

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего  
образования  
Московский авиационный институт  
(национальный исследовательский университет)

На правах рукописи



Королев Даниил Дмитриевич

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

2.5.15. – Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных  
аппаратов

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
Кандидат технических наук  
Ляховецкий Максим Александрович

Москва – 2024

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	4
ГЛАВА 1. УСТАЛОСТЬ ЭЛЕМЕНТОВ АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ УСТАЛОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК.....	14
1.1 Анализ причин разрушения деталей ДЛА и ЭУ, подверженных усталостному разрушению. ....	14
1.2 Влияние качества поверхностного слоя на усталостную прочность ДСЕ.....	19
1.3 Технологический процесс изготовления лопатки компрессора ГТД.....	21
1.4 Обзор методов поверхностного пластического деформирования, применяемых для повышения усталостной прочности деталей авиационных двигателей.....	23
1.5 Влияние ЛУО на усталостные характеристики титановых сплавов. ....	26
1.6 Выводы к главе 1 .....	29
ГЛАВА 2. ОСНОВНЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ И ФИЗИЧЕСКАЯ КАРТИНА ПРОЦЕССА ЛАЗЕРНОЙ УДАРНОЙ ОБРАБОТКИ.....	31
2.1 Развитие представлений о явлении повышения давления в ограниченном пространстве у твердого тела от воздействия лазерного излучения. ....	31
2.2 Феноменологическая модель лазерной ударной обработки.....	33
2.3 Разновидности лазерной ударной обработки.....	37
2.4 Необходимые составляющие процесса лазерной ударной обработки. ....	40
2.4 Влияние лазерной ударной обработки на свойства поверхностного слоя и сравнение с дробеударными методами упрочнения .....	42
2.4.1 Влияние обработки на шероховатость поверхностного слоя .....	42
2.4.2 Влияние обработки на микроструктуру.....	44
2.4.3 Влияние обработки на микротвердость поверхностного слоя .....	46
2.4.4 Влияние обработки на остаточные напряжения.....	49
2.5 Выводы к главе 2.....	52
ГЛАВА 3 МАТЕРИАЛЫ, МЕТОДИКИ И ОБОРУДОВАНИЕ .....	53
3.1 Материалы и геометрические параметры исследуемых образцов .....	53
3.2. Установка лазерной ударной обработки и её составляющие.....	54
3.3. Оборудование и методики определения свойств материалов.....	57
ГЛАВА 4 ИССЛЕДОВАНИЕ И АНАЛИЗ ЛАЗЕРНОЙ УДАРНОЙ ОБРАБОТКИ ТИТАНОВОГО СПЛАВА ВТ6 .....	61

4.1 Исследование и выбор материала поглощающего (абляционного) покрытия при обработке титанового сплава ВТ6 .....	62
4.2 Исследование влияния интенсивности лазерного излучения на механику локальной деформации титанового сплава ВТ6 .....	69
4.3 Исследование влияния интенсивности лазерного излучения на степень наклепа титанового сплава ВТ6.....	74
4.4. Исследование свойств поверхностного слоя после обработки участка на образцах из сплава ВТ6. ....	76
4.4.1 Оценка геометрических показателей качества поверхностного слоя после лазерной ударной обработки .....	78
4.4.2 Микроструктура титанового сплава ВТ6 после ЛУО .....	81
4.4.3 Микротвердость и степень наклепа титанового сплава ВТ6 после ЛУО	85
4.4.4 Остаточные напряжения поверхностного слоя титанового сплава ВТ6 после лазерной ударной обработки.....	87
4.5. Усталостные испытания титанового сплава ВТ6 после лазерной ударной обработки .....	95
4.6 Фрактографический анализ образцов после испытаний.....	96
4.7 Выводы к главе 4.....	103
<b>ГЛАВА 5. ПРАКТИЧЕСКОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ.....</b>	<b>105</b>
5.1 Методика выбора режимов лазерной ударной обработки авиационных материалов .....	105
5.2 Рекомендации по обработке лопаток компрессора ГТД.....	108
5.3 Опытная технологии лазерной ударной обработки лопатки ГТД .....	110
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....</b>	<b>114</b>
<b>СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ .....</b>	<b>116</b>
<b>СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ .....</b>	<b>117</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ 1 .....</b>	<b>130</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ 2.....</b>	<b>131</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ 3.....</b>	<b>132</b>

## ВВЕДЕНИЕ

Для отрасли двигателестроения и энергомашиностроения характерны повышенные требования к эксплуатационной надежности и ресурсу работы их деталей и сборочных единиц (ДСЕ), а при разработке новых типов двигателей и энергоустановок эти требования значительно возрастают для обеспечения новых уровней эффективности и безопасности. Повышение эффективности тепловых машин связано со значительным увеличением температуры и давления рабочего тела, повышением контактных нагрузок и вибрациям, что приводит к ухудшению условий эксплуатации ДСЕ. Таким образом, обеспечение требования повышенной безопасности двигателей летательных аппаратов и энергетических установок (ДЛА и ЭУ) становится невозможным без создания новых материалов и технологий.

К одним из основных эксплуатационных факторов, снижающим ресурс и надежность ДЛА и ЭУ, относят усталостное разрушение рабочих лопаток, дисков, валов, зубчатых и шлицевых соединений и т.д. Зачастую процесс усталостного разрушения усугубляется дополнительным воздействием факторов окружающей среды на рабочие поверхности ДСЕ: коррозии, повреждения частицами и посторонними предметами и т.д. [1].

Таким образом, одной из важнейших задач при производстве и эксплуатации ДЛА и ЭУ является обеспечение высоких уровней стойкости ДСЕ к факторам эксплуатации. В частности, одной из ключевых проблем является обеспечение стойкости к забоинам кромок пера рабочих лопаток (РЛ) компрессора ГТД. Повреждение кромок РЛ носит случайный характер и связано с попаданием посторонних предметов в тракт двигателя, как со взлетно-посадочной полосы (камни, элементы конструкции ЛА), так и в воздухе (птицы, песок, пепел). Воздействие таких предметов на кромку РЛ приводит к её повреждению с возможным образованием разрывов и деформации металла. Такие повреждения приводят к перераспределению напряженно-деформированного состояния (НДС) РЛ, что может значительно снизить предел выносливости лопатки, а следовательно, привести к быстрому развитию трещины в зоне повреждения. Для

предотвращения катастрофических последствий таких явлений принимается большое количество конструктивно-технологических мероприятий при проектировании, производстве и эксплуатации авиационных двигателей [2,3,4].

#### **Актуальность темы исследования.**

Одним из технологических способов повышения усталостной прочности РЛ в целом и стойкости кромки РЛ к попаданию посторонних предметов в частности является использование методов поверхностного пластического деформирования (ППД) [2,3]. Методы ППД позволяют создать в поверхностном слое (ПС) детали сжимающие остаточные напряжения (ОН), которые благоприятно влияют на усталостную прочность элементов ДЛА и ЭУ снижая скорость развития трещины и повышая стойкость к повреждению кромок от попадания посторонних предметов.

В современной промышленности можно выделить три основных метода упрочнения, применяемых для повышения предела выносливости ДСЕ [3]:

1. Дробеструйная или пневмодробеструйная обработка (ДСО). В основе этого метода лежит взаимодействие ускоренных потоком воздуха частиц (стеклянных, стальных или керамических шариков) 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 ( $\sim 10$  ГВт/см<sup>2</sup>), что обеспечивает пластическую деформацию локальной области и большую глубину упрочненного слоя в сравнении с дробеударными методами.

Первые работы, которые заложили фундамент лазерной ударной обработки, относятся к 70-м годам прошлого века [5-8]. Началом промышленного применения ЛУО послужили авиационные инциденты в начале 90-х годов прошлого века на бомбардировщиках В-1В (США), связанные с отрывом вентиляторных лопаток ГТД из-за повреждений кромок в результате попадания посторонних предметов [9].

Для предотвращения авиационных происшествий была введена повышенная частота регламентных осмотров лопаток двигателя на наличие критических повреждений кромок пера. К 1994 г. на выполнение этих требований было затрачено более 1 млн. человеко-часов. 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 (США).

Впоследствии внедрение метода ЛУО расширилось и ВВС США провело несколько исследовательских программ, направленных на совершенствование методики. Так, 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 лазерного ударного упрочнения, главным образом, за счет автоматизации процесса нанесения и удаления поглощающего (абляционного) слоя [10].

В настоящее время, ЛУО применяется в ВВС США для обработки лопаток двигателей. В частности, сообщается [11] 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 [12-24].

Таким образом актуальность работы заключается в применении технологии лазерной ударной обработки для снижения чувствительности лопаток компрессора

к попаданию посторонних предметов, а также для повышения усталостной прочности деталей ДЛА.

Данная работа выполнялась в рамках: программа УМНИК от Фонда содействия инновациям (Договор №15206ГУ/2020 от 05.06.2020), госзадания «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, научно-исследовательской и опытно-конструкторской работы «Разработка технологии лазерного ударного упрочнения кромок пера лопаток компрессора» (Договор МАИ с АО «ОДК-Авиадвигатель» № 00000000020956190543/540-28-7219 от 08.04.2021), научно-исследовательской работы «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), научно-исследовательской работы «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, С. Коцаньды, В.С. Ивановой и др. Важнейший вклад в технологию повышения ресурса и надежности элементов авиационных двигателей внесли такие ученые как 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 лазерной ударной обработки для металлических материалов послужили работы проведенные в 60-х и 70-х гг. Г.А. Аскарянном 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. Был обнаружен эффект возникновения ударной волны на металлических подложках в вакууме за счет абляции материала, а также изменение структурного состояния подложки под влиянием пластической деформации.

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 середины 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 различные металлы и сплавы 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.

**Объектом исследования** является 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.

**Целью исследования** является 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.

**Научной новизной обладают следующие 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 (ЛУО) 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  $6,5 \text{ ГВт/см}^2$  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  $7 \text{ ГВт/см}^2$ .

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.

#### **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 испытания рабочих лопаток компрессора ГТД из титанового сплава ВТ6, изготовленных по штатной технологии и с использованием метода лазерной ударной обработки.

**Апробация работы.** Основные положения и результаты диссертационной работы доложены и обсуждены на следующих международных и всероссийских научно-технических конференциях: «Новые материалы 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 4 работы, из них в рецензируемых научных изданиях и изданиях, приравненных к ним, опубликовано 2 работа, 1 патент на изобретение и 1 программа 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. 295-300.

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».

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

В расчетно-аналитическую часть работы: 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.

В экспериментальную часть работы: личное участие в постановке и проведении всех экспериментальных исследований обрабатываемости титанового сплава ВТ6 лазерной ударной обработкой и обработке, полученных экспериментальных данных. Анализ экспериментальных данных осуществлялся с соавторами публикаций.

#### **Внедрение результатов исследований.**

Результаты работы были внедрены в «ОКБ им. А. Люльки» филиал ПАО «ОДК-УМПО».

#### **Структура и объем работы.**

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

# ГЛАВА 1 УСТАЛОСТЬ ЭЛЕМЕНТОВ АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ УСТАЛОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

## 1.1 Анализ причин разрушения деталей ДЛА и ЭУ, подверженных усталостному разрушению

В работе [25] приведена информация о типовых отказах и повреждениях авиационных ГТД (рисунок 1.1).

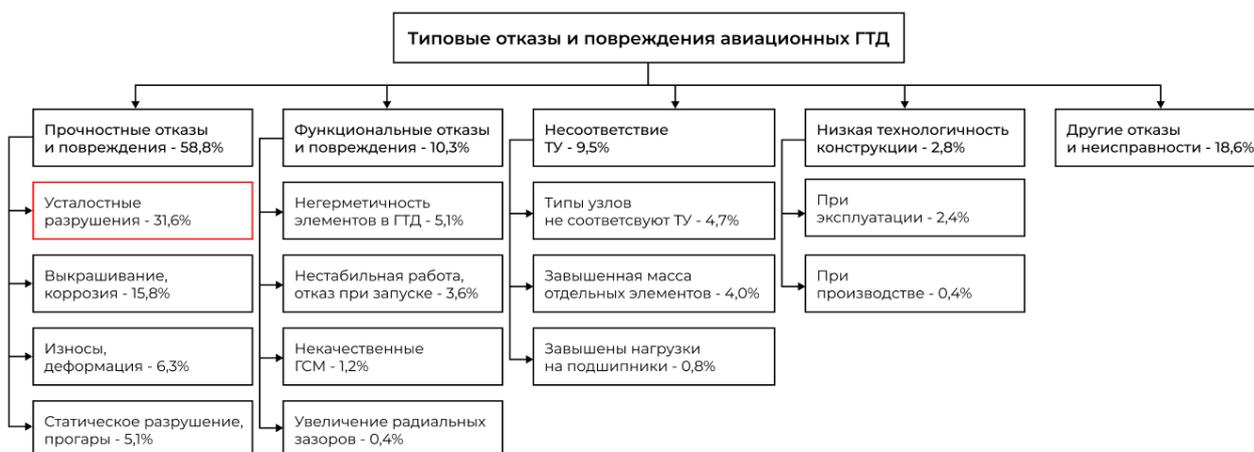


Рисунок 1.1 – Типовые отказы и повреждения авиационных ГТД. [25]

Исходя из приведенной выше информации видно, что 31,6% всех отказов и повреждений элементов ГТД вызваны усталостными разрушениями. К основным деталям ГТД, подверженным данному виду разрушения, можно отнести: рабочие лопатки компрессора, валы, диски, лабиринтные уплотнения, элементы камеры сгорания и т.д. Таким образом, усталость материала – это один из основных факторов снижения ресурса и надежности элементов ГТД. Усталость, согласно ГОСТ 23207-78, — это процесс постепенного накопления повреждений материала под действием переменных напряжений, приводящий к изменению свойств, образованию трещин, их развитию и разрушению.

Авторы работы [26] описывают поломки лопаток двигателя CFM-56 вследствие усталостного разрушения и показывают, что все лопатки независимо от их размера и материала изготовления разрушаются в определенных зонах: на спинке, кромках, торце (рисунок 1.2). Отчеты о выходе из строя авиационных

двигателей гражданской авиации, исследованные авторами работы, показывают, что на одной ступени часто наблюдается группы сломанных лопаток – 2-3 подряд, что также характерно для всех последующих ступеней. Таким образом, общее число повреждённых лопаток в компрессоре может достигать десятка штук. В работе отмечается, что попадание частиц и посторонних предметов с поверхности взлетно-посадочной полосы в тракт двигателя может привести к появлению разрыва металла или деформациям (загибам) лопаток, в районе которых может произойти усталостное разрушение.

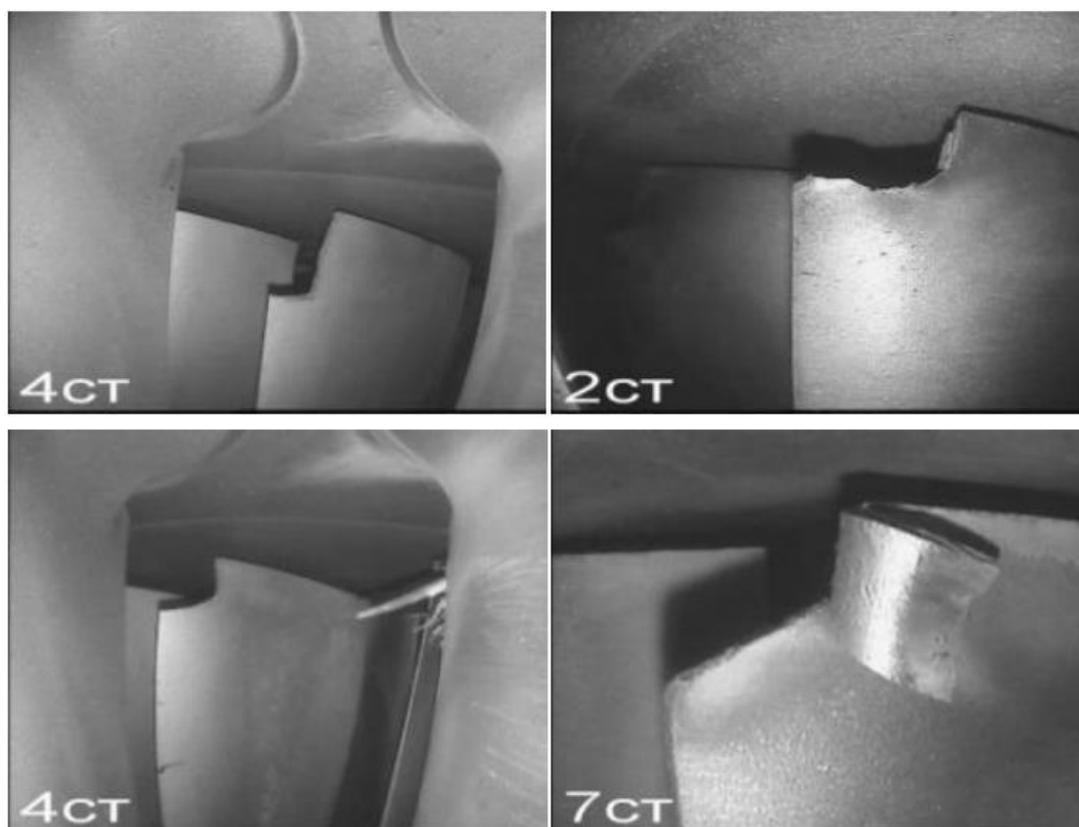


Рисунок 1.2 - Поломки лопаток КВД двигателя CFM-56 [26]

В работе [27] авторы рассматривали причины разрушения поворотных лопаток направляющего аппарата из стали 14X17H2, применяемого на газотурбинных установках ГТК-25И. Данный тип установок применяется для транспортировки газа. На рисунке 1.3 приведена фотография разрушенной лопатки.

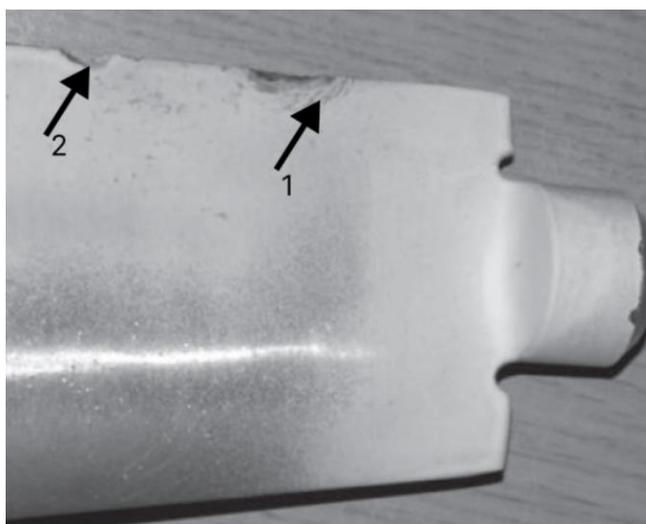


Рисунок 1.3 – Коррозионно-усталостное разрушение (1) поверхности лопатки из стали 14X17H2 в процессе эксплуатации и хрупкое разрушение в районе забоин (2) при аварийном разрушении. [27]

По мнению авторов, причиной разрушения лопатки является наличие значительных знакопеременных нагрузок пера лопатки, а также коррозионная среда и забоины кромок, которые ускоряли процесс образования трещины.

В работе [28] авторами исследовалось влияние длительности действия максимальных напряжений на усталость и длительную прочность вала ГТД изготовленного из сплава ЭИ 961-Ш.

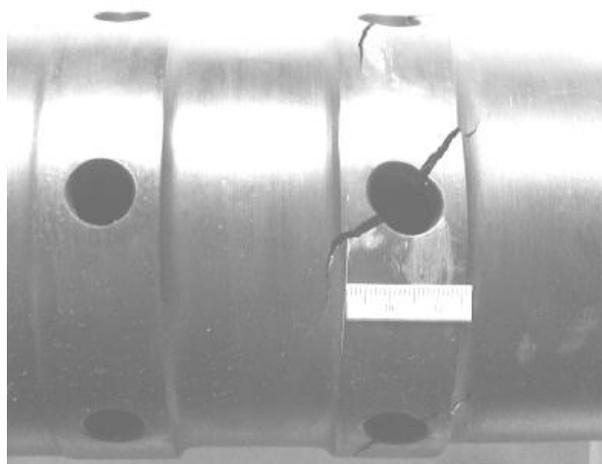


Рисунок 1.4 – Разрушение вала [28]

После проведения испытаний было выявлено, что при действии на вал циклических нагрузок, разрушение имеет усталостный характер с образованием трещин в направлении действия главных напряжений (рисунок 1.4). Помимо этого,

циклическая долговечность деталей существенно зависит от длительности действия максимальных нагрузок в цикле нагружения.

Авторы работы [29], после проведения фрактографических исследований поверхностей разрушения дисков, показали, что зарождение усталостных трещин чаще всего происходит в окрестности контактных поверхностей диска компрессора и хвостовика лопаток (рисунок 1.5).

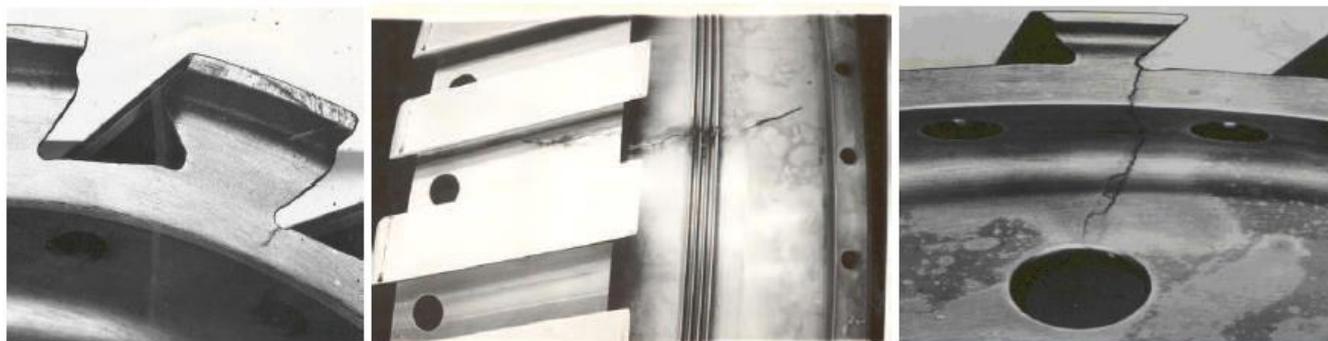


Рисунок 1.5 – Трещины в дисках компрессора [29]

Анализ повреждений показал, что трещины возникают в местах скругления малого радиуса соединения «ласточкин хвост» и далее могут распространяться в двух направлениях: 1 – вдоль радиуса диска; 2 – по основанию межпазового выступа. Исходя из этого, авторы сделали вывод о том, что существенную роль в разрушении диска компрессора играет начальный этап нагрузок, вызванный контактным воздействием лопатки на диск компрессора. Контактное взаимодействие пары лопатка-диск происходит путем проскальзывания с трением, а зона контакта изменяется с течением времени. Авторы делают вывод о том, что причиной данных разрушений является фреттинг-усталость, т. е. усталостное разрушение в результате повреждения поверхности детали от фреттинг-износа.

В работе [30] описываются проблемы лабиринтных уплотнений, которые могут возникнуть при эксплуатации ГТД. В процессе работы двигателя возникают ситуации, когда гребешки лабиринтного уплотнения истираются, вследствие чего производят ремонт путем наплавки или замены графитового кольца. В случае замены происходит изменение геометрии лабиринтного уплотнения, и оно уже не может обеспечить необходимые параметры, что приводит к изменению параметров

рабочего процесса в двигателе, изменению температурного режима, что в свою очередь приводит к перепаду температур в деталях, накоплению напряжений и возникновению усталостных дефектов.

В работе [31] авторы рассматривали основные виды повреждений камеры сгорания ГТД. Как считают авторы, основными причинами разрушения являются эксплуатационные факторы: высокая температура; неравномерность нагрева основных элементов камеры; коррозионное воздействие; вибрации корпусов двигателя, передающейся на элементы камеры сгорания; вибрационный режим горения и т.д. Данные факторы приводят к появлению различных эксплуатационных дефектов. Так, например, повреждение корпусов наблюдаются, в основном из-за усталостных повреждений. Данные повреждения возникают от действия вибраций при повышенных монтажных статических нагрузках, изменяющих расчетных характер нагружения при работе двигателя. В результате трещины образуются в зонах сварных швов, фланцев для отбора воздуха, бобышек для крепления агрегатов.

Другим элементом ГТД, подверженным разрушению вследствие циклических изменений температуры, являются жаровые трубы [32,33]. Данные повреждения проявляются в виде трещин и деформаций термического происхождения; трещин усталостного характера между отверстиями для прохождения воздуха; трещин по сварным швам (в том числе, в местах соединения секций жаровой трубы).

Таким образом, усталостные повреждения в процессе эксплуатации встречаются во всех ключевых элементах конструкции ГТД. Причинами начала разрушения может послужить комплексное воздействие внешних факторов: износ, коррозия, температурные нагрузки, механические повреждения и т.д. Эти повреждения приводят к необходимости проведения регламентных работ по контролю состояния деталей в процессе эксплуатации, а также в дальнейшем проведения ремонтных работ, что оказывает большое влияние на стоимость обслуживания и эксплуатации авиационной техники.

## 1.2 Влияние качества поверхностного слоя на усталостную прочность ДСЕ

Помимо внешних факторов, влияющих на усталостную прочность при эксплуатации, определяющую роль оказывает и качество поверхностного слоя (ПС) ДСЕ [34,2,3,35,36,37], которое определяется рядом параметров, получаемых после преобразования заготовки в конечную деталь.

Важно отметить, что качество поверхности и непосредственно свойства ПС детали должны соответствовать техническим требованиям на получаемое изделие. Свойства ПС непосредственно зависят от методов изготовления заготовки, ее обработки и применения различных финишных технологий обработки. Поэтому оценку качества ПС полученной детали принято проводить по следующим параметрам:

1. Микрогеометрия (шероховатость),
2. Микроструктура,
3. Микротвердость и степень наклепа,
4. Остаточные напряжения.

Шероховатость поверхности является одним из ключевых параметров, влияющих на усталостную прочность ДСЕ, которому уделяется большое внимание в технологическом процессе изготовления лопаток ГТД. Микронеровности поверхности, образованные при механической обработке, являются очагами зарождения усталостных трещин, в связи с этим лопатки подвергаются финишному шлифованию и полированию. Так, например, допустимая шероховатость пера лопатки лежит в диапазоне  $R_a = 0,08 \dots 0,63$  мкм [38,3]. Этот факт также накладывает определенные ограничения на использование упрочняющих технологий, которые могут значительно увеличивать шероховатость поверхности.

Микроструктура ПС также имеет определяющее влияние на усталостную прочность ДСЕ. Титановые сплавы, используемые при производстве лопаток компрессора ГТД, имеют в своем составе  $\alpha$  и  $\beta$  фазы, соотношение и тип структуры которых формируется при определенной температуре полиморфного (фазового) превращения в процессе термопластической деформации, и оказывает определяющее влияние на прочностные свойства готового изделия [35]. Также

стоит отметить, влияние следующих технологических факторов изготовления заготовок и полуфабрикатов из титановых сплавов, которые могут приводить к образованию дефектов [39]:

- металлургические дефекты и вредные газовые примеси;
- неоптимальные режимы термопластической обработки заготовок или полуфабрикатов;
- нарушение режимов механической обработки, при которых возможны локальные термопластические процессы.

Все эти параметры, которые в совокупности принято называть технологической наследственностью материала, определяют конечный ресурс готового изделия.

Еще одним фактором, непосредственно влияющим на усталостных характеристики деталей, является степень наклепа. Наклеп – это процесс упрочнения детали (повышение твердости и прочности) под действием пластической деформации за счет выхода на поверхность дефектов кристаллической решетки. Основным дефектом кристаллической решетки, благодаря которому происходит ее упрочнение, является дислокация [40].

Уровень и глубина залегания остаточных напряжений (ОН) оказывают прямое влияние на усталостную прочность ДСЕ. При описании качества поверхностного слоя обычно оперируют напряжениями второго рода (микронапряжениями), которые обусловлены наличием в металле дислокаций, а также возникают при взаимодействии зерен при деформации [3]. При измерении ОН используется оценка их значения (МПа) и глубины их залегания (мкм) в поверхностном слое. Оценку уровня и глубины ОН обычно проводят с помощью измерения реакции образца материала после частичного удаления упрочненного слоя путем химического или ионного травления, т. е. в следствии разгрузки образца происходит макро или микродеформация выбранного объекта. Благоприятное влияние на усталостную прочность оказывают сжимающие ОН, которые в условиях приложения внешней изгибающей нагрузки не позволяют предварительно сжатому поверхностному слою выйти в зону растягивающих напряжений, которые

провоцируют образование очага усталостной трещины [2, 3, 41], что в конечном итоге благоприятно сказывается на усталостной прочности лопаток ГТД.

Таким образом, изготовление лопатки ГТД из титановых сплавов является достаточно сложным процессом, в котором необходимо строго соблюдать все технологические операции, для недопущения появления негативных эффектов в детали, связанных с технологической наследственностью и получения детали с несоответствующим свойствами.

### 1.3 Технологический процесс изготовления лопатки компрессора ГТД

На рисунке 1.6 проиллюстрирован типовой технологический процесс изготовления компрессорной лопатки ГТД из титанового сплава.



Рисунок 1.6 – Схема принципиального технологического процесса изготовления лопатки ГТД

Для изготовления лопатки компрессора ГТД используется заготовка, которая представляет собой штамповку, получаемую различными методами: изотермическим, высокоскоростным или вальцеванием. После чего заготовка подвергается предварительной и окончательной механической обработке. На заключительном этапе деталь подвергают обработке методами ППД, а также используют различные защитные покрытия, которые, например, защищают поверхность детали от коррозии и эрозии.

Производственный процесс изготовления рабочей лопатки включает множество технологических операций [3]:

1. Протягивание хвостовика и зацентровка технологической бобышки на конце пера;
2. Фрезерование контура бандажной полки со стороны корыта и спинки;
3. Фрезерование сопряжений пера с хвостовиком и бандажной полкой;
4. Фрезерование кромок пера;
5. Электрохимическая обработка;
6. Фрезерование кромок пера, контура бандажной полки со стороны спинки и корыта;
7. Шлифование абразивной лентой профиля пера и поверхностей сопряжения пера с хвостовиком и бандажной полкой со стороны спинки и корыта;
8. Травление и контроль для выявления прижогов, трещин и других внешних дефектов металла;
9. Стабилизирующий отжиг;
10. Виброполирование пера, бандажных полок, полок хвостовика и поверхностей сопряжения;
11. Отрезка технологической бобышки;
12. Деформационное упрочнение профиля пера и хвостовика;
13. Детонационное напыление или электроискровое покрытие контактных поверхностей бандажных полок;
14. Гальваническое серебрение хвостовика.

Исходя из описания технологического процесса рабочей лопатки, заготовка подвергается воздействию различных механических, химических и термических нагрузок, что может влиять на свойства поверхностного слоя детали в части нестабильности микроструктуры, нежелательных растягивающих остаточных напряжений или повышенной степени наклепа. Таким образом, одним из важнейших факторов внедрения новой технологии является минимальное негативное влияния или его отсутствие на свойства ПС.

## 1.4 Обзор методов поверхностного пластического деформирования, применяемых для повышения усталостной прочности деталей авиационных двигателей

Для повышения усталостной прочности рабочих лопаток ГТД из титановых сплавов в отечественной и зарубежной практике используются три основных метода [42,43] модификации поверхностного слоя:

- Дробеструйная (пневмодробеструйная) обработка (ДСО);
- Ультразвуковая обработка микрошариками (УЗО);
- Лазерная ударная обработка (ЛУО).

Дробеструйная обработка – это процесс холодной обработки, при которой поверхность детали бомбардируется сферическими телами - дробью. Каждое соударение дроби с поверхностью металла приводит к пластической деформации поверхностного слоя и образованию деформированной области (вмятин). Деформированная таким образом область металла вызывает упругую реакцию соседних участков, направленную на сжатие деформированной зоны, что приводит к образованию сжимающих остаточных напряжений. При множественном соударении дроби с поверхностью происходит перекрытие вмятин в результате чего образуется относительно равномерный слой с остаточными сжимающими напряжениями. Принципиальная схема процесса представлена на рисунке 1.7.

