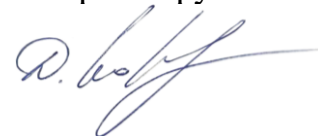


На правах рукописи



Королев Даниил Дмитриевич

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ЛАЗЕРНОЙ УДАРНОЙ ОБРАБОТКИ ДЛЯ  
ПОВЫШЕНИЯ УСТАЛОСТНОЙ ПРОЧНОСТИ КОМПРЕССОРНЫХ ЛОПАТОК  
ИЗ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Специальность: 2.5.15. - Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки  
летательных аппаратов

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва – 2024

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»

Научный руководитель: Ляховецкий Максим Александрович  
кандидат технических наук

Официальные оппоненты: Самойленко Василий Михайлович, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет гражданской авиации», заведующий кафедрой «Авиатопливообеспечения и ремонта летательных аппаратов»

Подрабинник Павел Анатольевич, кандидат технических наук, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН», доцент кафедры высокоэффективных технологий обработки

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждения науки Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук

Защита состоится «26» декабря 2024 года в 10 часов 00 мин. на заседании диссертационного совета 24.2.327.06 на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» по адресу: 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д.4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»:

[https://mai.ru/upload/iblock/7c3/fp2ka0nu6f5txqaz5gadwulqux1epbq1/Dissertatsiya\\_Korolev.pdf](https://mai.ru/upload/iblock/7c3/fp2ka0nu6f5txqaz5gadwulqux1epbq1/Dissertatsiya_Korolev.pdf)

Автореферат разослан: «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2024 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета 24.2.327.06  
д.т.н., доцент



Краев Вячеслав Михайлович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы диссертации.

Одним из технологических способов повышения усталостной прочности рабочих лопаток (РЛ) к попаданию посторонних предметов является использование методов поверхностного пластического деформирования (ППД). Методы ППД позволяют создать в поверхностном слое (ПС) детали сжимающие остаточные напряжения (ОН), которые благоприятно влияют на усталостную прочность элементов двигателей летательных аппаратов (ДЛА) и энергетических установок (ЭУ).

В современной промышленности можно выделить три основных метода ППД, применяемых для повышения предела выносливости:

1. Дробеструйная обработка (ДСО). В основе метода лежит взаимодействие ускоренных потоком воздуха частиц с упрочняемой поверхностью.

2. Ультразвуковая обработка микрошариками (УЗО). Обработка осуществляется за счет ультразвуковых колебаний, передаваемых через шарики от пьезоактуатора, к поверхности детали.

3. 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 дробеударных методов.

Первые работы, заложившие фундамент ЛУО, относятся к 70-м годам прошлого века. Началом промышленного применения ЛУО послужили авиационные инциденты в 90-х годах прошлого века на бомбардировщиках В-1В (США), связанные с отрывом вентиляторных лопаток из-за повреждений кромок в результате попадания посторонних предметов. Для повышения назначенного ресурса и снижения стоимости эксплуатации двигателей компания General Electric Aircraft Engines (GEAE) инициировала работы по отработке технологии ЛУО с компанией Laser Shock Peening Technologies.

Впоследствии ВВС США провело несколько программ, направленных на совершенствование методики. В начале 2000-х гг. была проведена программа «Manufacturing technology for affordable laser shock peening – Air Force ManTech Program F33615-98-C-5150», целью которой было снижение стоимости ЛУО в 2–4 раза и увеличение выхода годной продукции в 6–9 раз. Целью следующей программы «Rapid laser shock peening – Air Force ManTech Program F33615-98-C-5116» было повышение производительности процесса ЛУО.

В настоящее время, ЛУО применяется в ВВС США для обработки лопаток двигателей. Сообщается о применении ЛУО для двигателей F-101-102 (бомбардировщик В-1В), F-110-129, F110-100, F110-132 (истребитель F-16), F119 (истребитель F-22), F118-100 (бомбардировщик В-2), F414 (истребитель-бомбардировщик F/A-18E/F). Помимо ВВС, ЛУО применяется также в гражданской авиации, например, для двигателей CFM 56 (Boeing-737), Trent 500 (Airbus A340), Trent 800 (Boeing 777), Trent 1000 (Boeing 787).

Что касается применения ЛУО в России, то, несмотря на публикации различных экспериментальных работ, практическое применение технологии на отечественных предприятиях отсутствует.

Настоящая работа посвящена исследованию возможности применения

технологии ЛУО для повышения усталостных характеристик рабочих лопаток компрессора низкого давления ГТД, изготовленных из титановых сплавов.

Данная работа выполнялась в рамках: программа УМНИК от Фонда содействия инновациям (Договор №15206ГУ/2020 от 05.06.2020), ГЗ «Методы математического и физического моделирования процессов формирования, ускорения многофазных потоков и потоков заряженных частиц, их взаимодействия с поверхностями с целью исследования и создания перспективных двигателей летательных аппаратов нового поколения» №FSFF-2020-0014, НИОКР «Разработка технологии лазерного ударного упрочнения кромок пера лопаток компрессора» (Договор МАИ с АО «ОДК-Авиадвигатель» № 00000000020956190543/540-28-7219 от 08.04.2021), НИР «Исследование процесса взаимодействия ударной волны, инициированной воздействием лазерного излучения, на поверхность упрочняемого материала» (Договор между МАИ и «ОКБ им. А. Люльки» филиал ПАО «ОДК-УМПО» №182-01449 от 30.11.2022), НИР «Разработка абляционных покрытий и технических требований на системы опытно-промышленной установки для лазерного ударного упрочнения» (договор между МАИ и АО «ОДК» № ОДК/2047/09/2023/643 от 15.09.2023 г.)

**Степень разработанности темы.** Механизму усталостного разрушения металлов посвящены работы С.В. Серенсена, В.М. Горицкого, В.С. Ивановой и др. Важнейший вклад в технологию повышения ресурса и надежности элементов авиационных двигателей внесли: А.М. Сулима, В.А. Богуслаев, В.К. Яценко, А.А. Маталин и др.

В разработку и развитие дробеударных методов применительно к авиационным двигателям большой вклад внесли И.В. Кудрявцев, Л.Г. Одинцов, А.П. Бабичев, Э.В. Рыжов, В.В. Петросов, В.М. Смелянский и др.

Фундаментом применения ЛУО для металлических материалов послужили работы, проведенные в 60-х и 70-х гг. Г.А. Аскарьяном и Е.М. Морозом, F. Neuman, D.W. Gregg и S.J. Thomas, В.Б. Брагинским, Ю.В. Афанасьевой, С.Н. Skeen, N.C. Anderholm, Л.И. Миркиным, которые были направлены на исследования взаимодействия лазерного излучения с поверхностью материалов при использовании коротких «гигантских» лазерных импульсов.

Практический эффект на авиационных материалах и деталях был получен в работах, проведенных в конце 80-х и 90-х гг. В.Р. Fairand, А.Н. Clauer, и J.L. Dulaney, что позволило внедрить технологию в начале 2000-х гг. в авиационную отрасль. Серийное применение технологии за рубежом началось с 2010-х гг. и в настоящее время большое число исследователей, в том числе отечественных, занимается разработкой математической модели технологического процесса ЛУО и исследованием влияния режимов и способов обработки на различных металлах и сплавах для широкого внедрения технологии на производство.

Несмотря на большое число исследований, многократно увеличившихся за последнее десятилетие, технология ЛУО до сих пор не нашла свое применение на отечественных предприятиях, что связано с недостаточностью исследования влияния режимов обработки на отечественные металлы и сплавы, отсутствием отечественного оборудования для ЛУО, а также отсутствием разработанных опытных и серийных технологий для отечественных ГТД.

**Цель исследования:** повышение усталостной прочности рабочей лопатки компрессора низкого давления ГТД из титанового сплава с использованием лазерной ударной обработки.

**Задачи исследования:**

1. Провести анализ технологии ЛУО и разработать методику выбора режимов лазерной ударной обработки авиационных материалов, применяемых для изготовления лопаток.

2. Провести экспериментальные исследования для определения влияния режимов лазерного излучения на геометрические, физико-механические, химические характеристики поверхностного слоя и эксплуатационные характеристики образцов, изготовленных из титанового сплава ВТ6.

3. Разработать рекомендации по технологии обработки рабочих лопаток компрессора ГТД из титановых сплавов на основе выявленных зависимостей.

4. Провести апробацию разработанных режимов ЛУО и сравнительные усталостные испытания рабочих лопаток компрессора ГТД, обработанных по штатной технологии и с использованием лазерной ударной обработки.

**Объект исследования:** технологический процесс лазерной ударной обработки рабочей лопатки компрессора низкого давления ГТД из титанового сплава.

**Предмет исследования:** характеристики поверхностного слоя титанового сплава ВТ6, применяемого для изготовления компрессорных лопаток ГТД.

**Новизна результатов исследований:**

1. Установлен эффективный диапазон значений плотности мощности (интенсивности) лазерной ударной обработки титанового сплава ВТ6 при длительности импульса 60 нс равный 2-7 ГВт/см<sup>2</sup>, в котором наблюдается линейный рост пластической деформации и значений микротвердости обрабатываемой поверхности.

2. Установлено, что при лазерной ударной обработке с поглощающим (абляционным) покрытием шероховатость (Ra) поверхности титанового сплава ВТ6 не изменяется, волнистость (Wa) повышается в 3,5 раза, а величина измененного приповерхностного слоя составляет не более 2,2 мкм при увеличении интенсивности с 2 до 7 ГВт/см<sup>2</sup>.

3. Установлено, что при лазерной ударной обработке без покрытия (ЛУОБП) шероховатость поверхности увеличивается до Ra = 4,961 мкм, волнистость (Wa) повышается в 15 раз, а величина измененного приповерхностного слоя составляет до 5 мкм при увеличении интенсивности с 2 до 7 ГВт/см<sup>2</sup>.

