минимизации коробления при дробеударном упрочнении обеспечит возможность достижения заданных показателей качества деталей.

Таким образом, была определена **цель работы**: повышение эффективности производства и качества маложестких деталей типа пластин с подкреплением на основе прогнозирования отклонений формы деталей при дробеударном упрочнении и их минимизации путём превентивного деформирования.

Достижение поставленной цели возможно после решения следующих задач:

1. разработать методику определения внутренних силовых факторов процесса дробеударной обработки в виде растягивающих сил, действующих на конструктивные элементы обрабатываемых деталей, и координат точек приложения данных сил (расстояния от поверхности) конечно-элементным моделированием с учетом структуры зоны обработки применяемого оборудования и фракционного состава рабочей среды;

2. разработать методику конечно-элементного моделирования процесса дробеударного упрочнения путём нагружения моделей деталей расчетными силами, соответствующими режимам обработки, с целью определения формоизменения обработанных деталей;

3. предложить способ минимизации искажения пространственной формы деталей в процессе дробеударного упрочнения, заключающийся в превентивном деформировании раскаткой роликами конструктивных элементов деталей, с определением технологических параметров на основе расчетного формоизменения упрочненной детали;

4. исследовать технологические возможности правки деталей после дробеударного упрочнения дробеструйной обработкой;

5. разработать и реализовать программы экспериментального исследования по проверке адекватности результатов моделирования процесса дробеударного упрочнения на конструктивно-подобных образцах деталей; по определению влияния операции превентивного деформирования на усталостную долговечность материала деталей.

Представленная диссертация содержит результаты научно-исследовательских, опытно-конструкторских и технологических работ, направленных на создание эффективной технологии обработки деталей типа пластин с подкреплением из алюминиевых сплавов в последовательности «Превентивное деформирование – дробеударное упрочнение».

Научная новизна работы

1. Впервые установлены характерные для упрочняемых дробеударным методом деталей типа пластин с подкреплением количественные взаимосвязи:

- внутренних силовых факторов в виде растягивающих сил и координат точек приложения данных сил (расстояния от поверхности), возникающих в поверхностном слое детали при дробемётном упрочнении и приводящих к короблению детали, с технологическими параметрами процесса обработки;

- параметров коробления в виде стрел прогиба в сечениях деталей с внутренними растягивающими силами, действующими на конструктивные элементы деталей и связанными с режимами дробемётного упрочнения (п. 7 паспорта специальности 2.5.6).

2. Предложена предсказательная модель процесса дробемётного упрочнения смесью дроби регламентированного фракционного состава, представляющая множественное внедрение в обрабатываемую поверхность партий дробинок с диаметрами, определёнными на основе анализа реального микрорельефа обработанной поверхности (п. 6 паспорта специальности 2.5.6).

3. Обоснована возможность управления процессом технологического наследования отклонений пространственной формы деталей типа пластин с подкреплением при дробемётном упрочнении, заключающийся в превентивном деформировании конструктивных элементов деталей раскаткой роликами с созданием расчетного предыскажения формы деталей в противоположном направлении (п. 6 паспорта специальности 2.5.6).

4. Экспериментально установлена взаимосвязь режимов и условий обработки типовых деталей типа пластин с подкрепляющими рёбрами превентивным деформированием раскаткой рёбер роликами с последующей дробеударной обработкой с усталостной долговечностью материала деталей (п. 7 паспорта специальности 2.5.6).

Теоретическая и практическая значимость

На основании полученных результатов в ходе выполнения теоретических и экспериментальных исследований установлены основные закономерности процесса обработки деталей типа пластин с подкреплением в технологическом сочетании «Превентивное деформирование – дробеударное упрочнение»; разработан способ минимизации коробления деталей, подвергаемых дробемётному упрочнению, заключающийся в превентивном деформировании путём раскатки роликами конструктивных элементов деталей; разработана и экспериментально подтверждена методика определения технологических параметров процесса превентивного деформирования типовых

подкреплённых деталей на основе их расчетного формоизменения в процессе упрочнения.

Применение разработанного способа обеспечивает повышение точности формы деталей типа пластин с подкреплением, подвергаемых дробемётному упрочнению, и, как следствие, снижение монтажных напряжений при дальнейшей сборке узлов и агрегатов.

Методология и методы исследования. Работа сформирована на базе научных основ технологии машиностроения. Теоретические исследования выполнены с применением методов математического анализа, теории упругости и пластичности. Для математического моделирования была использована многоцелевая программа конечно-элементного анализа LS-Dyna, генерация моделей осуществлялась в среде MATLAB. Данные, полученные при моделировании, обрабатывались в программе Microsoft Excel. Исследование поверхности после обработки дробью осуществлялось при помощи оптического профилометра Bruker Contour GT-K1. Для определения фракционного состава дробы был использован стенд машинного зрения NI SMART CAMERA 1764. Исследование остаточных напряжений производилось по методике, разработанной ИРНТУ, на установке для измерения остаточных напряжений УДИОН-2.

Положения, выносимые на защиту

1. Методика определения методом конечно-элементного моделирования внутренних силовых факторов процесса дробемётного упрочнения в виде растягивающих сил, действующих на конструктивные элементы обрабатываемых деталей типа пластин с подкрепляющими рёбрами, и координат точек приложения данных сил (расстояния от поверхности), связанных с режимами и условиями дробемётной обработки.