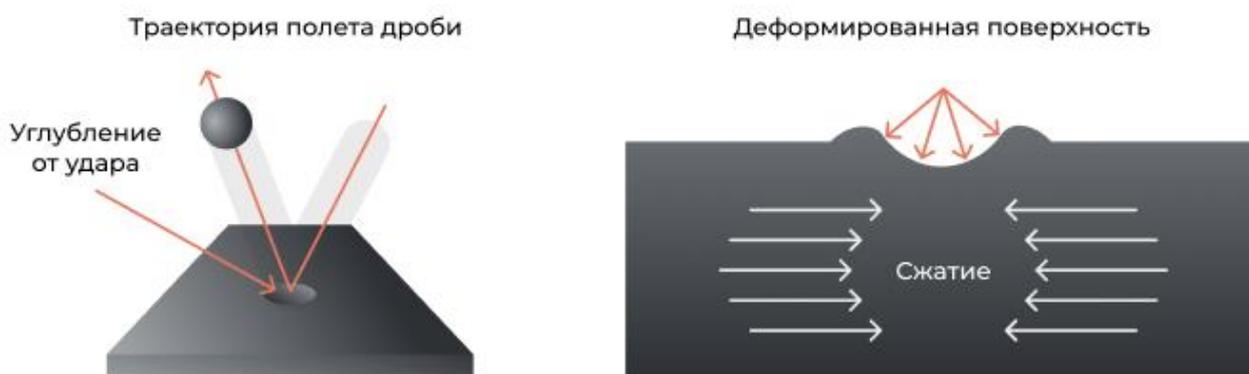


Рисунок 1.7 – Принципиальная схема дробеструйной обработки. [44]

Дробеструйная обработка обеспечивает значительное увеличение срока службы детали [45,46] при этом максимальное значение остаточных сжимающих напряжений после обработки дробью может достигать  $(0,5-0,7) \sigma_b$  материала.

К основному недостатку данного метода можно отнести увеличение шероховатости поверхности после обработки, которая повышается в среднем на величину от 2,5 до 5 мкм в зависимости от обрабатываемого материала. Также обязателен периодический контроль размеров и формы дроби для обеспечения заданного технологического режима обработки и недопущения создания дополнительных концентраторов напряжений на поверхности при её раскалывании.

Основное отличие ультразвукового упрочнения микрошариками от дробеструйной обработки заключается в способе ускорения и размере упрочняющих частиц (дроби). Принципиальная схема ультразвуковой дробеструйной обработки приведена на рисунке 1.8.

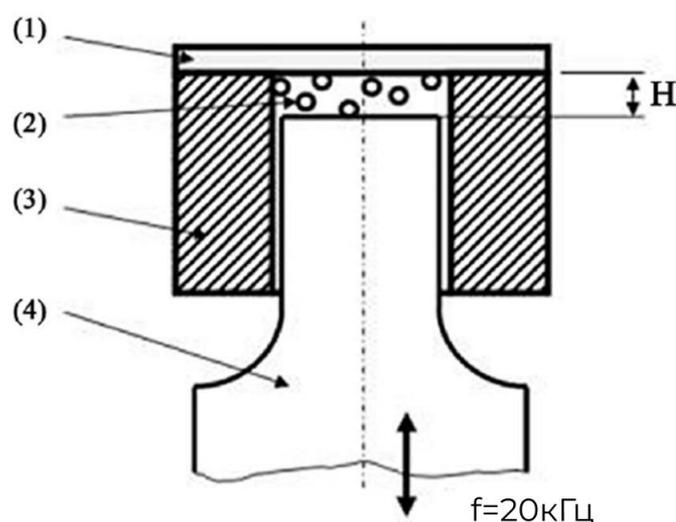


Рисунок 1.8 – Принципиальная схема ультразвуковой дробеструйной обработки.

- 1) Обрабатываемая деталь. 2) Дробь. 3) Волновод. 4) Устройство передачи колебаний с вибратора. [47]

В отличие от дробеструйной обработки, в процессе ультразвукового дробеударного упрочнения, дробь приводится в движение при помощи устройства передачи колебаний от вибратора. Частота колебаний достаточно высока и выбирается в ультразвуковом диапазоне (более 18 кГц). Упрочняющие тела (2) находятся в закрытом канале между волноводом (3) и поверхностью обрабатываемой детали (1), а соударения частиц под действием колебаний

приводит к созданию остаточных напряжений в поверхностном слое обрабатываемой детали.

В результате обработки осуществляется сглаживание шероховатостей по истечении определённого времени и упрочнение поверхности детали [48]. Сам процесс может осуществляться как в специальных приспособлениях с наличием твердых частиц и жидкости [42], так и с использованием ограниченного канала с частицами дроби и жидкости [47]. В сравнении с дробеструйным упрочнением величина и глубина залегания ОН меньше, т. к. кинетическая энергия, передаваемая поверхности детали, ограничена параметрами технологических установок. В связи с этим к преимуществам данного метода можно отнести возможность деликатной обработки тонкостенных элементов, например кромок лопаток, а к недостаткам – невысокие значения и глубину залегания ОН по сравнению с дробеструйным методом.

Лазерная ударная обработка – новый процесс поверхностного пластического деформирования, основанный на воздействии коротких наносекундных лазерных импульсов с большой энергией на поверхность металлов.

Базис технологии лазерного удара был заложен исследователями в 60-х и 70-х годах в работах по исследованию взаимодействия коротких лазерных импульсов с поверхностью металлов [49] и развит при разработке лазерных систем большой мощности для технологии лазерного термоядерного синтеза. Принципиальная схема лазерного ударного упрочнения представлена на рисунке 1.9.



Рисунок 1.9 – Принципиальная схема лазерной ударной обработки. [50]

Сущность метода заключается в следующем: в процессе лазерной ударной обработки используется высокоэнергетический лазерный импульс с интенсивностью излучения от 1 до 10 ГВт/см<sup>2</sup>, который попадает на поверхность детали или на поверхность поглощающего (абляционного) покрытия. Поверхность под воздействием лазерного излучения начинает испаряться, создавая плазму высокого давления и ударную волну величиной в несколько ГПа. Чтобы максимизировать энергию ударной волны, передаваемую к детали, применяется ограничивающий слой, в роли которого может выступать вода. Создаваемый импульс давления распространяется в виде упругопластической волны вглубь металла, локально преодолевая динамический предел упругости Гюгонио и вызывая пластическую деформацию. В результате возникает слой остаточных сжимающих напряжений порядка миллиметра в глубину [51].

### **1.5 Влияние ЛУО на усталостные характеристики титановых сплавов.**

Основополагающим фактором, влияющим на выбор применения той или иной технологии при производстве ДСЕ, является ее влияние на предел выносливости и долговечность детали.

Авторы работы [52] исследовали влияние ЛУО на усталость титанового сплава Ti834. Эксперименты проводились при фиксированной нагрузке, соответствующей многоциклового усталости материала, до момента начала разрушения образца из-за появления усталостной трещины. Применение ЛУО позволило повысить ресурс работы образца на 46% относительно неупрочненного образца.

В работе [46] проводилось сравнение долговечности образцов титанового сплава Ti-6Al-4V, обработанных методами ЛУО и ДСО. Использование ЛУО позволило увеличить ресурс до разрушения образца на 966% относительно необработанного и на 237%, относительно ДСО.

Авторы статьи [53] исследовали влияние различных методов ППД на изменение предела выносливости титанового сплава Ti-2,5Cu относительно исходных образцов после полирования. В результате проведенных экспериментов

была показана возможность увеличения предела выносливости при использовании ДСО на 23%, а при использовании ЛУО - на 35% относительно неупрочненного образца.

В работе авторы [54] исследовали влияние ЛУО на долговечность лопатки компрессора ГТД, изготовленной из титанового сплава Ti17. Минимальная толщина пера лопатки составляла 0,5 мм на входной кромке и 0,4 мм на выходной кромке, наибольшая толщина - 2,2 мм.

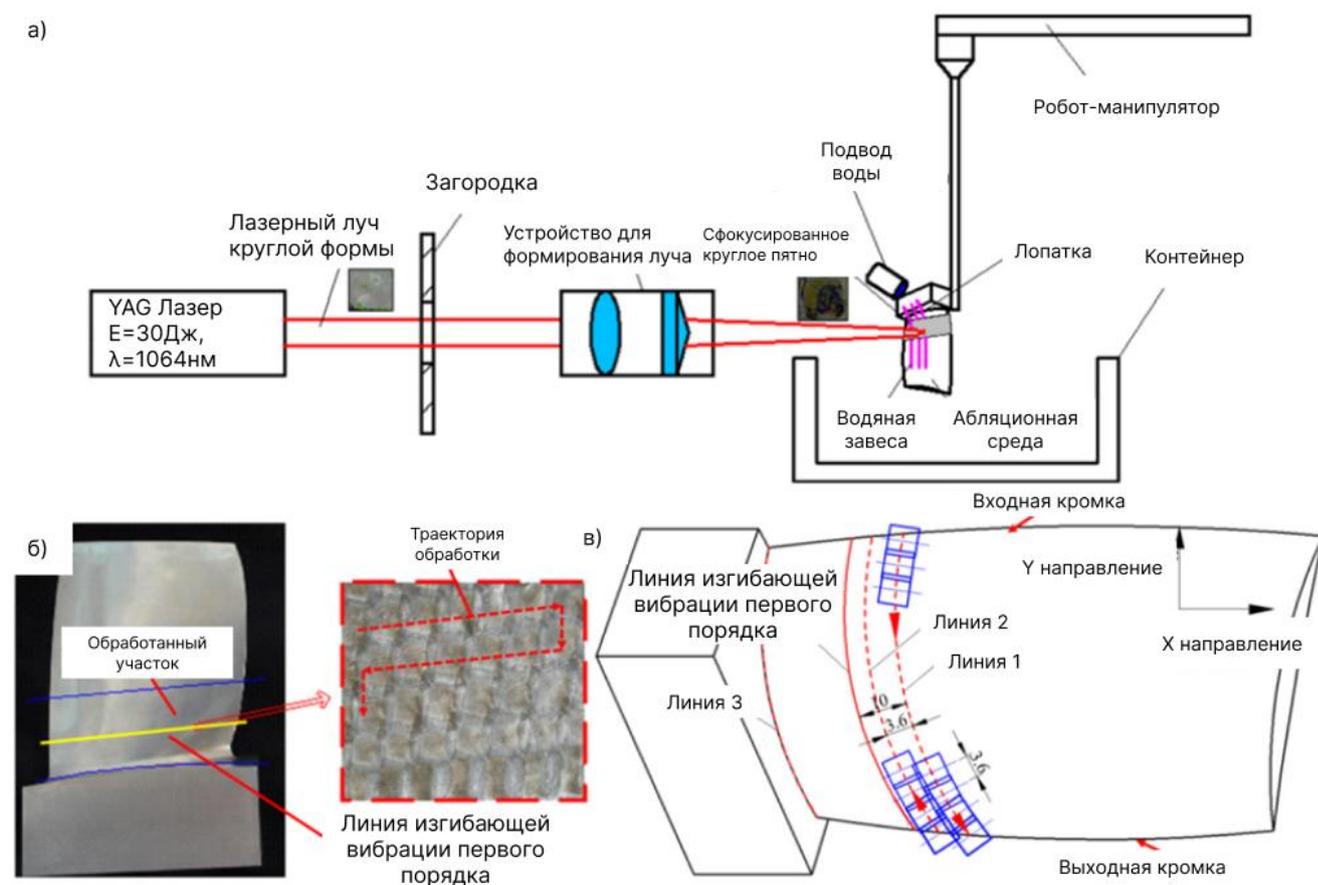


Рисунок 1.10 – Схема эксперимента. а) Установка лазерного ударного упрочнения; б) Зона обработки; в) стратегия обработки [54]

Испытания на долговечность лопаток из титанового сплава Ti17 производилось как на обработанных лопатках, так и необработанных. Результаты усталостных испытаний при фиксированном нагружении в 480 МПа представлены на рисунке 5. Помимо этого, были произведены измерения остаточных напряжений на «спинке» и «корыте» лопаток после ЛУО, результаты которых представлены на рисунке 1.11.

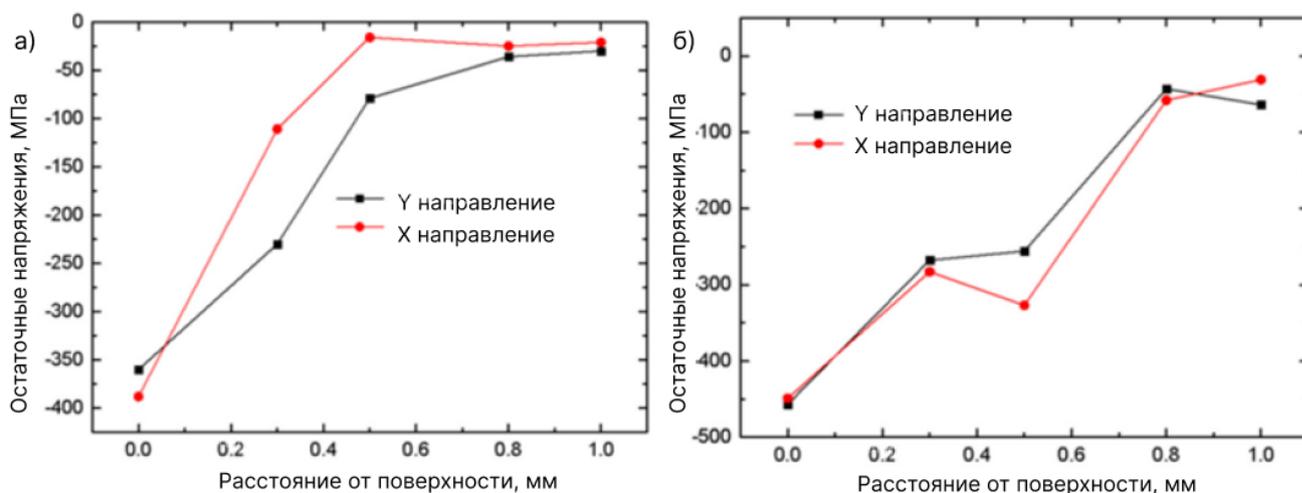


Рисунок 1.11 – Результаты измерения остаточных напряжений.  
а) «спинка», б) «корыто»

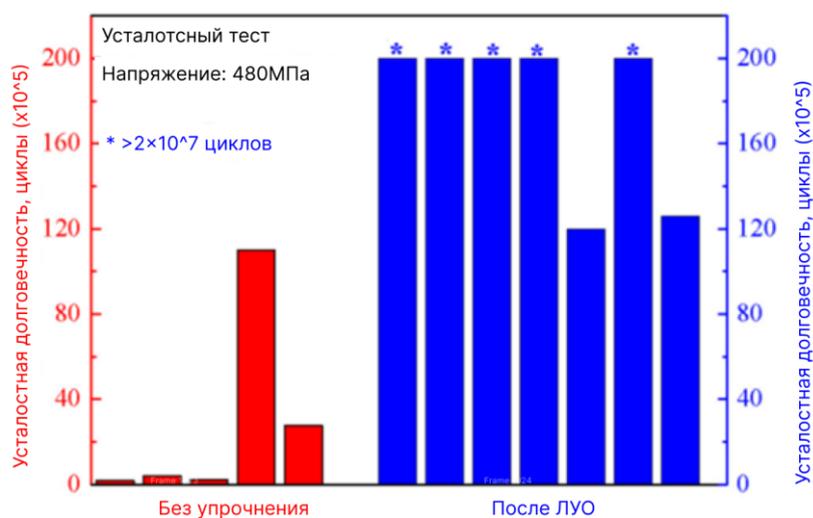


Рисунок 1.12 – Результаты испытаний лопаток на долговечность.

Из рисунка 1.12 хорошо видно, что долговечность лопаток, обработанных методом ЛУО, значительно выше, чем лопаток без обработки. Долговечность 3-х лопаток без упрочнения составила  $1,7-3,9 \times 10^5$ . Долговечность двух других лопаток составила  $1,1 \times 10^7$  и  $2 \times 10^6$  циклов соответственно. Причем долговечность 5-ти лопаток, обработанных ЛУО достигла  $2 \times 10^7$  после чего не последовало разрушения, а долговечность оставшихся обработанных лопаток достигла максимального уровня для одной единственной лопатки, показавшая наилучшие характеристики по испытаниям без обработки.

Авторы работы [55] рассматривали влияние различных методов ППД на повышения предела выносливости титановой лопатки первой ступени компрессора

ГТД. В качестве исследуемых методов ППД использовались: ЛУО, ЛУОБП и малопластичное выглаживание. Сравнительные исследования производились как с внесенным концентратором напряжения, так и без него. По результатам проведенных исследований авторы делают вывод о том, что ЛУОБП не снижает исходного предела выносливости лопатки, в отличие от других методов ППД, а также повышает предел выносливости лопатки с забоиной на 15% относительно необработанной лопатки.

## 1.6 Выводы к главе 1

Таким образом, как показал проведенный анализ, проблема усталостного разрушения элементов конструкции ГТД является одной из самых острых с точки зрения обеспечения ресурса и надежности при эксплуатации ДЛА и ЭУ, т. к. затрагивает практически все важнейшие ДСЕ, включая лопатки, валы, диски, элементы камеры сгорания и др.

Для повышения стойкости к усталостному разрушению ДСЕ отечественных ГТД применяют дробеударные методы, 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. Обработка кромок рабочих лопаток является важнейшей технологической задачей, т.к. в процессе эксплуатации повреждения от попадания посторонних предметов значительно сокращает срок службы лопаток и может привести к их отрыву во время полета, а следовательно, к разрушению всего двигателя.

Исследователями показано, что технология ЛУО для титановых сплавов позволяет значительно повысить предел выносливости и долговечность, но режимы обработки различных титановых сплавов могут варьироваться, а кроме того, при разработке технологического процесса детали, возникают ряд сопутствующих задач, связанных с особенностями напряженно-деформированного состояния конкретного вида лопатки, технологического процесса её получения и

режимов эксплуатации. Кроме того, в публикациях практически отсутствуют систематические сведения обрабатываемости отечественных титановых сплавов.

В связи с вышеизложенным, **объектом исследования в работе выбран** технологический процесс лазерной ударной обработки рабочей лопатки компрессора низкого давления ГТД из титанового сплава.

**Целью исследования** является 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.

## **ГЛАВА 2. ОСНОВНЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ И ФИЗИЧЕСКАЯ КАРТИНА ПРОЦЕССА ЛАЗЕРНОЙ УДАРНОЙ ОБРАБОТКИ**

### **2.1 Развитие представлений о явлении повышения давления в ограниченном пространстве у твердого тела от воздействия лазерного излучения**

После изобретения лазера первым из ключевых событий, приведших в последствии к открытию способа лазерной ударной обработки, были работы проведенные Аскарьяном и Морозом в Физическом институте им. П.Н. Лебедева в 1962 г. [5]. В проведенном эксперименте было измерено давление, возникающее при воздействии лазерного излучения высокой интенсивности на металлическую поверхность. Было обнаружено, что измеренное давление по крайней мере на несколько порядков больше, чем расчетное фотонное давление. Они справедливо пришли к выводу, что фактически измерили давление, возникающее в результате абляции металлического материала и расширения плазмы, и предложили использовать этот эффект для ускорения космических летательных аппаратов.

Два года спустя Neuman в лаборатории центра NASA Ames Research Center исследовал величину ударной волны при варьировании интенсивности лазерного излучения для различных металлов [56]. Он отметил, что короткий «гигантский» лазерный импульс длительностью 50 нс создавал значительно большее давление, чем «обычный» лазерный импульс длительностью 1 мкс и энергией, в 5 раз превышающей «гигантский» импульс. Это позволило впоследствии сделать выводы о значительном влиянии на пиковое давление ударной волны плотности мощности лазерного излучения. Вскоре эти выводы были подтверждены рядом экспериментальных и теоретических исследований [57-61]. Надо отметить, что все представленные работы проводились в условиях вакуума во избежание диэлектрического пробоя воздуха при высокой плотности мощности подводимого лазерного излучения и позволили достигать высоких значений давления ударной волны, что, с другой стороны, служило достаточно большим препятствием для использования в прикладных задачах.

Ключом к устранению этого препятствия стало открытие, сделанное Anderholm в Sandia Laboratories в 1968 г. [62,63]. Его работа заключалась в напылении алюминиевой пленки на кварцевый диск толщиной 6 мм и последующим облучением такой мишени через прижатый к алюминиевой пленке второй кварцевый диск той же толщины и измерении пикового давления с помощью пьезоэлектрического датчика. Полученное значение давления составило величину в 3,4 ГПа при облучении лазерным излучением с плотностью мощности порядка 1,9 ГВт/см<sup>2</sup>. Этот эксперимент наглядно продемонстрировал возможность достижения высоких давлений при плотностях мощности, которые не приводили к диэлектрическому пробое на воздухе благодаря искусственному ограничению плазмы у поверхности твердого тела.

В 1970 г. Миркин в МГУ им. М.В. Ломоносова впервые обнаружил влияние ударных волн, индуцированных короткими импульсами лазерного излучения, на микроструктуру и твердость поверхностного слоя металлов, наблюдая двойникование зерна феррита на глубине порядка 0,5 мм от поверхности воздействия лазерного излучения [6].

В следующем году Metz и Schmidt в U.S. Naval Research Laboratory исследовали воздействие лазерного излучения плотностью мощности 0,18 ГВт/см<sup>2</sup> с длительностью импульса 35 нс на отоженных никелевых и ванадиевых фольгах толщиной 50 мкм [64]. После повторного отжига облученных фольг после лазерного удара они наблюдали образование вакансионных пустот в никелевой фольге и вакансионных петель в ванадиевой фольге, которые свидетельствовали о высокой плотности дислокаций, созданных ударной волной.

В период 1968–1972 гг. были проведены важные исследования по подбору прозрачных слоев для увеличения пикового давления в зоне воздействия лазерного излучения, наблюдаемое Anderholm.

O'Keefe и Skeen из TRW Systems Group исследовали использование тонких летучих покрытий из силиконового клея RTV и Duso на алюминиевых мишенях толщиной 76 мкм [61]. Для 50 нс импульса плотностью мощности 1,8 ГВт/см<sup>2</sup>

пиковое давление при использовании силиконового клея RTV было в 8 раз выше, а клея Duso в 15 раз по сравнению с экспериментами без использования покрытия.

В 1972 году Fairland и Mallozzi из Battelle Memorial Institute провели эксперименты по обработке алюминиевого сплава 7075 при плотностях мощности 1,2-2,2 ГВт/см<sup>2</sup> с длительностью импульса 32 нс и использованием в качестве прозрачного слоя, ограничивающего плазму, силиката натрия [7]. В результате удалось увеличить модуль упругости алюминиевого сплава на 18-23%. Развитие этих работ привело к получению первого патента по лазерной ударной обработке – «Изменение свойств материала с помощью ограниченной плазмы» [65].

В работе [66] было впервые проведено моделирование распространения упругопластической ударной волны на поверхности мишени, которое показало, что на фронте ударной волны наблюдается превышение предела упругости Гюгонио (HEL), которое ведет к пластической деформации материала и изменению механических свойств обрабатываемой поверхности.

В последующие несколько лет исследователями была выявлена [67-69] важная взаимосвязь между лазерным импульсом и эпюрой действующего давления, форма которого оказывает значительное влияние на распределение механических свойств по глубине обработанного участка материала, и предприняты попытки моделирования ударной волны, инициированной лазерным излучением в программном комплексе LILA.

Получение первых положительных результатов по упрочнению образцов из различных металлических материалов, привело к появлению множества экспериментальных работ в период 80-х и 90-х годов, направленных, главным образом, на определение физико-химических, механических и эксплуатационных свойств материалов [70-75].

## **2.2 Феноменологическая модель лазерной ударной обработки**

Для проведения процесса лазерной ударной обработки в настоящее время используется схема, представленная на рисунке 2.1: поверхность обрабатываемого материала покрывается сначала поглощающим слоем, а затем ограничивающим. В

качестве поглощающего (абляционного) покрытия для предотвращения повреждения поверхностного слоя материала детали обычно используется черная краска, ПВХ лента или алюминиевая фольга. В качестве ограничивающего слоя для увеличения давления и продолжительности ударной волны часто применяется вода.

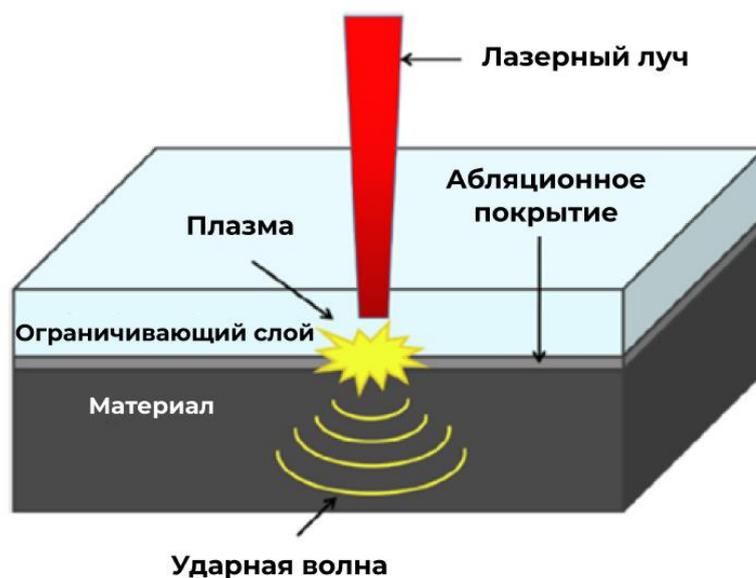


Рисунок 2.1 – Схема лазерной ударной обработки [76]

Лазерное излучения с энергией  $\sim 0,5\text{--}10$  Дж и длительностью импульса  $\sim 8\text{--}100$  нс направляется на обрабатываемую поверхность. Излучение проходит через прозрачный ограничивающий слой и попадает на покрытие, которое поглощает энергию лазерного излучения, происходит его испарение и нагрев газа с образованием расширяющейся плазмы и фронта ударной волны. Из-за наличия ограничивающего слоя ударная волна воздействует на поверхность металла через покрытие и преобразуется в упругопластическую волну, проникающую вглубь материала детали. Когда давление упругопластической волны превышает динамический предел упругости Гюгонио (HEL), происходит пластическая деформация, которая приводит к изменениям микроструктуры, таким как искажение решетки, образованием дислокаций и измельчению зерна в поверхностном слое материала [76].

Для оценки влияния давления плазмы в ограниченном пространстве в зависимости от параметров лазерного излучения, авторами работы [77] была

предложена достаточно простая математическая модель процесса. На рисунке 2.2 представлена схема плазмообразования при лазерной ударной обработке.

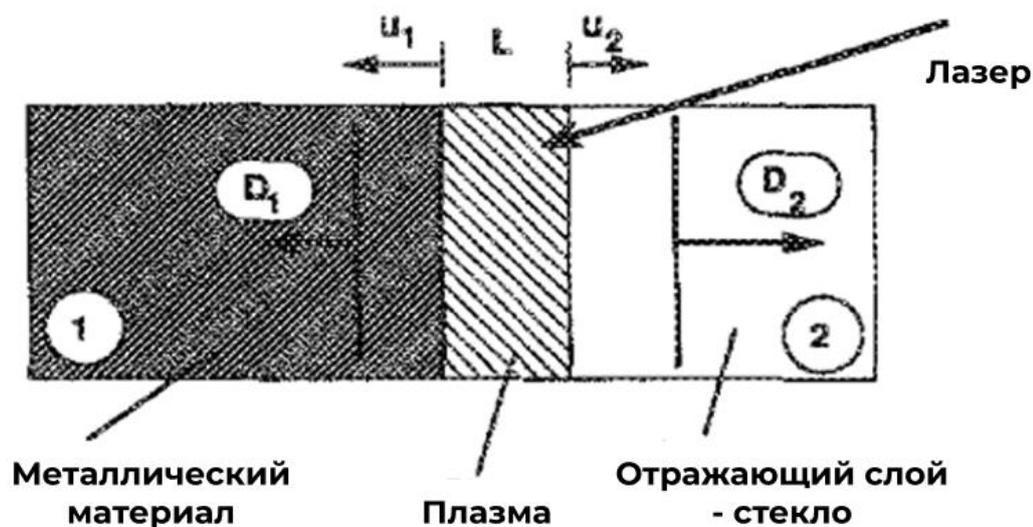


Рисунок 2.2 – Схема плазмообразования при лазерной ударной обработке [77]

Модель предусматривает только одномерное решение задачи по расширению плазмы. Лазерная энергия попадает на границу раздела между обрабатываемым материалом (1) и ограничивающим слоем (2). Поверхность материала покрытия нагревается, испаряется и ионизируется. Удалению ионизированного газа препятствует прозрачная ограничивающая среда, соответственно, давления газа увеличивается, и плазма расширяется, что приводит к увеличению зазора между металлической деталью и ограничивающим слоем.

Предполагается, что давление плазмы достаточно велико для генерации двух ударных волн в средах: в металле и в ограничивающей среде. Следовательно, смещение межфазной стенки (толщина плазмы) будет происходить только за счет движения плазмы за двумя ударными волнами, распространяющимися внутри двух материалов. Тогда  $L(t)$  – толщина плазмы в момент времени  $t$ , можно выразить через уравнение (2.1), где  $u$  – скорости распространения плазмы за двумя ударными волнами.

$$L(t) = \int_0^t [u_1(t) + u_2(t)] dt \quad (2.1)$$

В свою очередь давление плазмы можно выразить через уравнение (2.2), где  $i=1$  или  $2$ ;  $\rho$ ,  $D$  и  $Z$  - плотность материала, скорость ударной волны и ударный импеданс  $i$ -го материала, соответственно.

Связь между импедансами авторы работы [27] выражают при помощи уравнения (2.3).

$$P = \rho_i D_i u_i = Z_i u_i \quad (2.2)$$

$$2/Z = 1/Z_1 + 1/Z_2 \quad (2.3)$$

Тогда толщину плазмы (1) с учетом уравнение (2) и соотношения (3) можно представить следующим образом:

$$\frac{dL(t)}{dt} = \frac{2}{Z} P(t) \quad (2.4)$$

Стоит отметить, что поглощенная энергия лазерного излучения идет на увеличение внутренней энергии плазмы, а также на работу по ее расширению и как результат – увеличению зазора  $L$  (рисунок 2.2).

В течение временного интервала  $dt$  толщина плазмы увеличится на  $dL$ . Тогда приходящая энергия на единицу поверхности  $I dt$ , которая будет использоваться для увеличения внутренней энергии  $E(t)$  (Джоуль на единицу объема) и будет использоваться как работа сил давления  $P(t)dL$ .

Тогда плотность мощности  $I(t)$  можно записать при помощи следующего уравнения:

$$I(t) = P(t) \frac{dL}{dt} + \frac{d[E_i(t)L]}{dt} \quad (2.5)$$

Также авторы считают, что только постоянная доля  $\alpha$  внутренней энергии  $E_i(t)$  представляет собой тепловую энергию  $E_t(t)$ , причем доля  $(1 - \alpha)$  используется для ионизации газа.

Что касается идеального газа, то давление  $P$  связано с тепловой энергией  $E_t$  следующим соотношением:

$$P(t) = \frac{2}{3} E_T(t) = \frac{2}{3} \alpha E_i(t) \quad (2.6)$$

Тогда уравнение (5) с учетом выражения (6) преобразуется следующим образом:

$$I(t) = P(t) \frac{dL(t)}{dt} + \frac{3}{2\alpha} \frac{d}{dt} [P(t)L(t)] \quad (2.7)$$

Далее, решая уравнения (4) и (7), с учетом граничных условий, что при времени  $t=0$ ,  $L(0) = 0$ , авторы привели решение к следующему виду:

$$P = 0,1 \sqrt{\frac{\alpha}{2\alpha + 3}} \sqrt{Z} \sqrt{I} \quad (2.8)$$

$$L(\tau) = 2 * 10^4 P \tau * \frac{1}{Z} \quad (2.9)$$

Таким образом, 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 плотности мощности лазерного излучения, соответственно, чем выше мощность, приходящая на единицу площади, тем выше давление, создаваемое плазмой. Величину плотности мощности можно регулировать различными способами как, например, увеличением энергии, уменьшением диаметра обрабатываемого пятна или длительностью импульса лазерного излучения.

Также стоит отметить, что толщина плазменного слоя напрямую зависит от давления и длительности импульса лазерного излучения  $\tau$  (нс). Если при определенном уровне  $\tau$ , величина плазменного слоя может быть слишком велика, то это повлечет за собой термические дефекты при обработке детали.

Исходя из всех вышеперечисленных факторов, процесс лазерной ударной обработки зависит от множества различных параметров, которые следует учитывать для каждого конкретного случая обработки.

### 2.3 Разновидности лазерной ударной обработки

Технология лазерной ударной обработки имеет несколько различных направлений развития. Среди них можно выделить классическую лазерную ударную обработку с применением абляционного покрытия (ЛУО), лазерную ударную обработку без использования абляционного покрытия (ЛУОБП),

«теплую» лазерную ударную обработку (ТЛУО). Кроме того, активно развивается направление, связанное с применением фемтосекундных лазеров для лазерного ударного упрочнения (ФЛУОБП) [76]. Классификация методов лазерного ударного упрочнения приведена на рисунке 2.3.



Рисунок 2.3 – Классификация методов лазерного ударного упрочнения

Так, например, особенностью процесса ТЛУО является то, что обрабатываемая поверхность металла предварительно нагревается до температур 150–300 °С и подвергается процессу лазерного ударного упрочнения [78]. Ввиду высокой температуры в процессе обработки вода уже не может быть использована в виде ограничивающего слоя. Поэтому в качестве данной среды используют стекло [79] или масло [80]. Главной идеей создания такого метода обработки стало получение высоких прочностных характеристик металлов и сплавов без потери пластичности. Однако использование нагревательных элементов и ограничивающих слоев из стекла или масла приводит к определенным трудностям при внедрении этого метода на производстве, ввиду чего он не получил широкого распространения на промышленных предприятиях.

