



**Ширяев Алексей Александрович**

**Совершенствование технологического процесса изготовления деталей  
ГТД из титанового сплава с применением технологии лазерной ударной  
обработки**

2.5.6. Технология машиностроения

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург  
2026

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» и в Акционерном обществе «Объединенная двигателестроительная корпорация-Авиадвигатель»

Научный руководитель: **Карманов Вадим Владимирович,**  
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Тамаркин Михаил Аркадьевич,**  
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технология машиностроения»,  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Донской государственный технический университет», г. Ростов-на-Дону

**Новиков Виталий Иванович**  
кандидат технических наук, доцент кафедры судебных экспертиз,  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет», г. Санкт-Петербург

Ведущая организация: **Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский университет науки и технологий», г. Уфа**

Защита диссертации состоится «26» мая 2026 г. в 12 часов 00 минут на заседании диссертационного совета У.2.5.6.26 федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», по адресу: 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, главный учебный корпус, аудитория 346.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте [www.spbstu.ru](http://www.spbstu.ru) федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого».

Автореферат диссертации разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2026 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
кандидат технических наук



Лобов Василий  
Александрович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность темы диссертации.**

Элементами конструкции авиадвигателей, в значительной мере определяющими их эксплуатационные характеристики, являются рабочие лопатки. Лопатки в процессе эксплуатации подвержены циклическим (мало- и многоцикловой усталости), центробежным нагрузкам. Помимо циклических нагрузок лопатки и проточная часть авиадвигателя подвержены повреждениям от попаданий посторонних предметов (лёд, песок, птицы, мусор на взлётно-посадочной полосе и пр.). Повреждение лопаток приводит к преждевременному выводу двигателя из эксплуатации и резкому (до двух раз) снижению предела выносливости повреждённых лопаток.

Одним из технологических способов повышения усталостной прочности лопаток компрессора является использование различных методов поверхностной упрочняющей обработки. Применение упрочнения позволяет создать в поверхностном слое (ПС) обрабатываемой детали сжимающие остаточные напряжения (ОН), которые благоприятно влияют на усталостную прочность и препятствует развитию трещин в поверхностном слое.

В авиадвигателестроительной отрасли наиболее широко применяются следующие виды упрочняющей обработки: гидродробеструйная, ультразвуковая обработка и выглаживание с малыми пластическими деформациями.

Относительно новым видом поверхностной упрочняющей обработки является лазерная ударная обработка (ЛУО). Упрочнение происходит за счет микровзрывов на поверхности детали, возникающих от импульсного лазерного излучения большой интенсивности, что обеспечивает пластическую деформацию локальной области и большую глубину упрочненного слоя относительно серийно применяемых методов.

Опубликованы различные экспериментальные работы по тематике ЛУО, однако, исследования выполнялись на элементарных образцах (плоских или цилиндрических). Экспериментальные и теоретические исследования комплексного характера на деталях ГТД отсутствуют.

Настоящая работа посвящена исследованию технологических возможностей и разработке рекомендаций по назначению технологических параметров лазерной ударной обработки, обеспечивающих качество поверхностного слоя и повышение усталостной долговечности (сопротивления усталости) обработанных деталей ГТД.

**Степень разработанности темы.** Важнейший вклад в технологию повышения ресурса и надежности элементов авиационных двигателей внесли: А.Н. Петухов, В.В. Панасюк, В.П. Когаев, А.М. Сулима и др.

В разработку и развитие методов поверхностного пластического деформирования (ППД) применительно к авиационным двигателям большой вклад внесли В.А. Горохов, В.Н. Ткачев, В.Ф. Макаров, Д.Д. Папшев, А.М. Сулима, Б.П. Рыковский и др.

Первыми работами, направленными на изучение технологии ЛУО и сферы её применения, были работы, проведенные в 60-х и 70-х гг. в СССР

(Г.А. Аскарян, Е.М. Морозов, В.Б. Брагинский, Ю.В. Афанасьева) и в США (С.Н. Skeen, N.C. Anderholm, F. Neuman, D.W. Gregg и S.J. Thomas).

Началом промышленного применения ЛУО послужило создание лазера с большим ресурсом, обеспечивающим небольшую стоимость применения данной технологии. Первое применение ЛУО состоялось в США с началом программы ВВС США по предотвращению разрушения деталей двигателей от многоциклового усталости и выполнялось на кромках лопаток двигателя GE F101 из алюминиевого сплава. Для чего была создана компания Laser Shock Peening Technologies (LSPT).

Внедрение упрочняющей обработки методом лазерного удара в серийное производство деталей газотурбинных двигателей (ГТД) в США началось с 2010-х гг. и было обусловлено положительными результатами на элементарных образцах из материалов авиационного назначения.

В данный момент учёные и инженеры как в России (О.А. Плехов, А.Ю. Изюмова, М.А. Ляховецкий, Ю. А. Ножницкий), так и за рубежом (R. Sundar, N. Maharjan, X. Pan, R. Fabbro и другие), занимаются разработкой математической модели процесса ЛУО и исследованиями влияния параметров ЛУО на физико-механические свойства, сопротивление усталости и коррозии материалов для последующего внедрения ЛУО в промышленность.

В России применение ЛУО осуществляется только в исследовательских целях, что обусловлено отсутствием отечественного оборудования для ЛУО, а также комплектующих для создания установки, в первую очередь – лазера. Также недостаточно исследовано влияние параметров обработки на сплавы, применяемые для изготовления лопаток компрессора.

**Цель исследования:** повышение качества поверхностного слоя и сопротивления усталости при изготовлении лопатки компрессора из титанового сплава на основе применения технологии лазерной ударной обработки.

#### **Задача диссертационной работы.**

Исследование влияния основных параметров режима технологического процесса поверхностного упрочнения на формирование параметров качества: шероховатость, точность размеров, упрочнение поверхностного слоя кромок пера и повышение сопротивления усталости лопаток компрессора из титанового сплава.