2. Результаты численного и экспериментального исследования закономерностей формирования НДС маложестких деталей типа пластин с подкрепляющими рёбрами при дробемётном упрочнении с оценкой влияния данного процесса на форму и остаточное напряженное состояние деталей;

3. Методика расчета режимных параметров процесса превентивного деформирования маложестких деталей типа пластин с подкрепляющими ребрами, подвергаемых дробемётному упрочнению, раскаткой роликами с последующей дробеструйной доводкой;

4. Методика и результаты исследования влияния режимов и условий обработки образцов в последовательности «Превентивное деформирование раскаткой роликами – дробемётное упрочнение» на усталостную долговечность материала.

Внедрение результатов. Полученные результаты использованы при производстве самолета МС-21 на Иркутском авиационном заводе – филиале ПАО «Корпорация «Иркут». По результатам выполнения

исследований был получен акт использования научно-исследовательских опытно-конструкторских работ на Иркутском авиационном заводе.

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 ContourGT-K1, стенда машинного зрения NI SMART CAMERA 1764, универсальной сервогидравлической испытательной машине ENF-EV101K2-04N-1E, установки для измерения остаточных напряжений УДИОН-2.

Апробация работы. Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на восьмой международной конференции «Проблемы механики современных машин» (г. Улан-Удэ, ВСГУТУ, 4 июля 2022 г.), первой Региональной конференции «iPolytech Conference» (г. Иркутск, ИРНИТУ, 23-25 ноября 2022 г.), XVI Международной научно-практической конференции «Современные авиационные технологии. «International Conference on Aviation Engineering» (Иркутск, ИРНИТУ, 03–07 июля 2023 г.).

Результаты работы представлены в 8 публикациях. В том числе в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ, опубликовано 5 статей, в международном издании, индексируемом в базе Scopus, 1 статья.

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

Исследования, представленные в настоящей диссертации, входят в состав работ, выполненных по договору №8/16 от 18.01.2016 г. на проведение научно-исследовательских, опытно-конструкторских и технологических работ между ИРНИТУ и ПАО «Корпорация «Иркут» на тему «Разработка комбинированной технологии «Превентивное деформирование – дробемётное упрочнение» деталей типа подкреплённых ободов и стенок».

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, включая 14 таблиц и 96 рисунков, заключения, списка литературы из 110 наименований, списка сокращений. Работа содержит 147 страниц машинописного текста и 4 приложения.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дана краткая характеристика состояния проблемы, обоснована актуальность выполненной работы, определена цель и поставлены задачи исследования, сформулированы научная новизна и практическая значимость работы.

В первой главе представлены конструктивные особенности подкреплённых деталей каркаса летательных аппаратов (рисунок 1), обзор технологических методов обеспечения точности формы и ресурса при изготовлении данных деталей. Также приведены теоретические и экспериментальные исследования процесса изготовления упрочняемых дробью подкреплённых деталей.

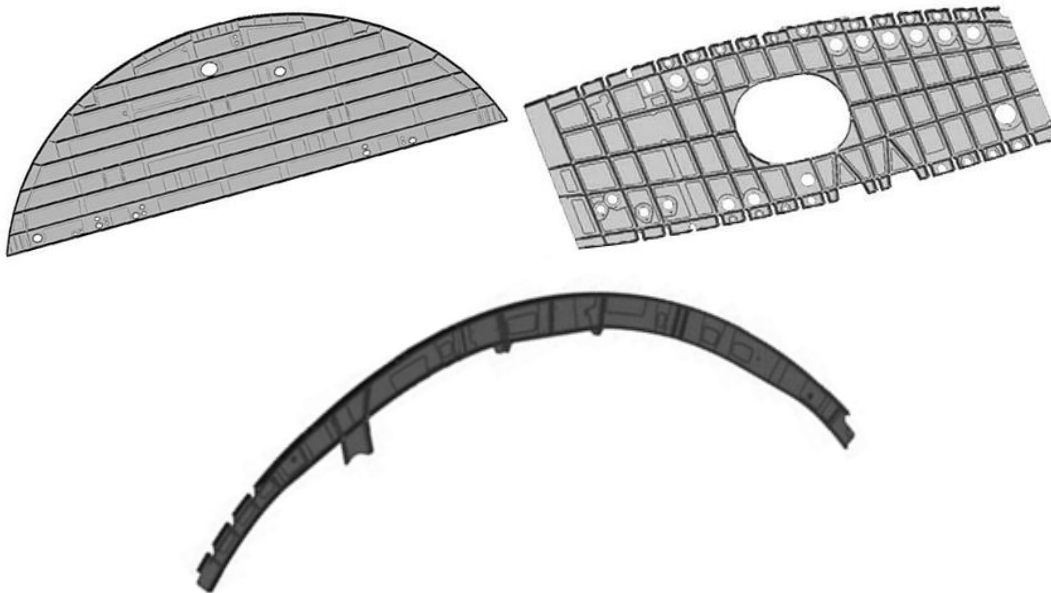


Рисунок 1– Типовые подкреплённые детали каркаса

Вторая глава посвящена исследованию процесса дробеударного упрочнения, внутренними силовыми факторами процесса упрочняющей дробемётной обработки, вызывающими формоизменение детали, являются удельная растягивающая сила и координата (расстояние от поверхности) точки её приложения.

Особенностью большинства подкреплённых деталей является расположение центра тяжести (ЦТ) сечения вне полона (рисунок 2). При этом растягивающие усилия, возникающие в наружных ($P_{нар}$) и внутренних ($P_{вн}$) слоях при двухсторонней упрочняющей дробеобработке, вызывают однонаправленные изгибающие моменты ($M_{нар}$ и $M_{вн}$). Это не позволяет добиться устранения коробления регулированием режимов обработки сторон детали ($V_{нар}$ и $V_{вн}$).