Основным недостатком классического метода лазерной ударной обработки является требование наличия защитного слоя для предотвращения термических повреждений поверхности обрабатываемого образца. В процессе обработки детали сложной геометрической формы возникают проблемы с нанесением абляционных покрытий, что снижает эффективность метода. Для решения этой проблемы был предложен метод ЛУОБП [53]. В данном варианте лазерного ударного упрочнения поглощающий слой отсутствует, что позволяет импульсному лазерному лучу низкой энергии непосредственно облучать образец, что приводит к испарению и ионизации поверхности и образованию плазмы. Плазма продолжает поглощать

лазерную энергию до тех пор, пока не сформируется ударная волна, которая распространяется по материалу и вызывает изменения микроструктуры и генерирует остаточные сжимающие напряжения в поверхностном слое детали.

Из-за отсутствия поглощающего слоя лазерный луч непосредственно облучает поверхность мишени, в результате чего происходит два процесса: испарение поверхности, а также ее плавление, что приводит к образованию расплавленных капель и наплывам расплавленного металла. Результаты термического воздействия затвердевают на поверхности детали под действием охлаждающего эффекта потока воды, что увеличивает шероховатость поверхности.

Также некоторые исследования подтверждают [53,81-84], что метод ЛУОбП может обеспечивать значительное упрочнение, также, как и ЛУО, но его использование связано с образованием поверхностного окисления и микротрещин, а также с возможностью легкого возникновения термической абляции поверхностного слоя материала.

Более высокая шероховатость, окисление поверхности и появление трещин могут значительно снизить усталостные характеристики детали. Используя меньшую энергию лазера (менее 0,5 Дж), можно уменьшить тепловое повреждение, и снизить эффект чрезмерного возрастания шероховатость поверхности. В работах [81,82] авторы исследовали влияние ЛУОбП на свойства алюминиевого сплава Al 6061-T6. По результатам проведенных исследований, авторы не обнаружили расплавленного слоя или микротрещин в подповерхностном слое материала, таким образом утверждая, что плавление затрагивает только неглубокие участки относительно поверхности материала. ЛУОбП нашла широкое применение для обработки сварных швов. Так в работе [83] авторы продемонстрировали, что ЛУОбП может эффективно создавать слой остаточных сжимающих напряжений вокруг сварных соединений, тем самым значительно продлевая их усталостную долговечность.

Благодаря высокой мгновенной интенсивности излучения и небольшой зоне воздействия нагрева ФЛУОбП может эффективно упрочнять обрабатываемые материалы без необходимости в ограничивающем или поглощающем слое. В

частности, интенсивность лазерного излучения в исследовании [85] составляет порядка  $100\ 000\ \text{ГВт/см}^2$ , по сравнению с  $10\ \text{ГВт/см}^2$  для ЛУО. Более того, благодаря применению фемтосекундного лазерного импульса, его время воздействия прекращается еще до образования плазмы. Таким образом, лазерный луч не будет взаимодействовать с плазмой, и эффективность обработки может быть повышена. Помимо этого, ФЛУОБП обычно обладает высокой точностью, в виду того, что создаваемая интенсивность излучения генерируется на очень маленьком участке поверхности, таким образом, данный метод подходит для обработки микро-областей.

К недостаткам ФЛУОБП относят меньшую глубину проникновения и величину остаточных сжимающих напряжений по сравнению с ЛУО. Поскольку на сегодняшний момент количество исследований, посвященных применению ФЛУОБП все еще мало, многие аспекты этого процесса, включая механизм взаимодействия фемтосекундного лазерного излучения с поверхностью металла плохо изучены и требуют дальнейшей проработки.

Таким образом классический метод ЛУО и ЛУОБП являются наиболее распространенными методами, применяемыми в промышленности в настоящее время.

## **2.4 Необходимые составляющие процесса лазерной ударной обработки.**

Эффективность процесса лазерной ударной обработки зависит от множества факторов (рисунок 2.4), таких как обрабатываемый материал, тип и параметры лазерной системы, параметров лазерного излучения, а также от свойств поглощающих и ограничивающих слоев.

Лазерная система	Форма лазерного пятна	Абляционное покрытие	Отражающий слой
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nd: стекло</li> <li>• Nd: YAG</li> <li>• Nd: YVO<sub>4</sub></li> <li>• Yb: YAG</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Круглое пятно</li> <li>• Квадратное пятно</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Алюминиевая лента</li> <li>• Медная лента</li> <li>• ПВХ лента</li> <li>• Адгезионный раствор на основе цинка</li> <li>• Порошковые краски</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Вода</li> <li>• Различные виды стекол</li> <li>• Силиконовая резина</li> </ul>

Рисунок 2.4 – Необходимые составляющие процесса лазерной ударной обработки

В качестве инструмента для лазерной ударной обработки используются лазерные системы с модуляцией добротности на основе стекла легированного неодимом (Nd:стекло), иттрий-алюминиевый гранат легированный неодимом (Nd:YAG) или иттербием (Yb:YAG), ортованадат иттрия легированный неодимом (Nd:YVO<sub>4</sub>). При этом длина волны может варьироваться от инфракрасного до зеленого диапазона, а длительность лазерного импульса - от 10 до 100 нс [86,87] при энергии в импульсе 1-100 Дж [86].

Важным параметром при обработке является форма и площадь лазерного излучения, падающего на поверхность. В совокупности с возможностью варьирования энергии этот параметр определяет интенсивность или плотность мощности лазерного излучения (ГВт/см<sup>2</sup>), а также обеспечивает производительность и влияет на картину распределения НДС в поверхностном слое. Наиболее широкое применение нашли лазерные пятна с круглой [88-91] и квадратной [92-95] формой. Первые – достаточно просты в аппаратной реализации, но не рациональны с точки зрения стратегии обработки поверхности для покрытия всей площади детали; вторые – требуют более дорогой специальной оптики, но при этом обеспечивают более простой подход к выбору стратегии обработки.

Другой важный параметр в технологии ЛУО – вид и материал поглощающего (абляционного) покрытия, которое предотвращает плавление поверхности металла. Обычно в качестве такого покрытия используются алюминиевая лента [96-99], медная пленка [100], ПВХ лента [101-103], адгезионный раствор на основе цинка [104] или черная краска [86,88,105].

Плазма, образующаяся в результате испарения абляционного слоя, идет на генерацию ударной волны, которая для большей эффективности процесса перенаправляется в сторону поверхности детали за счет использования отражающего слоя. В качестве которого используются вода [88,87,96,105,102], кварц [101,106], стекло [101,107,79], стекло К9 [108], свинцовое стекло [101], силиконовая резина [101] и др. Наибольшее применение в технологии, по сравнению со стеклом и кварцем, нашла вода, несмотря на меньшую эффективность отражения, ввиду простоты формирования ограничивающего слоя при омывания сложнофасонной детали.

## **2.5 Влияние лазерной ударной обработки на свойства поверхностного слоя и сравнение с дробеструйными методами упрочнения**

### **2.5.1 Влияние обработки на шероховатость поверхностного слоя**

Известно, что шероховатость, непосредственно влияет на эксплуатационные характеристики деталей ГТД: чем выше значение шероховатости, тем больше концентраторов напряжения образуются на поверхности, что негативно влияет на усталостные характеристики деталей.

В работах [109,53] авторами был исследован эффект применения различных методов ППД (дробеструйная обработка (ДСО), ультразвуковое упрочнение микрошариками (УЗО) и лазерная ударная обработка без покрытия (ЛУОБП)) на шероховатость поверхностного слоя титановых сплавов Ti-6Al-4V (рисунок 2.5), Ti-2.5Cu. Как показал сравнительный анализ, наибольшая шероховатость поверхности достигается при использовании ЛУО без покрытия, что связано с большой плотностью мощности и процессами плавления поверхности металла.

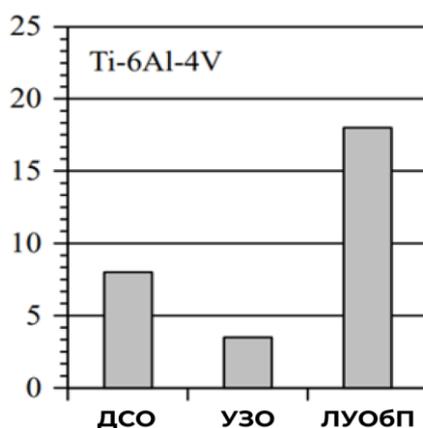


Рисунок 2.5 – Шероховатость поверхности образцов после обработки различными методами ППД [109]

В работе [46] авторы сравнивали шероховатость поверхностного слоя титанового сплава Ti-6Al-4V после ЛУО и ДСО, а также их комбинаций с различными интенсивностями воздействия. Результаты измерения шероховатости поверхности приведены на рисунке 2.6.

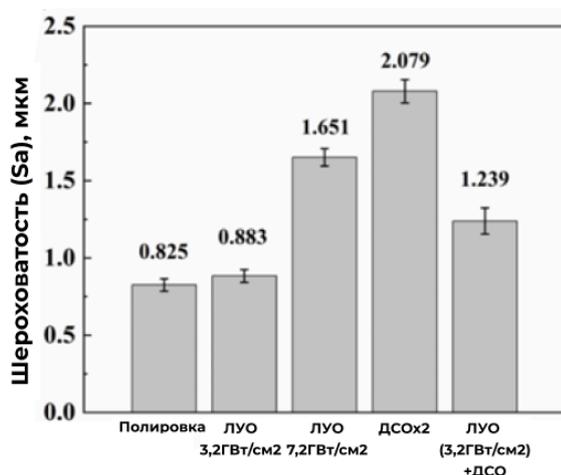


Рисунок 2.6 – Шероховатость поверхности титанового образца после применения различных методов ППД и их комбинаций.[46]

Применение ЛУО с интенсивностью в 3,2ГВт/см<sup>2</sup> практически не приводит к увеличению шероховатости образца, при интенсивности лазерного излучения в 7,2ГВт/см<sup>2</sup> наблюдается увеличение шероховатости с 0,825 мкм до 1,651 мкм, а максимальные значения шероховатости характерно для дробеударной обработки двойной интенсивности.

Похожие результаты приводят авторы работы [110] для титанового сплава Ti17 после лазерной ударной обработки и дробеструйного упрочнения. Так при

исходной шероховатости  $R_a = 0,07$  мкм, после ЛУО шероховатость составила  $0,124$  мкм, а для ДСО –  $1,21$  мкм.

В работе [22] авторы исследовали влияние лазерного ударного упрочнения на свойства титанового сплава ВТ6 с использованием алюминиевого абляционного покрытия. В частности, исследования по шероховатости показали, что обработка в режимах  $3,8 \text{ ГВт/см}^2$ ,  $5,3 \text{ ГВт/см}^2$ ,  $8,5 \text{ ГВт/см}^2$  не приводит к увеличению шероховатости, а её значение сохраняется на уровне исходных образцов  $R_a = 0,83$  мкм.

Таким образом, в работах показано, что наиболее благоприятные режимы обработки поверхности титановых сплавов с точки зрения влияния на шероховатость исходной поверхности реализуются при использовании технологии ЛУО с абляционным покрытием.

## 2.5.2 Влияние обработки на микроструктуру

В работе [110] авторы исследовали микроструктуру поверхностного слоя титанового сплава Ti17 после лазерной ударной обработки, дробеструйной обработки, а также их комбинации. Авторы показывают идентичные брэгговские пики (рисунок 2.7) в сплаве Ti17 характерные для  $\alpha$ -фазы и  $\beta$ -фазы до и после ЛУО и ДСО.

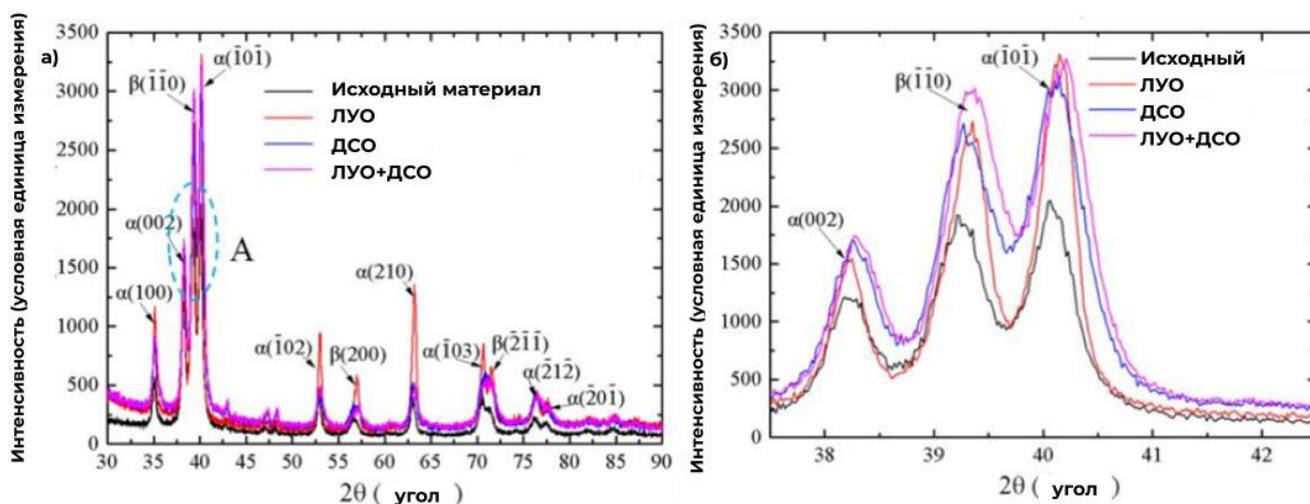


Рисунок 2.7 - Рентгенограммы поверхности сплава Ti17, (а) степень дифракции  $30\sim 90$ , (б) величина [A] в (а)

Однако брегговский дифракционный пик увеличился от исходного состояния после обработки ЛУО, ДСО и комбинированного метода. Также было обнаружено, что в сплаве Ti17 наблюдается уширение пиков. Такие результаты могут быть объяснены измельчением зерен, деформацией кристаллической решетки и увеличением микронапряжений при обработке методом ЛУО, ДСО и комбинированным методом. Кроме того, максимальная степень уширения брегговского пика у ДСО выше, чем у ЛУО. Это означает, что поверхность металла после ДСО имеет более измельченное зерно, чем поверхность после ЛУО.

Аналогичный результат представлен и в работе других авторов [111]. Исследования показали, что применение лазерной ударной обработке на титановом сплаве Ti-6Al-4V приводит к измельчению зерна.

В работе [112] исследовалось влияние лазерной ударной обработки на свойства ПС образцов из титанового сплава Ti-17. Авторы утверждают, что во время ЛУО не происходило фазовых превращений, а также не образовывались новые фазы. Помимо этого, ЛУО приводит к деформации кристаллической решетки и образованию дислокаций, вызванных сильной пластической деформацией поверхностного слоя образцов. Плотность дислокаций вызванных ЛУО в сравнении с необработанным образцом представлена на рисунке 2.8.

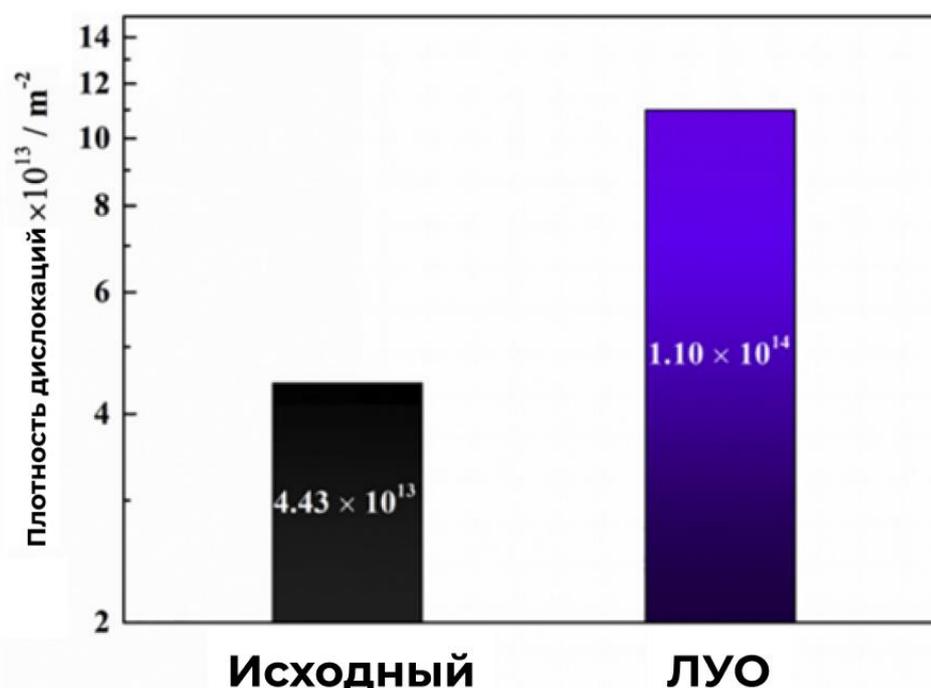


Рисунок 2.8 – Плотность дислокаций образца без обработки и после ЛУО [112]

Также авторы произвели оценку размеров зерна до обработки, так и после ЛУО. На рис. 2.9а и 2.9б представлены частотные гистограммы доли площади в зависимости от размера зерен в исходных образцах и образцах после ЛУО.

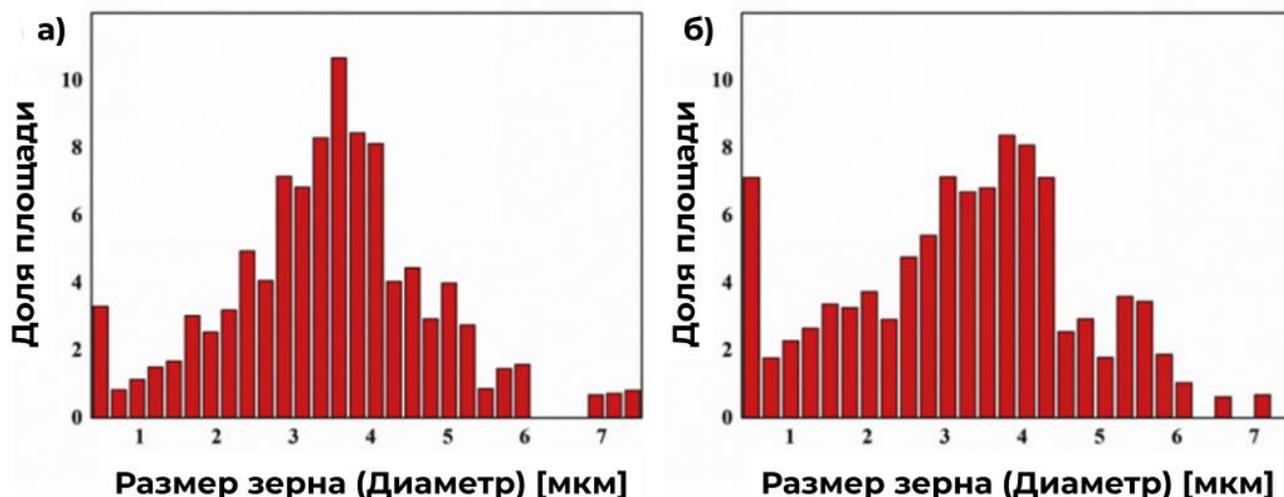


Рисунок 2.9 – Доля площади в зависимости от размера зерна [112]

а) Исходный; б) После ЛУО

Небольшое изменение размера зерен может быть объяснено тем, что исходные зерна были слишком малы, чтобы обеспечить значительную возможность измельчения, а также тем, что высокий уровень дефектности титанового сплава Ti-17 усилил процесс измельчения зерен с размером до 2 мкм. Большинство зерен распределены в диапазоне от 1 до 6 мкм как в исходных образцах, так и в образцах с ЛУО. В исходном образце только 5,3% зерен были меньше 1 мкм, в то время как в образце после ЛУО этот процент увеличился до 11,2%.

Таким образом можно сказать, что ЛУО приводит к деформации кристаллической решетки титановых сплавов, и как следствие, приводит к образованию дислокаций с высокой концентрацией, а также к измельчению зерна без образования новых фаз.

### 2.5.3 Влияние обработки на микротвердость поверхностного слоя

Влияния различных видов обработки на микротвердость поверхности титанового сплава Ti-2.5Cu проводили в работе [53]. Исследования показали, что

степень наклепа повышается при использовании всех ППД методов: у ЛУОБП на 8%; у ДСО на 30%; у УЗО на 8%.

В работе [110] авторы исследовали микротвердость поверхностного слоя по глубине образца из сплава Ti17 после лазерной ударной обработки, дробеструйной обработки и комбинированного метода. Результаты исследований приведены на рисунке 2.10.

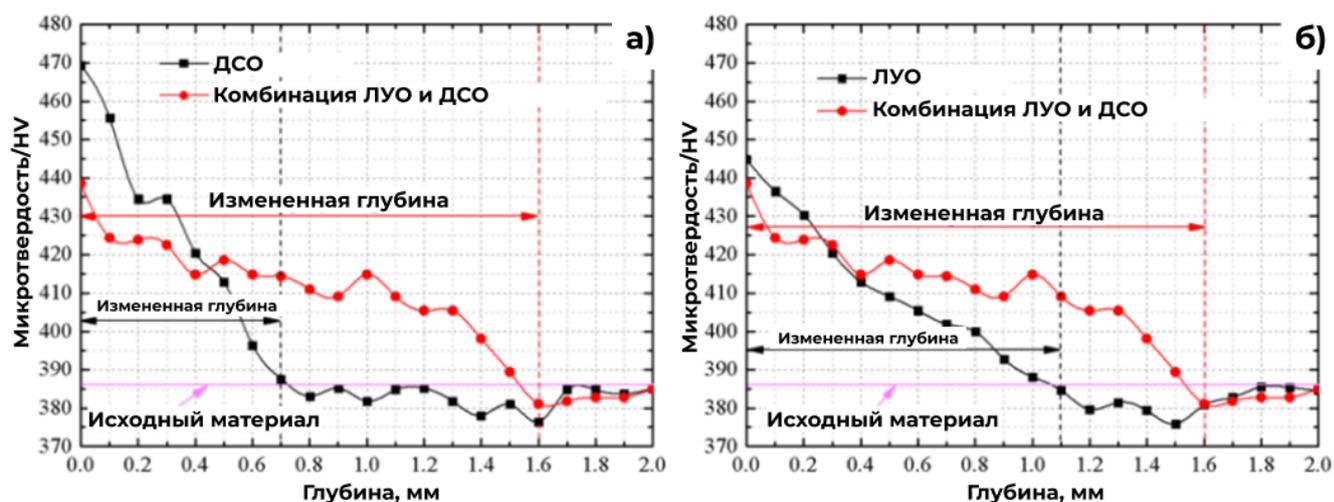


Рисунок 2.10 – Распространение микротвердости по глубине образца после различных методов упрочнения [110]

Наибольшее значение микротвердости на поверхности образца присуще методу ДСО, причем степень наклепа поверхности составляет 22%. ЛУО приводит к меньшей степени наклепа на поверхности ~ 15,5%. Причем характерная глубина измененного поверхностного слоя для ЛУО выше, чем для дроби. Глубина распространения для ЛУО составляет 1,6 мм, а у ДСО - 0,7 мм.

В работе [113] авторы исследовали влияние лазерного ударного упрочнения с интенсивностью  $11,5 \text{ ГВт/см}^2$  на микротвердость поверхностного слоя. В качестве исследуемого материала использовался титановый сплав Ti-6Al-7Nb, а в качестве абляционного покрытия использовалась черная ПВХ лента. Результаты проведенных исследований представлены на рисунке 2.11. Максимальная степень наклепа при обработке с 3 проходами лазерного излучения по образцу составила – 23,3%.

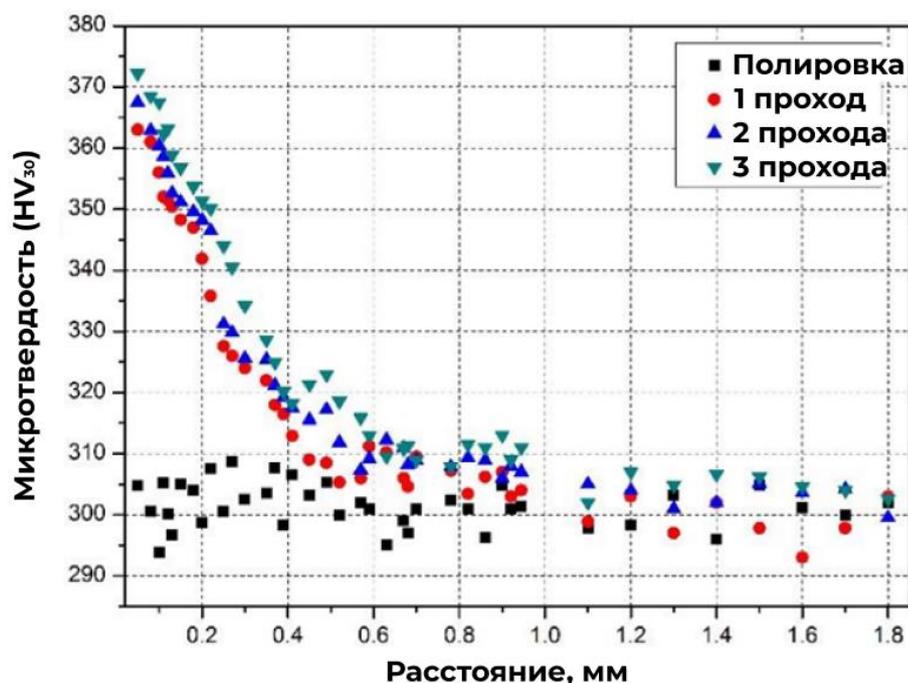


Рисунок 2.11 – Распространение микротвердости по глубине образца после лазерного ударного упрочнения с различной [113]

В работе [114] авторы исследовали влияние ЛУО на микротвердость ПС титанового сплава Ti-5Al-2Sn-2Zr-4Mo-4Cr. Обработка производилась в 1, 3, 5 проходов. Максимальная степень наклепа составила 17% для 5 проходов, а минимальная 12,7% для 1 прохода.

В работе [115] авторы исследовали влияние УЗУ на микротвердость титанового сплава Ti-6Al-4V. Эксперименты проводились с различными временами обработки образцов: 480 с, 960 с, 1920 с. Максимальная степень наклепа поверхности образца соответствует наиболее длительному времени обработки и составляет 25%, а наименьшая степень наклепа соответствует минимальному времени обработки – 16%.

Таким образом, большинство исследований влияния ЛУО на степень наклепа показало преимущества использования этого метода в связи с более низкими значениями по сравнению с дробеударными методами, что позволяет рассчитывать на лучшие усталостные характеристики за счет меньшей хрупкости поверхностного слоя деталей.

## 2.5.4 Влияние обработки на остаточные напряжения

Остаточные напряжения являются важнейшим параметром поверхностного слоя, который определяет стойкость детали к усталостному разрушению. В случае, если в процессе обработки на поверхности детали формируются растягивающие остаточные напряжения, это может привести к резкому снижению предела выносливости за счет суперпозиции внешних и внутренних напряжений, которые могут превысить предел текучести материала в определенных режимах работы детали. Поэтому для деталей, работающих в условиях усталости, критически важно обеспечивать благоприятный НДС за счет формирования сжимающих остаточных напряжений в ПС.

В работе [109] авторами было исследовано влияние ДСО, УЗУ и ЛУОБП на ОН поверхностного слоя титанового сплава Ti-6Al-4V. Авторы показали, что применение ЛУОБП на титановом сплаве дает наибольшую глубину залегания сжимающих ОН по сравнению с другими методами ППД. При этом максимальные значения сжимающих ОН вблизи поверхности выше у метода ДСО. Результаты остаточных напряжений приведены на рисунках 2.12.

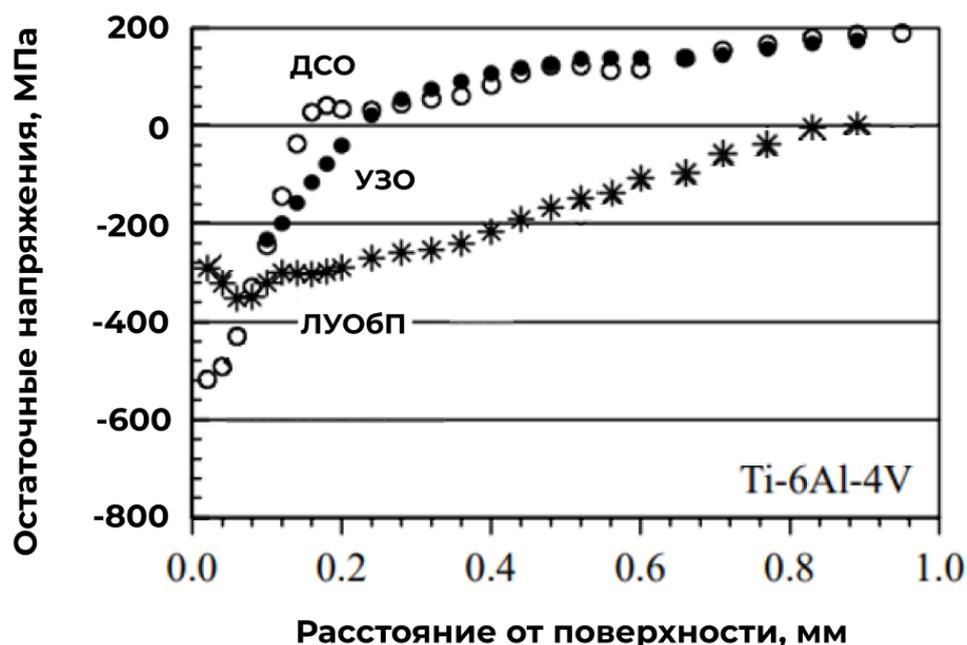


Рисунок 2.12 – Остаточные напряжения в образце из титанового сплава Ti-6Al-4V после применения различных методов ППД [109]

Авторы работы [53] проводили исследования ОН на титановом сплаве Ti-2.5Cu. Результаты измерения ОН показали, что максимальные значения сжимающих ОН были достигнуты при обработке методом ЛУО и составили 650 МПа, для ДСО – 600 МПа, УЗО – 575 МПа.

В работе [46] авторы рассматривали влияние ЛУО, ДСО их комбинации на величину ОН в ПС на титановом сплаве Ti-6Al-4V. Применение ЛУО с плотностью мощности лазерного излучения  $7,2 \text{ ГВт/см}^2$  позволило достичь сжимающих ОН величиной до 780 МПа с глубиной залегания более 1 мм (рисунок 2.13), что недостижимо, как показали авторы для методов ППД даже в комбинации с ЛУО.

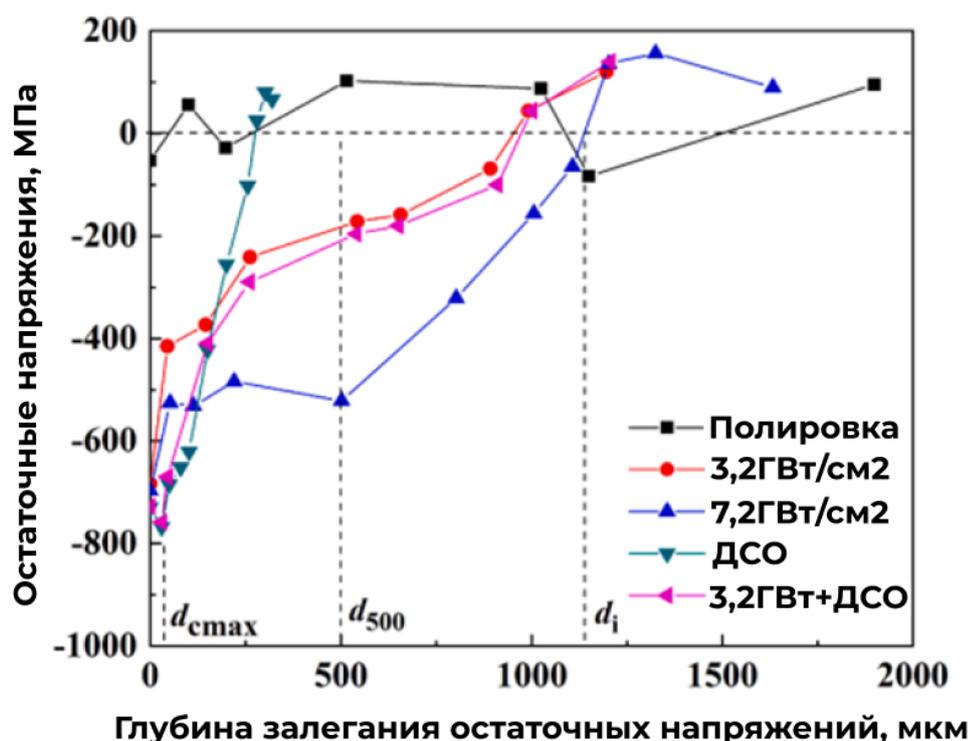


Рисунок 2.13 – Остаточные напряжения в образцах из Ti-6Al-4V

Несколько иную картину распределения сжимающих ОН на поверхности показали авторы работы [110] для титанового сплава Ti17, после обработки методами ЛУО, ДСО и их комбинации (рисунок 2.14). Так максимальные значения сжимающих ОН получены при комбинированной обработке (ЛУО+ДСО) ~ 615 МПа, для ДСО – 550 МПа, а для ЛУО – 520 МПа.