Для решения данной задачи и достижения поставленной цели необходимо:

1. Изучить физические закономерности механизма воздействия различных технологических параметров лазерной ударной обработки (плотность мощности, количество проходов, процент перекрытия пятен лазера) на поверхностный слой кромки пера лопатки.

2. Разработать методику научно-обоснованного выбора рациональных параметров лазерной ударной обработки, обеспечивающих повышение сопротивления усталости лопаток компрессора из титанового сплава.

3. Построить математическую модель оценки уровня и глубины остаточных напряжений в поверхностном слое кромки лопаток компрессора при одновременном двустороннем упрочнении в результате технологии ударной лазерной обработки.

4. Разработать практические рекомендации по реализации технологического процесса изготовления лопаток компрессора из титанового сплава с применением технологии лазерной ударной обработки, методику проектирования и научно-обоснованный выбор параметров режимов упрочнения поверхностного слоя лопаток.

**Объект исследования:** технологический процесс изготовления лопатки ГТД с применением лазерной ударной обработки.

**Предмет исследования:** исследование параметров технологического процесса изготовления лопаток компрессора с использованием лазерной ударной обработки (плотность мощности, количество проходов, процент перекрытия пятен лазера), обеспечивающих высокое качество поверхностного слоя лопатки компрессора (шероховатость, остаточные напряжения), а также предел выносливости.

**Методология и методы исследования.**

Экспериментальные результаты работы получены при использовании научных основ технологии машиностроения, упрочняющей обработки с помощью лазерной установки, оборудования для усталостных испытаний и анализа параметров поверхностного слоя с учётом использованием стандартов на испытания. Проведение статистической обработки и анализ полученных результатов с использованием методов факторного анализа. Проведение математического моделирования процесса лазерной ударной обработки выполнен в специализированном пакете. Приборы и оборудование сертифицированы и поверены.

**Научная новизна:**

1. Установлены закономерности влияния параметров лазерной ударной обработки на глубину распределения и характер остаточных напряжений, шероховатость поверхности лопатки из титанового сплава

2. Экспериментально подтверждена адекватность модели, описывающей пластическую деформацию материала при взрыве и описывающей процесс лазерного ударного упрочнения, протекающему со скоростями деформации, на порядок выше ( $10^6 \text{ с}^{-1}$ ).

3. Получена математическая модель процесса лазерной ударной обработки, позволяющая оценить и произведена оценка уровня и глубины остаточных напряжений в поверхностном слое кромки компрессорной лопатки ГТД при одновременном двустороннем упрочнении в результате технологии ударной лазерной обработки. Результат расчетов показал, что уровень напряжений составляет (-0,4...-0,2 отн. ед.) на глубине свыше 0,2 мм, что согласуется с результатами эксперимента.

4. Разработаны практические рекомендации по реализации технологического процесса изготовления компрессорных лопаток ГТД из титанового сплава с применением технологии лазерной ударной обработки, методику проектирования и научно-обоснованный выбор параметров режимов упрочнения поверхностного слоя лопаток.

**Достоверность научных результатов:**

Обеспечена необходимым объемом экспериментальных исследований, применением комплекса современных методов исследования, использованием сертифицированного и поверенного оборудования, воспроизводимостью результатов измерений, стандартными методиками исследований и испытаний.

**Теоретическая и практическая значимость заключается в:**

1. Разработана методика научно-обоснованного выбора рациональных режимов технологического процесса изготовления лопаток ГТД с применением лазерной ударной обработки, обеспечивающих повышение сопротивления усталости кромок пера (или только лопаток) из титанового сплава на 26...37% по сравнению со стандартной технологией.

2. Установлены рациональные режимы технологического процесса упрочнения кромки пера при изготовлении компрессорных лопаток ГТД с применением ударной лазерной обработки. Получаемые в результате технологии изготовления лопаток с применением ударной лазерной обработки достигнутые значения параметра шероховатости поверхности  $R_a$ , обеспечивают снижение эффективного коэффициента концентрации напряжений ( $K_\sigma$ ) лопатки ГТД из ( $\alpha+\beta$ ) титанового сплава в 1,4-2,0 раза.

3. Результаты диссертационной работы внедрены в учебный процесс в Передовой инженерной школе «Высшая школа авиационного двигателестроения» ПНИПУ в учебных дисциплинах магистерских программ по направлению 15.04.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств» и на АО «ОДК-Авиадвигатель» для назначения характеристик оборудования при разработке отечественной промышленной установки лазерного ударного упрочнения лопаток ГТД.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Установлены закономерности влияния технологических параметров процесса лазерной ударной обработки кромки пера лопатки из титанового сплава, обеспечивающие выполнение требований по глубине и характеру распространения остаточных напряжений, одновременному достижению установленного значения параметра шероховатости поверхности ( $R_a$ ) лопатки, для увеличения прочности и сопротивления усталости.

2. Теоретико-экспериментальные исследования, показавшие применимость существующей математической модели формирования напряжений в материалах при скоростном деформировании, применительно к более скоростным процессам с использованием технологии одновременной двусторонней ударной лазерной обработки, для обеспечения требований к качеству поверхностного слоя и повышению сопротивления усталости лопаток ГТД из титанового сплава.

3. Практические рекомендации по реализации усовершенствованного технологического процесса изготовления компрессорных лопаток ГТД из титанового сплава с применением технологии ударной лазерной обработки, методика проектирования и научно-обоснованного выбора рациональных режимов ударного лазерного упрочнения поверхностного слоя.

**Апробация результатов работы.** Основные результаты диссертационной работы докладывались на: Международной научно-технической конференции

им. Н.Д. Кузнецова «Перспективы развития двигателестроения» (Самара, 2023 и 2025); XXIV Всероссийской научно-технической конференции «Аэрокосмическая техника, высокие технологии и инновации – 2023» (Пермь, 2023); Всероссийском конкурсе научно-технических работ и проектов «Молодёжь и будущее авиации и космонавтики» (Москва, 2023); Конгрессе по двигателестроению «НТКД-2024» (Москва, 2024); XXV Всероссийской научно-технической конференции АКТТИ-2024 (Пермь, 2024); Международной научно-технической конференции «Перспективные машиностроительные технологии» (Санкт-Петербург, 2024); IX Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Проблемы и перспективы развития авиации, наземного транспорта и энергетики» (АНТЭ-2024) (Казань, 2024); Научно-технической конференции «Климовские чтения» (Санкт-Петербург, 2024).