4. Установлено, что максимальная степень наклепа при ЛУО с покрытием для величины плотности мощности 6,5 ГВт/см<sup>2</sup> достигает 19%, а для ЛУО без покрытия, под термическим слоем, достигает 11%.

5. Установлено, что ЛУО с покрытием наводит в титановом сплаве ВТ6 устойчивые сжимающие остаточные напряжения (от 300 до 800 МПа в зависимости от режимов) на глубину порядка 1 мм. При ЛУО без покрытия значения ОН с глубины более 300 мкм сравнимы со значениями ОН после ЛУО с покрытием, однако, в диапазоне от 0 до 300 мкм ОН существенно ниже из-за плавления поверхности в результате воздействия лазерного излучения.

6. Установлено, что глубина проникновения ОН при обработке титанового сплава ВТ6 может варьироваться в широких пределах от 300 мкм до 1000 мкм при изменении плотности мощности лазерного излучения с 2 до 7 ГВт/см<sup>2</sup>.

7. Установлено, что ЛУО позволяет получить прирост усталостной долговечности титанового сплава ВТ6 на 136% относительно образцов после дробеметной обработки и на 268% относительно исходных неупрочненных образцов. На основе фрактографического анализа показано, что прирост усталостной долговечности связан с увеличением расстояния от очага усталостной трещины до поверхности образца.

#### **Теоретическая и практическая значимость результатов исследования.**

1. Разработана комплексная методика подбора режимов лазерной ударной обработки для различных авиационных материалов.

2. Разработаны технологические рекомендации по обработке лопаток компрессора ГТД лазерной ударной обработкой.

3. Разработана опытная технология лазерной ударной обработки кромок пера рабочей лопатки компрессора из титанового сплава ВТ6, которая позволила повысить усталостную прочность лопаток на 16%.

#### **Методология и методы исследования.**

Экспериментальные результаты работы получены при использовании современных методов регистрации параметров лазерного излучения и анализа параметров поверхностного слоя материалов, а также с использованием стандартных методик испытаний.

#### **Достоверность результатов исследований:**

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

#### **Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Методика выбора режимов лазерной ударной обработки авиационных материалов.

2. Методика и экспериментальные данные по выбору материала поглощающего (абляционного) покрытия для технологического процесса лазерной ударной обработки.

3. Результаты экспериментов и зависимости влияния режимов лазерной ударной обработки титанового сплава ВТ6 на шероховатость, волнистость, степень наклепа, уровень и глубину залегания остаточных напряжений, и усталостные характеристики.

4. Результаты сравнительных усталостных испытаний рабочих лопаток компрессора ГТД из титанового сплава ВТ6, изготовленных по штатной технологии и с использованием метода лазерной ударной обработки.

#### **Вклад автора в проведение исследований.**

Разработка методики выбора режимов лазерной ударной обработки и методики выбора материала поглощающего (абляционного) покрытия для технологического процесса лазерной ударной обработки применительно к титановому сплаву, разработка опытного технологического процесса обработки рабочей лопатки ГТД из титанового сплава ВТ6, личное участие в постановке и проведении всех экспериментальных исследований обрабатываемости титанового

сплава ВТ6 методом лазерной ударной обработкой и обработке, полученных экспериментальных данных.

### **Апробация работы.**

Основные положения и результаты диссертационной работы доложены и обсуждены на следующих международных и всероссийских научно-технических конференциях: «Новые материала XXI века: разработка, диагностика, использование» – г. Москва – 2020, «Международная конференция «Авиация и космонавтика» – г. Москва – 2020-2023, «Быстрозакаленные материалы и покрытия» – г. Москва – 2021, «Международная молодежная научная конференция «Гагаринские чтения» – г. Москва – 2021 и 2023.

### **Публикации.**

По теме диссертации опубликовано 13 работ, из них в рецензируемых научных изданиях рекомендованных ВАК и изданиях, приравненных к ним, опубликовано 2 работы, 1 патент на изобретение и 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ:

1. Влияние режимов лазерного ударного упрочнения на физико-механические свойства поверхностного слоя алюминиевого сплава Д16 / Д. Д. Королев, Г. Д. Кожевников, Д. А. Токачев [и др.] // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. – 2023. – № 4. – С. 159-166.

2. Конечно-элементное моделирование деформаций поверхности лопаток компрессора ГТД из титанового сплава ВТ6, образующихся при лазерной ударной обработке с расширением низкотемпературной плазмы в ограниченном канале / Г. Д. Кожевников, Д. Д. Королев, М. А. Ляховецкий [и др.] // Тепловые процессы в технике. – 2024. Т. 16. №7. – С. 295-302.

3. Патент № 2793015 С1 Российская Федерация, МПК В23К 26/60, С23С 26/00, С23С 28/00. Способ нанесения абляционного покрытия для снижения термических дефектов при обработке деталей методом лазерного ударного упрочнения : № 2022114867 : заявл. 01.06.2022 : опубл. 28.03.2023 / Д. Д. Королев, М. А. Ляховецкий, Л. Н. Лесневский, Г. Д. Кожевников ; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Московский авиационный институт.

4. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022666065 Российская Федерация. Программное обеспечение для расчета параметров ионизированного газа при воздействии когерентного излучения : № 2022665170 : заявл. 11.08.2022 : опубл. 24.08.2022 / Г. Д. Кожевников, Д. Д. Королев, М. А. Ляховецкий ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский авиационный институт».

**Структура и объём работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованных источников из 122 наименований и 3 приложений. Общий объём диссертации составляет 132 страницы и включает 80 рисунков и 10 таблиц.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** дается общая характеристика работы, обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель работы и задачи для её

достижения, научая новизна, теоретическая и практическая значимость работы. Представлены положения, выносимые на защиту, а также апробация результатов и публикации по теме диссертационной работы.

**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 надежности при эксплуатации ДЛА. Для повышения стойкости к усталостному разрушению деталей отечественных ГТД применяют ДСО и УЗО, но наиболее перспективным является метод лазерной ударной обработки, который обеспечивает большие глубины залегания остаточных напряжений, а также возможность обработки тонкостенных элементов, таких как кромки пера лопаток.

Исследователями показано, что технология ЛУО для титановых сплавов позволяет значительно повысить их предел выносливости, но режимы обработки различных титановых сплавов могут варьироваться. Кроме того, при разработке технологического процесса (ТП) детали, возникают ряд задач, связанных с особенностями напряженно-деформированного состояния конкретного вида лопатки, ТП её получения и режимов эксплуатации.

**Во второй главе** рассмотрены основные закономерности и физическая картина процесса лазерной ударной обработки.

Для проведения процесса ЛУО используется схема, представленная на рисунке 1: поверхность обрабатываемого материала покрывается абляционным покрытием, а затем ограничивающим слоем. В качестве абляционного покрытия для предотвращения повреждения поверхностного слоя материала детали обычно используется черная краска, ПВХ лента или алюминиевая фольга. В качестве ограничивающего слоя чаще всего применяется вода.

Показано, что для осуществления процесса упрочнения, необходимо, чтобы давление, создаваемое плазмой, было выше динамического предела упругости Гюгонио, в противном случае ударная волна будет создавать упругие деформации, которые исчезнут после затухания волны.

Давление плазмы прямо пропорционально интенсивности ( $P \sim \sqrt{I}$ ) лазерного излучения, соответственно, чем выше мощность, приходящая на единицу площади, тем выше давление, создаваемое плазмой. Величину интенсивности можно регулировать различными способами как, например, увеличением энергии, уменьшением диаметра обрабатываемого пятна или длительностью импульса лазерного излучения.

Важным параметром при обработке является площадь лазерного излучения, падающего на поверхность. В совокупности с возможностью варьирования энергии и времени импульса этот параметр определяет интенсивность или плотность мощности лазерного излучения ( $\text{ГВт}/\text{см}^2$ ).



Рисунок 1 – Схема лазерной ударной обработки



В заключении главы говорится о том, что в практике наибольшее применение нашли два способа упрочнения: ЛУО (лазерная ударная обработка с абляционным покрытием), ЛУОБП (лазерная ударная обработка без абляционного покрытия).

В третьей главе представлены материал и геометрические параметры образцов, использованных в исследованиях, описаны методики исследований и оборудование.

Для исследования стойкости абляционных покрытий использовались круглые образцы диаметром 20мм и толщиной 4мм. Для исследования влияния лазерного излучения на свойства ПС использовались прямоугольные образцы со следующими размерами 80x20x4мм. Для проведения усталостных испытаний были изготовлены корсетные образцы. Все образцы были изготовлены из титанового сплава ВТ6, после чего, для снятия ОН производился отжиг по следующему режиму: вакуумный отжиг при  $t=630^{\circ}\text{C}$  с выдержкой 1,5 часа, далее охлаждение в печи до  $t=200^{\circ}\text{C}$  с последующим охлаждением на воздухе.

Вся обработка образцов производилась на экспериментальной установке LS85 производства компании ООО «Прогрессивные производственные технологии» (рисунок 2).

Установка может обрабатывать детали массой до 5 кг, энергия излучения до 10 Дж, длительность импульса  $60\pm 2$  нс, форма пятна – Гаусс, рабочее расстояние до поверхности детали может варьироваться от 300 до 500 мм.

Толщина абляционных покрытий, нанесенных на поверхность обрабатываемых образцов, деформации металла, шероховатость и волнистость, полученные после обработки методом лазерной ударной обработки, измерялись на оптическом конфокальном микроскопе Olympus LEXT OLS 5000.

Методика определения деформации пятна заключалась в построении 3D карты профиля поверхности при двадцатикратном увеличении. Из полученной карты выбиралась область размером 200 мкм с наибольшим отклонением по высоте от номинальной (необработанной) поверхности. После чего измерялось высота от точки на необработанной области до средней линии профиля деформации по области с наибольшим отклонением по высоте.