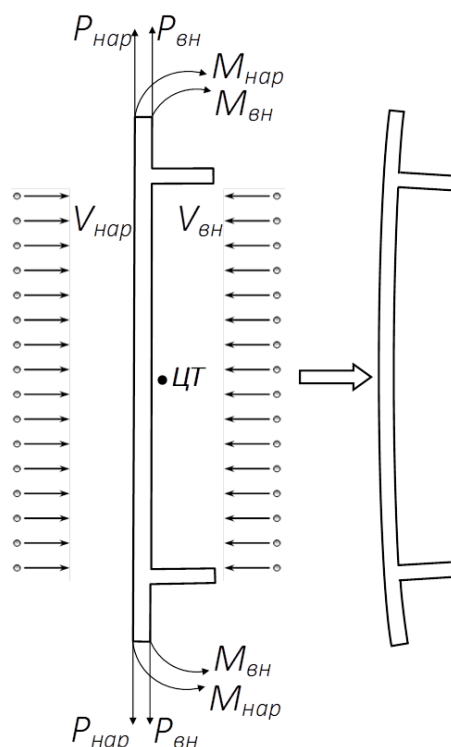


Рисунок 2 – Схема нагружения при упрочнении дробью подкреплённой детали

Разработана и реализована методика экспериментального исследования процесса дробемётного упрочнения деталей, состоящих из таких конструктивных элементов, как полотно, карманы и подкрепляющие рёбра, расположенные под разными углами, с целью определения исходных данных для дальнейших расчётов в виде внутренних силовых факторов и структуры зоны упрочняющей дробемётной обработки.

На основе измерения стрел прогибов и удлинений образцов, закрепляемых на имитаторах конструктивных элементов деталей, определены внутренние силовые факторы процесса дробемётного упрочнения в виде удельной растягивающей силы и координаты точки её приложения – расстояния от обрабатываемой поверхности. Данные факторы действуют на обработанные дробью конструктивные элементы деталей, что приводит к общей деформации упрочненной детали.

С использованием механического метода (метода полосок) определения остаточных напряжений (ОН) получены эпюры ОН, формирующихся в поверхностных слоях конструктивных элементов подкреплённых деталей. Полученный эпюр представлен на рисунке 3 в качестве примера.

Партия:	ИА3-26	Примечание	-	
Образец:	1			
Материал:	1933	Глубина наклепа, мм	0,3	
Вид обработки:	Упрочнение, 420 об/мин, 1 м/мин, дробь 0,6-0,8 мм, позиция 1.			

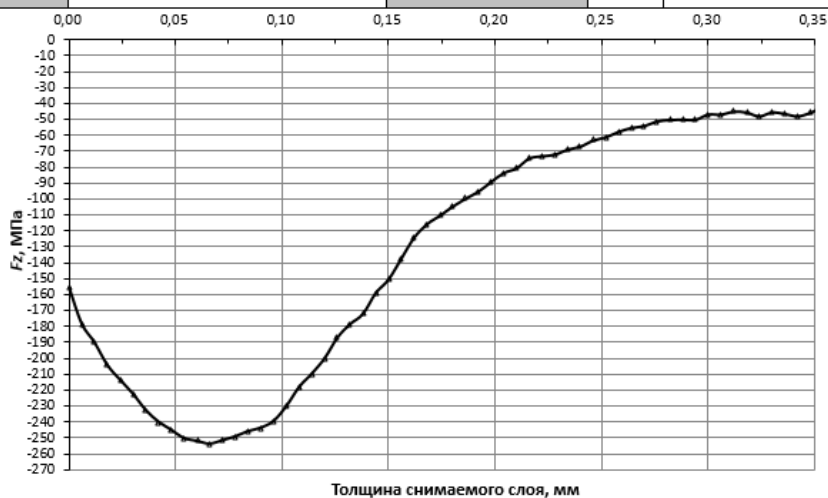
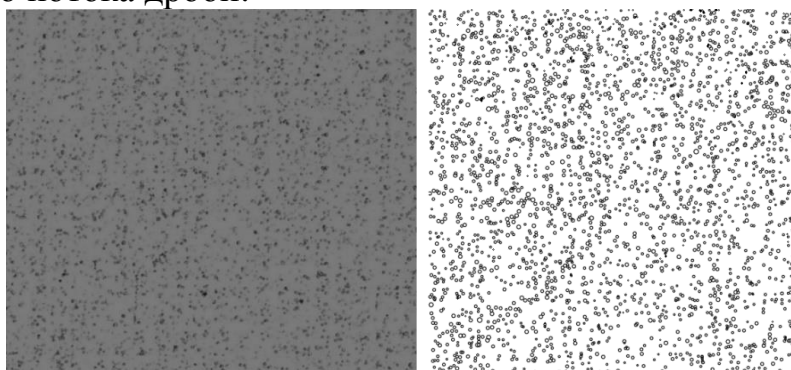


Рисунок 3 – Эпюр распределения остаточных напряжений после дробеударной обработки

При помощи оптического профилометра Bruker Contour GT-K1 определены параметры микрорельефа обработанных дробью полированных образцов из алюминиевого сплава 1933Т2, закреплённых на имитаторах конструктивных элементов подкреплённых деталей «Полотно», «Карман» и «Ребро». Образцы обрабатывались на типовых режимах на разных уровнях по высоте зоны обработки программной дробемётной установки УДП-2-2,5. В качестве рабочей среды использовалась смесь дробы диаметром 0,6...0,8 мм, полученная путём отсева из стальной литой дробы ГОСТ 11964-81. В результате анализа микрорельефа (рисунок 4) получены распределения диаметров отпечатков дробинки в зависимости от расположения конструктивных элементов относительно потока дробы.