**Работа соответствует паспорту специальности – 2.5.6. «Технология машиностроения»** пунктам: п. 3. Математическое моделирование технологических процессов и методов изготовления деталей и сборки изделий машиностроения. п. 4. Совершенствование существующих и разработка новых методов обработки и сборки с целью повышения качества изделий машиностроения и снижения себестоимости их выпуска. п. 7. Технологическое обеспечение и повышение качества поверхностного слоя, точности и долговечности деталей машин.

**Список публикаций автора по теме диссертации** включает 25 научных трудов, в том числе 12 – в журналах, входящих в Перечень ВАК, 2 – в журналах, входящих в Перечень Scopus.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения по результатам работы, списка литературы из 223 наименований и одного приложения, общим объёмом 137 страниц, включая 99 рисунков, 10 таблиц.

**Во введении** отображены актуальность и цель работы, обоснован объект и предмет исследования, а также представлены методы исследования, практическая значимость работы и реализация результатов, указана научная новизна.

**В первой главе** рассматриваются базовые представления об усталости элементов авиационных двигателей и технологических методах повышения усталостных характеристик.

Проблема усталостного разрушения элементов конструкции ГТД является одной из самых острых с точки зрения обеспечения ресурса и надёжности при эксплуатации летательных аппаратов. Для повышения стойкости к усталостному разрушению деталей отечественных ГТД применяют дробеструйная и гидродробеструйная обработки, малопластичное выглаживание, ультразвуковая обработка (УЗО). Но наиболее перспективным является метод лазерной ударной обработки, который обеспечивает большую глубину сжимающих остаточных напряжений, а также возможность обработки тонкостенных элементов, таких как кромки пера лопаток.

Проведена сравнительная оценка применимости методов упрочняющей обработки по параметрам качества поверхностного слоя (шероховатость, эпюра остаточных напряжений, микроструктура, степень наклепа), требований к оборудованию и расходным материалам.

Проведен анализ научных и практических работ по ЛУО. Исследованием ЛУО занимаются в США (LSPT), Японии (Toshiba), КНР (Tyrida), ФРГ (Siemens).

В России исследованием ЛУО занимаются в следующих организациях: 1) ПФИЦ УрО РАН; 2) ФГБОУ ВО «МАИ»; 3) ФГАОУ ВО «МГТУ им. Н.Э. Баумана».

Исследователями показано, что технология ЛУО является более гибкой по сравнению с малопластичным выглаживанием, позволяющим обрабатывать тонкостенные криволинейные поверхности. ЛУО превосходит гидро- и дробеструйную обработки и УЗО в части большей глубины сжимающих ОН, отсутствием наклепа и обеспечением шероховатости. Позволяет увеличить предел выносимости обрабатываемых деталей, но для этого необходимо подобрать параметры обработки. Кроме того, при разработке технологического процесса (ТП), возникают ряд задач, связанных с особенностями геометрии лопатки, материала, требований конструкторской документации.

Параметры поверхностного слоя, которые необходимо обеспечить согласно техническим условиям (ТУ) и конструкторской документации (КД), представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Требования ТУ и КД на упрочнение

№	Требования ТУ на упрочнение и КД	
1	Шероховатость Ra, мкм	Ra 0,32
2	Степень наклёпа, %	≤ 10
3	Растягивающие ОН на поверхности	не допускаются
4	Наличие микротрещин на поверхности	не допускаются
5	Отклонения контура кромок пера лопаток ГТД, мкм	≤ 6
6	Распределение сжимающих ОН в поверхностном слое, отн. ед.	-0,8...-0,2
7	Глубина распределения сжимающих ОН, мм	> 0,2

Рассмотрены основные закономерности и физическая картина процесса лазерной ударной обработки.

Для проведения процесса ЛУО используется схема, представленная на рисунке 1: на поверхность обрабатываемого материала наносится защитный слой, а затем прозрачный слой. В качестве защитного слоя для предотвращения повреждения поверхностного слоя детали используется акриловая черная краска, ПВХ или алюминиевая лента. В качестве прозрачного слоя чаще всего применяется дистиллированная вода.



Рисунок 1 – Схема лазерной ударной обработки

**Во второй главе** изложены методика исследования, применяемый материал, оборудование и используемые приборы. В качестве материала был выбран  $(\alpha+\beta)$  титановый сплав. Исследование проводилось на плоских образцах 50x40x3 мм, изготовленных из конструктивно-подобных образцов лопатки компрессора (рисунок 2), а также лопатках компрессора. Эскиз лопатки показан на рисунке 3. Упрочнению подвергалась зона кромок лопаток шириной 5 мм.

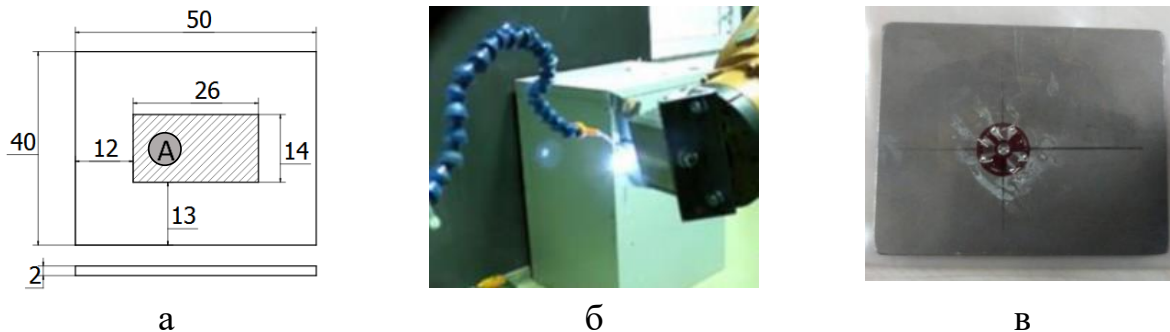


Рисунок 2 – Плоские образцы для определения профилей остаточных напряжений:

- а) габаритные размеры с зоной обработки и местом тензодатчика; б) процесс ЛУО; в) образец после ЛУО с тензодатчиком

Объектом исследования выбран технологический процесс лазерной ударной обработки кромки пера лопатки ГТД. Предметом исследования выбраны параметры качества поверхностного слоя (глубина и величина остаточных напряжений, шероховатость, степень наклепа), а также степень повышения предела выносливости лопатки после упрочнения методом лазерной ударной обработки.