Твердость поверхностного слоя измерялась на микротвердомере ПМТ-3М согласно ГОСТ 9450-76 при нагрузке 2Н.

Остаточные напряжения измерялись на рентгеновском дифрактометре StressX в ГНЦ ФАУ «Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова» и методом ак. Давиденкова на автоматизированном комплексе для измерения поверхностных остаточных напряжений в металлах и сплавах МерКулОН "Тензор-3" в филиале АО «ОДК» «НИИД».

Фрактографические исследования, морфология поверхности и химический состав дефектов, обнаруженных на поверхности металла после лазерной ударной

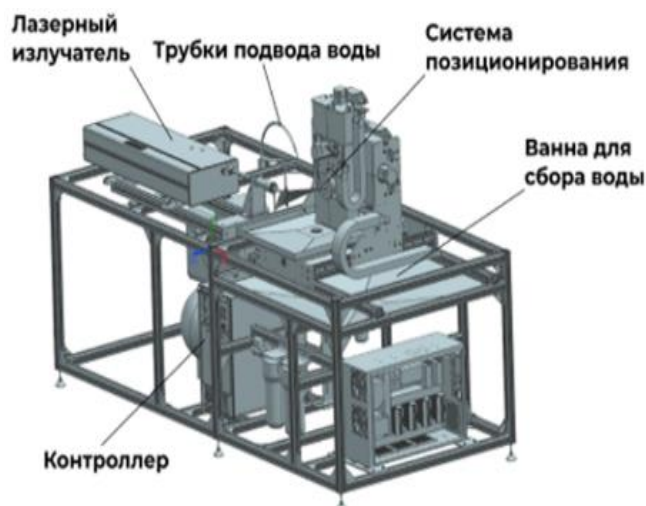


Рисунок 2 – 3D модель установки лазерной ударной обработки

обработки, производился на сканирующем электронном микроскопе EVO-40 Carl Zeiss с приставкой для энергодисперсионного анализа INCA (Oxford instr.).

Шлифовка и полировка образцов осуществлялась на автоматизированном шлифовально-полировальном станке LaboPol-4 с дозатором LaboDoser фирмы Struers.

Испытания корсетных образцов на усталость производились на разработанном МАИ и ЦКБ АЛМАЗ усталостном стенде ЭД100-М.

**В четвертой главе** приведены результаты исследований ПС после ЛУО титанового сплава ВТ6.

*Исследование и выбор материала поглощающего (абляционного) покрытия при обработке титанового сплава ВТ6.*

Для исследования возможности применения различных типов поглощающих покрытий были выбраны следующие материалы: ПВХ лента, алюминиевая лента, цинкосодержащий грунт (ЦГ), полиэфирный грунт (ПГ), порошковая краска (ПКр).

Для оценки применимости поглощающих покрытий для ЛУО была разработана методика испытаний на их стойкость к лазерному излучению:

1. На образец из сплава ВТ6 наносилось покрытие согласно техническим условиям на покрытие.

2. Для определения его лучевой стойкости проводилась обработка образца при выбранном значении плотности мощности в диапазоне от 1 до 9 ГВт/см<sup>2</sup> (таблица 1). При фиксированном значении плотности мощности производилось облучение образца в одной точке несколькими импульсами до разрушения поглощающего покрытия.

3. Фиксировалось число импульсов при которых покрытие не разрушалось.

4. Строился график (рисунок 3) зависимости количества выстрелов до разрушения покрытия от интенсивности лазерного излучения.

Таблица 1 – Режимы обработки

Интенсивность излучения, ГВт/см <sup>2</sup>	Энергия излучения, Дж	Диаметр лазерного излучения, мм	Время импульса, нс
1	1,9	1,4	60
3	2,8	1,4	60
5	4,6	1,4	60
7	6,5	1,4	60
9	8,3	1,4	60

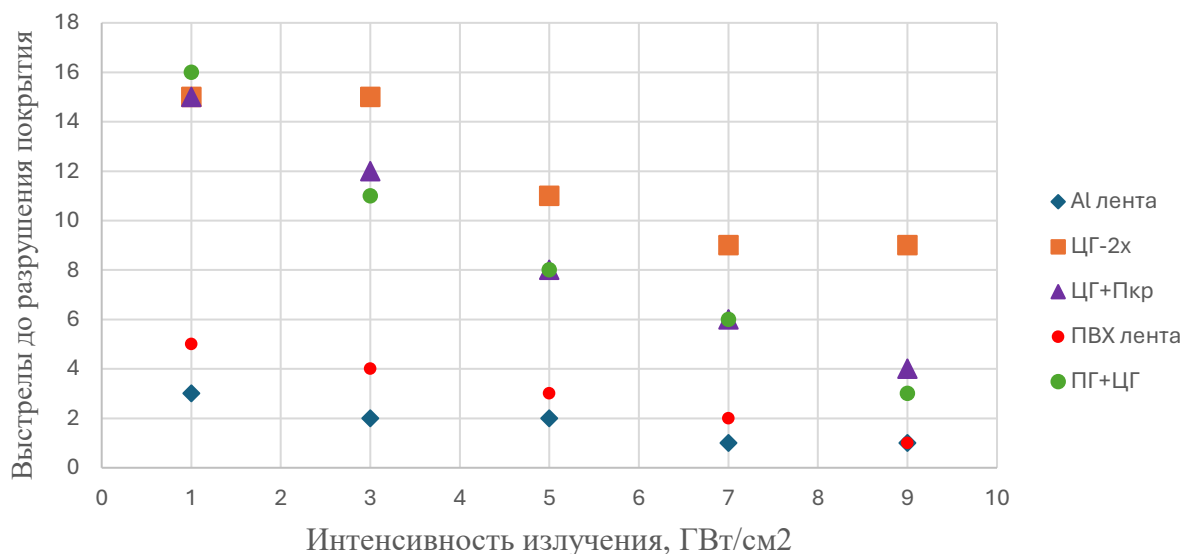


Рисунок 3 – Зависимость количества выстрелов до разрушения абляционного покрытия от интенсивности лазерного излучения

Анализ результатов проведенных исследований показал, что стойкость покрытий, нанесенных с помощью лент, уступает стойкости покрытий на основе красок в 3-5 раз во всем диапазоне интенсивности излучения.

Наилучшую стойкость показало покрытие ЦГ 2х, которое выдержало 9 импульсов с максимальной плотностью мощности лазерного излучения 9 ГВт/см<sup>2</sup>. Наилучшие результаты по лентам были получены для ПВХ-ленты.

Следующим этапом подбора абляционного покрытия стал анализ поверхности при обработке площадки 5x5 мм, имитирующей процесс обработки поверхности детали.

После использования покрытия ЦГ 2х были обнаружены точечные дефекты (рисунке 4а и 4б). За пределом зоны обработки таких дефектов не наблюдалось, что позволяет идентифицировать причину их появления в процессе ЛУО, как использование покрытия ЦГ 2х.

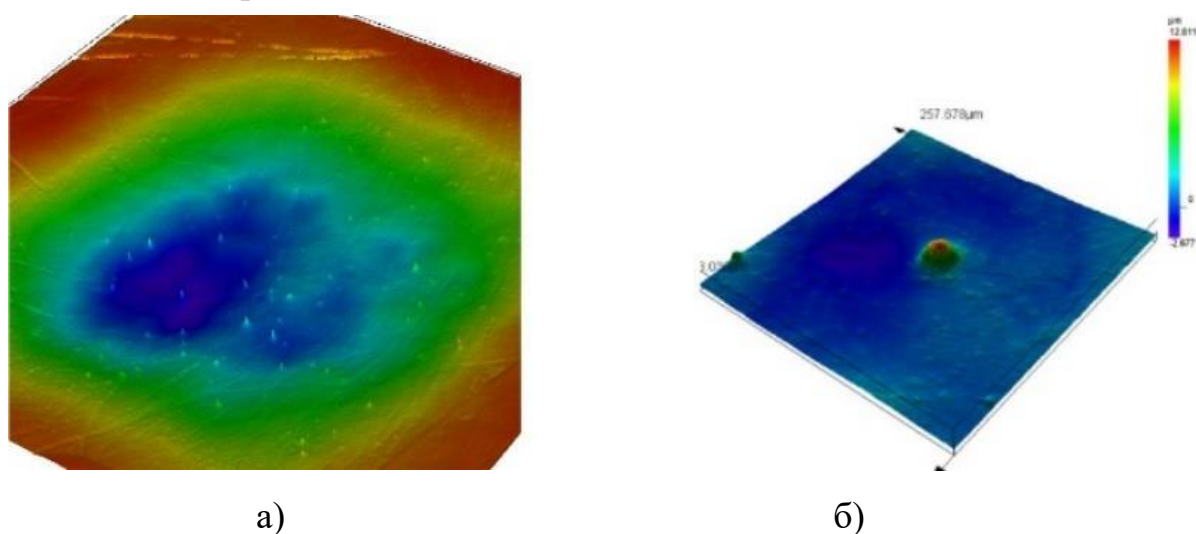


Рисунок 4 – Поверхность образца после ЛУО с применением ЦГ 2х  
а) Весь участок обработки, б) Дефект при увеличении 100х

Анализ дефектов (рисунок 5) показал наличие большого количества кислорода и углерода, а также натрия, серы, калия и кальция. Таким образом причиной появления таких дефектов является остаточная пористость прилегающего к металлу слоя покрытия, которая ведет к адиабатическому сжатию воздуха и значительному нагреву, который вызывает плавление металла и материала покрытия.