а

б

Рисунок 4 – Профилограмма обработанной дробью поверхности (а); контуры отпечатков, полученные в САD-системе AutoCAD (б)

Разработана методика определения фракционного состава дробы в виде количественного соотношения дробинок данных диаметров с применением технологии технического зрения. Представлены результаты определения фракционного состава дробы, используемой при упрочнении деталей на дробемётной установке УДП-2-2,5. Процентное соотношение дробы по диаметрам составляет: 0,6 мм – 43%; 0,7 мм – 48%; 0,8 мм – 9%.

В третьей главе представлены результаты конечно-элементного моделирования процесса дробеударного упрочнения подкреплённых деталей с учётом структуры зоны обработки и фракционного состава рабочей среды.

На основе результатов моделирования процесса единичного внедрения шариков с диаметрами 0,6, 0,7 и 0,8 мм в материал детали при рабочих скоростях 0,5...5 м/с (рисунок 5) получены зависимости диаметров отпечатков от скорости дробы (рисунок 6).

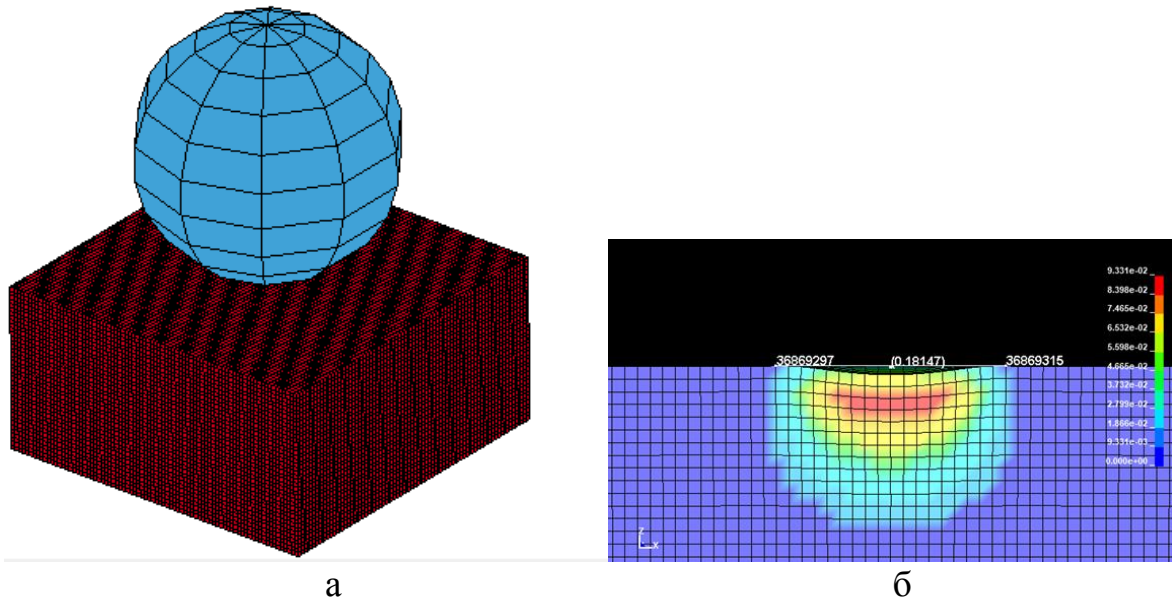


Рисунок 5 – Конечно-элементная модель единичного внедрения (а); измерение отпечатка от внедрения дробинки (б)

Зависимости диаметра отпечатка от скорости внедрения дробинки представлены в виде эмпирических зависимостей:

$$d_o^{0,6} = -0,0056 \cdot v^2 + 0,0671 \cdot v - 0,0184,$$

$$d_o^{0,7} = -0,0104 \cdot v^2 + 0,0937 \cdot v - 0,0265,$$

$$d_o^{0,8} = -0,0083 \cdot v^2 + 0,0908 \cdot v - 0,0303,$$

где d – диаметр отпечатка, v – скорость внедрения дробинки.