После ЛУО на часть партии лопаток наносились концентраторы напряжений типа «забоина» и определялся предел выносливости. Концентраторы наносились на входные кромки лопаток путем прорезания на фрезерном станке фрезой с углом заточки  $60^\circ$  и радиусом закругления  $R=0,1 \dots 0,2$  мм согласно ОСТ 1 00304-79 (см. рисунок 4). Все параметры резания (скорость резания, подача на зуб) при нанесении концентратора были постоянными для всей партии лопаток. После нанесения концентратора его глубина была измерена глубиномером.

Концентраторы напряжений типа «забоина» наносились с глубинами 0,5 и 1,0 мм.

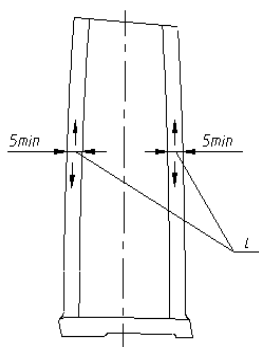


Рисунок 3 – Эскиз рабочей лопаток компрессора с указанием зон упрочнения кромок пера

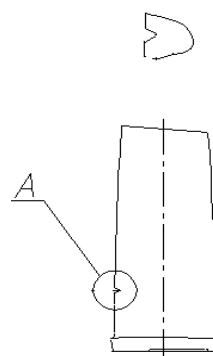
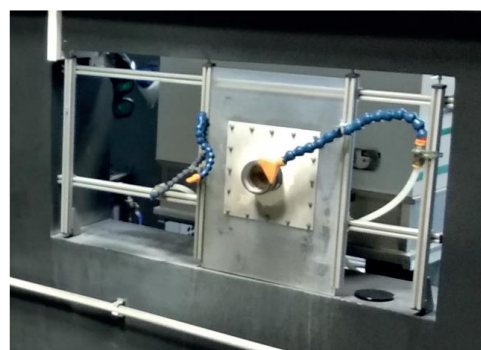


Рисунок 4 – Рабочая лопатка компрессора с V-образным концентратором

Вся обработка образцов и лопаток компрессора производилась на экспериментальной лазерной установке (рисунок 5), состоящей из лазера, роботизированного манипулятора и оптической системы.



а



б

Рисунок 5 – Оборудование для ЛУО:

а) роботизированный манипулятор STEP SR50; б) оптическая система

Установка может обрабатывать детали массой до 50 кг, энергия излучения до 10 Дж, длительность импульса 10 нс, частота повторения импульсов 1...5 Гц.

Измерение шероховатости проводилось профилометром-контурографом Mitutoyo.

Величина ОН в плоских образцах по глубине определена с помощью автоматизированной системы MTS3000 – Restan методом тензометрического сверления отверстий в соответствии со стандартом ASTM E837. На лопатках ОН определялись методом Давиденкова на установке АПООН и рентгеновской дифрактометрии на роботизированном дифрактометре Xstress Robot в соответствии со стандартом EN 15305.

Микроструктуру образцов исследовали на полированных и травленых шлифах на электронном сканирующем микроскопе «ZEISS Axio Observer».

Испытания на усталость лопаток проводились на электродинамических вибростендах ВЭДС-1500, LDS V875 при колебании по первой изгибной форме в условиях комнатной температуры ( $t=20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), чтобы определить предел выносливости. Испытания велись до разрушения объекта исследований.

**В третьей главе** приведены результаты экспериментальных исследований поверхностного слоя после ЛУО образцов из титанового сплава.

Анализ результатов проведенных исследований показал, что при плотности мощности свыше  $0,5 I/I_{\max}$  уровень ОН выходит на асимптоту, далее практически не изменяется (рисунок 6). При увеличении числа проходов уровень ОН возрастает на 10-15% вне зависимости от формы пятна лазера, а глубина ОН – до 30 %.

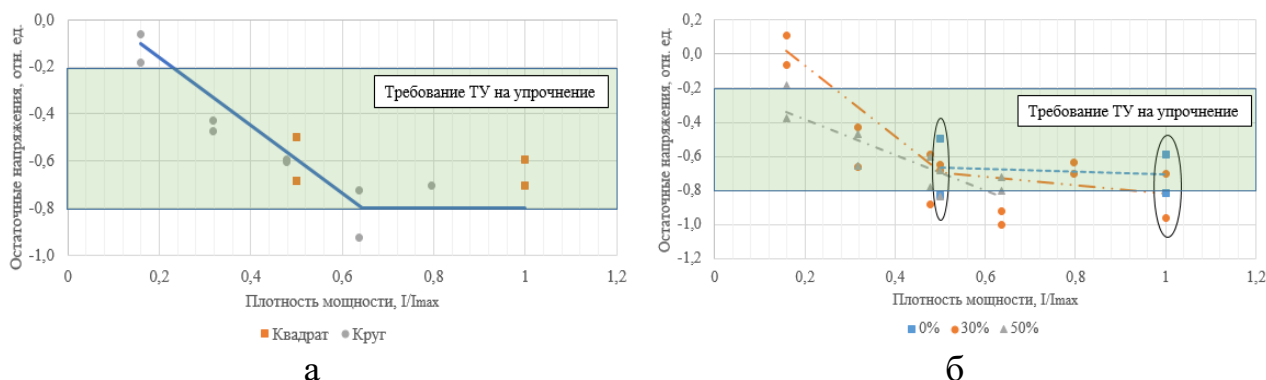


Рисунок 6 – Зависимость сжимающих ОН от плотности мощности ЛУО:  
 а) от разной формы пятна лазера; б) от процента перекрытия пятен

Также было установлено, что при интенсивной обработке поверхности образцов при повышенных значениях плотности мощности  $\sim 0,5 I/I_{\max}$ , а также при двойном и тройном ударе, был обнаружен эффект деградации поверхности в виде появления дефектов поверхностного слоя.