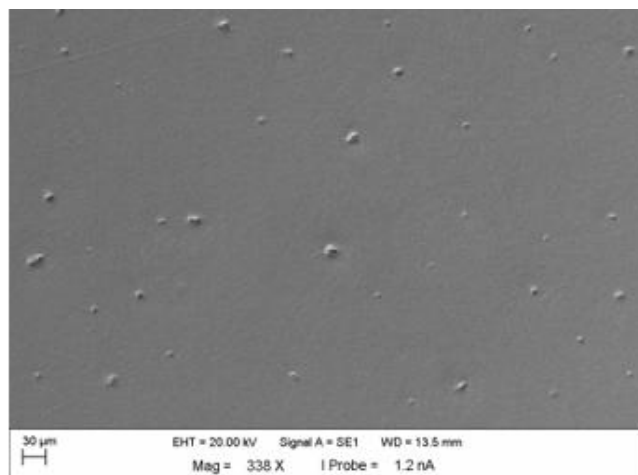


Рисунок 5 – Дефекты на поверхности образца с ЦГ 2х при увеличении 338х

*Исследование влияния интенсивности лазерного излучения на механику локальной деформации титанового сплава ВТ6.*

Далее рассматриваются результаты исследования влияния значений энергии и диаметра лазерного пучка на геометрические параметры отпечатков (рисунок 6,7) при одиночном импульсе. Обработка проводилась при фиксированном времени излучения равном 60 нс и диаметрах лазерного пучка 1 мм и 1,4 мм.

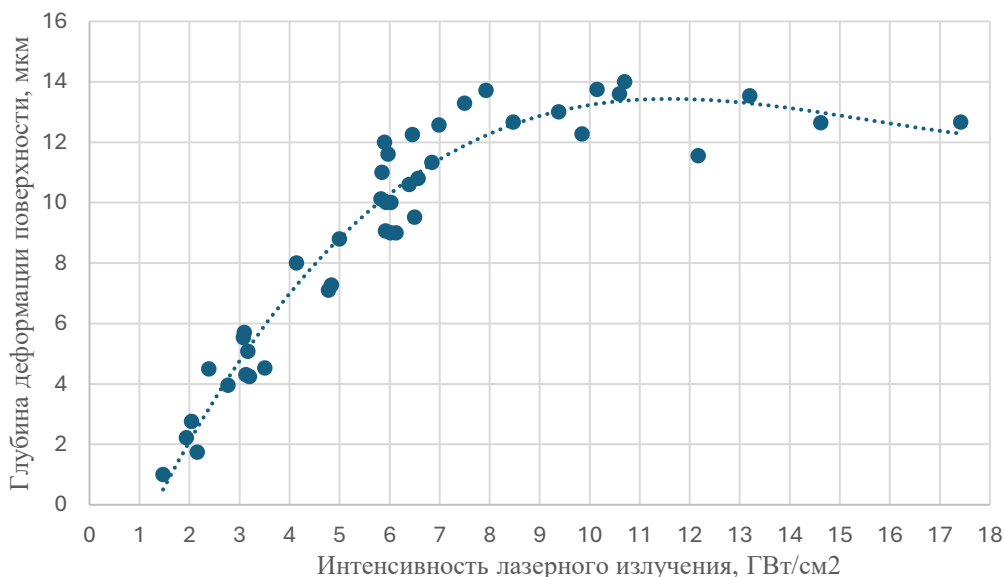


Рисунок 6 – Зависимость глубины деформации отпечатка от интенсивности лазерного излучения

Из рисунка 6 видно, что максимальная глубина деформации увеличивается практически линейно до 12–14 мкм при увеличении плотности мощности лазерного излучения, но при достижении значения в 7-8 ГВт/см<sup>2</sup> дальнейшее увеличение глубины прекращается. Этот эффект хорошо известен и связан с воздушным пробоем, возникающим вследствие достижения максимальной проводимости лазерного излучения в воздухе и началом его ионизации. Таким образом, плазма образуется над поверхностью детали перед водяным слоем, что приводит к частичному отражению лазерного излучения и значительным снижением эффективности.

Достижение максимальной глубины деформации на уровне ~7-8 ГВт/см<sup>2</sup>, по-видимому, связано с неидеальными условиями: наличием увлажненного воздуха и водяной взвеси перед поверхностью детали в связи с использованием воды в качестве

отражающего слоя, а также достижением максимально возможной пластической деформации титанового сплава ВТ6.

Примечательный результат был получен при оценке размеров отпечатков при различных диаметрах лазерного пучка – 1 мм и 1,4 мм, приходящего на поверхность детали (рисунок 7).

Как видно из рисунка, диаметр отпечатков при фиксированном значении диаметра лазерного излучения постоянно возрастает с увеличением значений интенсивности лазерного излучения, такое явление можно объяснить радиальным распространением плазмы по поверхности образца.

*Исследование влияния интенсивности лазерного излучения на степень наклепа титанового сплава ВТ6.*

Из рисунка 8 видно, что характер изменения максимального значения микротвердости в центре обработанного пятна при увеличении интенсивности излучения практически аналогичен характеру изменения максимальной глубины деформации (рисунок 6): происходит линейный рост значений микротвердости, но после достижения интенсивности излучения  $\sim 7-8$  ГВт/см<sup>2</sup> дальнейший рост практически прекращается.

Характер изменения значений микротвердости вдоль деформированной зоны при плотности мощности лазерного излучения в 6 ГВт/см<sup>2</sup> приведен на рисунке 9.

Из приведенного графика хорошо видно, что зона распространения повышенных значений микротвердости (до уровня необработанного сплава –  $HV_{200} = 320$  МПа) не превышает диаметр деформированной зоны, что справедливо для всех значений интенсивности лазерного излучения.

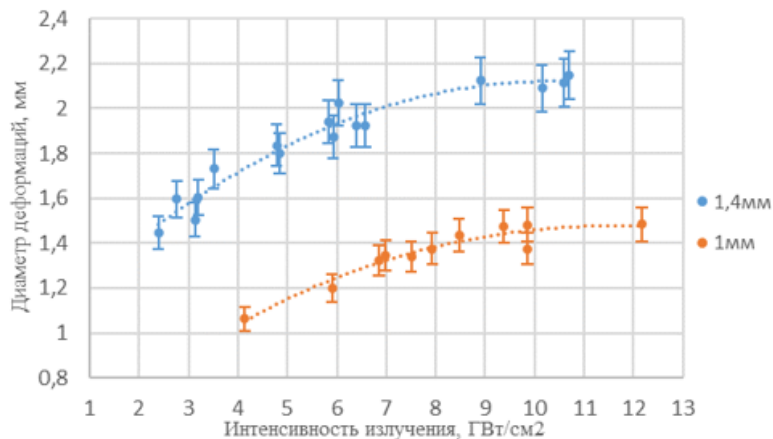


Рисунок 7 – Зависимость диаметра деформаций на поверхности от интенсивности излучения при различных диаметрах лазерного пучка

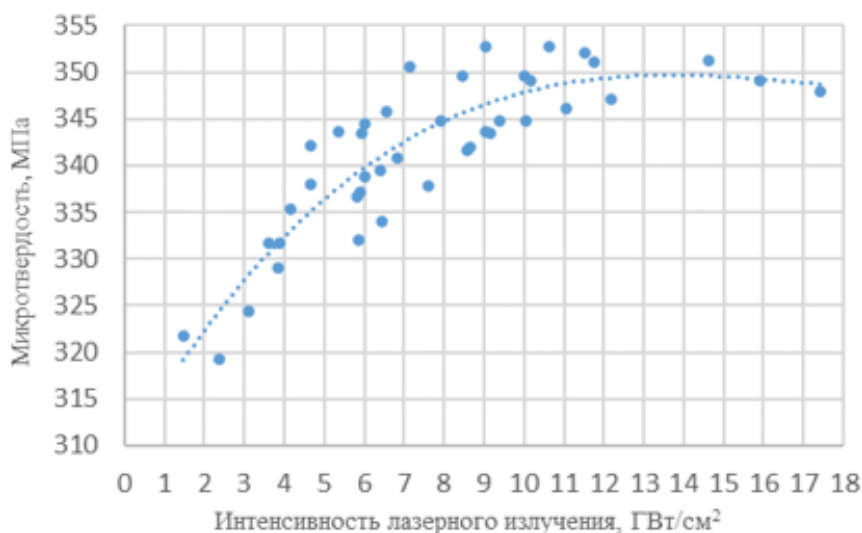


Рисунок 8 – Зависимость микротвердости в центре зоны деформации от интенсивности лазерного излучения

В связи с совпадением картины влияния увеличения интенсивности излучения на максимальную глубину деформации и микротвердость, можно утверждать, что обработка титанового сплава ВТ6 свыше 7 ГВт/см<sup>2</sup> не является оптимальной и целесообразной с точки зрения эффективности процесса.

*Исследование свойств поверхностного слоя после обработки участка на образцах из сплава ВТ6.*

Из приведенных данных (рисунок 10) можно отметить, ЛУОбП приводит к образованию модифицированного слоя, который помимо высокой шероховатости, обладает и значительно большей волнистостью – в 10-20 раз выше по сравнению с необработанной поверхностью.