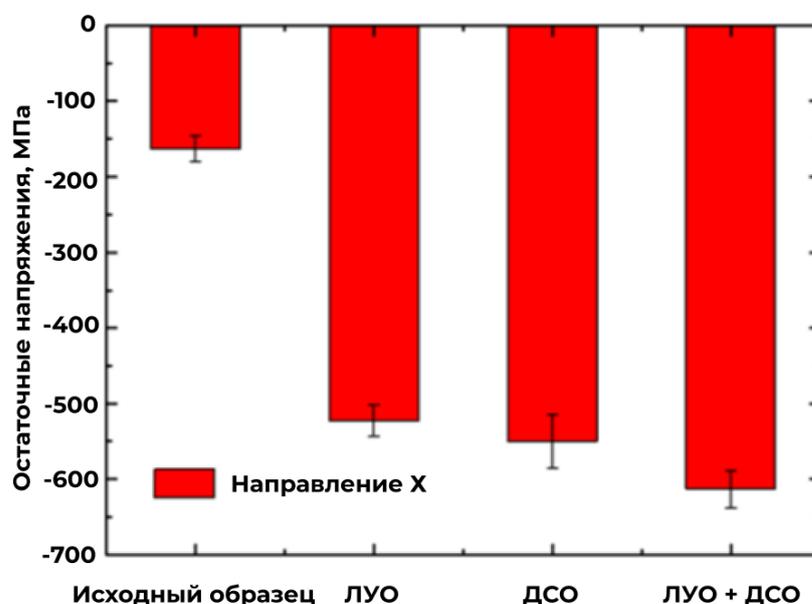


Рисунок 2.14 – Остаточные напряжения в поверхностном слое титанового образца Ti17 после применения методов ППД

Таким образом, проведенный анализ влияния ЛУО на формирование сжимающих ОН показал, что важнейшей его особенностью является большая глубина залегания сжимающих ОН (более 1 мм), что недостижимо для дробеударных методов обработки. Причем эпюра распределения ОН в поверхностном слое значительно зависит от параметров лазерного излучения, использования поглощающего (абляционного покрытия) и вида обрабатываемого сплава.

Таблица 2.1 – Сравнительные результаты ОН в образцах после применения ППД

Статья	Материал	Максимальные остаточные напряжения		
		ЛУО, ЛУОБП/(глубина)	ДСО(глубина)	УЗО(глубина)
[109]	Ti-6Al-4V	-280 МПа (920 мкм)	-520 МПа (120 мкм)	220 МПа (200 мкм)
[53]	Ti-2.5Cu	-650 МПа	-600 МПа	-575 МПа
[46]	Ti-6Al-4V	-750 МПа (1100 мкм)	-750 МПа (250 мкм)	-
[110]	Ti17	-500 МПа	-550 МПа	-

## 2.6 Выводы к главе 2

Проведенный обзор информационных источников позволил установить ряд факторов, имеющих существенное значение для дальнейших исследований:

1. В практике ЛУО наибольшее применение нашли два способа упрочнения: с использованием поглощающего покрытия и без покрытия.

2. В качестве отражающего слоя для повышения технологичности процесса ЛУО используется вода.

3. Использование ЛУО позволяет получить уникальные свойства ПС в сравнении с дробеударными методами: низкую степень наклепа, большую глубину залегания сжимающих ОН (более 1 мм), но получаемые параметры поверхностного слоя значительно зависят от режима обработки и вида обрабатываемого материала.

4. При использовании ЛУО без покрытия происходит переплав приповерхностного слоя, что приводит к значительному повышению шероховатости поверхности, и изменению фазового состояния этого слоя. Таким образом, при обработке поверхности рабочих лопаток использование ЛУОБП требует дополнительной механической обработки поверхности шлифованием и полированием, а, следовательно, назначения дополнительных припусков на обработку. С другой стороны, при использовании ЛУОБП отсутствует технологическая операция формирования поглощающего слоя на поверхности детали.

5. При использовании ЛУО шероховатость поверхности меняется незначительно, либо вообще не изменяется в сравнении с исходной. Отсутствуют изменения фазового состояния в приповерхностном слое и необходимость в дополнительной механической обработке поверхности.

## ГЛАВА 3 МАТЕРИАЛЫ, МЕТОДИКИ И ОБОРУДОВАНИЕ

### 3.1 Материалы и геометрические параметры исследуемых образцов

Для исследования влияния лазерной ударной обработки на свойства поверхностного слоя, а также проведения усталостных испытаний были использованы образцы из титанового сплава ВТ6. Химический состав материала представлен в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Химический состав титанового сплава ВТ6

Марка сплава	Химический состав в % материала										
	Fe	C	Si	V	N	Ti	Al	Zr	O	H	Прочее
ВТ6	До	До	До	3,5 -	До	86.45 -	5.3 -	До	До	До	До
	0,6	0,1	0,1	5,3	0,05	90.9	6.8	0,3	0,2	0,015	0,1

Для исследования стойкости абляционных покрытий использовались круглые образцы диаметром 20мм и толщиной 4мм (рисунок 3.1а). Для исследования влияния лазерного излучения однократных выстрелов и обработанных участков на свойства ПС использовались прямоугольные образцы со следующими габаритными размерами 80x20x4мм, изображенные на рисунке 3.1б. Для проведения усталостных испытаний были изготовлены образцы, изображенные на рисунке 3.2.

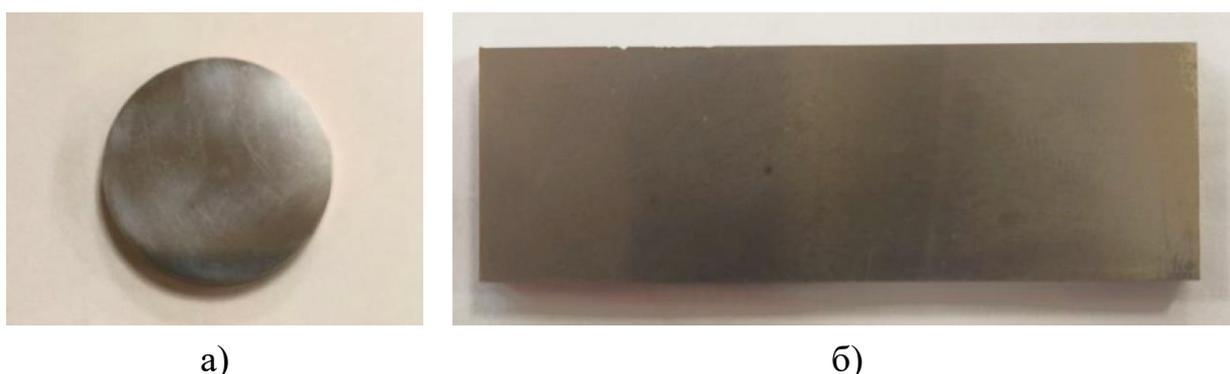


Рисунок 3.1 – Образцы для исследования влияния лазерного излучения

а) Для исследования стойкости абляционных покрытий, б) Для исследования ПС после однократных выстрелов и обработанных зон

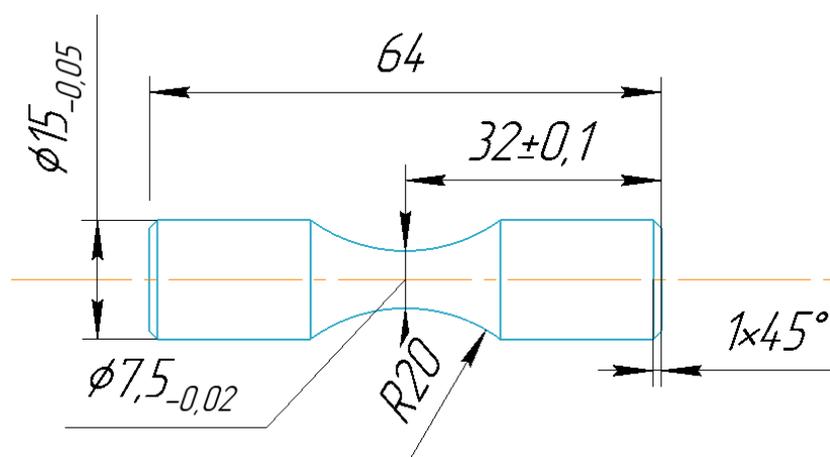


Рисунок 3.2 – Размеры образца для проведения усталостных испытаний

Процесс изготовления образцов включал в себя как механическую обработку, так и в некоторых случаях электроэрозионную обработку. Для снятия ОН после механической обработки был произведен отжиг образцов 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.

### 3.2. Установка лазерной ударной обработки и её составляющие

Исследования по определению влияния лазерного излучения на стойкость абляционного покрытия, влияния лазерного излучения на степень наклепа, деформации поверхности и остаточные напряжения производились на экспериментальной установке LS85 производства компании ООО «Прогрессивные производственные технологии»

Установка лазерной ударной обработки состоит из нескольких основных элементов: персональный компьютер, система управления (контроллер), лазерный излучатель, система позиционирования, система подачи и сбора воды. Схема, показывающая принцип работы установки показана на рисунке 3.3, фотография установки без защитного кожуха представлена на рисунке 3.4, а ее параметры вынесены в таблицу 3.2.

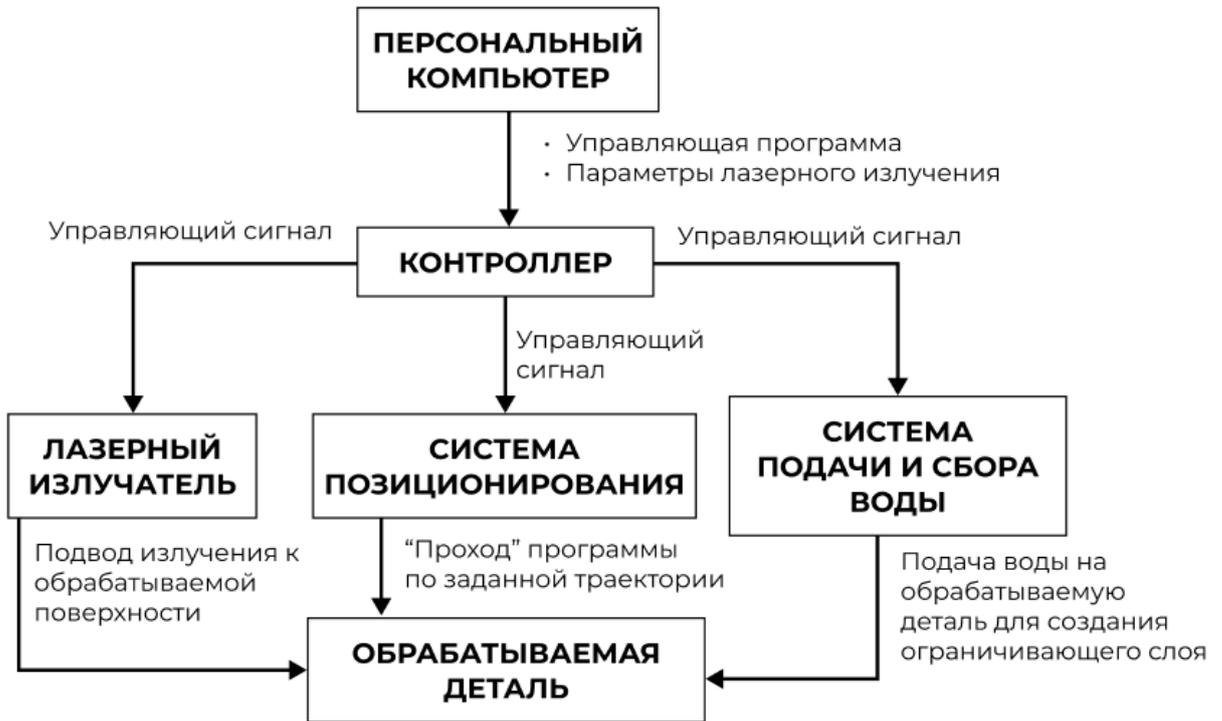


Рисунок 3.3 – Блок схема работы установки лазерной ударной обработки

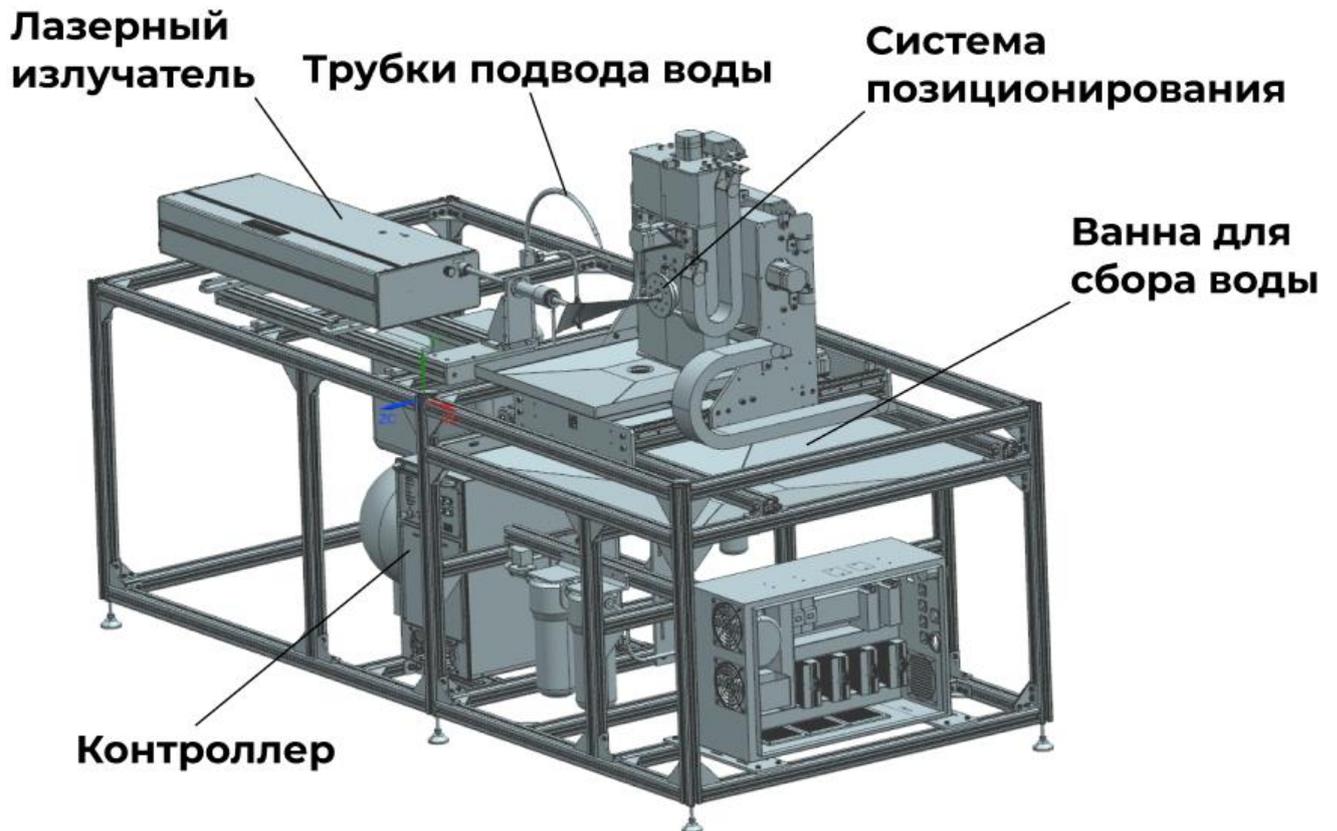


Рисунок 3.4 – 3D модель установки лазерной ударной обработки

Таблица 3.2 – Параметры установки для обработки деталей методом ЛУО

Название	Масса детали, кг	Энергия ЛИ, Дж	Длительность импульса, нс	Форма пятна	Рабочее расстояние, мм
LS85	До 5	До 10	58±2	Гаусс	300-500

Работа всей системы начинается с выставления необходимых параметров через ПК, а именно: энергия излучения, время импульса, диаметр лазерного излучения. В последствии рассчитывается необходимая интенсивность лазерного излучения, которая будет использоваться при обработке детали, и загружается на ПК траектория движения обрабатываемой детали.

Через ПК все внесенные параметры передаются на контроллер, откуда через управляющие сигналы информация направляется на лазерный излучатель, систему позиционирования детали, систему подачи и сбора воды, после чего происходит отладка и запуск программы на обработку детали.

Одной из ключевых систем в установке является лазерный излучатель, который сконструирован на основе активного элемента (Nd:стекло) с длиной волны излучения 1064 нм; временем импульса – 55-60 нс, энергией лазерного импульса – до 10 Дж, распределение лазерного излучения по пятну – Гаусс. Схема работы лазерного излучателя заключается в первичной генерации излучения, которое в последствии, увеличивает свою энергию путем прохождения через специальные усилители-квантроны. Благодаря реализации такой схемы получается достичь энергии в диапазоне 0,5-10Дж.

Сфокусированное лазерное излучение попадает на обрабатываемую деталь, которая закреплена в 4-х осевой системе позиционирования. На поверхность детали подается поток воды. т. к. в процессе обработки необходимо использовать ограничивающее покрытие. Вода с продукты отработанного абляционного материала и стекают в ванну и далее через фильтры попадает в канализацию.

### 3.3. Оборудование и методики определения свойств материалов

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, представленного на рисунке 3.5.



Рисунок 3.5 – Оптический конфокальный микроскоп

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 (рисунок 3.6) согласно ГОСТ 9450-76 при нагрузке 2Н. Величина степени наклепа измерялась по формуле (1),

$$N = \frac{HV_{\text{упр}} - HV_{\text{материала}}}{HV_{\text{материала}}} * 100\% \quad (3.1)$$

где микротвердость упрочненной зоны бралась как среднее значение по 5 измерениям в центре деформированного пятна, либо по 20 измерениям для обработанной зоны.



Рисунок 3.6 – Микротвердомер ПМТ-3М

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 обработки, производился на сканирующем электронном микроскопе EVO-40 Carl Zeiss (рисунок 3.7) с приставкой для энергодисперсионного анализа INCA (Oxford instr.).



Рисунок 3.7 – Сканирующий электронный микроскоп EVO-40 Carl Zeiss

Шлифовка и полировка образцов осуществлялась на автоматизированном шлифовально-полировальном станке LaboPol-4 с дозатором LaboDoser фирмы Struers. Для последовательного шлифования материала использовались различные абразивные круги с разным размером абразивного зерна.

Испытания на многоцикловую усталость производились на разработанном МАИ и ЦКБ АЛМАЗ усталостном стенде ЭД100-М. Конструктивно установка выполнена в настольном варианте и состоит из двух основных блоков: механического блока нагружения и электронного блока управления и контроля. Схема нагружения образца представлена на рисунке 3.8.

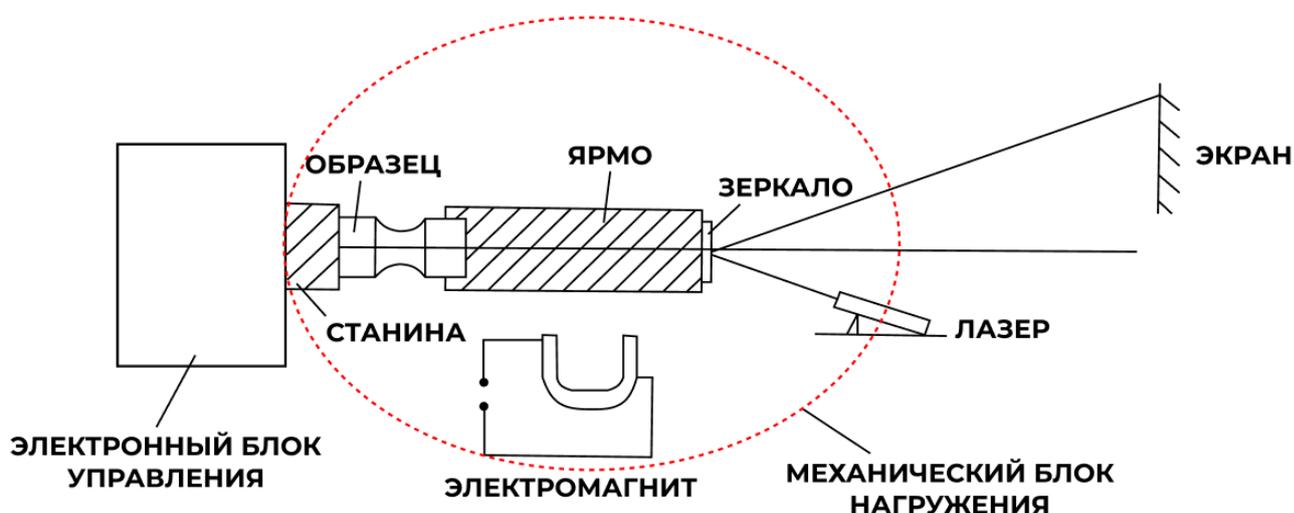


Рисунок 3.8 – Принципиальная схема усталостной установки ЭД100-М

Принцип работы установки основан на использовании режима автоколебаний подвижной части блока нагружения, подводимых к образцу. Испытания проводятся при консольном изгибе образца в одной плоскости. Программа испытаний образцов задается соответствующим набором переключателей задатчика программы, положения которых отражают градации продолжительности периода нагружения (десятки, сотни, тысячи и т.д. циклов), и потенциометрами изменения амплитуды нагружения.

Для определения уровня напряжения, которое возникает в образце, проводится построение тарировочной кривой. Образец перед началом испытаний закрепляется в станине, после чего на него устанавливается ядро, на торце

которого располагается зеркало. На ярмо устанавливаются грузы разной массы, в результате чего образец изгибается, а по отраженному от зеркала лазерному излучению оценивается действительный уровень напряжений, что выражается в отклонении лазерной точки на экране от исходного положения. По полученным данным строится тарировочная кривая, которая позволяет контролировать уровень напряжения во время испытания.

## ГЛАВА 4 ИССЛЕДОВАНИЕ И АНАЛИЗ ЛАЗЕРНОЙ УДАРНОЙ ОБРАБОТКИ ТИТАНОВОГО СПЛАВА ВТ6

Формируемые свойства поверхностного слоя при лазерной ударной обработке являются следствием прохождения упругопластической волны вглубь материала, что приводит к появлению зон локальной деформации, образованию остаточных напряжений, увеличению микротвердости, появлению рельефа поверхности и т. д. Значения этих параметров, в свою очередь, зависят от множества факторов:

1. Формы проекции лазерного пучка, приходящего на поверхность обрабатываемого материала,
2. Вида распределения энергии в лазерном пучке (П-образное, Гауссово и др.)
3. Параметров формируемого факела плазмы при абляции поглощающего покрытия (распределение давления, времени жизни плазмы и др.)
4. Импеданса поглощающего покрытия и границы перехода между покрытием и металлом,
5. Свойств обрабатываемого материала (предела упругости Гюгонио – HEL, структурного состояния, наличия пор и т.д.).

Учесть все эти факторы при разработке режима ЛУО не представляется возможным из-за множества влияющих параметров: высокой скорости процесса образования и воздействия плазмы, высокой скорости прохождения упругопластической волны в материале, – диагностика характеристик всех этих процессов требует использования уникального исследовательского оборудования.

В связи с этим в диссертационной работе для разработки режима ЛУО рассматривается отклик системы «поглощающее покрытие/металл» на изменение режимов лазерного излучения, для чего используется хорошо известные в инженерии методы измерения характеристик поверхностного слоя (глава 3). Как было указано в выводах к главе 2, в качестве отражающего покрытия была выбрана вода в связи с простотой использования для любой формы образцов и лопаток, поэтому в данной работе свойства этого слоя не рассматриваются.

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

Анализ информационных источников, проведенный во 2-й главе, показал, что для реализации технологии ЛУО применяют различные типы поглощающих покрытий: ПВХ ленты, металлические, в том числе алюминиевые, ленты, краски и т.д. Для сравнительного исследования возможности применения различных типов поглощающих покрытий были выбраны следующие виды материалов: ПВХ лента, алюминиевая лента, цинкосодержащий грунт (ЦГ), полиэфирный грунт (ПГ), порошковая краска (ПКр). Выбор указанных материалов был основан на анализе информационных источников, предварительных испытаниях различных типов покрытий, а также требовании повышения технологичности процесса нанесения поглощающего покрытия.

Основное различие между указанными материалами состоит в способе их нанесения. В работе были выбраны материалы в виде клейких лент (ПВХ и алюминиевая ленты), которые вручную наносятся на предварительно очищенную поверхность и широко используется в научно-исследовательских работах и производственной практике. В процессе их нанесения не допускается наличие на поверхности посторонних частиц, так как это может привести к неполному прилеганию поглощающего покрытия к металлу, и, как следствие, к риску преждевременного разрыва покрытия в процессе обработки и термическому повреждению поверхности детали. Сложность нанесения таких покрытий связана с наличием воздушных пустот между металлом и лентой, т.к. в процессе обработки это может привести к локальному плавлению металла детали из-за адиабатического сжатия воздуха. В особенности этот недостаток проявляется при нанесении металлических лент на деталь сложной формы (лопаток) из-за их жесткости и склонности к образованию складок.

В качестве лакокрасочного метода был выбран порошковый способ нанесения. Поверхность обрабатываемого материала предварительно очищалась и обезжиривалась для обеспечения максимальной адгезии краски к металлу. Покрытие наносилось слоями по 80-100 мкм и отверждалось при температуре 180-

200 °С в течение 15-20 минут. После полного отверждения первого слоя наносился второй и последующие слои. Основным преимуществом красок по сравнению с лентами является их технологичность при нанесении на детали сложной формы и возможность автоматизации процесса.

После проведения процесса лазерной ударной обработки производилась очистка образца от остатков абляционного покрытия. В экспериментах удаление лакокрасочных покрытий осуществлялось при помощи специальной смывки Elcon S™, а лент – механическим способом с последующей мойкой и химической очисткой растворителем для удаления клеевого состава в УЗ ванне.

Основные характеристики используемых в работе абляционных покрытий, приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Параметры покрытий

Тип покрытия	Толщина покрытия, мкм	Шероховатость покрытия, мкм
А1 лента	60-68, среднее 65	Ra = 0,381 мкм
ПВХ лента	118-126, среднее 120	Ra = 0,526 мкм
ЦГ+ПКр	125-170, среднее 140	Ra = 1,051 мкм
ЦГ – 2слоя	180-220, среднее 200	Ra = 0,25 мкм
ЦГ+ПГ	180-220 среднее 200	Ra = 0,181 мкм

Для поглощающих (абляционных) покрытий, которые могут использоваться на производстве, был сформирован следующий перечень требований:

1. Покрытие не должно разрушаться в течение всего цикла обработки.
2. Способ формирования покрытия должен обеспечивать возможность автоматизации процесса нанесения.
3. Должна быть обеспечена возможность автоматизации снятия остатков покрытия после проведения технологического процесса ЛУО.
4. Не допускается наличие повреждений поверхности детали (механических, химических) в процессе нанесения, обработки ЛУО и снятия покрытия.

Основным требованием к разработке поглощающего покрытия является п. 1, т. к. именно он может обеспечить необходимую производительность без

необходимости дополнительных переходов по нанесению покрытия для обработки всей площади детали.

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

1. На плоский образец из титанового сплава ВТ6 (см. главу 3) наносилось исследуемое покрытие согласно техническим условиям на покрытие.

2. Далее для определения его лучевой стойкости проводилась обработка выбранной области образца при выбранном значении плотности мощности в диапазоне от 1 до 9 ГВт/см<sup>2</sup> (таблица 4.2) При фиксированном значении плотности мощности производилось облучение образца в одной точке несколькими импульсами до разрушения поглощающего покрытия. После каждого воздействия поверхность осматривалась с помощью оптического микроскопа.

3. Фиксировалось число импульсов при которых покрытие не разрушалось.

4. Строился график (рисунок 4.2) зависимости плотности мощности от количества импульсов до разрушения для всех типов поглощающих покрытий.

Таблица 4.2 – Режимы обработки

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

Изображения лучевых повреждений различных покрытий после ЛУО приведены на рисунке 4.1. Первый ряд изображений соответствует первому воздействию лазерного излучения на покрытие, второй – промежуточному, а последний – импульсу, при котором абляционное покрытие было разрушено до металла.

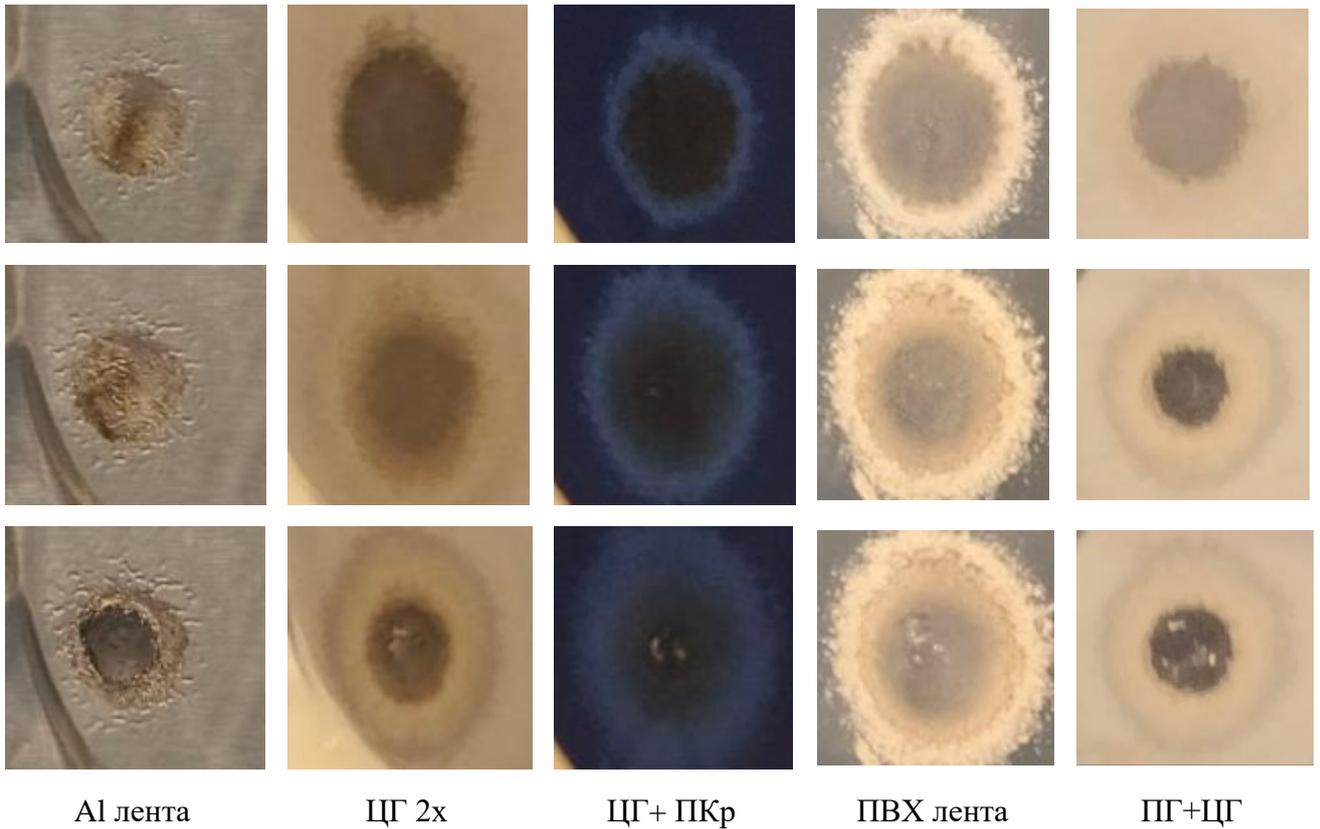


Рисунок 4.1 – Процесс разрушения покрытий от лазерного излучения.