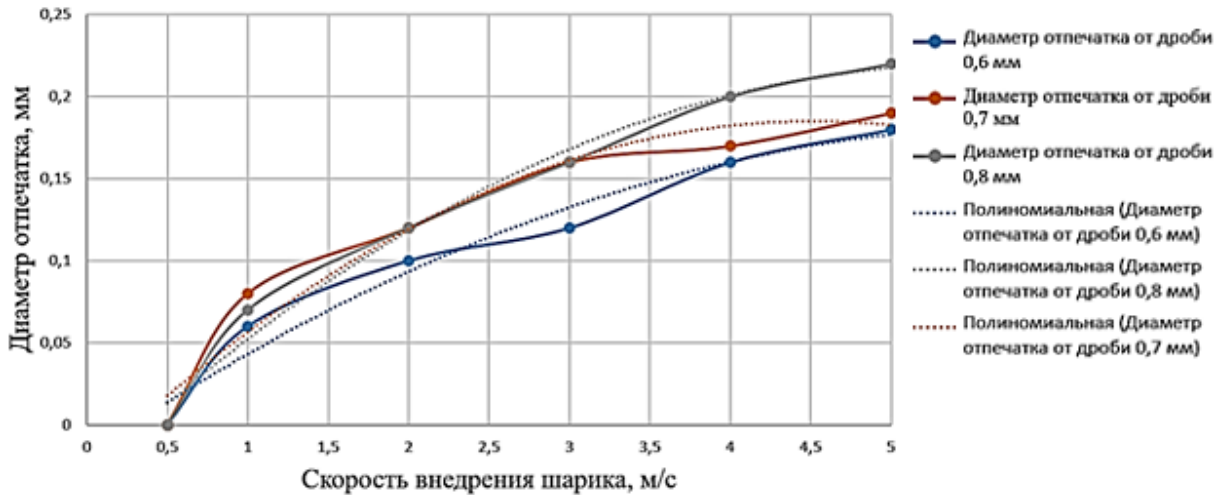


Рисунок 6 – Зависимость диаметров отпечатков от скорости внедрения дроби

Представлена методика и результаты моделирования процесса множественного внедрения дробинок с учётом фракционного состава и распределения скоростей в потоке дроби при упрочняющей дробемётной обработке, установленных в главе 1 (рисунок 7). Результатом моделирования являются расчетные эпюры ОН и значения удельных растягивающих сил в конструктивных элементах деталей. Сравнение расчётных и экспериментальных данных показало сходимость эпюр ОН с отклонениями в пределах 15%; удельных растягивающих сил – 9 %.

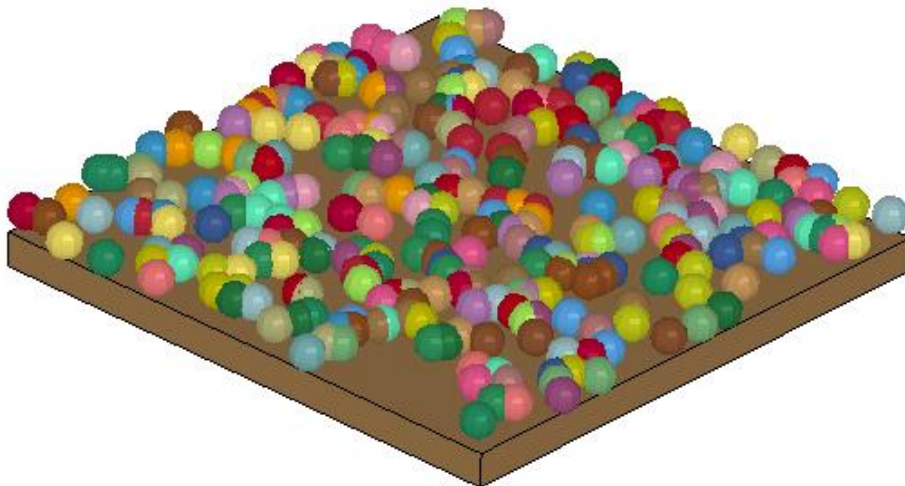


Рисунок 7 – Моделирование множественных внедрений

Полученные значения удельных растягивающих сил были использованы при моделировании процесса упрочняющей обработки конструктивно-подобного образца (КПО) подкреплённой детали «Стенка» (рисунок 8,а) косвенным методом путём приложения расчётных сил к

узлам сетки конечно-элементной модели. Это позволило значительно сократить потребные вычислительные ресурсы и время расчёта.

Определённые в результате моделирования параметры формоизменения деталей при упрочняющей обработке дробью в виде отклонений от плоскости в контрольных точках (рисунок 8,б) представляет исходные данные для дальнейшего определения режимов и условий превентивного деформирования.

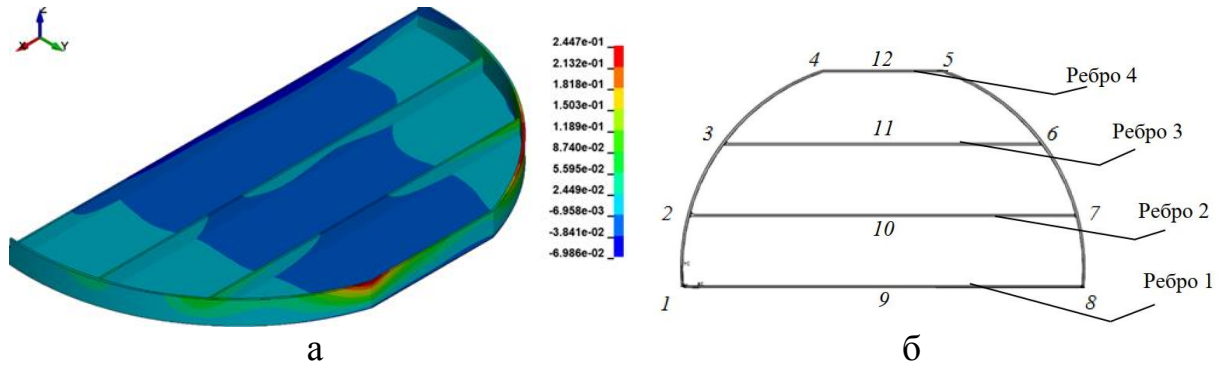


Рисунок 8 – Результаты моделирования процесса упрочняющей дробемётной обработки КПО детали «Стенка» в виде распределения перемещений узлов конечно-элементной сетки (а); расчетная схема определения отклонений детали после моделирования (б)

Значения отклонений от плоскостности в контрольных точках КПО, полученные при моделировании, представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Расчетные отклонения от плоскостности в контрольных точках, полученные при моделировании процесса дробемётной обработки

№ контрольной точки	Отклонения, мм
1	0,83
2	0,79
3	0,59
4	0,07
5	0,045
6	0,42
7	0,88
8	0,9
9	0,01
10	0,23
11	0,11
12	0

Четвертая глава посвящена практической реализации результатов исследования.