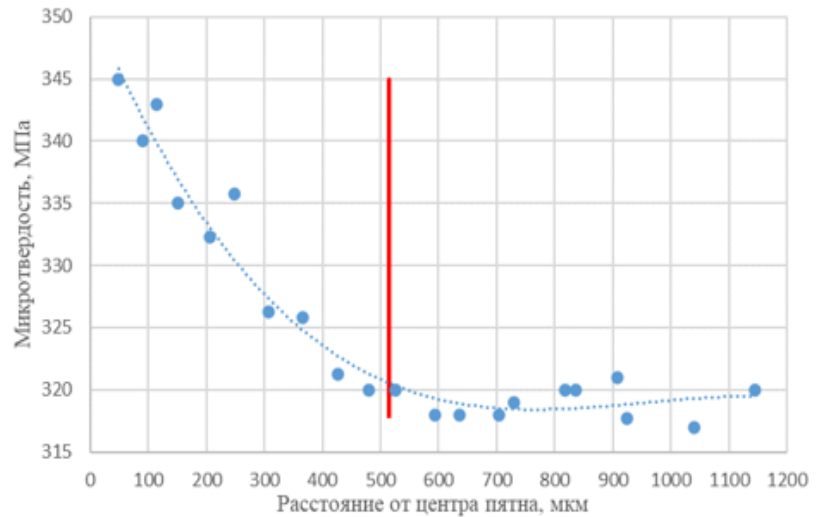


Рисунок 9 – Профиль распределения микротвердости по деформированному пятну при 6 ГВт/см<sup>2</sup>

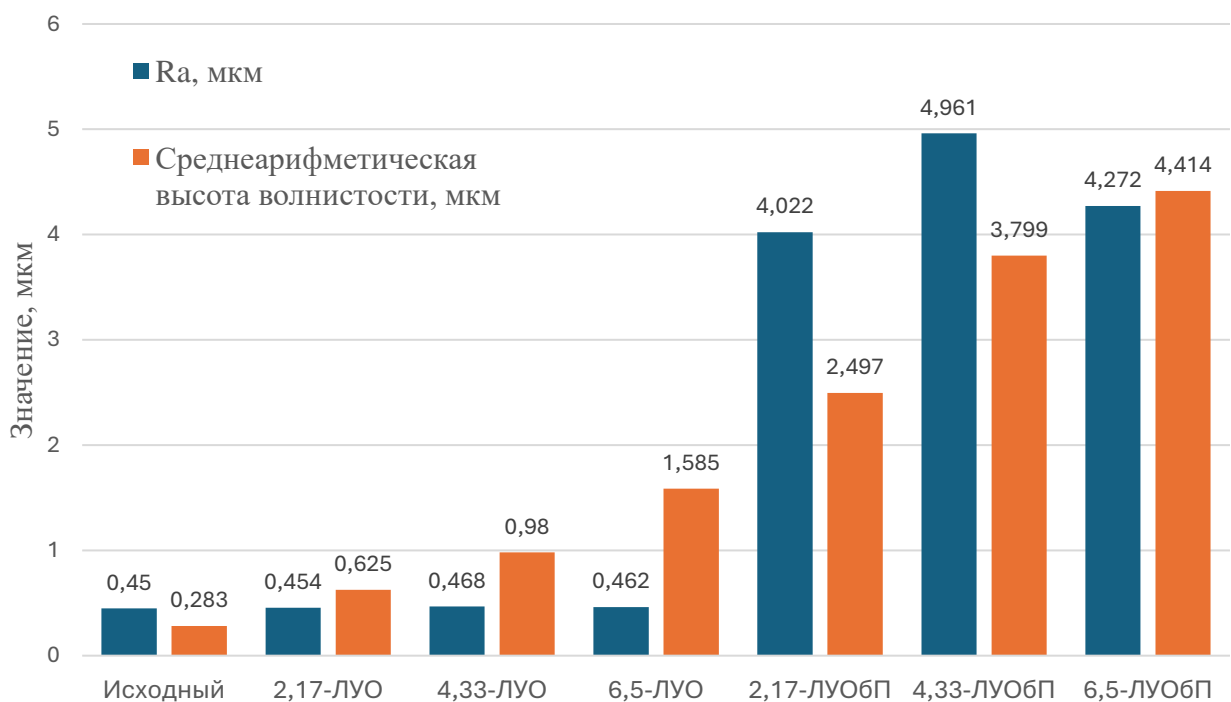


Рисунок 10 – Сводные данные по шероховатости и волнистости обработанных поверхностей

ЛУО, напротив, не приводит к изменению шероховатости поверхности, а максимальное увеличение волнистости поверхности в 5,6 раз характерно для режима - 6,5 ГВт/см<sup>2</sup>. Глубина деформации поверхности относительно номинальной увеличивается с повышением интенсивности лазерного излучения, а также отказ от абляционного покрытия значительно усиливает эту тенденцию (рисунок 11).

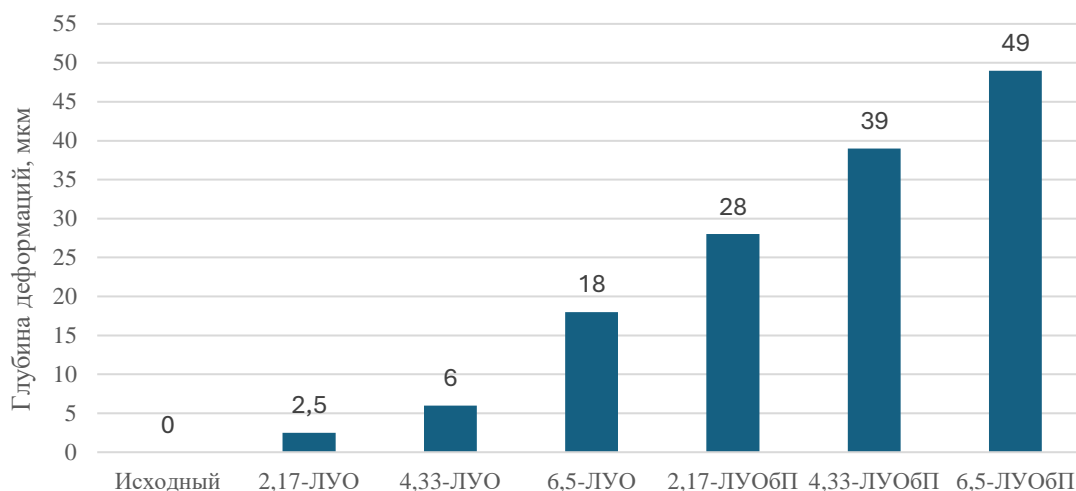


Рисунок 11 – Деформация зоны обработки относительно номинальной поверхности

Металлографические исследования поверхности показали, что даже с применением абляционного покрытия при плотности мощности выше  $4 \text{ ГВт/см}^2$  происходит формирование поверхностно-измененного слоя толщиной 1-2 мкм, характеризующегося такими нежелательными дефектами, как микротрещины.

Оценка качества ПС по глубине упрочненного слоя и степени наклепа для указанных выше режимов проводилась на косых шлифах, графики измерения микротвердости по глубине представлены на рисунке 12, красными пунктирными линиями указаны границы изменения микротвердости необработанного сплава ВТ6.

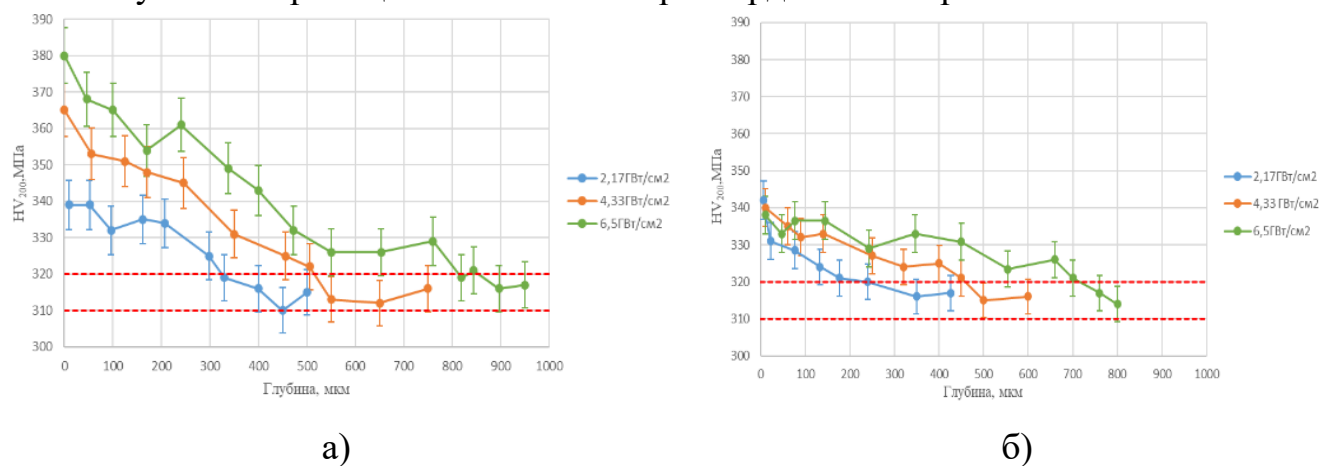
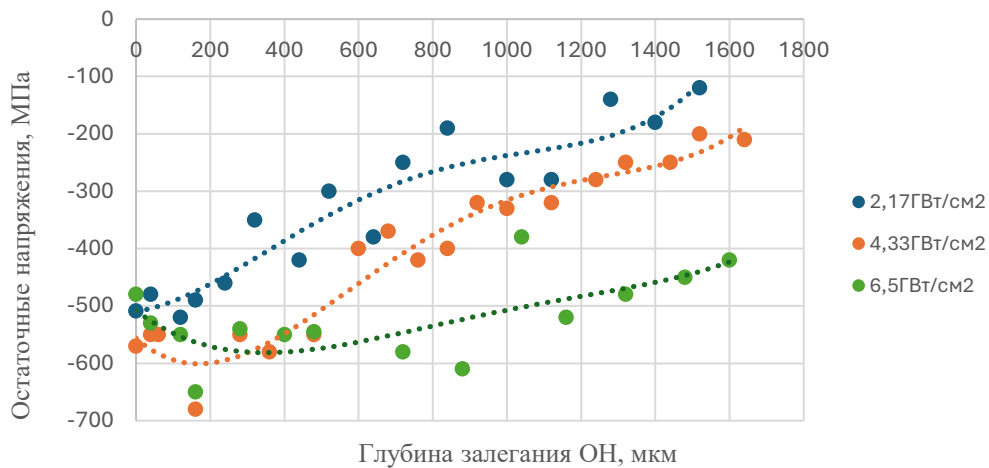