Была проведена оценка силы влияния основных факторов на глубину ОН, а также шероховатость по плану ПФЭ  $2^3$ .

Полнофакторный эксперимент имел следующие основные факторы: количество проходов, плотность мощности, процент перекрытия.

Получены эмпирические зависимости глубины ОН (формула 1) и шероховатости (формула 2) от параметров ЛУО. Установлено, что наибольшее влияние оказывает количество проходов, затем – плотность мощности, наименьшее – процент перекрытия лазерных пятен.

$$H = 1,15 \cdot I^{11,11-19,148 \cdot \ln K - 0,659 \cdot \ln K + 1,285 \cdot \ln K \cdot \ln \ln P} \cdot K^{-3,76 + 0,332 \cdot \ln P} \cdot P^{0,085} \quad (1)$$

где  $H$  – глубина остаточных напряжений, мм;

$I$  – плотность мощности, отн. ед.;

$K$  – количество проходов, шт.;

$P$  – процент перекрытия, %.

$$Ra = 1,5 \cdot I^{8,12-9,7 \cdot \ln K + 1,285 \cdot \ln P} \cdot K^{-1,6 + 0,2 \cdot \ln P} \cdot P^{0,032} \quad (2)$$

где  $Ra$  – шероховатость, мкм;

$I$  – плотность мощности, отн. ед.;

$K$  – количество проходов, шт.;

$P$  – процент перекрытия, %.

Проведена статистическая обработка экспериментальных данных плоских образцов и построены графики зависимостей величины и глубины ОН, шероховатости от плотности мощности ЛУО и процента перекрытия при одном и двух проходах (рисунок 7). Маркерами обозначено количество проходов: один (нижний) и два (верхний).

Размерность для величины ОН принята – отн. ед. Это отношение текущей величины ОН к максимальной величине сжимающих ОН из всех режимов ЛУО.

### Шероховатость

Резкое повышение шероховатости свыше  $Ra\ 1$  вызвано повреждением защитного слоя при 2-м проходе. При 1-м проходе режимы с высокой плотностью мощности не приводят к повреждениям защитного слоя, шероховатость при этом не превышает  $Ra\ 0,6$ .

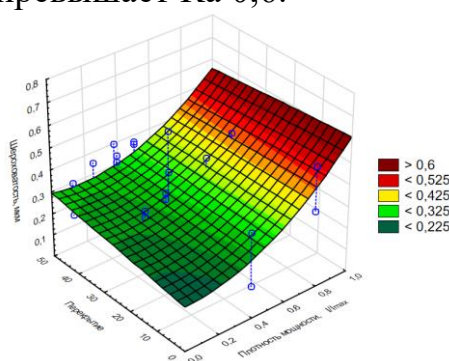


Рисунок 7 – Зависимость шероховатости от плотности мощности и процента перекрытий

Маркерами обозначены режимы с 1м (нижний) и 2мя (верхний) проходами

Анализ данных на рисунке 7 показывает, что в диапазоне плотностей мощности  $0,3...0,6\ I/I_{max}$  шероховатость выходит на асимптоту  $Ra\ 0,4$ .

### Рекомендуемый диапазон параметров ЛУО

Рекомендуемый диапазон параметров ЛУО представлен в таблице 2.

Таблица 2 – Рекомендуемый диапазон параметров ЛУО

№	Параметр	Значение
1	Плотность мощности, $I/I_{max}$	0,1...0,4
2	Количество проходов, шт.	1
3	Процент перекрытия пятен лазера, %	0...50

Его применение позволит обеспечить следующие параметры поверхностного слоя, представленные в таблице 3.

Таблица 3 – Параметры поверхностного слоя

№	Параметр	Значение
1	Шероховатость $Ra$ , мкм	$0,29\pm 0,01$
2	Величина ОН, отн. ед.	-0,4...-0,2
3	Глубина ОН, мм	0,2...0,8

Рекомендуемый диапазон параметров ЛУО обеспечивает 5 пунктов из требований ТУ и КД применительно к плоским образцам (см. таблицу 4).

Таблица 4 – Выполнение требуемых требований при использовании рекомендованного диапазона параметров ЛУО

№	Требования ТУ на упрочнение и КД		Результат
1	Шероховатость Ra, мкм	Ra 0,32	0,29±0,01
2	Величина ОН, отн. ед.	-0,8...-0,2	-0,4...-0,2
3	Глубина ОН, мм	> 0,2	> 0,2
4	Степень наклёпа, %	≤ 10	≤ 5
5	Растягивающие ОН на глубине до 0,2 мм не допускаются		Выполнено
6	Упрочнение не образует микротрещин на поверхности		Выполнено

По результаты экспериментальных исследований были сформированы следующие выводы:

1. Построены эмпирические зависимости глубины остаточных напряжений и шероховатости от варьируемых параметров лазерной ударной обработки (плотность мощности, количество проходов и процент перекрытия). Установлено, что наибольшее влияние на глубину остаточных напряжений и шероховатость оказывает количество проходов и плотность мощности.

2. При плотности мощности более 0,5 I/I<sub>max</sub> существует асимптота по величине и глубине сжимающих ОН. Увеличение количества проходов приведет к увеличению величину и глубины ОН на 10–15 % и 30 % соответственно.

3. Определен рекомендуемый диапазон параметров ЛУО, обеспечивающий выполнение 5 пунктов из требований ТУ и КД применительно к плоским образцам.