Опытные работы по отработке технологического сочетания «Превентивное деформирование – дробемётное упрочнение» были выполнены на базе Иркутского авиационного завода путём обработки на заводских режимах КПО подкреплённой детали «Стенка» (рисунок 9).

Предварительно была выполнена раскатка роликами рёбер КПО с режимами, рассчитанными на основе исходных данных в виде расчётных отклонений от плоскостности, определённых при моделировании.

После дробемётного упрочнения отклонения КПО, подвергнутого превентивному деформированию, были снижены в 2,8 раза в сравнении с фрезерованным КПО, что подтверждает применимость разработанных методик.

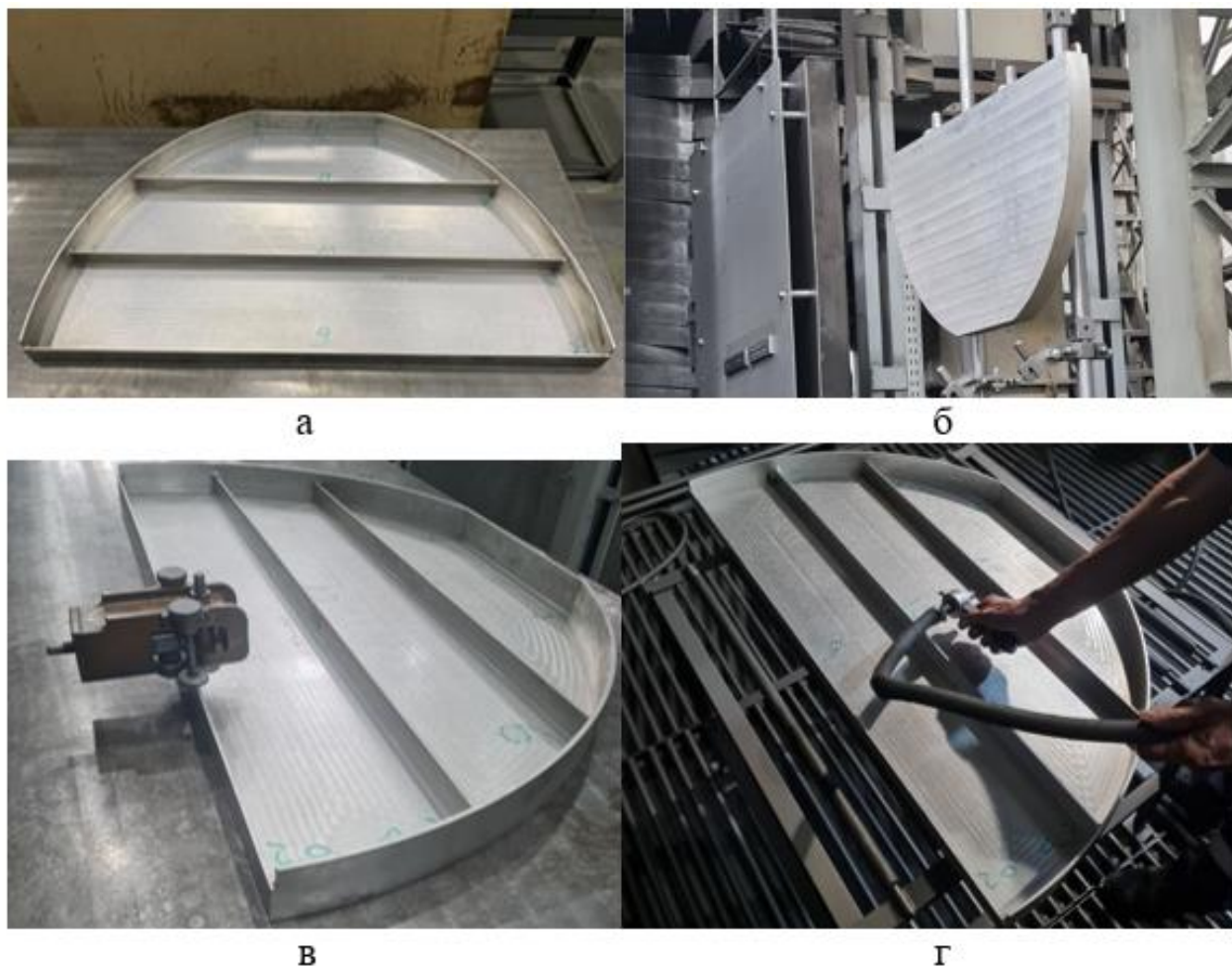


Рисунок 9 – Опытные работы по отработке технологического сочетания «Превентивное деформирование – дробемётное упрочнение»; КПО детали типа «Стенка» (а); дробемётное упрочнение (б); превентивное деформирование раскаткой роликами (в); дробеструйная доводка (г)

Опытные работы, проведённые с целью проверки технологических возможностей процесса правки упрочнённых деталей дробеструйной обработкой, показали возможность дальнейшего повышения точности формы упрочняемых подкреплённых деталей путём выполнения последовательности операций «Превентивное деформирование раскаткой рёбер роликами – дробемётное упрочнение – доводка формы дробеструйным методом». В результате доводки дробеструйной обработкой был получен КПО детали «Стенка» с отклонениями от плоскостности в пределах установленного допуска 0,4 мм.