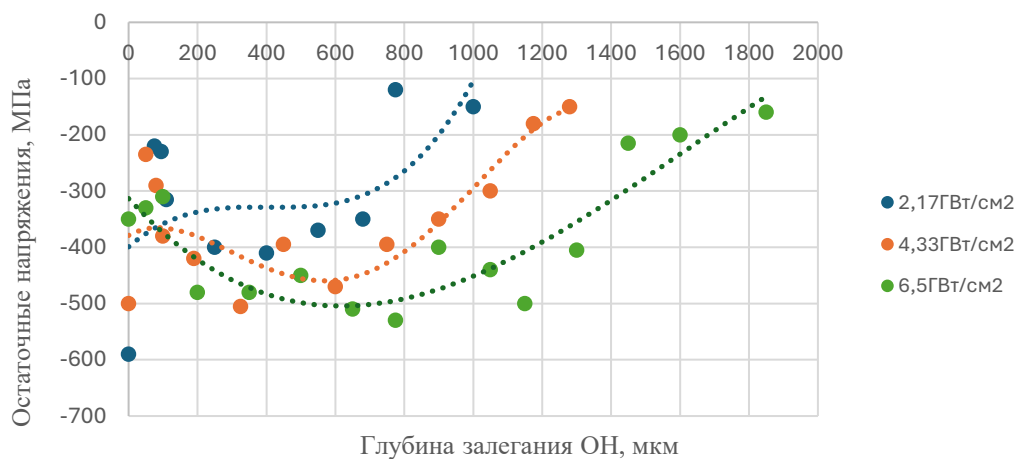
Рисунок 12 – Зависимость микротвердости по глубине образца: а) ЛУО, б) ЛУОБП

Результаты измерения ОН (рисунок 13) с использованием рентгеновского дифрактометра и методом ак. Давиденкова показали:

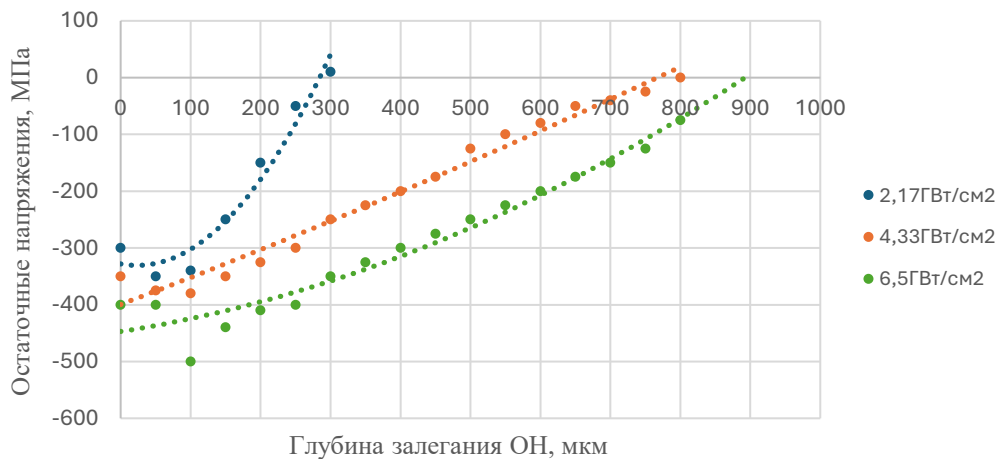
1. ЛУО наводит в титановом сплаве ВТ6 устойчивые сжимающие остаточные напряжения (от 300 до 800 МПа в зависимости от режимов) на глубины порядка 1 мм.
2. После ЛУОБП на поверхности материала и с глубины более 300 мкм значения ОН сравнимы с ОН после ЛУО, однако, в диапазоне от 0 до 300 мкм ОН для ЛУОБП существенно ниже из-за плавления поверхности в результате воздействия лазерного излучения.
3. Глубина проникновения ОН может варьироваться в широких пределах от 300 мкм до 1000 мкм при изменении плотности мощности лазерного излучения.



а)



б)



в)

Рисунок 13 – Результаты измерения ОН.

- а) ЛУО – рентгенографический метод; б) ЛУОБП – рентгенографический метод;  
в) ЛУО – метод ак. Давиденкова

Результаты усталостных испытаний (рисунок 14) показали, что среднее значение усталостной долговечности исходных неупрочненных корсетных образцов находится на уровне 65 475 циклов, для дроби среднее значение равно 101 000 циклов, что дает прирост по долговечности на 55%. Схожие результаты показала обработка в режиме 2,17 ГВт/см<sup>2</sup>. Наилучшие результаты показала обработка методом ЛУО на



уровне  $6,5 \text{ ГВт/см}^2$ , при которой прирост составил 136% относительно образцов после ДСО и 268% относительно исходных образцов.

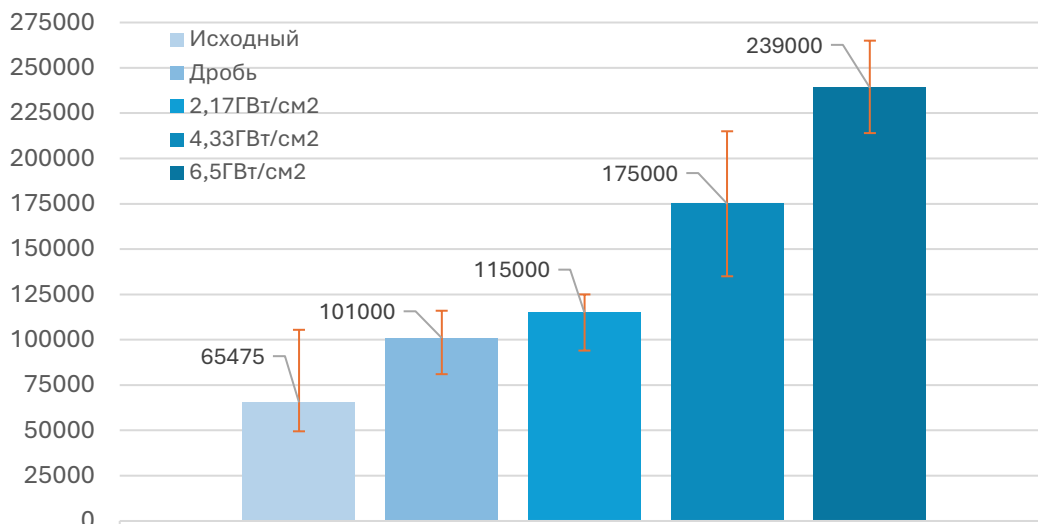


Рисунок 14 – Результаты испытаний на многоцикловую усталость неупрочненных образцов, образцов после ДСО и ЛУО

На корсетных образцах после усталостных испытаний проводились фрактографические исследования поверхности излома для поиска очага зарождения трещины. Известно, что при первоначальном зарождении трещины формируются фасетки, поэтому в дальнейшем глубина зарождения очага трещины будет анализироваться по глубине залегания фасетки.

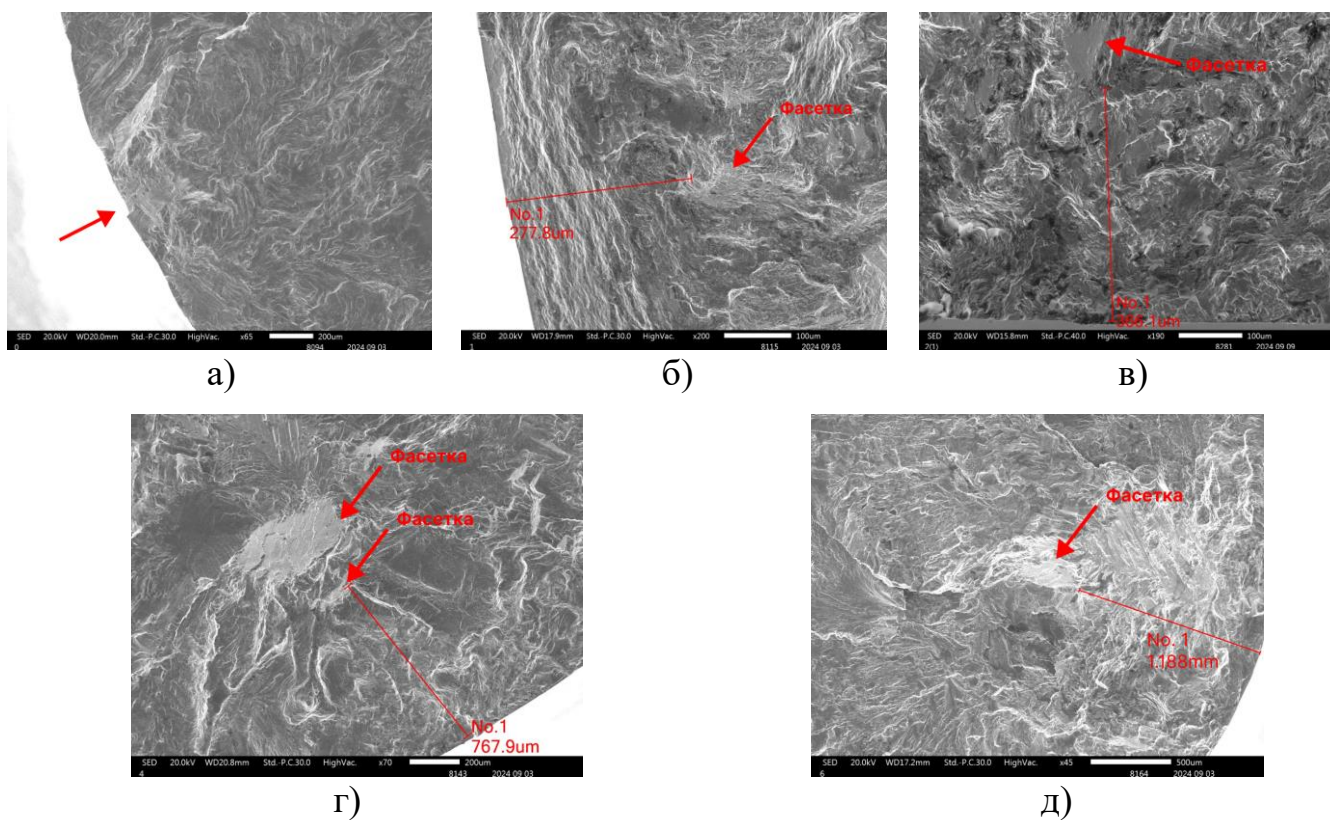


Рисунок 15 – Очаг зарождения усталостной трещины  
а) Без обработки, б) ДСО, в)  $2,17 \text{ ГВт/см}^2$ , г)  $4,33 \text{ ГВт/см}^2$ , д)  $6,5 \text{ ГВт/см}^2$

На основе проведенных исследований были сформированы следующие выводы:

- Отсутствие какой-либо обработки поверхностного слоя образца приводит к тому, что усталостная трещина начинает развиваться с поверхности;

- Наличие сжимающих ОН приводит к смещению очага зарождения усталостной трещины вглубь детали. Причем чем выше глубина залегания остаточных напряжений, тем больше очаг смещается вглубь образца и как следствие увеличивается количество циклов до разрушения образца;

- ЛУО на режимах 4,33 и 6,5 ГВт/см<sup>2</sup> показала явную эффективность по сравнению с дробеструйной обработкой при следующем режиме: шарики диаметром 2 мм из стали ШХ15, время экспозиции 30 мин.