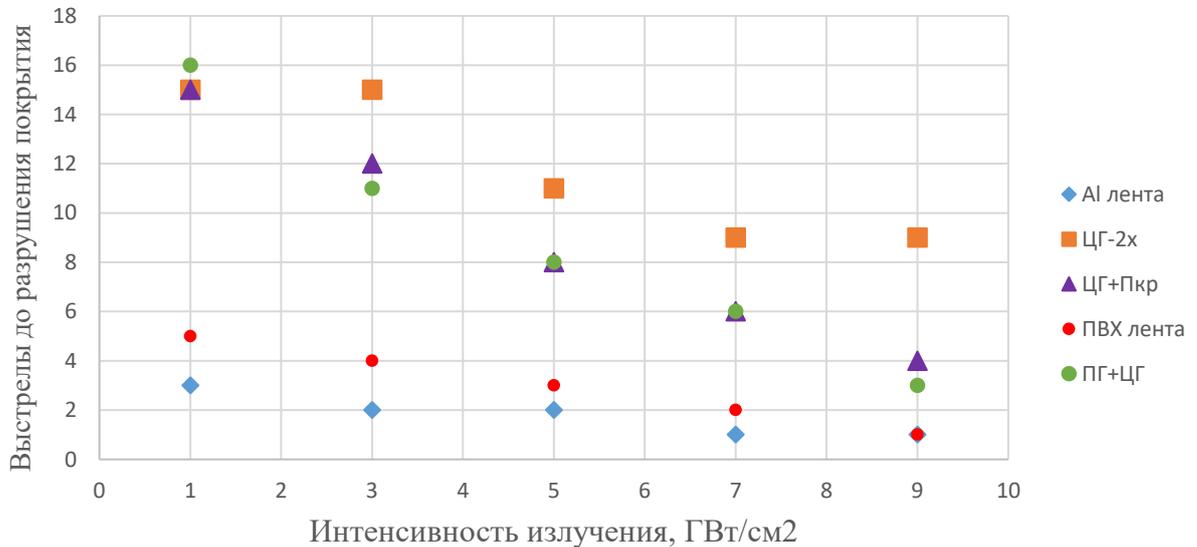


Рисунок 4.2 – Зависимость количества выстрелов до разрушения абляционного покрытия от интенсивности лазерного излучения

Анализ результатов проведенных исследований показал, что стойкость покрытий, нанесенных с помощью лент, уступает стойкости покрытиям на основе красок в 3-5 раз во всем диапазоне плотностей мощности (рисунок 4.2).

Наилучшую лучевую стойкость показало лакокрасочное 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 поглощающего покрытия стал анализ деформаций и морфологии поверхности при обработке площадки 5х5 мм, имитирующей процесс обработки поверхности детали, и фиксированной плотности мощности лазерного излучения 2 ГВт/см<sup>2</sup> с 60% перекрытием пятен друг относительно друга. Для этого были выбраны следующие покрытия: ПВХ лента, ЦГ 2х и ЦГ+ПКр. Оценка качества проводилась по глубине деформации поверхности после обработки и исследованию повреждений и дефектов, возникающих в процессе обработки.

Высота деформированной зоны относительно номинального размера детали измерялась для оценки влияния импеданса системы «поглощающее покрытие/металл». Полученные данные сведены в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Сравнение характеристик поверхностного слоя после обработки зоны 5х5 мм с различными абляционными покрытиями

№	Абляционное покрытие	Интенсивность излучения	Глубина деформаций	Среднее значения деформации, мкм	Дефекты
1-1	ПВХ	2ГВт/см <sup>2</sup>	1,5 мкм	2±0,5	-
1-2			2,5 мкм		-
1-3			2 мкм		-
2-1	ЦГ 2х		4 мкм	4	Дефекты
2-2			4 мкм		Дефекты
2-3			4 мкм		Дефекты
3-1	ЦГ+ ПКр		2 мкм	2	-
3-2			2 мкм		-
3-3			2 мкм		-

Как показали исследования, наибольшие деформации достигаются для ЦГ 2х – 4 мкм, а для ЦГ+ПКр – 2 мкм. При использовании ПВХ ленты среднее значение деформации устанавливается на уровне 2 мкм, но при этом наблюдается разброс, который может быть связан с разнотолщинностью ленты, возникающая, в том числе, в процессе клейки и разглаживания, что приводит вытягиванию и утонению ленты.

Анализ морфологии поверхности на наличие дефектов производился после её очистки от остатков поглощающего покрытия в УЗ ванне с растворителем. После использования покрытия ЦГ 2х были обнаружены точечные дефекты. Изображение дефекта получено с помощью конфокального измерительного микроскопа при 5х и 100х кратном увеличении (рисунке 4.3а и 4.3б). Дефекты представляют собой множество конических образований разного размера высотой до 12 мкм и диаметром в основания 10-30 мкм. За пределом зоны обработки таких дефектов не наблюдалось, что позволяет идентифицировать причину их появления в процессе процесс ЛУО, как использование покрытия ЦГ 2х.

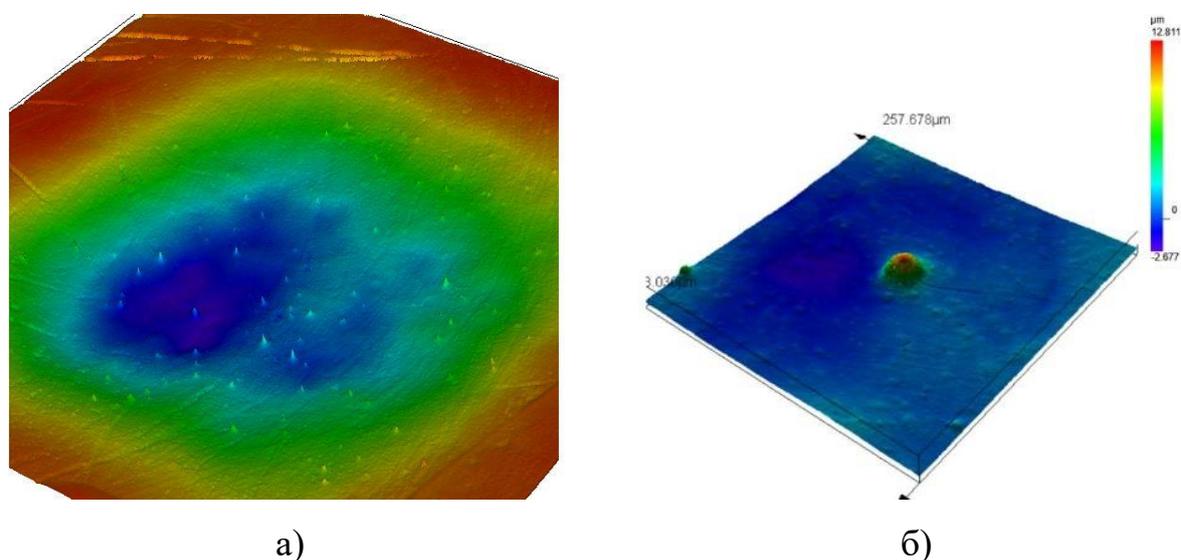


Рисунок 4.3 – Поверхность образца после ЛУО с применением ЦГ 2х

а) Весь участок обработки, б) Дефект при увеличении 100х

Для химического анализа полученных дефектов на покрытии ЦГ 2х использовался энергодисперсионный микроанализ (EDS) рисунок 4.4 и 4.5, полученные результаты химического состава приведены в таблице 4.4.

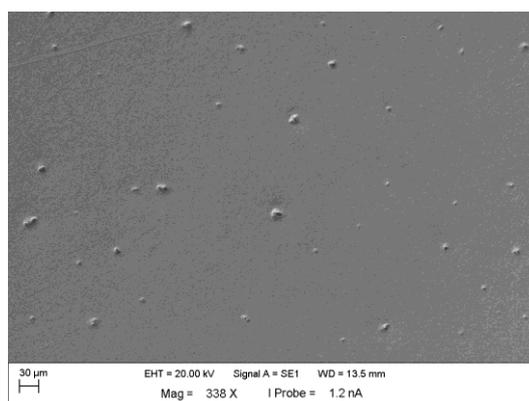


Рисунок 4.4 – Дефекты на поверхности образца с применением покрытия ЦГ 2х при увеличении 338х

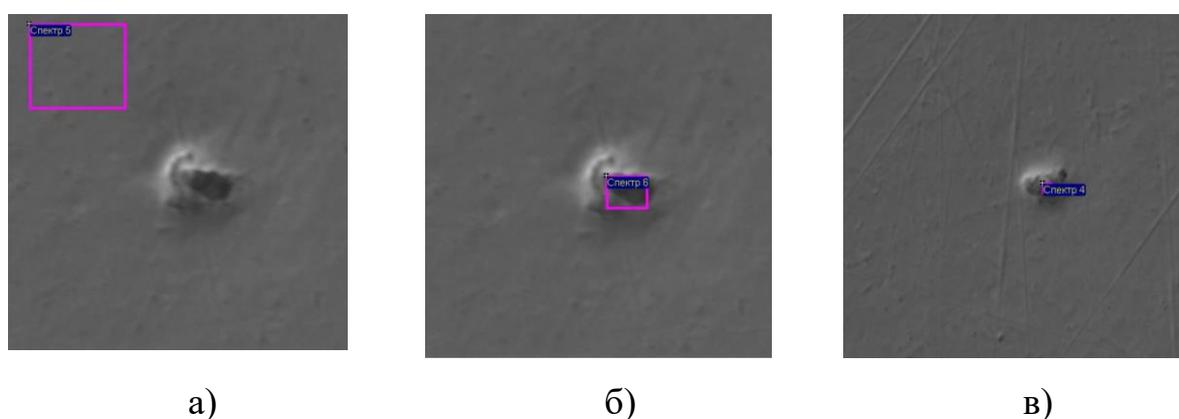


Рисунок 4.5 – Исследуемые области на поверхности образца после применения покрытия ЦГ 2х. а) Спектр 5 – материал, б) Спектр 6 – дефект 1, в) Спектр 4 – дефект 2.

Таблица 4.4 – Результаты проведения элементного анализа на образце с дефектами после применения абляционного покрытия ЦГ

Элемент	Весовой %		
	Спектр 4	Спектр 5	Спектр 6
С	17.11	-	-
О	12.76	-	15,34
Al	2.71	5,43	2.48
Ti	62.80	89,77	75.93
V	4.62	4,80	3.29
Na	-	-	0.96
S	-	-	0.75
K	-	-	0.93
Ca	-	-	0.32

Из анализа таблицы 5 видно, что состав зоны «Спектра 5», находящегося вне области дефекта, соответствует составу титанового сплаву ВТ6, а зоны «Спектра 4» и «Спектра 6» (область дефекта) - показал наличие большого количества кислорода и углерода, а также натрия, серы, калия и кальция. Таким образом, исходя из полученных результатов, можно сделать вывод, что причиной появления таких дефектов является остаточная пористость прилегающего к металлу слоя покрытия, которая ведет, как и в случае с пустотами при приклейке лент, к адиабатическому сжатию воздуха и значительному нагреву, который вызывает плавление металла и материала покрытия.

Надо отметить, что использовании при ЛУО ПВХ покрытия и краски ЦГ+ПКр не дает такого эффекта. Таким образом, полученные дефекты на более эффективном покрытии требуют последующей дополнительной шлифовки и полировки применительно к обработке лопаток, поэтому в рамках диссертационной работы краска ЦГ в дальнейшем не рассматривалась.

Несмотря на преимущества лакокрасочных покрытий для целей исследования и разработки опытного технологического процесса обработки лопатки было решено использовать ПВХ ленту, т.к. она показала хорошую эффективность, не требует специального оборудования (покрасочных камер и сушильных шкафов), а её лучевая стойкость позволяет работать без термических дефектов во всем диапазоне плотности мощности с промежуточной переклейкой ленты. Но при внедрении ЛУО на производство безусловно необходимо переходить на лакокрасочную технологию, которая позволяет автоматизировать процесс нанесения и удаления покрытия.

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

Формирование остаточных напряжений в поверхностном слое является следствием пластической деформации материала в результате прохождения упругопластической волны при ЛУО, что приводит к появлению зон локальной деформации. Форма и глубина деформированного участка (отпечатка) косвенно

показывает границы обрабатываемости материала, равномерность приходящего на поверхность лазерного излучения и факела плазмы, указывает на дефекты поглощающего покрытия, позволяет правильно выбрать стратегию обработки и процент перекрытия при наложении отпечатков друг на друга.

Далее рассматриваются результаты исследования влияния значений энергии и диаметра проекции лазерного пучка на геометрические параметры отпечатков и степень наклепа поверхностного слоя при одиночном импульсе с применением ПВХ ленты в качестве поглощающего покрытия. Обработка проводилась при фиксированном времени излучения равном 60 нс и диаметрах лазерного пучка 1 мм и 1,4 мм, уровень энергии лазерного импульса подбирался таким образом, чтобы обеспечить необходимую плотность мощности.

Для оценки влияния плотности мощности при различных диаметрах на геометрические параметры отпечатка на максимальную глубины и форму пятна была проведена обработка поверхности однократными импульсами, полученные результаты приведены на рисунках 4.6 и 4.7.

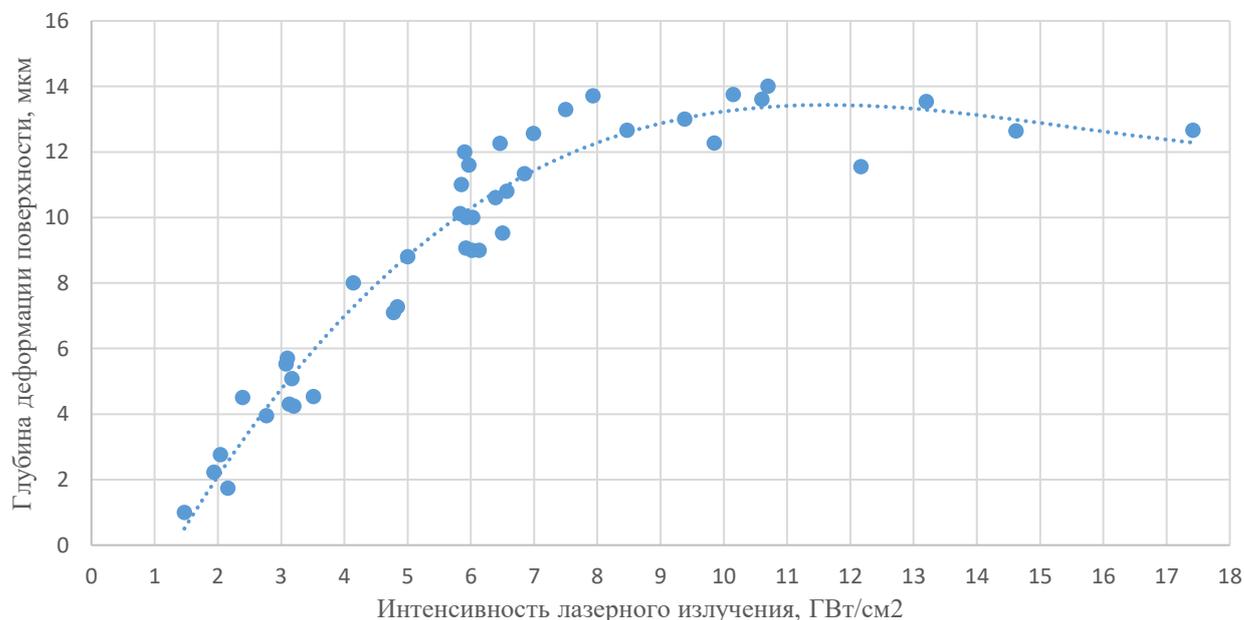


Рисунок 4.6 – Зависимость глубины деформации отпечатка от интенсивности лазерного излучения.

Как видно из рисунка 4.6, максимальная глубина деформации увеличивается практически линейно до 12–14 мкм при увеличении плотности мощности

лазерного излучения, но при достижении значения в 8-10 ГВт/см<sup>2</sup> дальнейшее увеличение глубины прекращается. Этот эффект хорошо известен [116] и связан с воздушным пробоем, возникающим в следствие достижения максимальной проводимости лазерного излучения в воздухе и началом его ионизации при достижении значений близких к 10 ГВт/см<sup>2</sup>. 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  $\sim 7-8$  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 4.7).

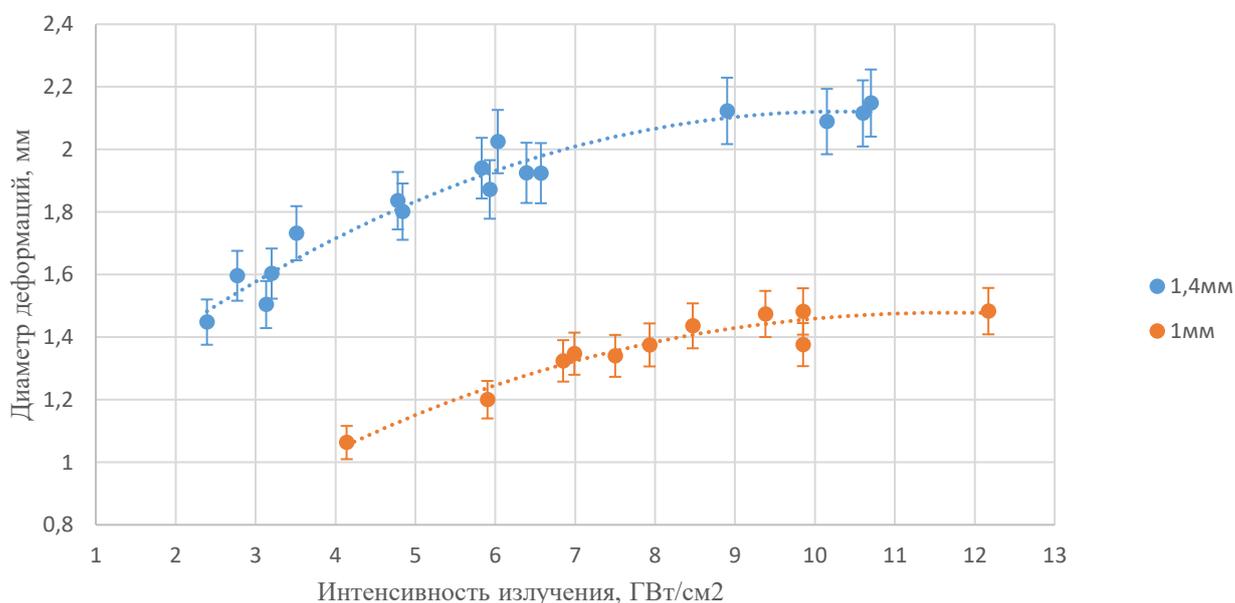


Рисунок 4.7 – Зависимость диаметра деформаций на поверхности от интенсивности излучения при различных диаметрах лазерного пучка

Как видно из рисунка 4.7, диаметр отпечатков при фиксированном значении диаметра лазерного излучения постоянно возрастает с увеличением значений интенсивности лазерного излучения.

Явление увеличения диаметра отпечатка на поверхности металла при увеличении интенсивности лазерного излучения можно объяснить исходя из формы профиля распределения интенсивности лазерного пучка – формы Гаусса [117], которое описывается уравнением (1):

$$I_r = I_0 e^{-2\frac{r^2}{w^2}} \quad (4.1)$$

где  $r$  – расстояние от оси пучка до рассматриваемой точки,  $I_0$  – исходная интенсивность лазерного излучения,  $I_r$  – интенсивность излучения в рассматриваемой точке пучка на расстоянии  $r$ , а  $w$  – радиус пучка на рассматриваемом расстоянии от перетяжки (наиболее узкая область пучка, в которой формируется фокус излучения). Причем исходная интенсивность излучения  $I_0$  описывается параметрами, приведенными в уравнении (2):

$$I_0 = \frac{E}{S * \tau} \quad (4.2)$$

где  $E$  – энергия лазерного излучения,  $S$  – площадь лазерного пучка на поверхности обрабатываемой детали,  $\tau$  – время импульса лазерного излучения.

Для наглядности представления профилей распределения интенсивностей лазерного излучения и влияния данных профилей на диаметр отпечатка приведены графики для плотности мощности излучения 2, 4 и 6 ГВт/см<sup>2</sup>, представленные на рисунке 4.8, в сравнении с условным уровнем интенсивности, достаточной для превышения предела Гюгонио (HEL).

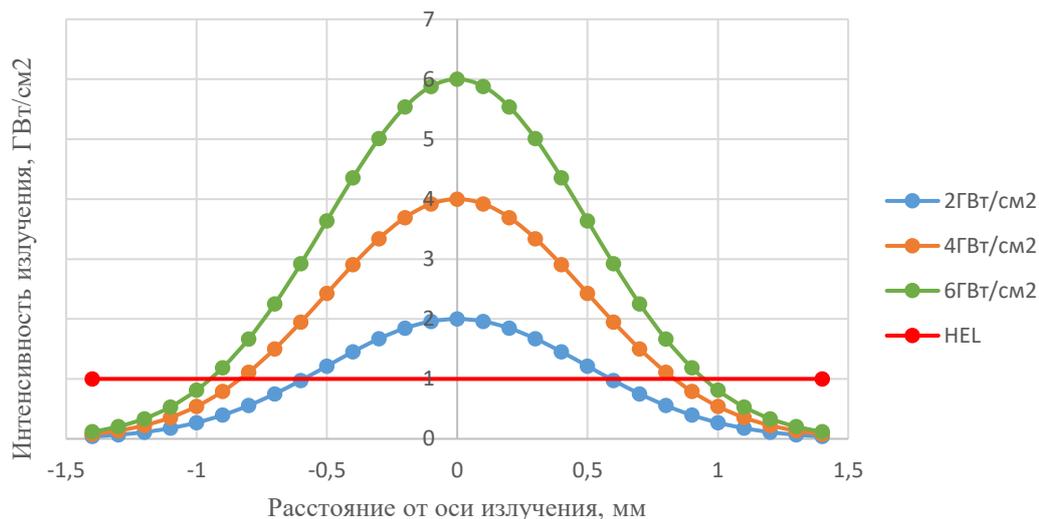


Рисунок 4.8 – Профили распределения интенсивности излучения

Из рисунка 4.8 видно, что при фиксированном значении диаметра пучка на выбранном расстоянии от перетяжки, графики изменяются только по своей амплитуде. Таким образом, увеличивая интенсивность излучения, мы непосредственно влияем на давление создаваемой плазмой (глава 2), поэтому можно сказать, что профили интенсивности коррелируют с профилями давления по пятну лазерного излучения, а линия предела упругости Гюгонио (HEL) при пересечении с профилем интенсивности соответствует диаметру отпечатка, получаемого на поверхности обрабатываемой детали.

С другой стороны, необходимо отметить, что расширение плазмы при абляции материала осуществляется во все стороны, в том числе и вдоль обрабатываемой поверхности, что ведет к увеличению зоны давления на металл и с повышением значения плотности мощности величина давления также будет увеличиваться. Авторы работы [21, 50] продемонстрировали влияние этого эффекта при обработке алюминиевого сплава Д16Т. Результаты экспериментов приведены в таблице 4.5.

Таблица 4.5 – Сравнение диаметра отпечатка и зоны распространение плазмы от энергии излучения [21].

Энергия, Дж	Диаметр отпечатка на металле, мм	Диаметр зоны распространения плазмы, мм
2	1,563	4,5
4	1,772	5,62
6	1,865	6,3
8	2,030	6,75

Таким образом, увеличение диаметра отпечатка на поверхности металла при увеличении плотности мощности можно связать с двумя факторами:

1. Использование лазерного пучка с гауссовским распределением интенсивности по диаметру;
2. Радиальным распространением плазмы по поверхности образца.

Таким образом, для разработки стратегии и режимов обработки детали в части перекрытия пятен друг относительно друга, следует руководствоваться истинным размером отпечатка поверхности, который будет изменяться в зависимости от значения плотности мощности. В связи с этим, при использовании гауссовского распределением интенсивности по диаметру рекомендуется проводить отработку режимов при фиксированном значении диаметра лазерного пучка. В итоге, с точки зрения постоянства получаемого качества поверхностного слоя и снижения неконтролируемых технологических факторов, рекомендуется использовать П-образное распределение интенсивности лазерного излучения.

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

Определение влияния технологических режимов лазерного ударного упрочнения на степень наклепа и взаимосвязи с деформацией проводилось по поверхности деформированной зоны. В виду того, что максимальные деформации материала наблюдается в центре пятна, были проведены измерения значений микротвердости в этой же зоне, результаты которых приведены на рисунке 4.9.

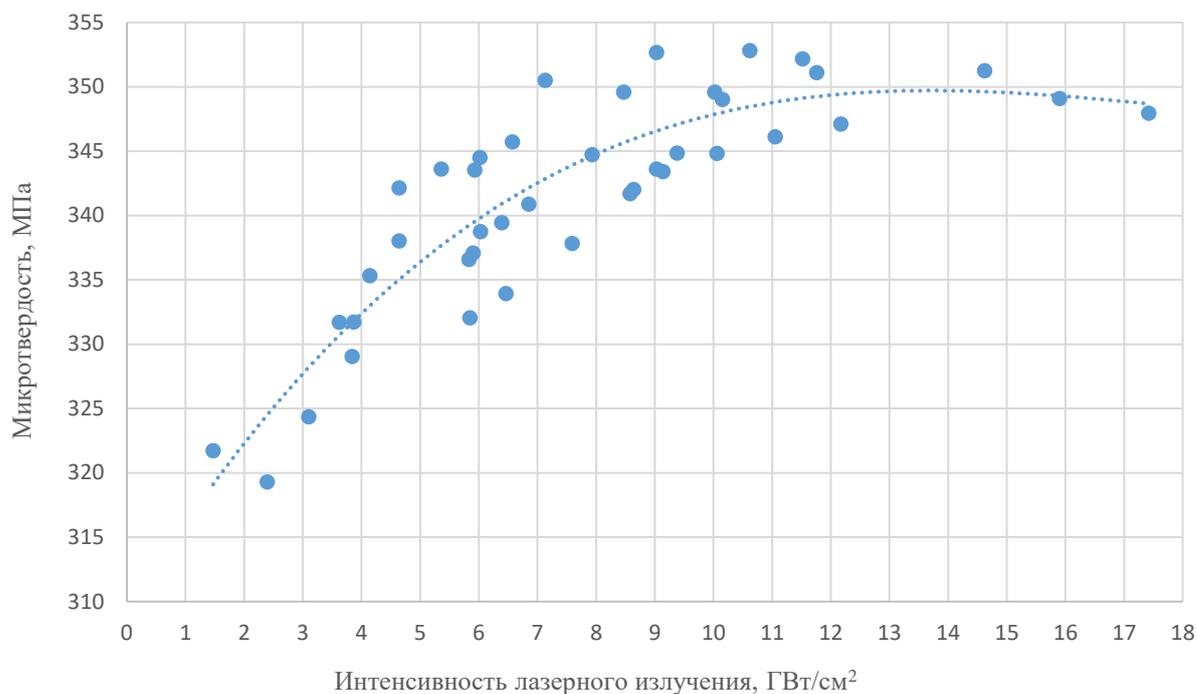


Рисунок 4.9 - Зависимость микротвердости в центре зоны деформации от интенсивности лазерного излучения

Из рисунка видно, что характер изменения максимального значения микротвердости при увеличении интенсивности лазерного излучения практически аналогичен характеру изменения максимальной глубины деформации (рисунок 4.6): происходит линейный рост значений микротвердости, но после достижения интенсивности излучения  $\sim 7-8$  ГВт/см<sup>2</sup> дальнейший рост практически прекращается. При этом величина микротвердости необработанного титанового сплава ВТ6 составила  $\sim 320$  МПа. Максимальное значение микротвердости обработанного ЛУО устанавливается на уровне  $HV_{200} \sim 350$  МПа, таким образом, степень наклепа титанового сплава ВТ6 после ЛУО не превышает 10% при однократном выстреле.

Характер изменения значений микротвердости вдоль деформированной зоны при плотности мощности лазерного излучения в 6 ГВт/см<sup>2</sup> приведен на рисунке 4.10.

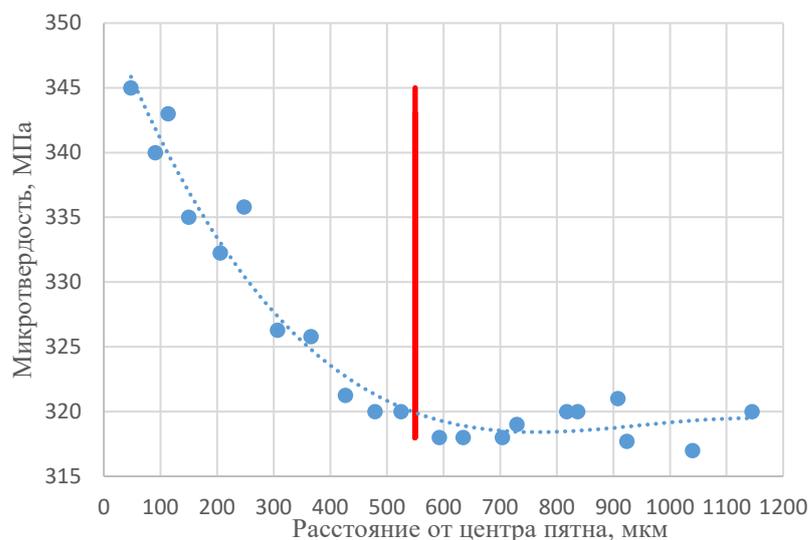


Рисунок 4.10 – Профиль распределения микротвердости по деформированному пятну при  $6 \text{ ГВт/см}^2$

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

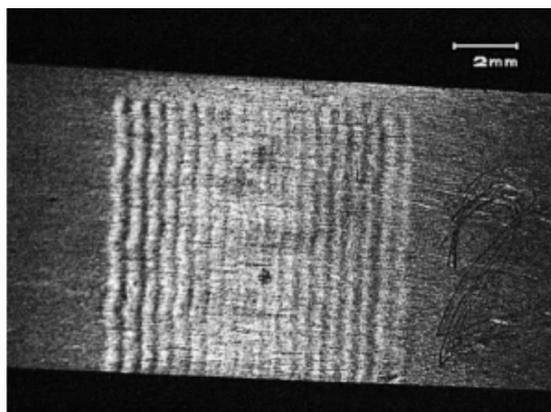
В связи с совпадением картины влияния увеличения интенсивности излучения на максимальную глубину деформации и микротвердость, можно утверждать, что обработка титанового сплава ВТ6 свыше  $7 \text{ ГВт/см}^2$  не является оптимальной и целесообразной с точки зрения эффективности процесса.

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

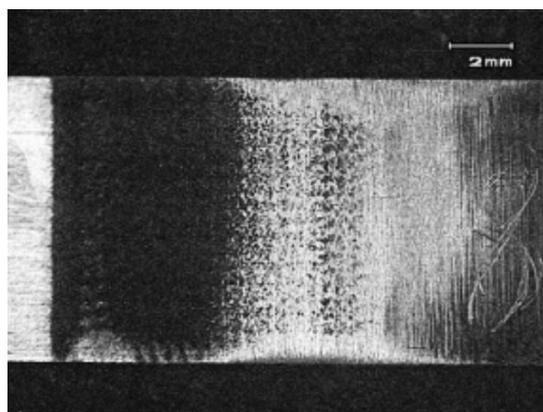
Исследование обработанных зон  $10 \times 10 \text{ мм}$  на образцах пластинах производилась при фиксированном диаметре лазерного излучения  $1,4 \text{ мм}$  с плотностью мощности  $2,17$ ;  $4,33$  и  $6,5 \text{ ГВт/см}^2$  с применением ПВХ ленты. Для сравнения обрабатываемости титанового сплава обработку зон проводили в том числе и без ПВХ ленты, т. е. способом ЛУОбП.

Для оценки качества поверхностного слоя проводилось металлографическое исследования обработанных поверхностей, измерялась шероховатость, волнистость, микротвердость и остаточные напряжения. Изображения

поверхностей титанового сплава ВТ6, обработанных методом ЛУО приведены на рисунке 4.11.



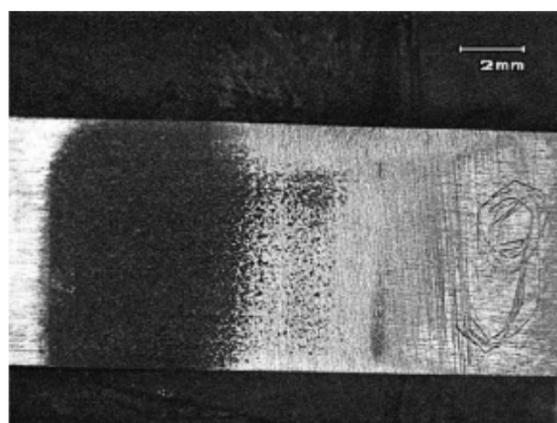
а)



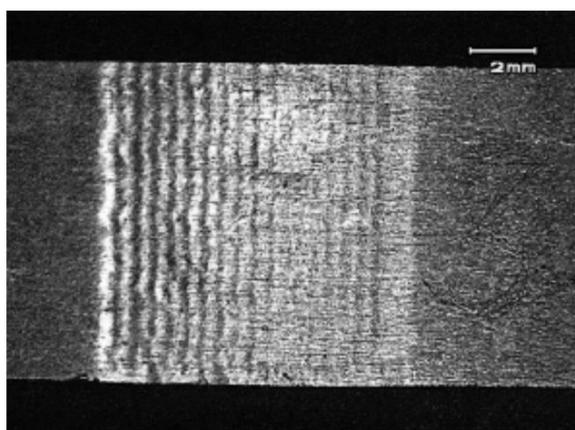
б)



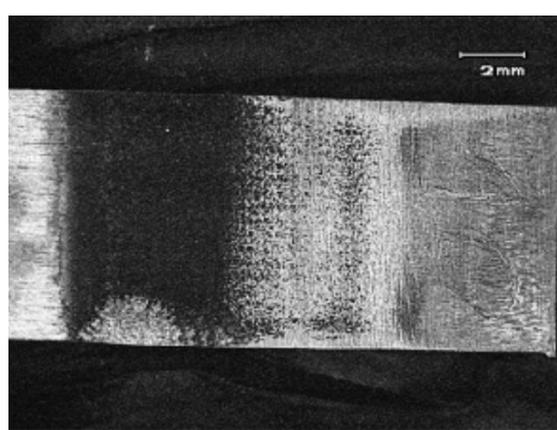
в)



г)



д)



е)

Рисунок. 4.11 - Поверхности титанового сплава ВТ6 после обработки ЛУО и ЛУОБП.