С целью исследования влияния операции превентивного деформирования раскаткой рёбер роликами на усталостную долговечность материала деталей была разработана и реализована методика экспериментального исследования на образцах подкреплённых деталей, изготавливаемых в последовательности «Фрезерование – превентивное деформирование – упрочняющая дробемётная обработка».

Усталостные испытания проводились на универсальной сервогидравлической испытательной машине ENF-EV101K2-04N-1E (Япония) для статических и циклических испытаний материалов.

Нагружение образцов при испытаниях осуществлялось по схеме четырехточечного изгиба, показанной на рисунке 7, с использованием специальной оснастки (рисунок 10).

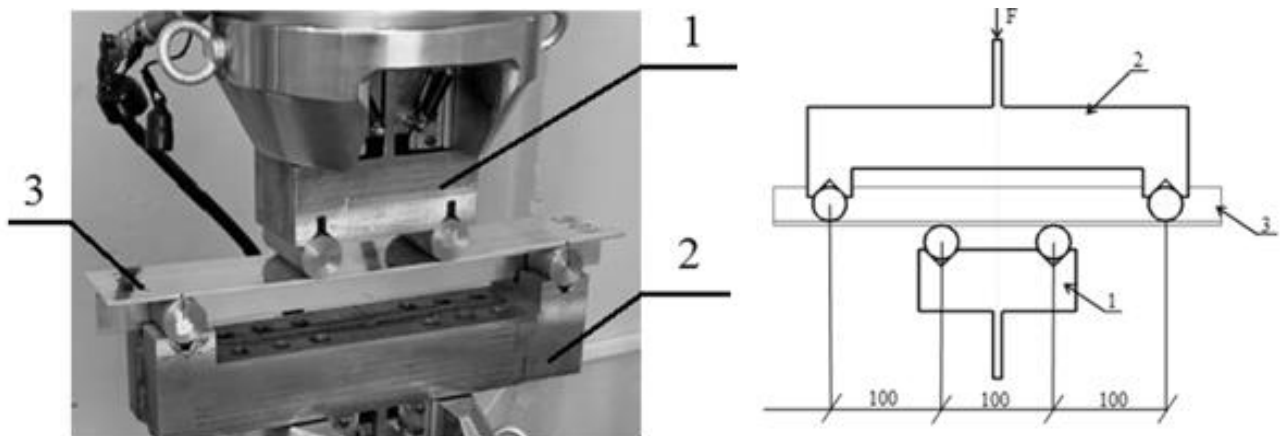


Рисунок 10 – Схема нагружения тавровых образцов при усталостных испытаниях в оснастке: 1 – пуансон; 2 – опора; 3 – образец

Установлено, что для фрезерованных и упрочнённых образцов из сплава 1933Т2 предварительная раскатка роликами привела к увеличению количества циклов до разрушения на 9-39 %, а для сплава 1163Т – к снижению количества циклов на 16-25 %.

Разработанные рекомендации по реализации технологического сочетания «Превентивное деформирование раскаткой роликами – дробемётное упрочнение» применительно к деталям типа пластин с подкреплением апробированы в условиях реального производства на

детали типа «Стенка» самолёта МС-21, что обеспечило повышение точности формы детали при дробемётном упрочнении.

Заключение содержит краткие результаты проведенных исследований.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В результате выполнения диссертационной работы получены новые научно обоснованные технологические решения, обеспечивающие решение актуальной для машиностроения проблемы минимизации коробления при упрочнении дробью деталей каркаса, типа маложёстких пластин с подкреплением.

При этом получены следующие научные выводы и практические результаты:

1. Изучены закономерности процесса дробемётного упрочнения деталей, состоящих из типовых конструктивных элементов «Полотно», «Карман» и «Ребро» для которых экспериментально определены: внутренние силовые факторы в виде удельных растягивающих сил, координат точек приложения данных сил (расстояния от поверхности); эпюры остаточных напряжений в поверхностных слоях; параметры микрорельефа поверхностей в виде распределений диаметров отпечатков дроби. Предложена высокопроизводительная методика автоматизированного определения с применением технологии технического зрения фракционного состава дроби, применяемой при упрочнении деталей, в виде количественного соотношения дробинok данных диаметров. Результаты исследования представляют исходные данные для предсказательного моделирования процесса дробемётного упрочнения деталей типа пластин с подкреплением смесью дроби регламентированного фракционного состава.

2. Разработанная методика конечно-элементного моделирования процесса дробемётного упрочнения с учетом фракционного состава и распределения скоростей в потоке дроби позволяет по расчетным эпюрам остаточных напряжений определять внутренние силовые факторы в виде удельных растягивающих сил, действующих на конструктивные элементы деталей в процессе обработки, и координат точек приложения данных сил (расстояния от поверхности). Адекватность методики подтверждена экспериментом (сходимость в пределах 15%).

3. Впервые выполнено конечно элементное моделирование реального процесса упрочняющей дробеобработки подкреплённой детали косвенным методом, путём нагружения конструктивных элементов расчетными внутренними силами, определёнными с учетом особенностей обработки на конкретном оборудовании – дробемётной установке УДП-2-2,5. Результатом моделирования обработки конструктивно-подобного

образца детали «Стенка», представляющего собой пластину с подкрепляющими рёбрами, являются стрелы прогиба сечений КПО по рёбрам (наибольшее значение – 0,86 мм по первому ребру), используемые в качестве исходных данных для расчета технологических параметров превентивного деформирования детали раскаткой рёбер роликами.