**В пятой главе** приводятся методика выбора режимов лазерной ударной обработки авиационных материалов; рекомендации по обработке лопаток компрессора ГТД; результаты испытаний лопаток ГТД, обработанных по разработанной опытной технологии лазерной ударной обработки.

*Методика выбора режимов лазерной ударной обработки авиационных материалов.*

Методика представлена на рисунке 16 и содержит следующие основные этапы:

1) Анализ исходной технической документации на ДСЕ для разработки технологии лазерной ударной обработки (рабочий чертеж, технические условия, технологическая документация).

2) Подбор поглощающего (абляционного) покрытия.

- Осуществляется выбор типа абляционного покрытия исходя из объема выпуска деталей, требований на геометрические параметры поверхностного слоя, лучевую стойкость покрытий и их адгезионную прочность к материалу детали.

- В случае если шероховатость исходной детали  $Ra > 3,2$  мкм или существует возможность осуществить операцию ЛУО перед операциями шлифования и полирования, рассматривается возможность применения ЛУОБП.

- Формируются технические условия на ТП подготовки поверхности перед лазерной ударной обработкой.

3) Оценка обрабатываемости материала детали. (Проведение исследований материала детали по значениям деформации, микротвердости и наличию дефектов поверхности при варьировании режимов обработки после ЛУО, формирование режимов ЛУО).

4) Определение влияния режимов лазерной ударной обработки на качество поверхностного слоя материала детали. (Проводится обработка образцов материала для выявления зависимостей между режимами ЛУО и параметрами качества поверхностного слоя материала: шероховатость, волнистость, наличие и тип дефектов, микроструктура, степень наклепа, эпюра остаточных напряжений по глубине, формирование режимов ЛУО для эксплуатационных испытаний).

5) Проведение сравнительных эксплуатационных испытаний материала детали.

6) Разработка технологических рекомендаций обработки ДСЕ и проведение квалификационных испытаний.

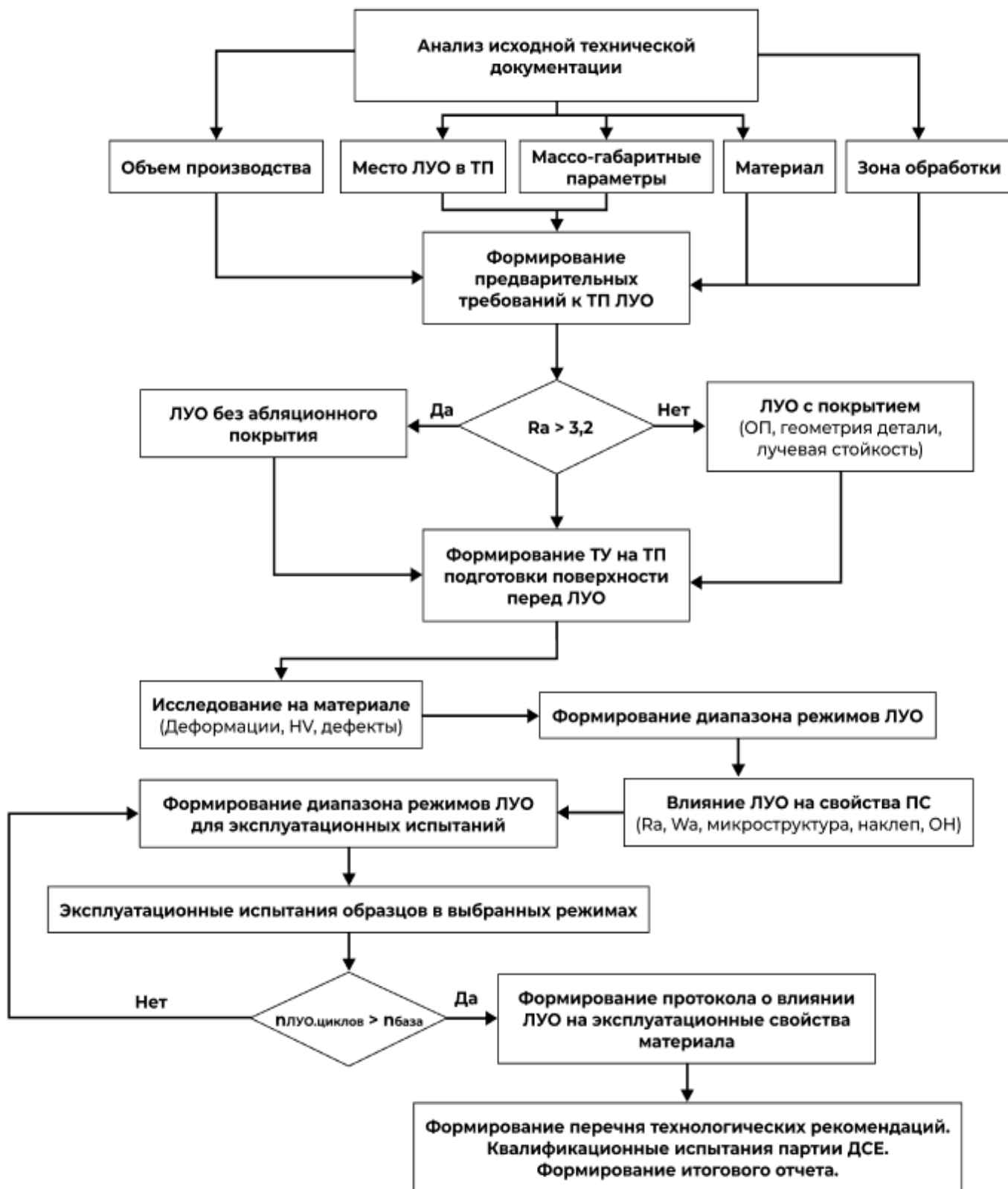


Рисунок 16 – Методика выбора режимов ЛУО авиационных материалов

### Рекомендации по обработке лопатки компрессора ГТД

**Дефекты.** При проведении ЛУО с абляционным покрытием могут наблюдаться локальные термические дефекты, связанные с неоднородностями в покрытии, пустотами и порами между покрытием и металлом, отслаиванием покрытия на скруглениях и кромках и т.д. В связи с этим на поверхности могут возникать локальные дефекты в виде прижогов с измененным слоем на глубину до 5 мкм. При этом размер таких термических дефектов может быть незначительным от 1-10 мкм и

сложно регистрируемым при визуальном осмотре. В связи с этим после ЛУО рекомендуется проводить полировку обработанных поверхностей.

Шероховатость. Шероховатость поверхности пера лопатки обычно лежит в диапазоне  $Ra = 0,08...0,63$  мкм. Это может накладывать ограничения при выборе способа лазерной ударной обработки: с абляционным покрытием (ЛУО) и без покрытия (ЛУОБП); а также место этой операции в технологическом процессе изготовления лопатки. Использование процесса ЛУОБП является менее трудоемким поскольку количество переходов в операции ЛУО при использовании абляционного покрытия выше, т.к. требуется дополнительное оборудование для подготовки поверхности нанесения покрытия, его контроля и снятия.

Таким образом, если в технологическом процессе изготовления лопатки существует возможность назначения дополнительного припуска на обработку после операции ЛУО не менее 50 мкм, то использования ЛУОБП может быть более экономически целесообразно.

Локальные деформации. Значение толщины кромок пера лопаток обычно варьируется в диапазоне 0,5-1,5 мм. При обработке таких элементов с использованием режимов ЛУО с большой плотностью мощности  $\sim 5-7$  ГВт/см<sup>2</sup> наблюдаются большие глубины проникновения остаточных сжимающих напряжений. При обработке тонких элементов может возникнуть изменение их формы, что для рабочей лопатки неприемлемо в связи с ухудшением её аэродинамических свойств. Таким образом, кромку пера лопатки необходимо обрабатывать при пониженных значениях плотности мощности для обеспечения сохранности формы кромки.

Степень наклепа. Повышенные значения микротвердости ухудшают усталостные характеристики материала. Применение ЛУО для титанового сплава ВТ6 при плотности мощности в диапазоне 2-7 ГВт/см<sup>2</sup> увеличивает степень наклепа не более чем на 19%.