а)  $2,17 \text{ ГВт/см}^2$  - ЛУО, б)  $2,17 \text{ ГВт/см}^2$  - ЛУОБП, в)  $4,33 \text{ ГВт/см}^2$  - ЛУО, г)  $4,33 \text{ ГВт/см}^2$  - ЛУОБП, д)  $6,5 \text{ ГВт/см}^2$  - ЛУО, е)  $6,5 \text{ ГВт/см}^2$  - ЛУОБП

#### 4.4.1 Оценка геометрических показателей качества поверхностного слоя после лазерной ударной обработки

На изображениях рисунка 4.11 (а,в,д) после ЛУО виден характерный рельеф поверхности после импульсной обработки, при этом вид поверхности после ЛУОБП также имеет схожий рельеф, но помимо этого обработанная поверхность приобретает черный цвет из-за термического воздействия и образования в приповерхностном слое оксида титана (рисунок 4.11 б,г,е).

Измеренные величины волнистости и шероховатости обработанных поверхностей представлены на рисунке 4.12.

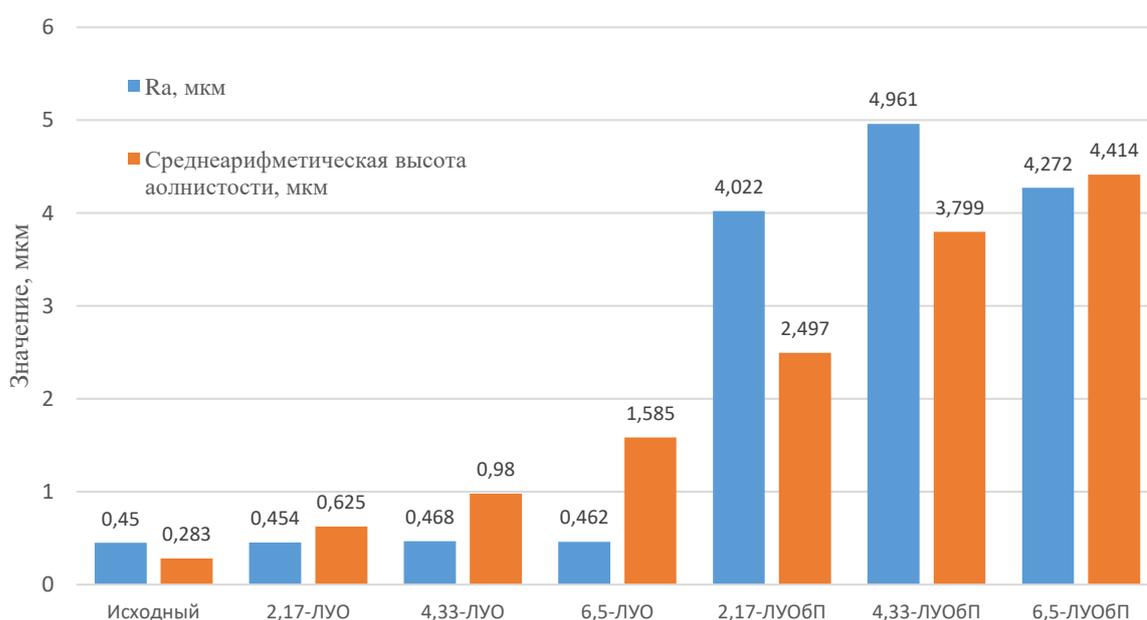


Рисунок 4.12 – Сводные данные по шероховатости и волнистости обработанных поверхностей

Из приведенных данных можно отметить, что прямое воздействие на поверхность лазерного излучения (ЛУОБП) приводит к образованию модифицированного слоя, который помимо высокой шероховатости, которая увеличивается на порядок для всех режимов ЛУОБП относительно полированной поверхности, обладает и значительно большей волнистостью – в 10-20 раз выше по сравнению с необработанной поверхностью.

ЛУО с покрытием, напротив, не приводит к изменению шероховатости поверхности, а максимальное увеличение волнистости поверхности в 5,6 раз характерно для режима обработки при 6,5 ГВт/см<sup>2</sup>.

Также стоит сказать, что глубина деформации поверхности относительно номинальной увеличивается с повышением интенсивности лазерного излучения, а также отказ от абляционного покрытия значительно усиливает эту тенденцию (рисунок 4.13).

В случае ЛУО с покрытием, полученные значения представляют собой истинную деформацию от воздействия упругопластической волны, но при отсутствии поглощающего слоя часть «деформации» поверхности приходится на абляцию металла, за счет которого образуется плазма. Причем по мере увеличения интенсивности доля истинной деформации начинает преобладать над долей испарённого слоя материала. Так при сравнении ЛУО с покрытием и без, при плотности мощности в 2,17 ГВт/см<sup>2</sup> значения отличаются в 11 раз, а при 6,5 ГВт/см<sup>2</sup> – в 2,7 раза (рисунок 4.13).

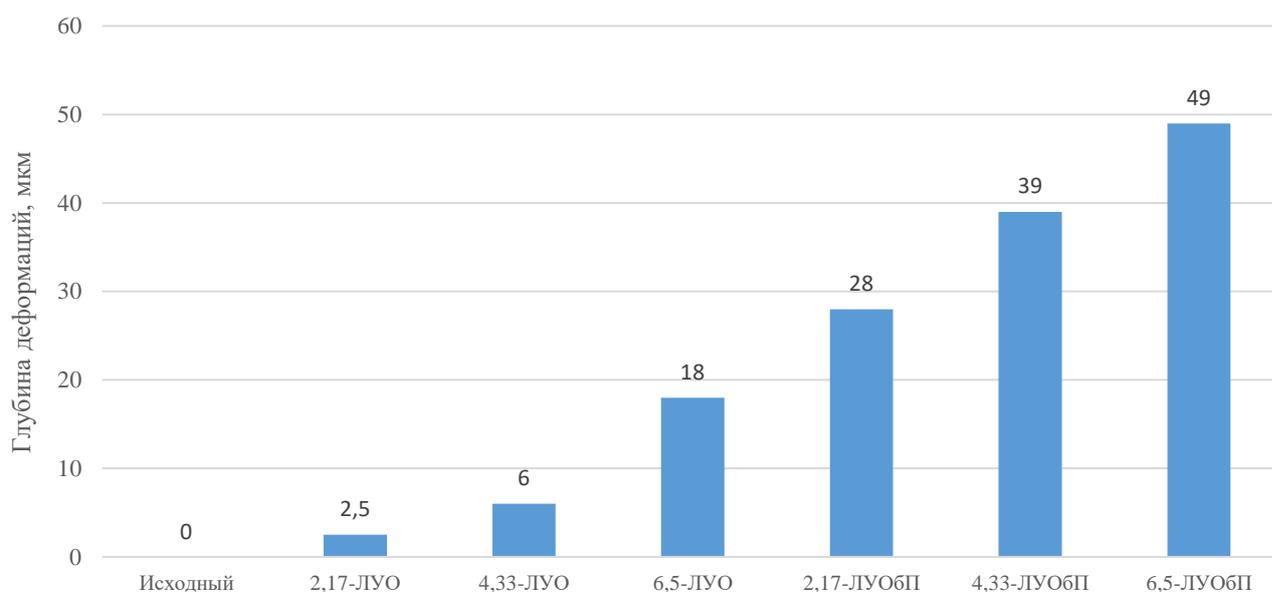


Рисунок 4.13 – Деформация зоны обработки относительно номинальной поверхности

Исследование обработанных поверхностей образцов на наличие дефектов проводилось с помощью растрового электронного микроскопа. Для образцов, обработанных ЛУО с покрытием с интенсивностью лазерного излучения 4,33 и 6,5 ГВт/см<sup>2</sup>, наблюдались точечные дефекты в виде окружностей или овалов с характерным диаметром не более 40 мкм (рисунок 4.14 б,в).

При обработке с плотностью мощности  $2,17 \text{ ГВт/см}^2$  подобных дефектов не наблюдалось (рисунок 4.14а). По-видимому, появление таких дефектов связано с наличием мелких частиц или пустот между поглощающим покрытием и металлом, несмотря на принятые меры по очистки поверхности и тщательной приклейке при его нанесении.

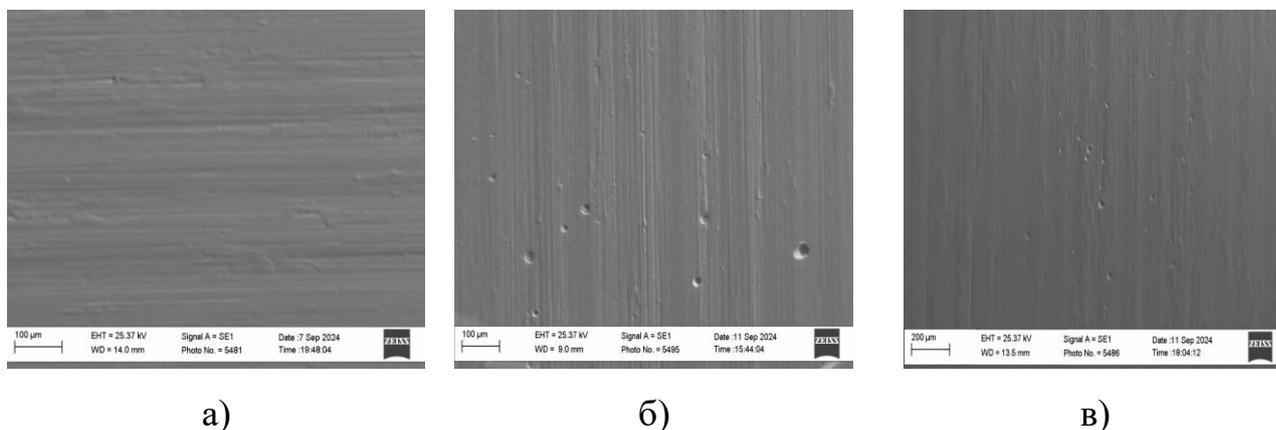


Рисунок 4.14 - Фотографии поверхности сплава ВТ6 после ЛУО

а)  $2,17 \text{ ГВт/см}^2$ , б)  $4,33 \text{ ГВт/см}^2$ , в)  $6,5 \text{ ГВт/см}^2$

Поверхность образцов после ЛУОБП представлена на рисунке 4.15. Для всех режимов обработки ( $2,17$ ;  $4,33$ ;  $6,5 \text{ ГВт/см}^2$ ) наблюдаются характерные черные зоны термически выращенного оксида, представляющего смеси низших оксидов титана ( $\text{TiO}$ ,  $\text{Ti}_2\text{O}_3$ ), которые пронизывают поры и сети микротрещин.

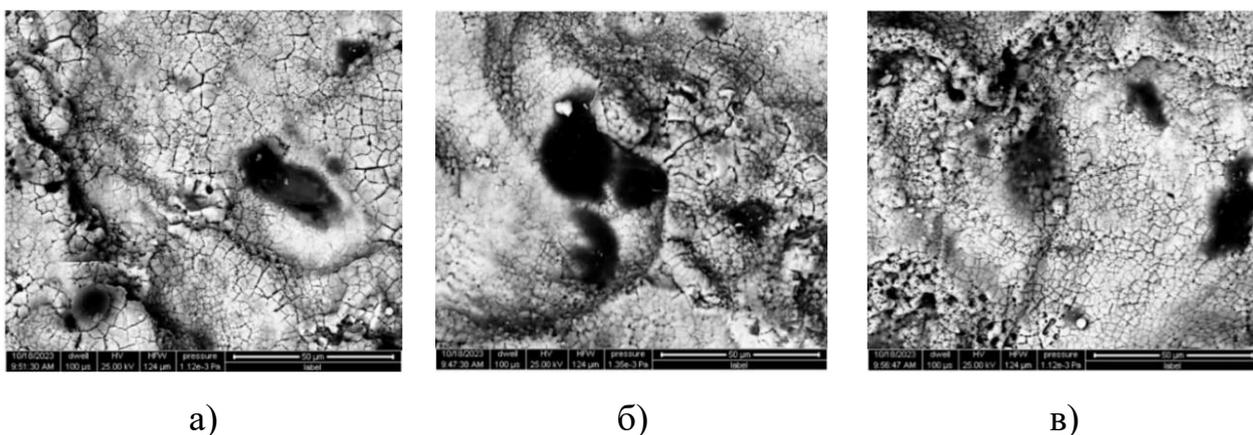


Рисунок 4.15 - Фотографии поверхности сплава ВТ6 после ЛУОБП

а)  $2,17 \text{ ГВт/см}^2$ , б)  $4,33 \text{ ГВт/см}^2$ , в)  $6,5 \text{ ГВт/см}^2$

В результате проведённого исследования было установлено, что образцы после лазерной ударной обработки без абляционного покрытия характеризуется значительным увеличением шероховатости и волнистости. Это обусловлено

образованием оксидов на поверхности сплава вследствие прямого воздействия лазерного излучения.

Однако применение лазерной ударной обработки с покрытием также влечёт за собой возникновение нежелательных эффектов при плотностях мощности более  $4 \text{ ГВт/см}^2$ , связанных с несовершенством абляционного покрытия и его интерфейса с металлом. В связи с этим необходимо предусмотреть дополнительный припуск на съём дефектного слоя или использовать альтернативное абляционное покрытие.

#### 4.4.2 Микроструктура титанового сплава ВТ6 после ЛУО

Исследование с помощью растрового электронного микроскопа микроструктуры на поперечных шлифах образцов после ЛУО с покрытием (рисунок 4.16) показала, что толщина поверхностного слоя с измененной структурой составляет до 1 мкм для плотности мощности  $2,17 \text{ ГВт/см}^2$  (рисунок 4.16б) и до 2,2 мкм для  $4,33$  и  $6,5 \text{ ГВт/см}^2$  (рисунок 4.16 г, е). В поверхностном слое после обработки в режиме  $2,17 \text{ ГВт/см}^2$  замечены неровности в виде углублений до 2,5 мкм, а для образцов, упрочненных при плотности мощности лазерного излучения  $4,33$  и  $6,5 \text{ ГВт/см}^2$ , поверхность пронизывают вертикальные микротрещины, и наблюдаются неровности глубиной до 3 мкм.

Остаточные напряжения могут приводить к изменению размеров субструктуры или изменению размеров дислокационных ячеек, причем дислокационные ячейки образуются за счет дислокационной упаковки. На изображениях поперечной структуры упрочненного сплава видны зерна твёрдого раствора алюминия в  $\alpha$ -титане, по границам которых располагаются включения  $\beta$ -фазы (твёрдого раствора алюминия и ванадия в  $\beta$ -титане) (рисунок 4.16 а, в, д). Лазерная ударная обработка вызывает сильную пластическую деформацию поверхности титанового сплава, поэтому микроструктура поверхностного слоя является измененной.  $\alpha$ -фаза способна формировать деформационные двойники, и посредством двойникового скрещивания грубая  $\alpha$ -фаза может измельчаться до субзерен, что приводит к общему измельчению зерна [118]. На рисунке 4.16а видно, что пограничные зерна  $\alpha$ -фазы дробятся и измельчаются.

Из-за разных типов решетки и ориентации, направление скольжения зерен  $\alpha$ -фазы и  $\beta$ -фазы отличаются:  $\beta$ -фаза с ОЦК решеткой имеет много систем скольжения, поэтому скольжение дислокаций внутри  $\beta$ -фазы легко получить в условиях жесткой пластической деформации. Выделение  $\beta$ -фазы по границе приповерхностного слоя для образца, обработанного при максимальной интенсивности  $6,5 \text{ ГВт/см}^2$  представлено на рисунке 4.17д.

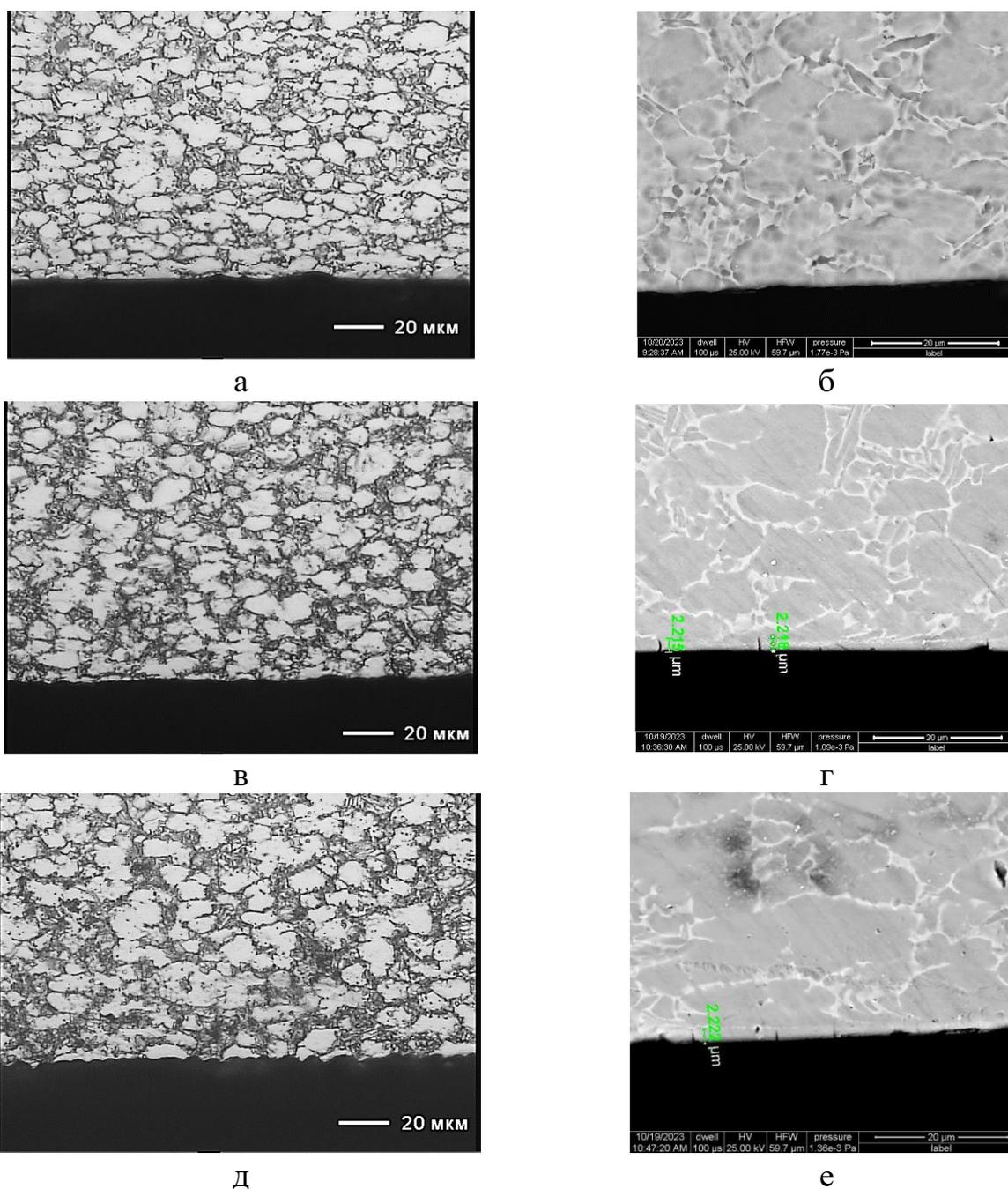


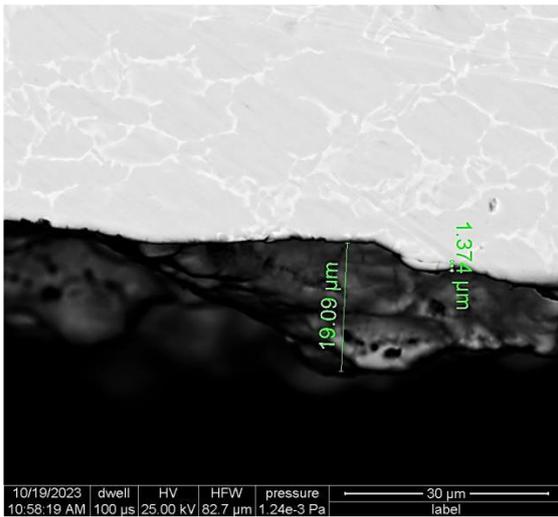
Рисунок 4.16 - Изображения микроструктуры на поперечном шлифе, полученные на РЭМ после ЛУО

а,б)  $2,17 \text{ ГВт/см}^2$ ; в,г)  $4,33 \text{ ГВт/см}^2$ ; д,е)  $6,5 \text{ ГВт/см}^2$

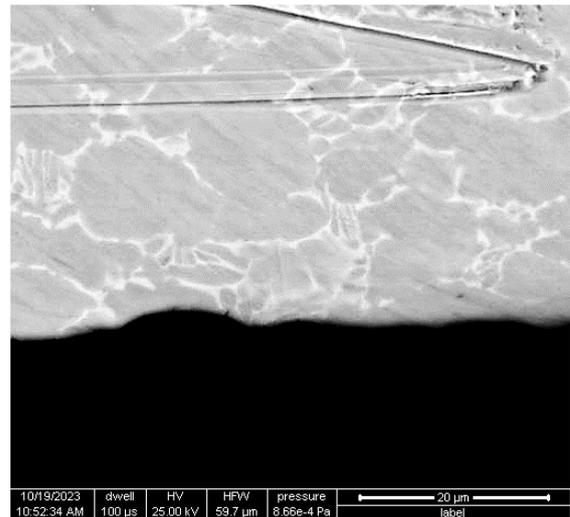
При исследовании с помощью РЭМ поперечной микроструктуры образцов обработанных ЛУО без покрытия найдено, что толщина термически выращенного оксидного слоя составляет до 20 мкм для всех образцов (рисунок 4.17). В очищенной от оксида зоне неровности поверхности достигают глубины 3 мкм. Толщина поверхностно-измененного слоя достигает 1,4 мкм для образца обработанного при 2,17 ГВт/см<sup>2</sup> (рисунок 4.17 а, б), до 5 мкм для 4,33 ГВт/см<sup>2</sup> (рисунок 4.17 в, г) и до 3,5 мкм для 6,5 ГВт/см<sup>2</sup> (рисунок 4.17 д, е). Поверхностный слой пронизывают вертикальные микротрещины, зарождение которых для образцов, подвергнутых ЛУО без поглощающего покрытия, произошло при использовании интенсивности лазерного излучения 4,33 и 6,5 ГВт/см<sup>2</sup>. При этом толщины измененного поверхностного слоя несколько превышают толщины, полученные при идентичных энергиях лазерного излучения для образцов обработанных ЛУО с покрытием

Наличие вертикальных микротрещин в приповерхностном слое толщиной до 3 мкм может быть связано с тем, что остаточные напряжения в тангенциальном и радиальном направлениях были различны на краях пятен обработки. Чтобы сбалансировать остаточные сжимающие напряжения внутри пятна, напряжения в тангенциальном направлении на краю пятна могли быть растягивающими.

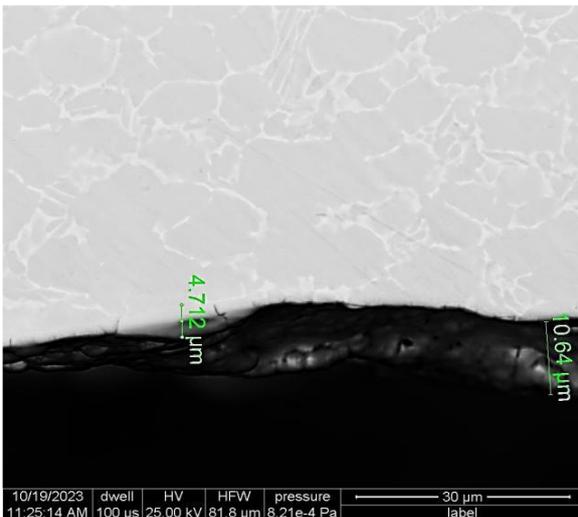
На рисунке 4.18 хорошо видна ячеистая периодическая микроструктура сплава в слое, примыкающем к термически выращенному оксиду, упрочненного ЛУО без покрытия с интенсивностью лазерного излучения 6,5 ГВт/см<sup>2</sup>. Микроструктура на границе представляет собой последовательность ячеек размером до 2 мкм. На каждое зерно  $\alpha$ -титана приходится до 5 ячеек. Формирование ячеистой структуры могло происходить как в результате оплавления поверхности, так и в результате формирования оксидов на основе титана, как было отмечено в работе [119].



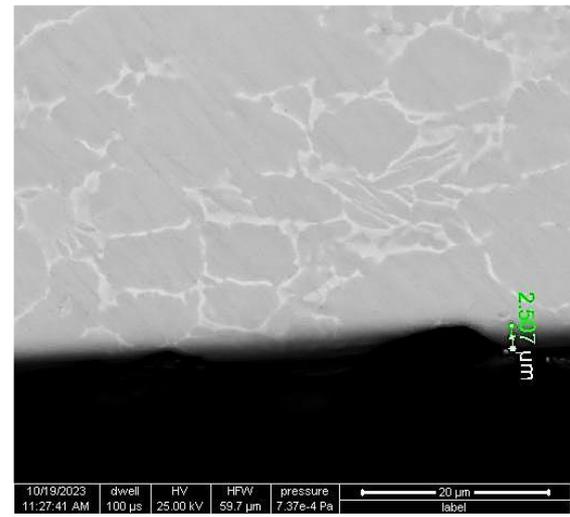
а



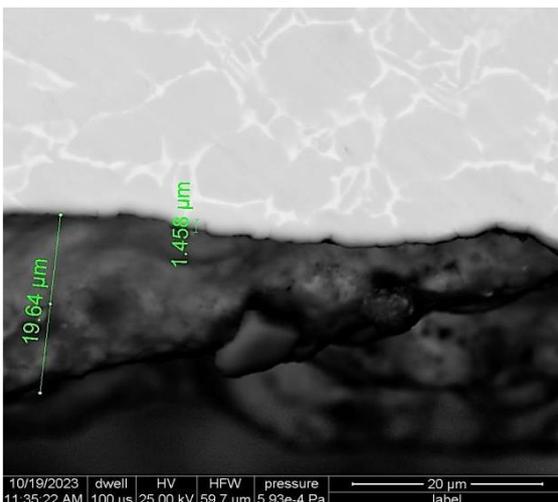
б



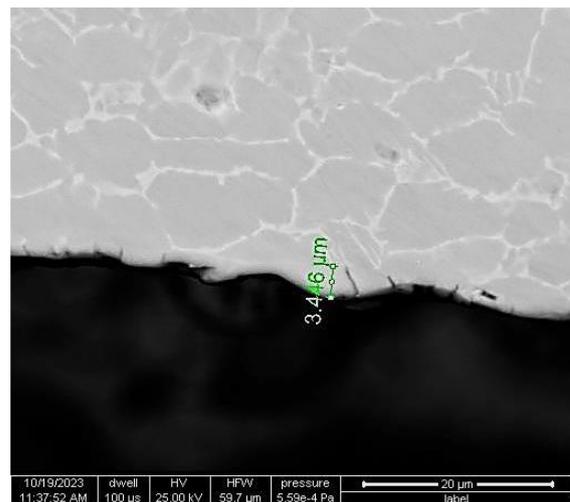
в



г



д



е

Рисунок 4.17 - Изображения РЭМ микроструктуры на поперечном шлифе до и после очистки от оксида образцов после ЛУОБП а,б)  $2,17 \text{ ГВт/см}^2$ ; в,г)  $4,33 \text{ ГВт/см}^2$ ; д,е)  $6,5 \text{ ГВт/см}^2$

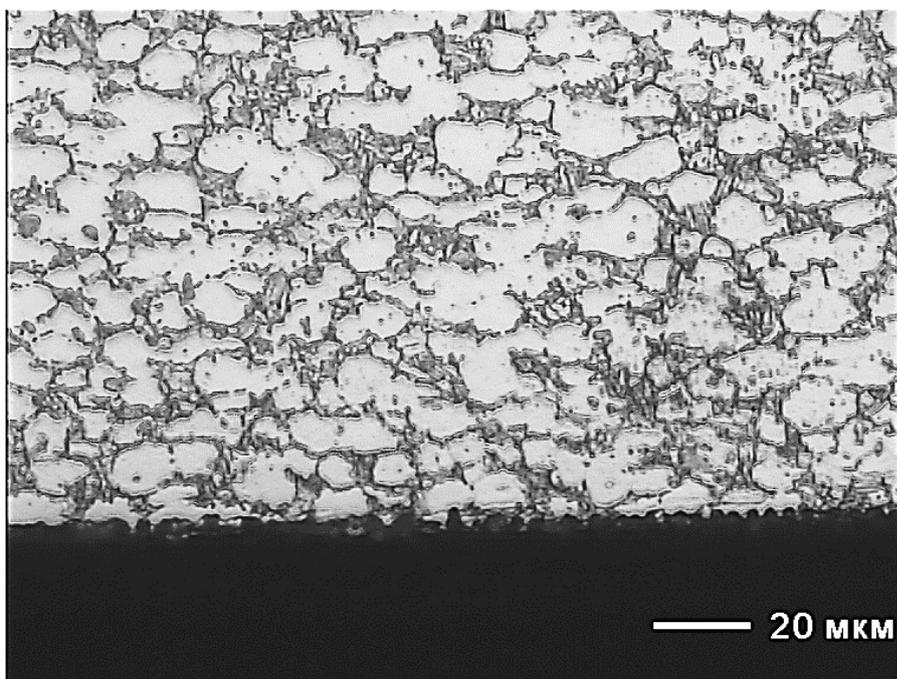


Рисунок 4.18 - Ячеистая структура на границе упрочненный слой - термический оксид для образца  $6,5\text{ГВт}/\text{см}^2$

Таким образом, металлографические исследования поверхности показали, что даже с применением абляционного покрытия при плотности мощности выше  $4\text{ГВт}/\text{см}^2$  происходит формирование поверхностно-измененного слоя толщиной 1-2 мкм, характеризующегося такими нежелательными дефектами, как микротрещины. Поэтому проведение последующей ЛУО полировки для устранения поверхностного слоя является желательной операцией. Для образцов, подвергнутых ЛУОБП, дополнительная механическая обработка также необходима в связи с наличием термически выращенных слоев оксида, обладающего структурными дефектами разрушающего характера.

#### **4.4.3 Микротвердость и степень наклепа титанового сплава ВТ6 после ЛУО**

Оценка качества поверхностного слоя по глубине упрочненного слоя и степени наклепа для указанных выше режимов проводилась на косых шлифах, графики измерения микротвердости по глубине представлены на рисунках 4.19 и 4.20, красными пунктирными линиями указаны границы изменения микротвердости необработанного сплава ВТ6.