**В четверной главе** приводятся результаты математического моделирования процесса лазерного ударного упрочнения.

Математическое моделирование процесса лазерного ударного упрочнения, протекающего при высоких скоростях деформации 10<sup>8</sup>...10<sup>9</sup> с<sup>-1</sup> выполнялось с использованием модели Джонсона–Кука:

$$\sigma = [A + B\varepsilon^{p^n}] \cdot \left[ 1 + C \cdot \frac{\dot{\varepsilon}^p}{\dot{\varepsilon}_0} \right] \cdot \left[ 1 - \left( \frac{T - T_0}{T_m - T_0} \right)^m \right] \quad (3)$$

где  $\sigma$  – остаточное напряжение;

$\varepsilon^p$  – пластическая деформация;

$\dot{\varepsilon}^p$  – скорость пластической деформации;

$A$  – предел текучести при комнатной температуре;

$B$  – коэффициент упрочнения;

$n$  – показатель деформационного упрочнения;

$C$  – определяет скоростную чувствительность;

$\dot{\varepsilon}_0$  – эталонная (квазистатическая) скорость деформации;

$T_0$  – температура окружающей среды;

$T_m$  – температура плавления материала.

Параметры  $B$  и  $n$  отвечают за изотропное (статическое) упрочнение при деформациях. Определение этих параметров выполняется на основании данных о поведении материала при медленном (квазистатическом) нагружении.

Параметр  $C$  отвечает за кинематическое упрочнение (т.е. за учет интенсивности деформаций). Он оценивается по данным о влиянии скорости деформации на напряжения.

Параметры  $A, B, n, C, \epsilon_0$  определены экспериментально.

Процесс ЛУО не приводит к термическому воздействию на упрочняемый материал, поэтому температурный фактор в модели не учитывается.

### Моделирование процесса ЛУО плоского образца

Зона обработки разбивалась на 4 одинаковых квадрата со стороной 1-3 мм (рисунок 8), к которым, согласно рассматриваемой схеме обработки, поочередно прикладывалась импульсная нагрузка (рисунок 9). Пространственное распределение нагрузки предполагалось однородным. На тыльной грани пластины запрещались перемещения, а на боковых гранях исключалось влияние отражений (non-reflecting boundary). Дискретизация расчетной области выполнена 8-узловыми конечными элементами со стороной 0,1 мм. Толщина пластины 2 мм.

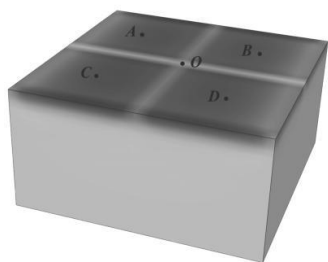


Рисунок 8 – КЭ-модель: А, В, С, D – центры пятен лазерного излучения; О – центр образца

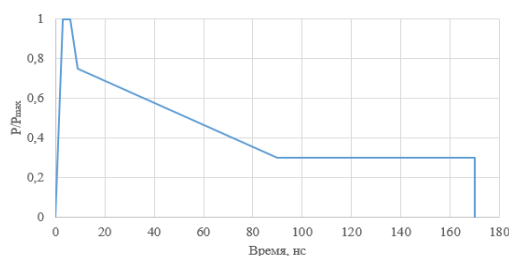


Рисунок 9 – Профиль давления при лазерном импульсе

Результаты распределения ОН по глубине при расчете и эксперименте приведены на рисунке 10.

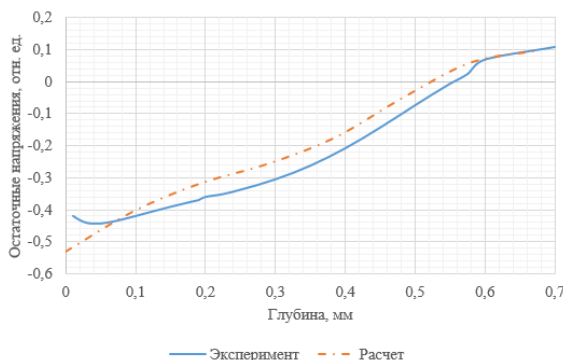


Рисунок 10 – Распределение ОН по глубине при расчете и эксперименте

Экспериментально подтверждена возможность математического моделирования процесса лазерного ударного упрочнения, протекающего при высоких скоростях деформации  $10^{-8} \dots 10^{-9} \text{ с}^{-1}$  с использованием модели

Джонсона–Кука. Расчеты по разработанной модели адекватны экспериментальным данным, погрешность не превышает  $\leq 10\%$ .

### Моделирование процесса ЛУО кромки пера лопатки компрессора

Геометрические размеры кромки и граничные условия указаны на рисунке 11. ЛУО выполнялась на верхней грани кромки не включая радиус кромки. Точка начала ЛУО указана линией 0. ЛУО проводилась при различных стратегиях обработки, энергии лазера и стороне лазерного пятна. В качестве формы лазерного пятна был выбран квадрат, т.к. распределение энергии в зоне воздействия близко к однородному. Профиль прикладываемого давления к пятну лазера указан на рисунке 9. Обработка выполнялась в один проход без перекрытия. Данная стратегия обработки обеспечивает наименьшее время обработки. Дискретизация расчетной области осуществлялась 8-узловыми конечными элементами. Размер стороны конечного элемента равнялся 0,1 мм.



Рисунок 11 – Модель кромки: 0 – начало обработки; отметки 15-30-40-50 – расстояние от начала обработки

Рассмотрим влияние параметров ЛУО на распределение уровня ОН по радиусу кромки, обрабатываемой и обратной стороне и нескольким сечениям.

### Распределение ОН в середине кромки лопатки

Параметры ЛУО при односторонней обработке обеспечивают сжимающие остаточные напряжения на глубину, превышающую середину кромки, однако этого недостаточно для сквозного наведения сжимающих ОН (рисунок 12).

Упрочнение необходимо проводить с обеих сторон лопатки.

Сжимающие остаточные напряжения глубиной до 0,4 мм обеспечиваются также на расстоянии до 1 мм от зоны воздействия ЛУО.