Остаточные напряжения. Полученные в работе результаты измерения ОН показали, что ЛУО наводит в титановом сплаве ВТ6 устойчивые сжимающие остаточные напряжения (от 300 до 800 МПа в зависимости от режимов обработки) на глубины порядка 1 мм. Поэтому обработка кромок пера лопатки на определённых режимах может приводить к непрогнозируемой эпюре ОН, наводя в них обширные сквозные пластические деформации, что может ухудшить усталостную прочность. Именно поэтому рекомендуется выбирать такие режимы обработки, на которых глубина залегания ОН не будет превышать половины толщины обрабатываемой детали.



Рисунок 17 – Лопатка из титанового сплава ВТ6

При разработке технологического процесса лазерной ударной обработки необходимо учитывать вышеизложенные рекомендации для создания эффективного процесса, позволяющего повысить усталостные характеристики лопаток ГТД.

#### *Опытная технология лазерной ударной обработки лопатки ГТД*

Данная работа была выполнена в рамках договора МАИ и ОКБ им. А.Люльки филиалом ПАО «ОДК-УМПО». В соответствии с техническим заданием объектом исследования являлась лопатка КНД (рисунок 17), изготовленная из титанового сплава ВТ6.

Целью данной работы являлась оценка влияния лазерной ударной обработки на предел выносливости компрессорных лопаток.

По результатам проведения усталостных испытаний удалось повысить усталостную прочность лопаток из титанового ВТ6 на 16% по сравнению с лопатками, обработанными по штатной технологии.

### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В ходе выполнения диссертационной работы удалось достичь всех поставленных задач, а именно:

1. Провести анализ технологии ЛУО и разработать методику выбора режимов лазерной ударной обработки авиационных материалов, применяемых для изготовления лопаток.

2. Провести экспериментальные исследования для определения влияния режимов лазерного излучения на геометрические, физико-механические, химические характеристики поверхностного слоя и эксплуатационные характеристики образцов, изготовленных из титанового сплава ВТ6.

3. Разработать рекомендации по технологии обработки рабочих лопаток компрессора ГТД из титановых сплавов на основе выявленных зависимостей.

4. Провести апробацию разработанных режимов ЛУО и сравнительные усталостные испытания рабочих лопаток компрессора ГТД, обработанных по штатной технологии и с использованием лазерной ударной обработки.

Проведенные исследования позволили получить следующие новые результаты:

1. Установлен эффективный диапазон значений плотности мощности (интенсивности) лазерной ударной обработки титанового сплава ВТ6 при длительности импульса 60 нс равный 2-7 ГВт/см<sup>2</sup>, в котором наблюдается линейный рост пластической деформации и значений микротвердости обрабатываемой поверхности.

2. Установлено, что при лазерной ударной обработке с поглощающим (абляционным) покрытием шероховатость (Ra) поверхности титанового сплава ВТ6 не изменяется, волнистость (Wa) повышается в 3,5 раза, а величина измененного приповерхностного слоя составляет не более 2,2 мкм при увеличении интенсивности с 2 до 7 ГВт/см<sup>2</sup>.

3. Установлено, что при лазерной ударной обработке без покрытия (ЛУОБП) шероховатость поверхности увеличивается до Ra = 4,961 мкм, волнистость (Wa) повышается в 15 раз, а величина измененного приповерхностного слоя составляет до 5 мкм при увеличении интенсивности с 2 до 7 ГВт/см<sup>2</sup>.

4. Установлено, что максимальная степень наклепа при ЛУО с покрытием для величины плотности мощности 6,5 ГВт/см<sup>2</sup> достигает 19%, а для ЛУО без покрытия, под термическим слоем, достигает 11%.

5. Установлено, что ЛУО с покрытием наводит в титановом сплаве ВТ6 устойчивые сжимающие остаточные напряжения (от 300 до 800 МПа в зависимости от режимов) на глубину порядка 1 мм. При ЛУО без покрытия значения ОН с глубины более 300 мкм сравнимы со значениями ОН после ЛУО с покрытием, однако, в диапазоне от 0 до 300 мкм ОН существенно ниже из-за плавления поверхности в результате воздействия лазерного излучения.

6. Установлено, что глубина проникновения ОН при обработке титанового сплава ВТ6 может варьироваться в широких пределах от 300 мкм до 1000 мкм при изменении плотности мощности лазерного излучения с 2 до 7 ГВт/см<sup>2</sup>.

7. Установлено, что ЛУО позволяет получить прирост усталостной долговечности титанового сплава ВТ6 на 136% относительно образцов после дробеметной обработки и на 268% относительно исходных неупрочненных образцов. На основе фрактографического анализа показано, что прирост усталостной долговечности связан с увеличением расстояния от очага усталостной трещины до поверхности образца.

## **ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

**Публикации в рецензируемых научных изданиях и публикации, приравненные к ним:**

1. Влияние режимов лазерного ударного упрочнения на физико-механические свойства поверхностного слоя алюминиевого сплава Д16 / Д. Д. Королев, Г. Д. Кожевников, Д. А. Токачев [и др.] // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. – 2023. – № 4. – С. 159-166.

2. Конечно-элементное моделирование деформаций поверхности лопаток компрессора ГТД из титанового сплава ВТ6, образующихся при лазерной ударной обработке с расширением низкотемпературной плазмы в ограниченном канале / Г. Д. Кожевников, Д. Д. Королев, М. А. Ляховецкий [и др.] // Тепловые процессы в технике. – 2024. Т.16. №7. – С. 295-302.

3. Патент № 2793015 С1 Российская Федерация, МПК В23К 26/60, С23С 26/00, С23С 28/00. Способ нанесения абляционного покрытия для снижения термических дефектов при обработке деталей методом лазерного ударного упрочнения : № 2022114867 : заявл. 01.06.2022 : опубл. 28.03.2023 / Д. Д. Королев, М. А. Ляховецкий, Л. Н. Лесневский, Г. Д. Кожевников ; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Московский авиационный институт".

4. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022666065 Российская Федерация. Программное обеспечение для расчета параметров ионизированного газа при воздействии когерентного излучения : № 2022665170 : заявл. 11.08.2022 : опубл. 24.08.2022 / Г. Д. Кожевников, Д. Д. Королев, М. А. Ляховецкий ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский авиационный институт»

**Публикации в других научных изданиях:**

5. Токачев, Д. А. Влияние типов абляционных покрытий на характеристики поверхностного слоя алюминиевого сплава Д16 при обработке методом лазерного ударного упрочнения / Д. А. Токачев, Д. Д. Королев, Г. Д. Кожевников // Гагаринские чтения - 2023 : Сборник тезисов докладов XLIX Международной молодежной

научной конференции, Москва, 11–14 апреля 2023 года. – Москва: Издательство "Перо", 2023. – С. 180.-181.

6. Исследование физико-химических свойств поверхностного слоя алюминиевых и титановых сплавов после лазерного ударного упрочнения с применением различных типов абляционных покрытий / Д. Д. Королев, Г. Д. Кожевников, Д. А. Токачев [и др.] // Авиация и космонавтика: Тезисы 22-ой Международной конференции, Москва, 20–24 ноября 2023 года. – Москва: Издательство "Перо", 2023. – С. 87.

7. Оптимизация режимов обработки лазерным ударным упрочнением алюминиевого сплава Д16 с помощью численного моделирования / Г. Д. Кожевников, Д. Д. Королев, Д. А. Токачев, М. А. Ляховецкий // Авиация и космонавтика: тезисы 21ой международной конференции, Москва, 21–25 ноября 2022 года / Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет). – Москва: Издательство "Перо", 2022. – С. 126-128.

8. Влияние режимов лазерной ударной обработки алюминиевого сплава Д16 на степень наклепа и величину остаточных напряжений поверхностного слоя / Д. Д. Королев, Г. Д. Кожевников, Д. А. Токачев, М. А. Ляховецкий // Авиация и космонавтика: тезисы 21ой международной конференции, Москва, 21–25 ноября 2022 года / Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет). – Москва: Издательство "Перо", 2022. – С. 130-132.

9. Королев, Д. Д. Влияние лазерного ударного упрочнения на сопротивление фреттинг-износу / Д. Д. Королев, Г. Д. Кожевников, М. А. Ляховецкий // Авиация и космонавтика: Тезисы 20-ой Международной конференции, Москва, 22–26 ноября 2021 года. – Москва: Издательство "Перо", 2021. – С. 115-117.

10. Королев, Д. Д. Применение технологии лазерного ударного упрочнения для обработки образцов из сплава ВТ6 / Д. Д. Королев, Г. Д. Кожевников, А. А. Пожидаев // XLVII Гагаринские чтения 2021 : Сборник тезисов работ XLVII Международной молодёжной научной конференции, Москва, 20–23 апреля 2021 года. – Москва: Издательство "Перо", 2021. – С. 150.

11. Лазерное ударное упрочнение титанового сплава ВТ6 с алюминиевым абляционным покрытием / М. А. Ляховецкий, Д. Д. Королев, Г. Д. Кожевников, М. В. Волков // Быстрозакаленные материалы и покрытия: Материалы XVIII Международной научно-технической конференции, Москва, 19–20 октября 2021 года. – Москва: Издательство Пробел-2000, 2021. – С. 258-263.

12. Исследование влияния вида и параметров абляционных слоев на величину остаточных напряжений в образцах из сплава ВТ6, обработанных методом лазерного ударного упрочнения / Д. Д. Королев, М. А. Ляховецкий, Л. Н. Лесневский, М. В. Волков // 19-я Международная конференция «Авиация и космонавтика» : Тезисы 19-ой Международной конференции, Москва, 23–27 ноября 2020 года. – Москва: Издательство "Перо", 2020. – С. 166-167.

13. Исследование технологии лазерного ударного упрочнения в авиационной промышленности / Г. Д. Кожевников, Д. Д. Королев, А. А. Пожидаев, М. А. Ляховецкий // Новые материалы XXI века: разработка, диагностика, использование : материалы I Международной молодёжной научной конференции, Москва, 21–24 апреля 2020 года. – Москва: Международный Информационный Нобелевский Центр "Нобелистика", 2020. – С. 68-69.