4. Доказана возможность управления процессом технологического наследования отклонений пространственной формы деталей типа пластин с подкреплением при дробемётном упрочнении, заключающийся в превентивном деформировании конструктивных элементов деталей раскаткой роликами с созданием расчетного предсказания формы деталей в противоположном направлении. Предложена методика расчета режимов и условий превентивного деформирования деталей типа пластин с подкреплением раскаткой рёбер роликами на основе определённых в результате моделирования параметров формоизменения в результате упрочнения дробью. Выполнен расчёт и произведена экспериментальная отработка технологического сочетания «Превентивное деформирование – дробемётное упрочнение», что позволило подтвердить применимость разработанных методик.

5. Исследованы технологические возможности процесса правки упрочнённых деталей дробеструйным методом. Показана возможность повышения точности формы деталей типа пластин с подкреплением при выполнении последовательности операций «Превентивное деформирование раскаткой рёбер роликами → Дробемётное упрочнение → Доводка формы дробеструйным методом». При реализации данной последовательности операций на КПО детали типа «Стенка» достигнуты отклонения от плоскостности 0,4 мм в пределах установленного допуска.

6. Разработана и реализована методика экспериментального исследования, которая позволила установить основные закономерности влияния технологических параметров последовательности операций «Фрезерование – превентивное деформирование раскаткой рёбер роликами – упрочняющая дробемётная обработка» на усталостную долговечность алюминиевых сплавов 1933Т2 и 1163Т, применяемых при изготовлении деталей типа пластин с подкреплением.

7. Разработаны рекомендации по реализации технологического сочетания «Превентивное деформирование раскаткой роликами – дробемётное упрочнение» применительно к деталям типа пластин с подкреплением, которые были апробированы в условиях реального производства на детали типа «Стенка» самолета МС-21, что обеспечило повышение точности формы детали при дробемётном упрочнении. По результатам выполнения исследований был получен акт использования научно-исследовательских опытно-конструкторских работ на Иркутском авиационном заводе. Это позволяет рекомендовать полученные результаты к использованию при разработке технологических процессов

упрочнения подкреплённых деталей из алюминиевых сплавов, получаемых механической обработкой.

Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы. Разработанные технологические рекомендации возможно использовать при производстве изделий авиационной техники. На основе данных рекомендаций может производиться разработка технологических процессов по формообразованию и превентивному деформированию раскаткой роликами конструктивных элементов деталей из алюминиевых сплавов после механической обработки перед дробемётным упрочнением с целью минимизации коробления деталей. Дальнейшие исследования в рамках этой тематики могут быть направлены на изучения влияния превентивного деформирования на ресурсные характеристики деталей.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Макарук, А.А. Определение отклонений формы деталей силового каркаса летательных аппаратов при дробеметном упрочнении методом конечно-элементного моделирования / А.А. Макарук, А.А. Пашков, **О.В. Самойленко** // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2018. – № 3(59). – С. 23-29.

2. Макарук, А.А. Определение внутренних силовых факторов, возникающих при упрочнении подкреплённых ребрами деталей / А.А. Макарук, А.А. Пашков, А.М. Хамаганов, **О.В. Самойленко** // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2018. – Т. 22, № 10(141). – С. 29-37.

3. Макарук, А.А. Методика расчета технологических параметров превентивного деформирования упрочняемых деталей типа «стенка» / А.А. Макарук, **О.В. Самойленко**, Ю.Н. Иванов, Н.С. Чашин, Н.В. Минаев // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2021. – Т. 25, № 1(156). – С. 8-16.

4. Пашков, А.Е. Исследование начальных напряжений процесса обработки дробью / А.Е. Пашков, А.А. Пашков, **О.В. Самойленко** // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2022. – Т. 20, № 4. – С. 120-128.

5. Пашков, А.А. Определение фракционного состава дроби при упрочнении ударными методами с помощью технического зрения / А.А. Пашков, **О.В. Самойленко**, А.А. Самойленко // Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. – 2022. – Т. 25, № 4. – С. 10-17.

В международных изданиях, включенных в Web of Science:

6. Makaruk, A.A., Increasing the shape accuracy of the hardened parts of the frame by technological methods / Makaruk, A.A., Pashkov A.A.,

Samoylenko O.V. // Materials Science and Engineering: IOP Conference Series. 2019: Vol. 632.

В прочих изданиях:

7. Пашков, А.Е. Оценка влияния предыскажения формы перед дробеметным упрочением на ресурс изделий из алюминиевых сплавов / А. Е. Пашков, А.А. Пашков, А.А. Макарук, **О.В. Самойленко** // Проблемы механики современных машин: материалы VIII международной конференции (г. Улан-Удэ, 04–09 июля 2022 года). – Улан-Удэ, 2022. – С. 197-204.

8. Румянцев, Ю.С. Перспективы развития технологии упрочняющей обработки методами поверхностного пластического деформирования / Ю.С. Румянцев, Л.М. Петров, **О.В. Самойленко** // Современные авиационные технологии. International Conference on Aviation Engineering: материалы XVI международной научно-практической конференции (г. Иркутск, 03–07 июля 2023 года). – Иркутск, 2023. – С. 34-38.

Подписано в печать 05.10.2023. Формат 60 x 90 / 16.
Бумага офсетная. Печать цифровая. Усл. печ. л. 1,25.
Тираж 100 экз. Зак. 127. Поз. плана 2н.

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