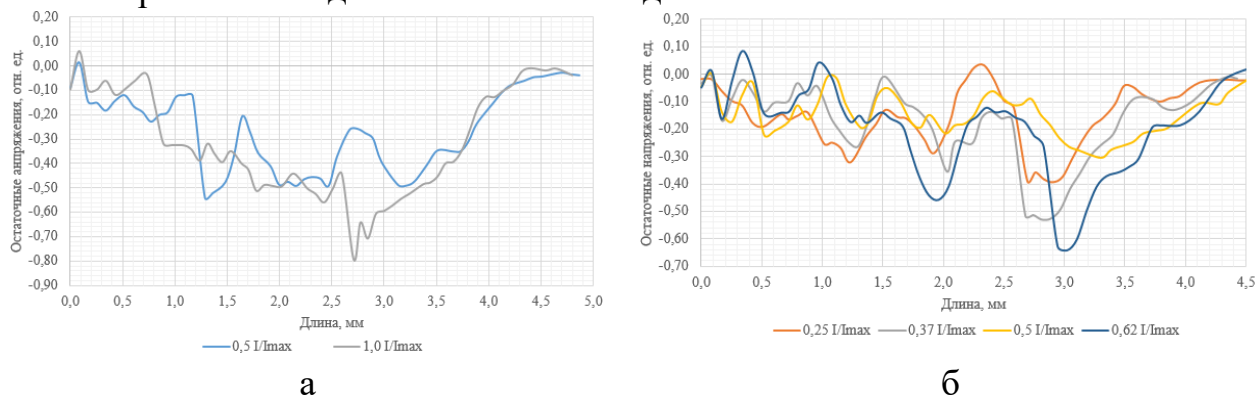


Рисунок 12 – Распределение ОН по длине в середине сечения кромки пера лопаток компрессора при стороне пятна: а) 1 мм; б) 2 мм

Сжимающие ОН в середине кромки наблюдаются от радиуса кромки до 1 мм по длине. В радиусе кромки сжимающие ОН достигают величины до -0,06 отн.



Основной объём работы выполняется на тонкостенных плоских образцах для определения скорости затухания ударной волны и определения параметров модели материала; и на более толстых образцах (в 1,5–2 раза) – для определения распределения остаточных напряжений по глубине в зависимости от параметров ЛУО во всём доступном диапазоне.

Статистическая обработка результатов позволяет получить зависимости величины и глубины остаточных напряжений, шероховатости от параметров ЛУО.

Затем определяется диапазон параметров, обеспечивающий заданный комплекс свойств в соответствии с требованиями по упрочнению и проводится анализ геометрических отклонений в 3D-модели лопатки при использовании данных параметров. Параметры модели материала (Джонсон-Кук) и распространение ударной волны от лазерного импульса подставляются из экспериментальных данных, полученных на первых двух стадиях алгоритма.

В случае, если расчетные геометрические отклонения лопатки не превышают установленных значений, проводится экспериментальное ЛУО установочной партии лопаток для определения оценки влияния обработки на предел выносливости, в т.ч. с концентраторами напряжений типа «забоина» различной глубины.

#### **Опытная отработка технологии лазерной ударной обработки лопаток ГТД на партии из 20 шт.**

После лазерной ударной обработки лопаток компрессора проводились их усталостные испытания. Результаты приведены на рисунке 15. В таблице 5 приведены параметры поверхностного слоя при применении рекомендуемого диапазона параметров ЛУО.

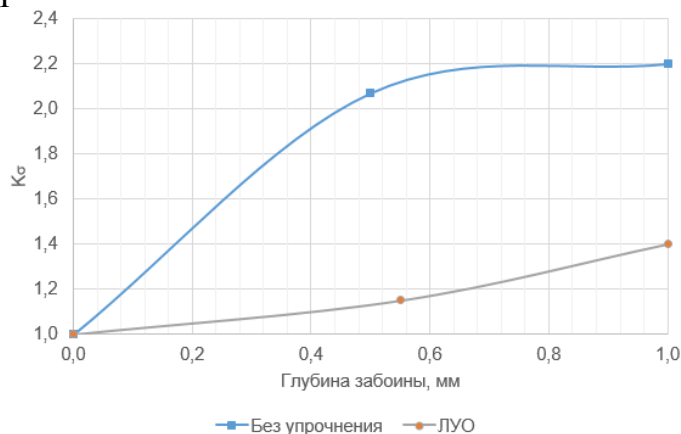


Рисунок 15 – Зависимость эффективного коэффициента концентрации напряжений  $K_{\sigma}$  от глубины концентратора для лопаток компрессора

По результатам проведения усталостных испытаний удалось добиться уменьшения значения эффективного коэффициента концентрации напряжений  $K_{\sigma}$  в 1,2-2,0 раза относительно лопаток без упрочнения.

Таблица 5 – Результаты применения рекомендуемого диапазона параметров ЛУО

№	Требования ТУ на упрочнение и КД	Результат
1	Шероховатость, мкм	Ra 0,32
2	Величина сжимающих ОН, отн. ед	-0,8...-0,2
3	Глубина сжимающих ОН, мм	> 0,2 мм
4	Растягивающие ОН на глубине до 0,2 мм не допускаются	Выполнено
5	Упрочнение не образует микротрещин на поверхности	Выполнено

В тексте диссертации представлены акты об использовании и внедрении результатов диссертационной работы.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные и практические результаты исследования:

1. Изучены физические закономерности механизма воздействия на поверхностный слой кромки лопаток компрессора различных (основных) параметров лазерной ударной обработки. Установлено, что количество проходов и плотность мощности в наибольшей степени влияют на величину шероховатости и глубину сжимающих остаточных напряжений.

2. Разработана методика научно-обоснованного выбора рациональных параметров лазерной ударной обработки, обеспечивающих повышение сопротивления усталости лопаток компрессора из титанового сплава на 26...37% по сравнению со стандартной технологией.

3. Построена математическая модель оценки уровня и глубины остаточных напряжений в поверхностном слое кромки лопаток компрессора при одновременном двустороннем упрочнении в результате технологии ударной лазерной обработки. Результат расчетов показал, что уровень напряжений составляет (-0,4...-0,2 отн. ед.) на глубине свыше 0,2 мм, что согласуется с результатами эксперимента.