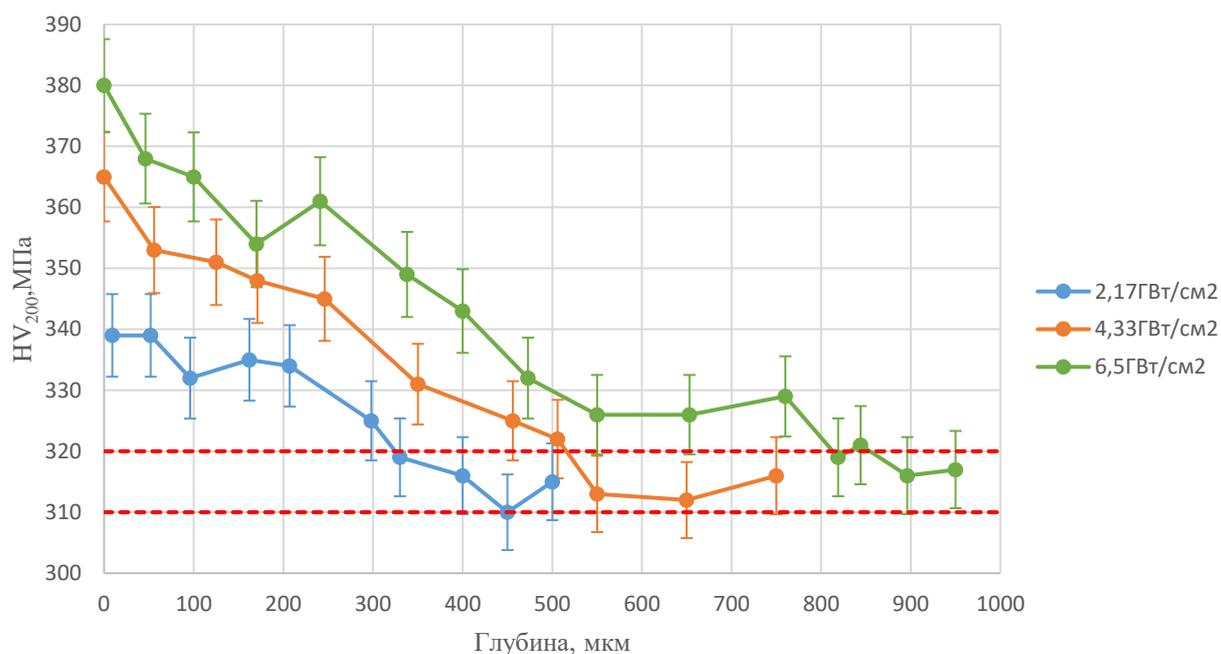


Рисунок 4.19 – Зависимость микротвердости по глубине образца после ЛУО

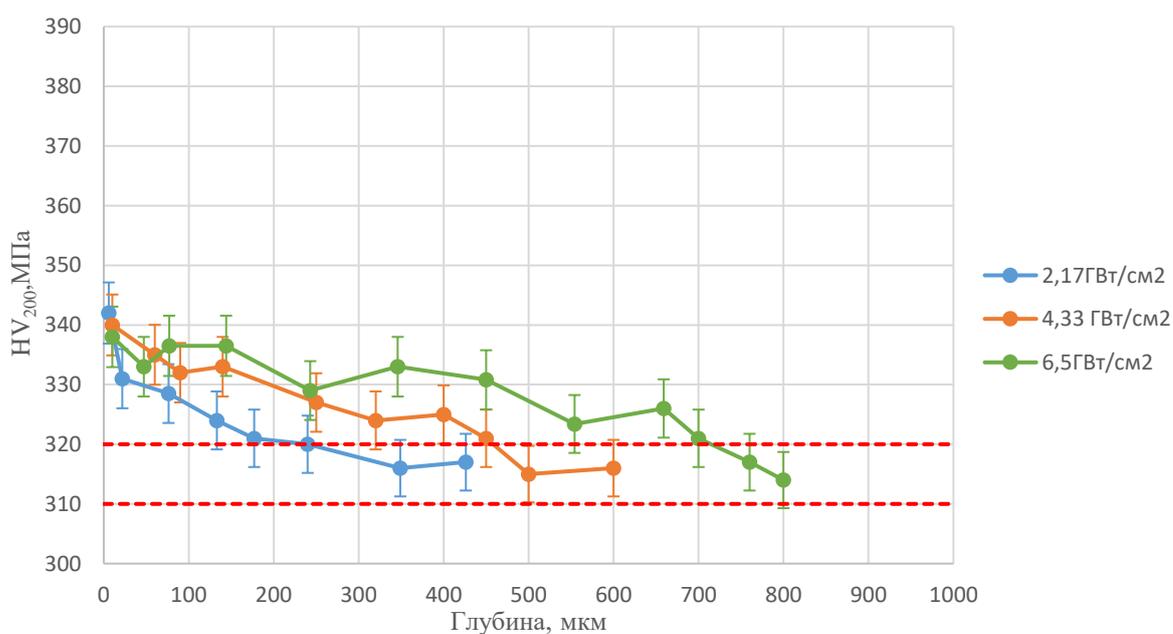


Рисунок 4.20 – Зависимость микротвердости по глубине образца после ЛУОБП

В обоих случаях – ЛУО с покрытием и без, наблюдается влияние повышения интенсивности лазерного излучения на увеличение значений и глубины микротвердости после обработки. Примечателен тот факт, что при использовании ЛУОБП максимальные достигаемые значения микротвердости находятся на уровне ~ 340-345 МПа, что соответствует значению при ЛУО с покрытием для минимальной плотности мощности в 2,17 ГВт/см<sup>2</sup>. Этот результат можно

объяснить тем, что приповерхностный слой, примыкающий к оксидному слою, является более мягким, чем слой металла после воздействия ударной волны после лазерной ударной обработки. [120].

Кроме того, глубина повышенных значений микротвердости при ЛУОБП ниже и составляет не более 700 мкм, тогда как при ЛУО она находится в диапазоне 320-820 мкм.

Таким образом, максимальная степень наклепа при ЛУО с покрытием для 6,5 ГВт/см<sup>2</sup> достигает 19%, а для ЛУОБП, под термическим слоем, достигает – 11%.

#### 4.4.4 Остаточные напряжения поверхностного слоя титанового сплава ВТ6 после лазерной ударной обработки

На рисунке 4.22 представлены эпюры ОН трех образцов после ЛУО с покрытием, обработанных при плотности мощности 2,17, 4,33 и 6,5 ГВт/см<sup>2</sup> (рисунок 4.21). На рисунке 4.23 представлены кривые релаксации ОН на противоположной поверхности в зависимости от глубины снятого слоя в обработанной зоне.

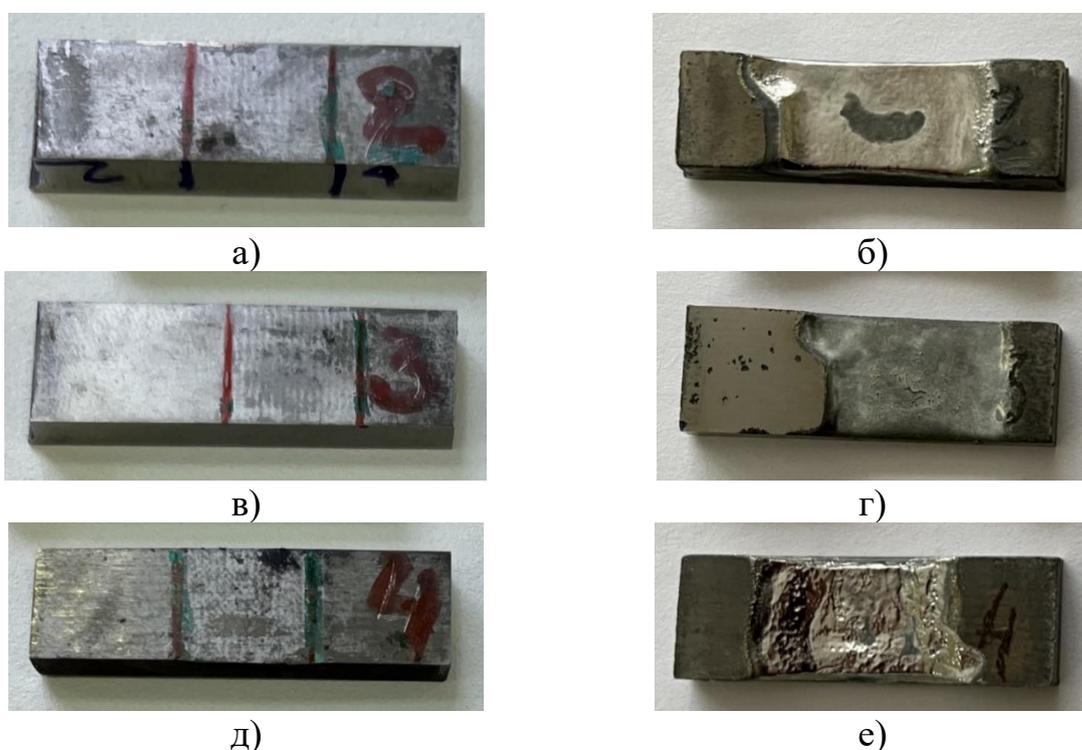


Рисунок 4.21 – Вид образцов после ЛУО с покрытием: а) 2,17 ГВт/см<sup>2</sup>, б) 4,33 ГВт/см<sup>2</sup>, в) 6,5 ГВт/см<sup>2</sup> и после травления, соответственно (б,г,е)

Сжимающие остаточные напряжения на поверхности образцов после обработки имеют небольшой разброс значений: от 509 до 569 МПа. Увеличение интенсивности лазерного излучения оказывает большое влияние на глубину проникновения ОН, так на глубине 1600 мкм величина сжимающих ОН при обработке в режиме 2,17 ГВт/см<sup>2</sup> находится на уровне 100 МПа, 4,33 ГВт/см<sup>2</sup> - 200 МПа, а 6,5 ГВт/см<sup>2</sup> – 420 МПа.

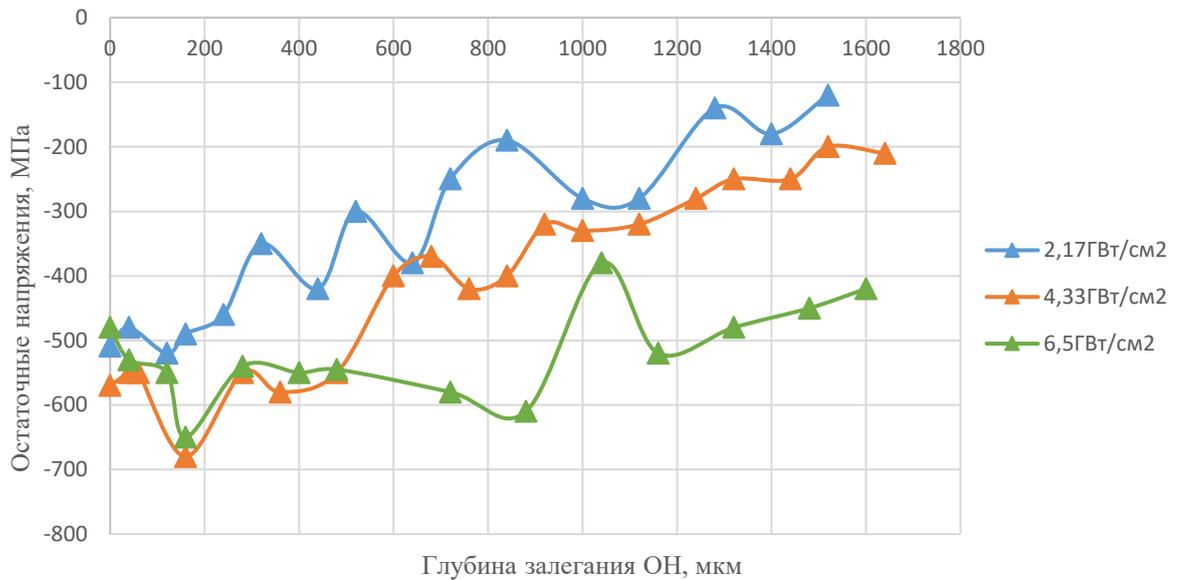


Рисунок 4.22 – Эпюры ОН на образцах, обработанных ЛУО с покрытием

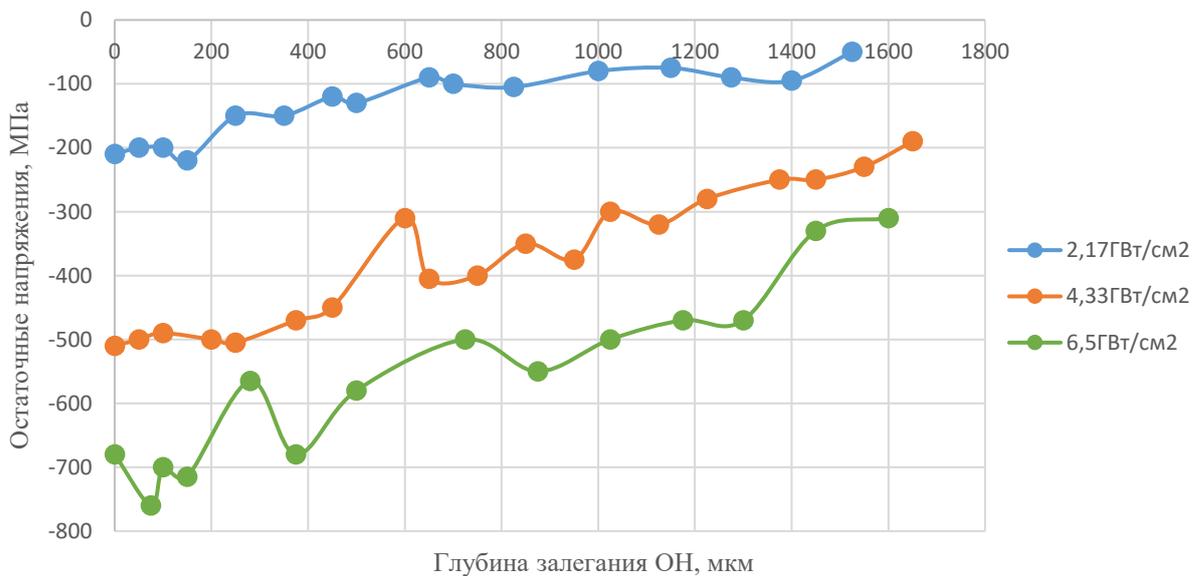


Рисунок 4.23 – Кривые релаксации ОН на образцах, обработанных ЛУО с покрытием в зоне противоположной зоне обработки ЛУО

На рисунке 4.24 представлена качественная картина распределения внутренних напряжений по всей толщине образца: 1) в зоне упрочнения, возникших в результате ЛУО, 2) компенсационных растягивающих напряжений в середине образца и 3) сжимающих напряжений на обратной стороне образца. Упрощенно, сумма всех напряжений, возникающих в секущей плоскости, равна нулю. Поэтому на обратной стороне образца возникают сжимающие ОН, которые могут и превышать максимальные значения ОН в области обработки. Это подтверждают результаты измерения, представленные на рисунке 4.24. Разброс значений сжимающих ОН на противоположной стороне при увеличении плотности мощности составляет от -200 МПа до -680 МПа. Удаление упрочненного слоя на 1600 мкм приводит к их практически линейному уменьшению до 50 МПа, 190 МПа и 300 МПа, в соответствии с увеличением плотности мощности обработки.

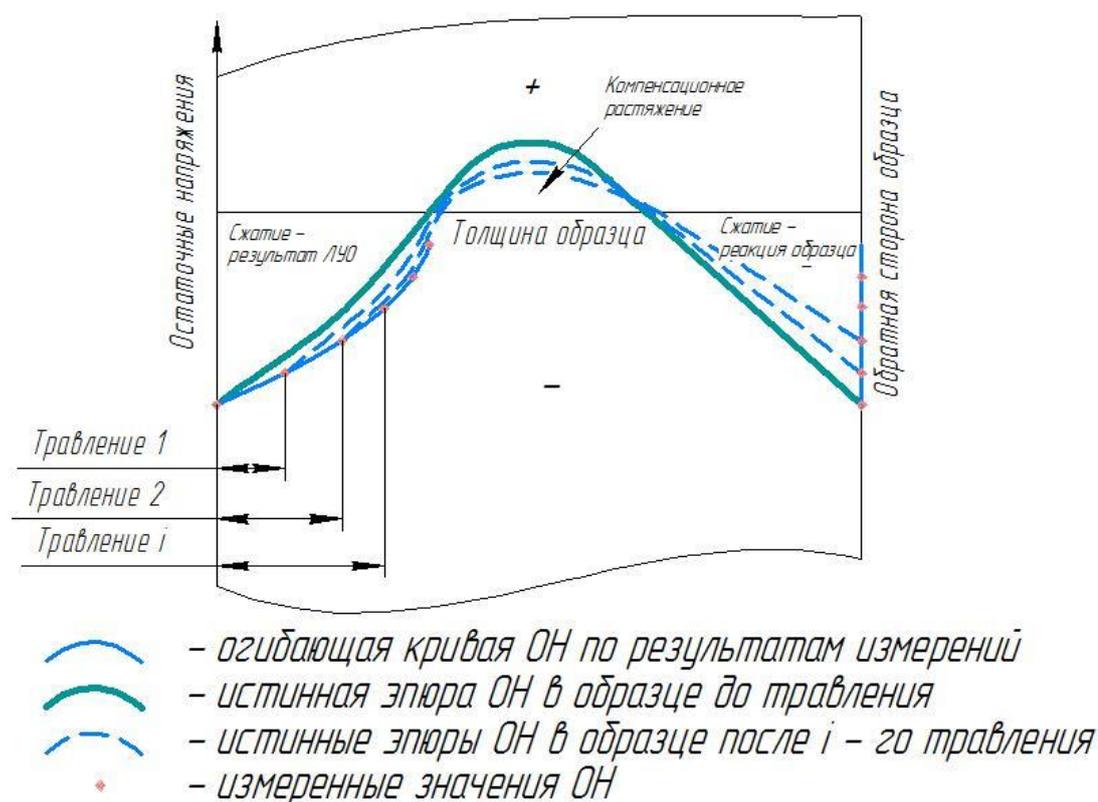


Рисунок 4.24 – Картина распределения внутренних напряжений по всей толщине образца в зоне упрочнения

На рисунке 4.26 представлены эпюры ОН трех образцов после ЛУОБП, обработанных при плотности мощности 2,17, 4,33 и 6,5 ГВт/см<sup>2</sup> (рисунок 4.25). На

рисунке 4.27 представлены кривые релаксации ОН на противоположной поверхности в зависимости от глубины снятого слоя в обработанной зоне.

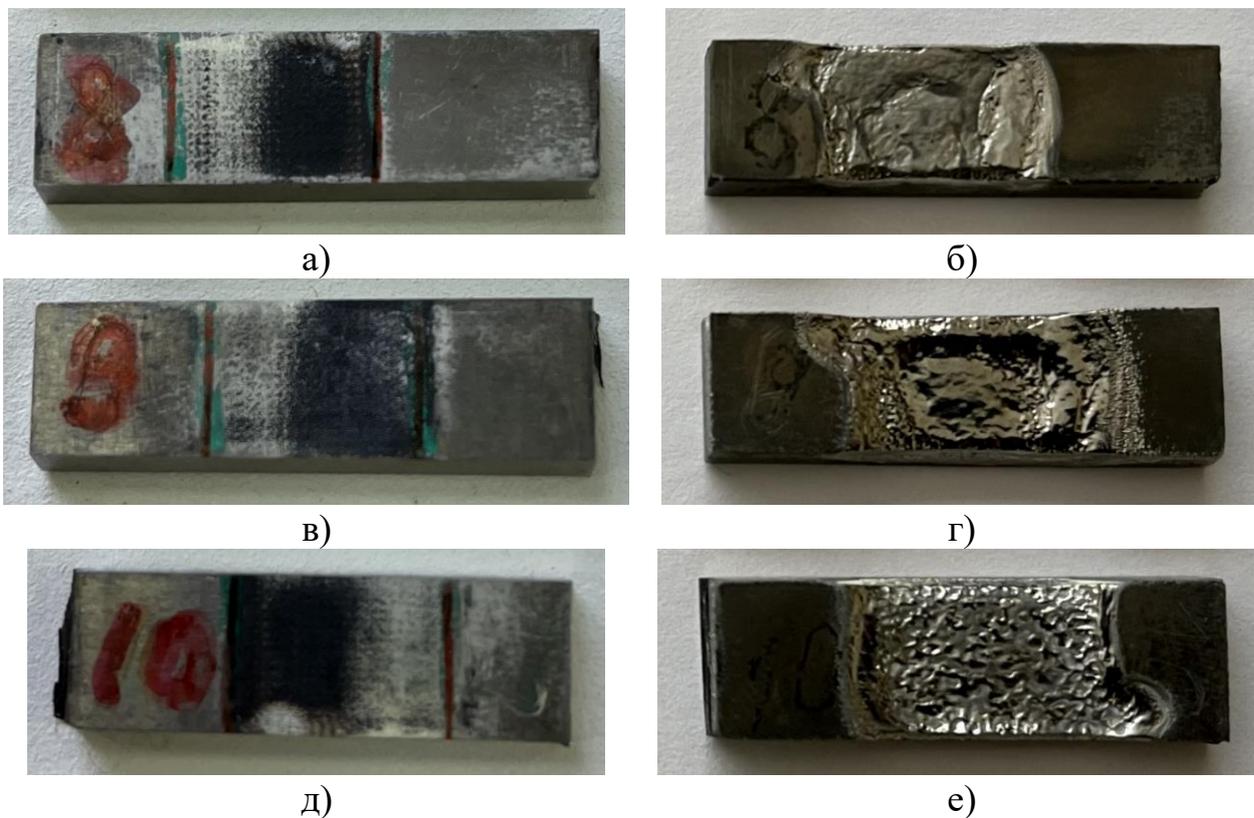


Рисунок 4.25 – Вид образцов после ЛУО без покрытия: а) 2,17 ГВт/см<sup>2</sup>, б) 4,33 ГВт/см<sup>2</sup>, в) 6,5ГВт/см<sup>2</sup> и после травления, соответственно (б,г,е)

Сжимающие остаточные напряжения на поверхности образцов после обработки ЛУОбП (рисунок 4.26) имеет разброс значений: от 590 МПа до 350 МПа. Уменьшение поверхностных сжимающих ОН с увеличением интенсивности излучения связано с возникновением больших растягивающих напряжений в связи с большей тепловой мощностью, подводимой при абляции.

Также как и при ЛУО с покрытием увеличение интенсивности лазерного излучения оказывает большое влияние на глубину проникновения ОН, так величина сжимающих ОН равная 150 МПа при обработке с плотностью мощности 2,17 ГВт/см<sup>2</sup> достигается на глубине ~ 1000 мкм, 4,33 ГВт/см<sup>2</sup> ~ 1300 мкм, а 6,5ГВт/см<sup>2</sup> ~ 1850 мкм.

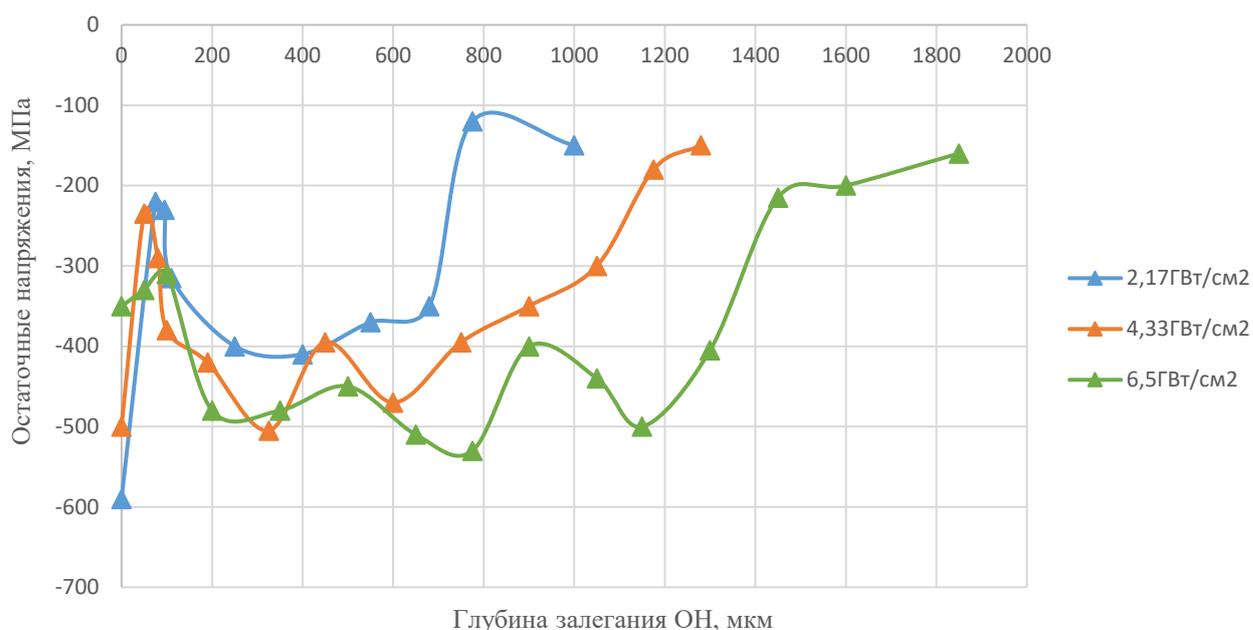


Рисунок 4.26 – Эпюры ОН на образцах, обработанных ЛУОБП

Разброс значений сжимающих ОН на противоположной стороне (рисунок 4.27) при увеличении интенсивности излучения составляет от 120 МПа до 500 МПа, что в целом соответствует меньшим суммарным ОН, формируемому в результате влияния расплавленного слоя.

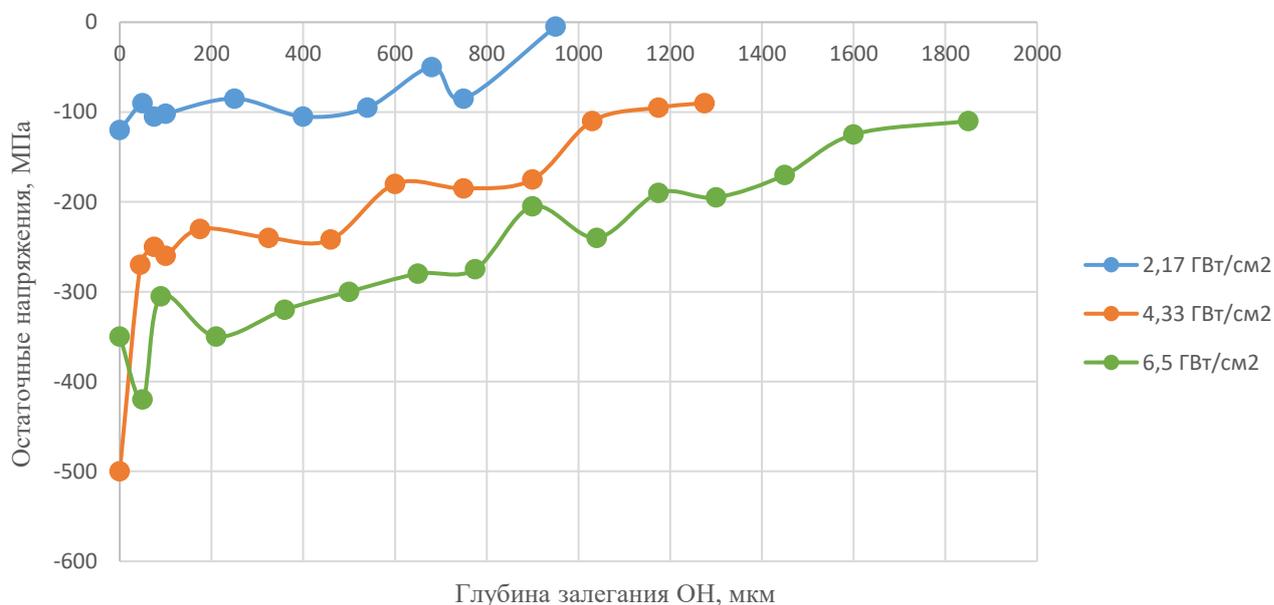


Рисунок 4.27 – Кривые релаксации ОН на образцах, обработанных ЛУО с покрытием в зоне противоположной зоне обработки ЛУО

На рисунках 4.28–4.30 представлены сравнительные эпюры ОН, полученные для ЛУО с покрытием и без, для каждой интенсивности излучения отдельно, на которых наглядно показано влияние модифицированного слоя в результате плавления при отсутствии покрытия, а также качественное совпадение эпюр в более глубоких слоях.

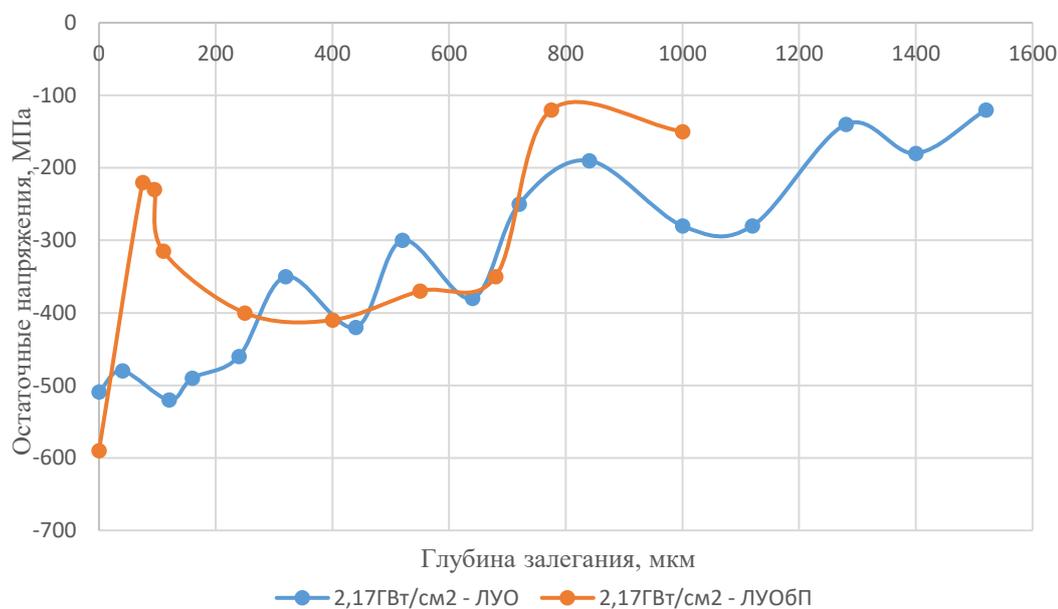


Рисунок 4.28 – Эпюры образцов обработанных ЛУО и ЛУОБП в режиме  $2,17 \text{ ГВт/см}^2$

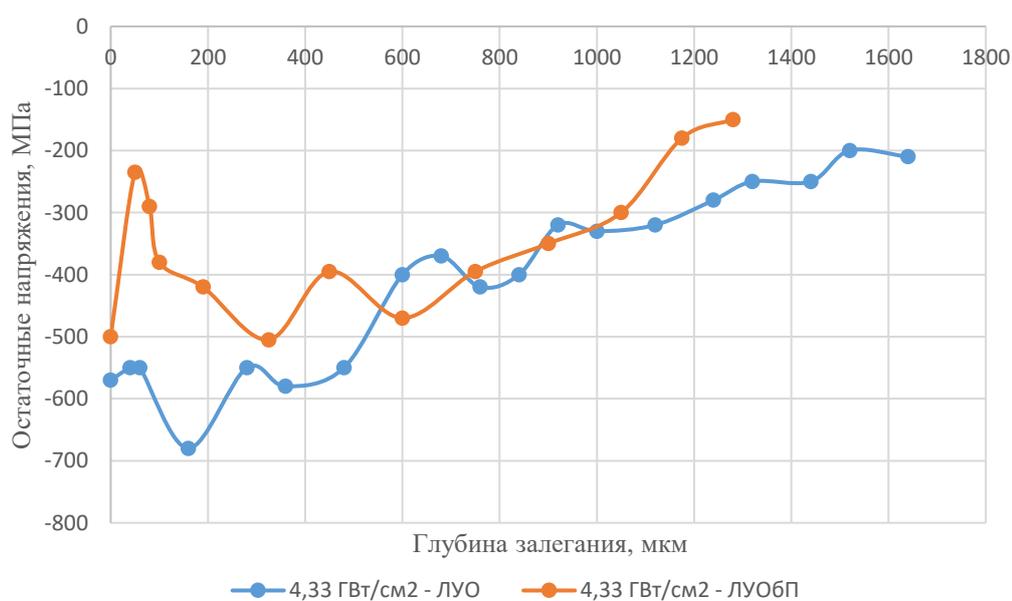


Рисунок 4.29 – Эпюры образцов обработанных ЛУО и ЛУОБП в режиме  $4,33 \text{ ГВт/см}^2$

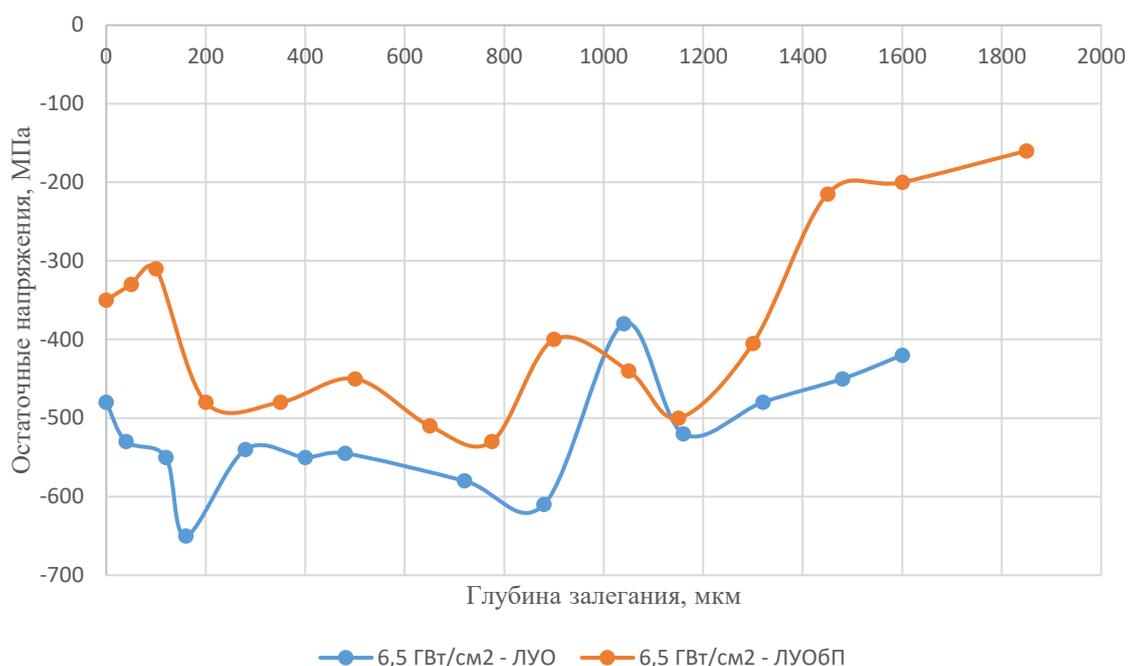


Рисунок 4.30 – Эпюры образцов обработанных ЛУО и ЛУОБП в режиме  $6,5\text{ГВт/см}^2$

Необходимо отметить, что использованная в работе методика измерения ОН с помощью рентгеновского дифрактометра не позволяет учитывать прогибы образцов, возникающие в результате действия, сформировавшихся ОН в процессе ЛУО, а при послойном удалении упрочненного слоя возникает обратный процесс – уменьшение прогиба, что ведет к изменению НДС образца и некоторому перераспределению ОН.