4. Разработаны практические рекомендации по реализации технологического процесса изготовления лопаток компрессора из титанового сплава с применением технологии лазерной ударной обработки, методика проектирования и методика научно-обоснованного выбора параметров режимов упрочнения поверхностного слоя лопаток компрессора.

5. Опытная отработка усовершенствованной технологии изготовления лопаток компрессора с применением ударной лазерной обработки показала, что для лопаток компрессора обеспечены требуемые значения параметра шероховатости поверхности Ra, эффективный коэффициент концентрации напряжений ( $K_\sigma$ ) лопаток компрессора из ( $\alpha+\beta$ ) титанового сплава снижен в 1,4-2,0 раза.

6. Результаты исследования использованы при планировании работ на АО «ОДК-Авиадвигатель» и используются в учебном процессе ПНИПУ.

## СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

**Публикации в научных изданиях, включенных в перечень ВАК:**

1. Ширяев, А.А. Влияние LSPwC на параметры поверхностного слоя лопаток компрессора газотурбинного двигателя из титанового сплава / А.А.

Ширяев, И.Г. Габов, А.С. Миленин, Ю.В. Попова // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2024. – № 3 (768). – С. 32-41. (ВАК, К1).

2. Ширяев, А.А. Влияние малопластичного выглаживания на параметры поверхностного слоя образцов лопаток компрессора газотурбинного двигателя из титанового сплава / А.А. Ширяев, И.Г. Габов, А.С. Миленин, Ю.В. Попова // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2024. – № 4 (769). – С. 39–46. (ВАК, К1).

3. Ширяев, А.А. Влияние методов упрочнения на усталостную прочность лопаток компрессора с концентраторами напряжений / А.А. Ширяев, А.С. Миленин // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2024. – № 9 (774). – С. 72–81. (ВАК, К1).

4. Ширяев, А.А. Анализ зависимости уровня и глубины остаточных напряжений от параметров лазерного излучения при моделировании лазерной ударной обработки плоских образцов из титанового сплава / А.А. Ширяев, В.В. Карманов // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2025. – № 4 (781). – С. 32–40. (ВАК, К1).

5. Ширяев, А.А. Влияние параметров лазерной ударной обработки на распределение остаточных напряжений в кромке лопатки компрессора из титанового сплава / А.А. Ширяев, В.В. Карманов // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2025. – № 5 (782). – С. 57–69. (ВАК, К1).

6. Ширяев, А.А. Влияние плотности мощности излучения лазера, количества проходов и коэффициента перекрытия зон упрочнения на уровень остаточных напряжений, глубину залегания и шероховатость в образцах из титанового сплава / А.А. Ширяев, А.С. Миленин, В.В. Карманов, О.А. Плехов, А.Н. Вшивков, Е.А. Гачегова // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2025. – № 6 (783). – С. 39–48. (ВАК, К1).

7. Ширяев, А.А. Влияние параметров лазерной ударной обработки на деформацию кромки лопатки компрессора из титанового сплава / А.А. Ширяев // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2025. – № 7 (784). – С. 37–44. (ВАК, К1).

8. Ширяев, А.А. Влияние стратегии обработки на распределение остаточных напряжений сжатия в кромке пера лопатки из титанового сплава / А.А. Ширяев, А.С. Миленин // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2025. – № 8 (785). – С. 40–48. (ВАК, К1).

9. Ширяев, А.А. Влияние плотности мощности лазерной ударной обработки на глубину и уровень остаточных напряжений в образцах из титанового сплава / А.А. Ширяев, А.С. Миленин, В.В. Карманов, О.А. Плехов, А.Н. Вшивков, Е.А. Гачегова // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2025. – № 9 (786). – С. 31–40. (ВАК, К1).

**Публикации в научных изданиях, индексируемых в международной базе цитирования Scopus:**

10. Shiryaev A.A. et al. Influence of ultrasonic shot blasting parameters on the physicomechanical properties of the surface layer of samples from 08PS and 12KH18N10T steels. / A.A. Shiryaev, V.N. Trofimov, V.V. Karmanov, D.V.

Vindokurov // AIP Conference Proceedings. 28th Russian Conference on Mathematical Modelling in Natural Sciences, RuMoNaS 2019. 2020. С. 040018.

11. Shiryayev A.A. et al. Effect of parameters of ultrasonic shot peening on the physicomaterial properties of the surface layer of flat samples / Shiryayev A.A., Trofimov V.N., Karmanov V.V., Vindokurov D.V. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. International Science and Technology Conference for Youth "Advanced Materials for Engineering and Medicine". 2020. С. 012025.

**Публикации в других научных изданиях:**

12. Shiryayev A.A. et al. Effect of reinforcing rolling on the surface properties of products made of heat-resistant alloys / Shiryayev A., Vinokurov N., Trofimov V., Karmanov V., Shilyayev A. // Instrumentation engineering, electronics and telecommunications – 2018. С. 96–106.

13. Ширяев, А.А. Сравнение методов упрочнения на предел выносливости лопаток из титанового сплава / А.А. Ширяев, И.Г. Габов, А.С. Миленин, Д.Ф. Таиров // Вестник ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение. – 2023. – № 4. – С. 109–117. (ВАК, К2)

14. Ширяев, А.А. Влияние лазерного ударного упрочнения на параметры поверхностного слоя лопаток компрессора газотурбинного двигателя из титанового сплава / А.А. Ширяев, И.Г. Габов, А.С. Миленин // Вестник ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение. – 2024. – № 1. – С. 66–73. (ВАК, К2)

15. Ширяев, А.А. Влияние лазерного ударного упрочнения на параметры поверхностного слоя лопаток компрессора газотурбинного двигателя из титанового сплава / А.А. Ширяев, А.С. Миленин // Динамика и виброакустика. – 2025. – Т. 11. – № 4. – С. 34–44. (ВАК, К3)

Остальные 10 работ опубликованы в материалах конференций.