Остаточные напряжения также были измерены с помощью метода ак.Давиденкова, который широко распространен в измерительных лабораториях двигателестроительных предприятий. Его достоинством является измерение ОН путем измерения деформации образца при послойном снятии остаточных напряжений с помощью травления. Таким образом, он лишен недостатков рентгеновского метода.

На рисунке 4.31 представлен график распределения сжимающих ОН после ЛУО с покрытием при обработке с увеличением интенсивности лазерного излучения. Из графика видно качественное совпадение значений ОН с результатами рентгеновского анализа. Величина сжимающих ОН на поверхности

находится в диапазоне от 300 до 400 МПа, а глубина проникновения от 300 мкм для 2,17 ГВт/см<sup>2</sup> до 900 мкм для 6,5 ГВт/см<sup>2</sup>.

Более низкие значения сжимающих напряжений на поверхности и по глубине по сравнению с рентгеновским методом объясняются различием принципов измерения ОН и имеют статистическое подтверждение на большой выборке материалов, т. е. значения одних и тех же ОН, измеренных рентгеновским дифрактометром, всегда выше значений ОН, измеренных методом ак. Давиденкова, в ~1,2-1,5 раза. Поэтому методы измерения поверхностных ОН всегда необходимо использовать в качестве сравнительных методов с эталонными образцами.

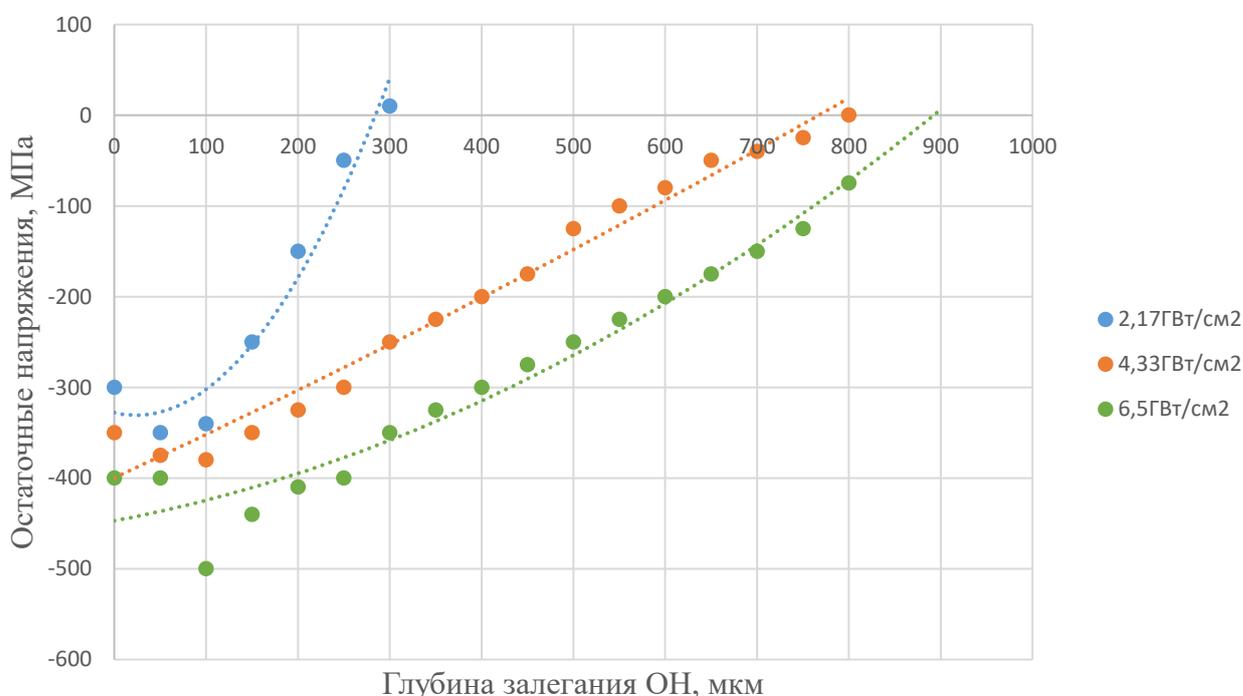


Рисунок 4.31 – Эпюры остаточных напряжений, измеренные методом ак. Давиденкова, с использованием ЛУО с покрытием

Таким образом, полученные результаты измерения ОН с использованием рентгеновского дифрактометра и методом ак. Давиденкова показали:

1. ЛУО с покрытием 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 с покрытием, 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.

4. Поскольку энергия ЛУО достаточна велика, воздействие лазерного излучения на определённых режимах может приводить к непрогнозируемой эпюре ОН для тонкостенных элементов, например таких, как кромка лопатки, нанося в них обширные сквозные пластические деформации, что может ухудшить усталостную прочность.

#### 4.5. Усталостные испытания титанового сплава ВТ6 после лазерной ударной обработки

Для определения влияния ЛУО на эксплуатационные характеристики титанового сплава ВТ6 были проведены усталостные испытания корсетных образцов (глава 3). Лазерная ударная обработка образцов проводилась в режимах, указанных в таблице 4.6. Для сравнительного анализа влияния различных методов ППД на усталостную прочность корсетные образцы обрабатывались дробью с помощью дробемета шариками диаметром 2 мм из стали ШХ15 и временем экспозиции 30 мин.

Таблица 4.6 – Режимы обработки корсетных образцов для усталостных испытаний.

Вид	Абляционное покрытие	Отражающий слой	Диаметр пятна ЛИ, мм	Интенсивность излучения, ГВт/см <sup>2</sup>	Перекрытие пятен
ЛУО	ПВХ лента	вода	1,4	2,17	60%
ЛУО				4,33	
ЛУО				6,5	

Для усталостных испытаний была выбрана база на уровне  $5 \times 10^4$  циклов, что соответствует началу участка многоциклового усталости на диаграмме Веллера для

титанового сплава ВТ6 при нагружении 555 Мпа. Для получения статически значимого результата использовалось 5 образцов для каждого режима обработки ЛУО, дробью и без обработки. Результаты проведенных испытаний представлены на рисунке 4.32.

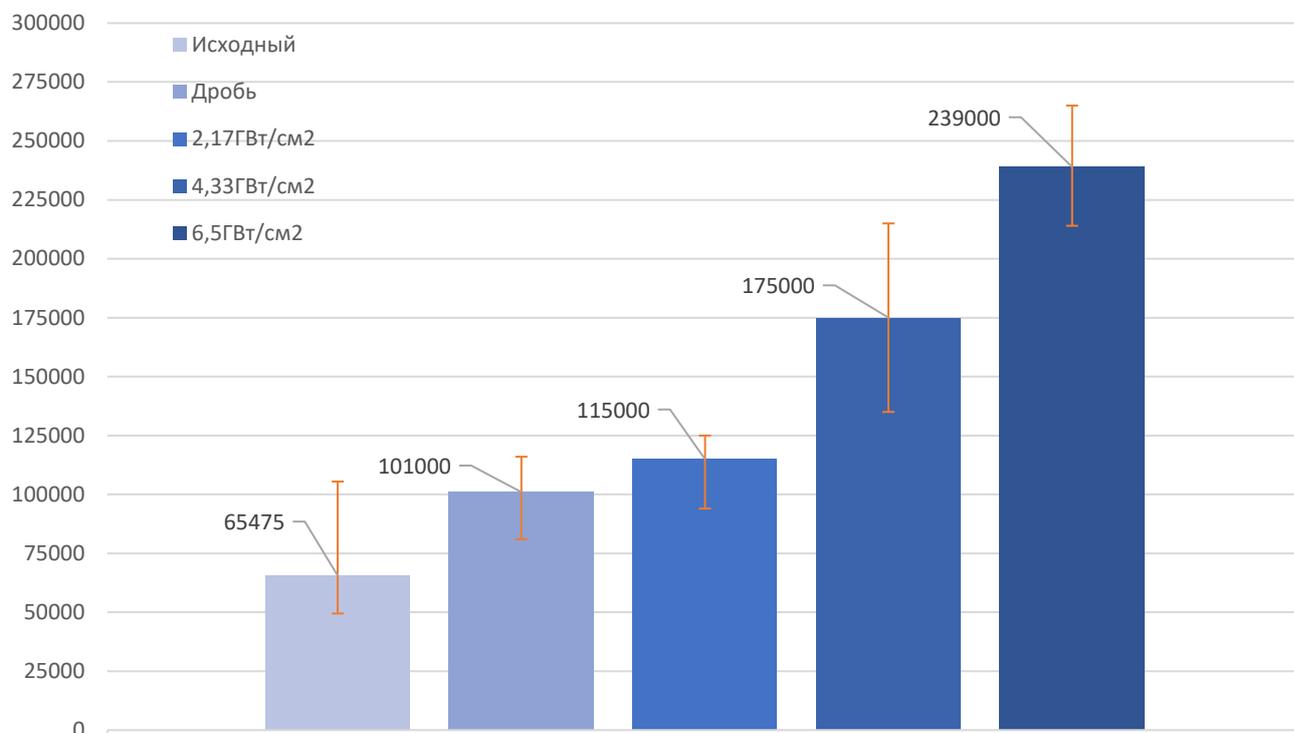


Рисунок 4.32 – Результаты испытаний на многоцикловую усталость неупрочнённых образцов, образцов после ДСО и ЛУО.

Из рисунка 4.32 видно, что среднее значение усталостной долговечности исходных неупрочненных образцов находится на уровне 65 475 циклов, причем 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 ГВт/см<sup>2</sup>, при которой прирост усталостной долговечности составил 136% относительно образцов после ДСО и 268% относительно исходных неупрочненных образцов.

#### 4.6 Фрактографический анализ образцов после испытаний

Корсетные образцы после завершения усталостных испытаний доламывались для проведения фрактографических исследований поверхности

излома. На рисунке 4.33 представлены фотографии изломов образцов, полученные на оптическом микроскопе.

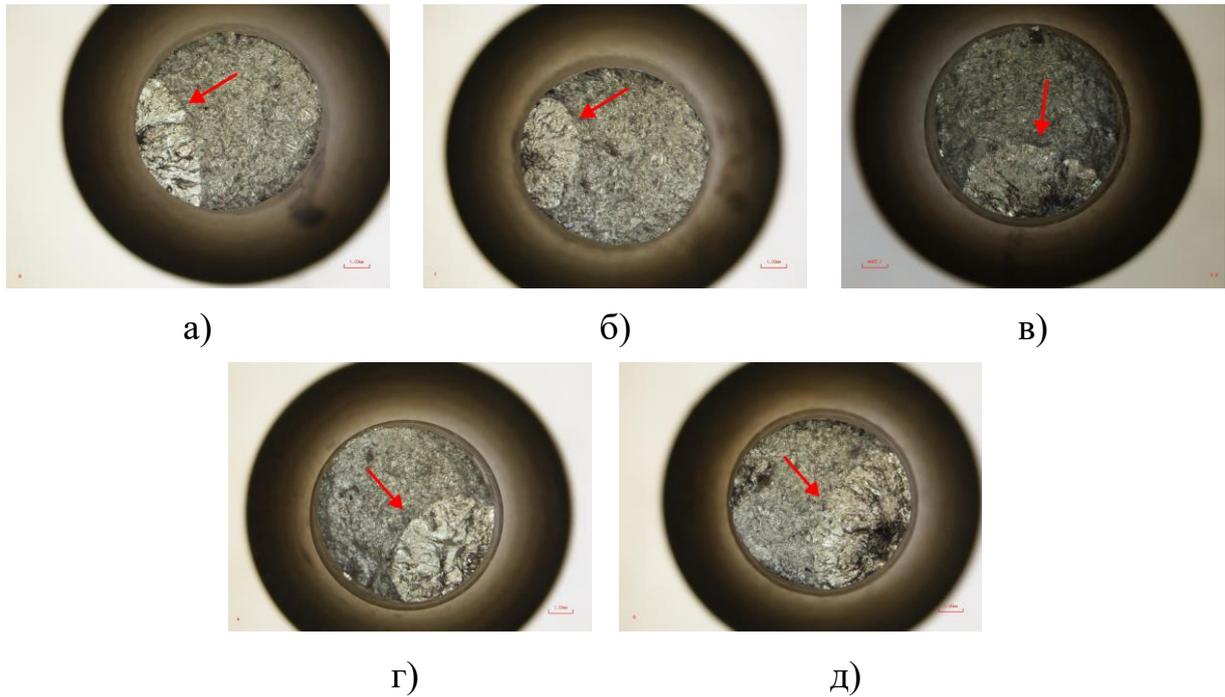


Рисунок 4.33 – Фотографии поверхности излома образцов после проведения испытаний на многоцикловую усталость

а) Без обработки, б) ДСО, в)  $2,17 \text{ ГВт/см}^2$ , г)  $4,33 \text{ ГВт/см}^2$ , д)  $6,5 \text{ ГВт/см}^2$

Красными стрелками показан фронт распространения усталостной трещины. Стоит отметить, что с изменением режима обработки увеличивается область развития усталостной трещины. На рисунке 4.34 приведена гистограмма зависимости площади распространения фронта усталостной трещины к площади излома образца, а также сравнение с результатами усталостных испытаний.

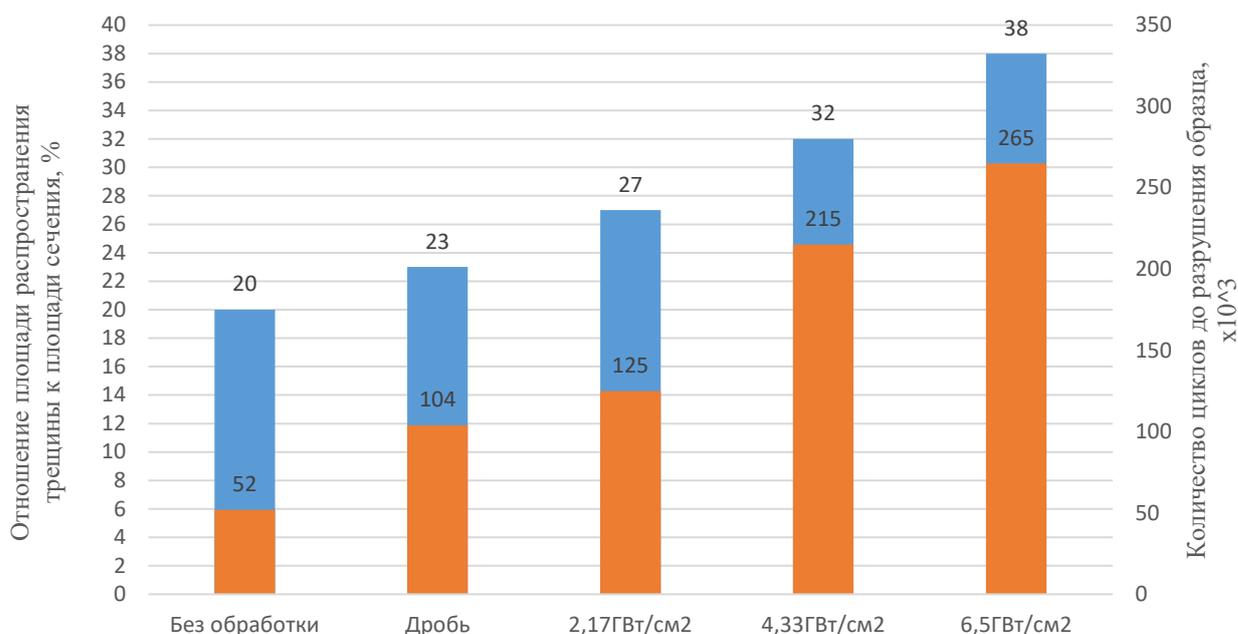


Рисунок 4.34 – Отношение области распространения трещины к площади сечения образца

Из рисунка видно, что при использовании ДСО, а также различных режимов ЛУО происходит рост отношения площадей распространения усталостной трещины к площади поверхности излома. Причем данная тенденция хорошо видна на образцах после ЛУО, обработанных в разных режимах, где рост сопровождается увеличением количества циклов до разрушения образцов. Отсюда можно сделать вывод о том, чем большие пластические деформации после обработки в образце (рисунок 4.31), тем дольше трещина развивается и достигает своего критического состояния.

Более детально изучение поверхности изломов образцов изучалось по рисункам 4.35–4.39. На рисунке 4.35 представлен излом неупрочненного образца, из которого видно, что распространение трещины началось с поверхности образца.

Особенностью всех образцов после применения ДСО и ЛУО является то, что в очаговой области, на поверхности излома наблюдались фасетки квазискола, которые представляли из себя относительно ровный участок поверхности с явно или неявно выраженными границами. Также известно, что при первоначальном зарождении трещины формируются фасетки [121, 122], поэтому в дальнейшем глубина зарождения очага трещины будет анализироваться по глубине залегания

фасетки, образовавшейся под поверхности образца и от которой в дальнейшем развивалась усталостная трещина.

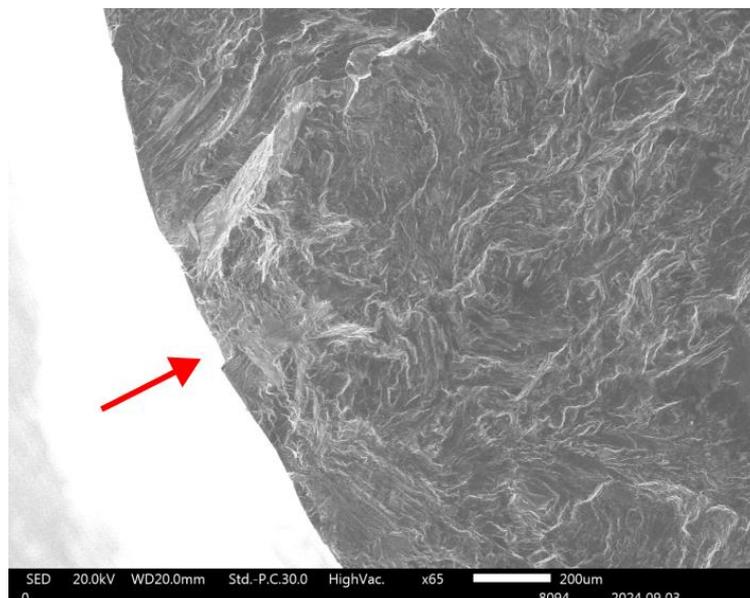


Рисунок 4.35 – Очаг зарождения усталостной трещины на образце без обработки

На рисунке 4.36 представлена фотография поверхности излома образца после ДСО. Из рисунка видно, что характерной областью, являющейся очагом зарождения трещины, является появившееся на изломе фасетка. Причем в отличие необработанного образца, у которого трещина начала развиваться с поверхности, в образце после ДСО место зарождения трещины находится на глубине порядка 277 мкм. Таким образом, обработка дробью создает упрочненный слой, который, в свою очередь, переносит место зарождения трещины под поверхность.

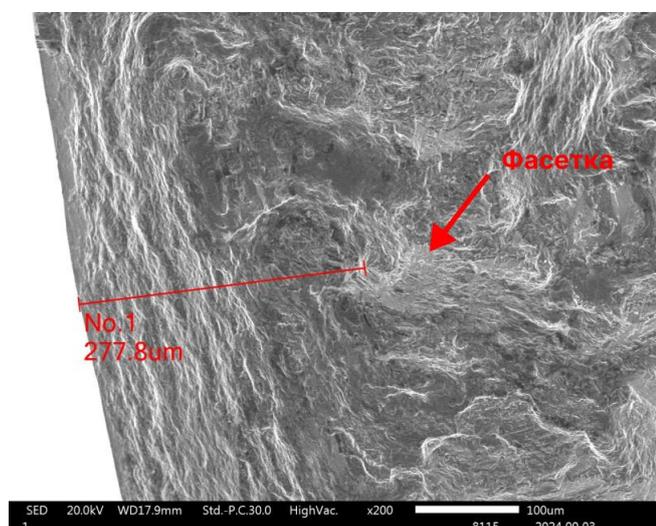


Рисунок 4.36 – Очаг зарождения усталостной трещины на образце после ДСО

На рисунке 4.37 представлена фотография излома после обработке ЛУО в режиме  $2,17 \text{ ГВт/см}^2$ . Также как и на образце после ДСО, на образце после ЛУО обнаружилась фасетка. Глубина залегания данного скола находится на глубине 366 мкм, что больше, чем у образца после дробы – 277 мкм.

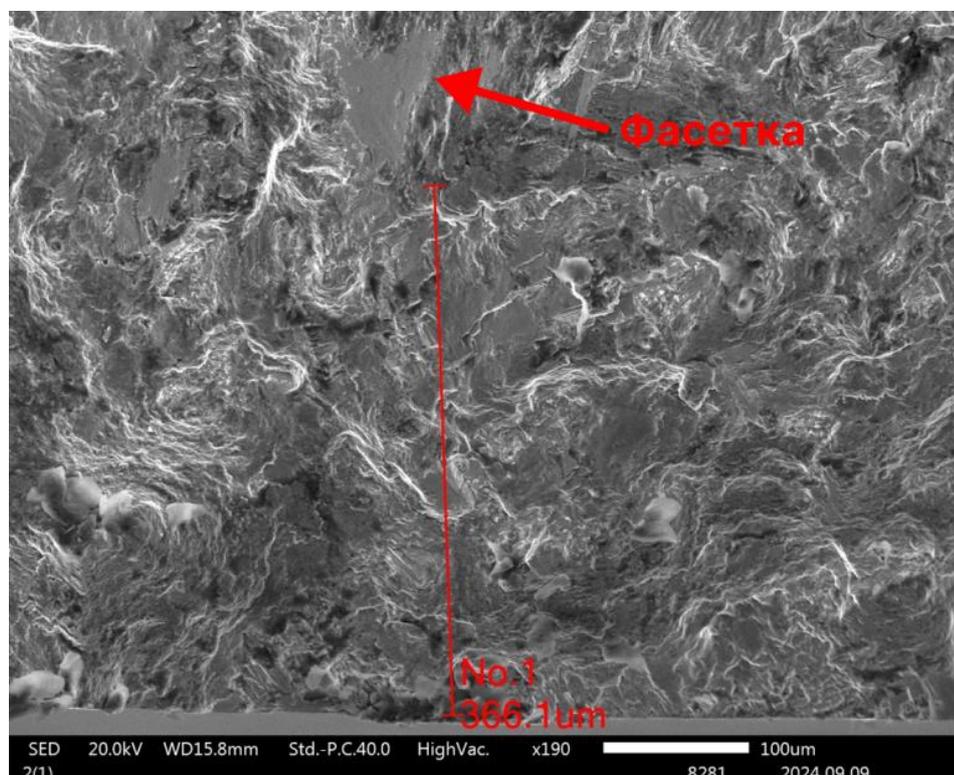


Рисунок 4.37 - Очаг зарождения усталостной трещины на образце после ЛУО в режиме обработки  $2,17 \text{ ГВт/см}^2$

Рисунок 4.38 показывает место зарождения усталостной трещины на образце после ЛУО в режиме  $4,33 \text{ ГВт/см}^2$ . Видно, что на поверхности излома присутствуют 2 фасеточные области, причем место зарождения трещины принимается по расположению маленькой фасетки. Глубина очага зарождения трещины находится на 768 мкм, что согласуется с глубиной залегания остаточных напряжений 750-800 мкм для этого режима (рисунок 4.26).

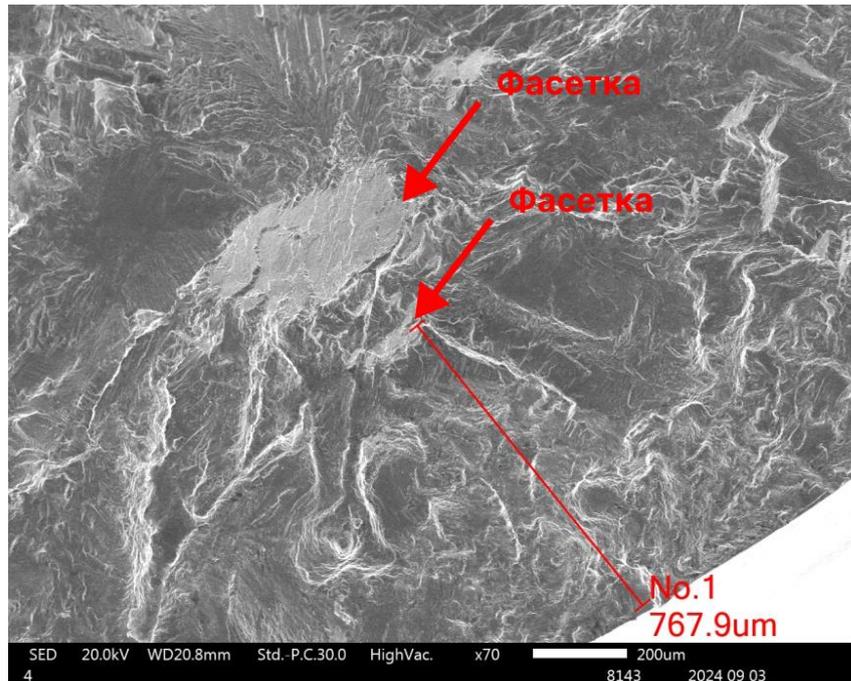


Рисунок 4.38 – Очаг зарождения усталостной трещины на образце после ЛУО в режиме обработки  $4,33 \text{ ГВт/см}^2$

Рисунок 4.39 показывает картину распространения усталостной трещины в образце после ЛУО при режиме обработки  $6,5 \text{ ГВт/см}^2$ . На изломе также наблюдается фасетка на глубине  $1188 \text{ мкм}$ .

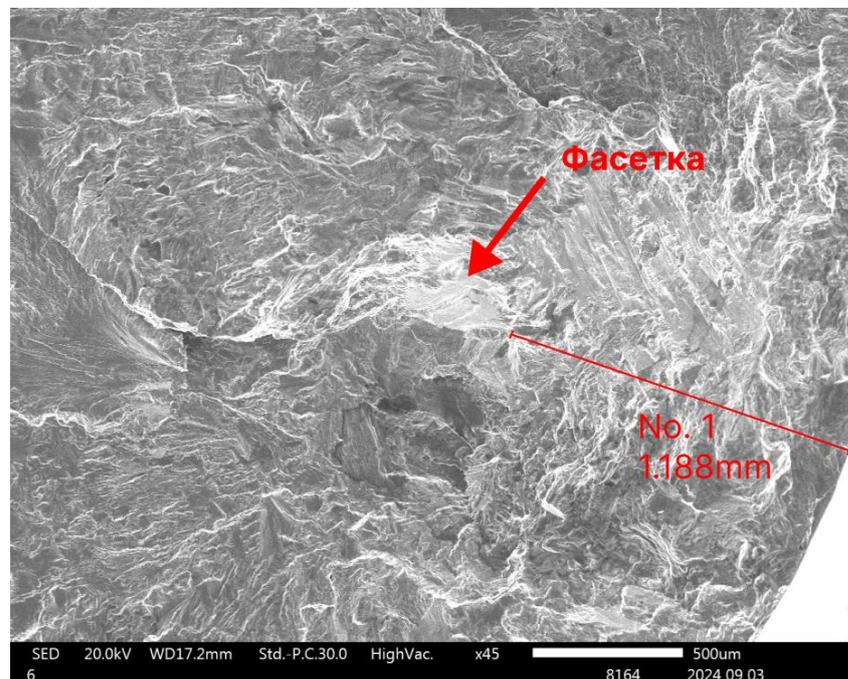


Рисунок 4.39 - Очаг зарождения усталостной трещины на образце после ЛУО в режиме обработки  $6,5 \text{ ГВт/см}^2$

Анализируя рисунки 4.35–4.39 видно, что различные режимы обработки приводят к разным значениям глубины зарождения очага усталостной трещины. На рисунке 4.40 представлены гистограмма, показывающая глубину залегания ОН и глубину очага зарождения трещины в зависимости от метода и режима обработки.

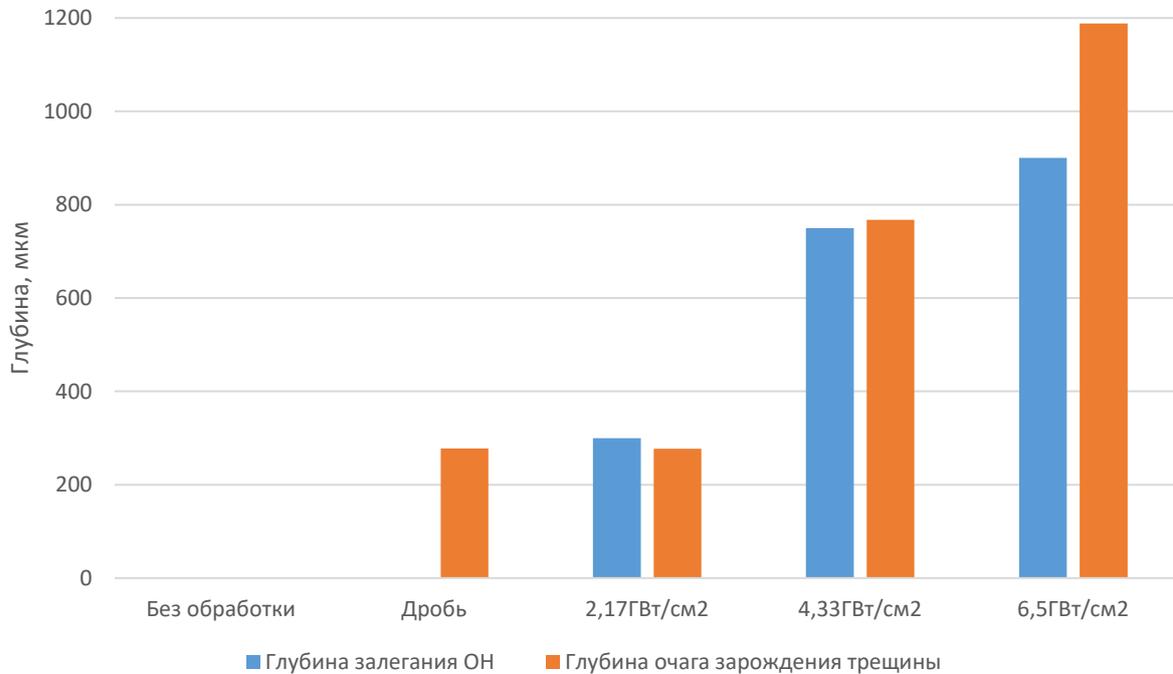


Рисунок 4.40 – Сравнение глубины залегания очага трещины и остаточных напряжений от метода и режима обработки

Таким образом из проведенных фрактографических исследования можно сделать несколько выводов:

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

#### 4.7 Выводы к главе 4

По проведенным исследованиям и испытаниям образцов из титанового сплава ВТ6 можно сделать следующие выводы:

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 (ЛУО) 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.

## ГЛАВА 5 ПРАКТИЧЕСКОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

### 5.1 Методика выбора режимов лазерной ударной обработки авиационных материалов

На основе проведенной работы по исследованию влияния режимов ЛУО на обрабатываемость титанового сплава ВТ6 была разработана методика выбора режимов лазерной ударной обработки авиационных материалов, используемых при производстве ДСЕ ДЛА и ЭУ.

Методика представлена на рисунке 5.1 и содержит следующие основные этапы:

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

— Подготовительный этап, на котором определяется материал, размер и конфигурация детали, объем производства, намечается место операции ЛУО в технологическом процессе, а также зона обработки исходя из расчетных и экспериментальных данных по наибольшим напряжениям в поверхностном слое детали.

— Формируется предварительный перечень требований к технологическому процессу лазерной ударной обработки.

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 ЛУО без покрытия.

— Формируются технические условия на технологический процесс 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.

— Формируется диапазон режимов лазерной ударной обработки материала детали.

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.

— Формируются режимы ЛУО для проведения эксплуатационных сравнительных испытаний, исходя из технических условий на деталь и полученных зависимостей влияния ЛУО на качество поверхностного слоя материала.

5) Проведение сравнительных эксплуатационных испытаний материала детали.

— Проводятся эксплуатационные испытания образцов материала, обработанных в выбранных режимах ЛУО, в сравнении со штатным или альтернативными технологическими процессами.

— Формируется отчет (протокол) о влиянии режимов ЛУО на эксплуатационные свойства материала детали.

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

— По итогам проведенных работ и при условии удовлетворительных результатов сравнительных эксплуатационных испытаний, формируется перечень

технологических рекомендаций по обработке ДСЕ. Проводятся квалификационные испытания партии ДСЕ и формируется итоговый отчет.

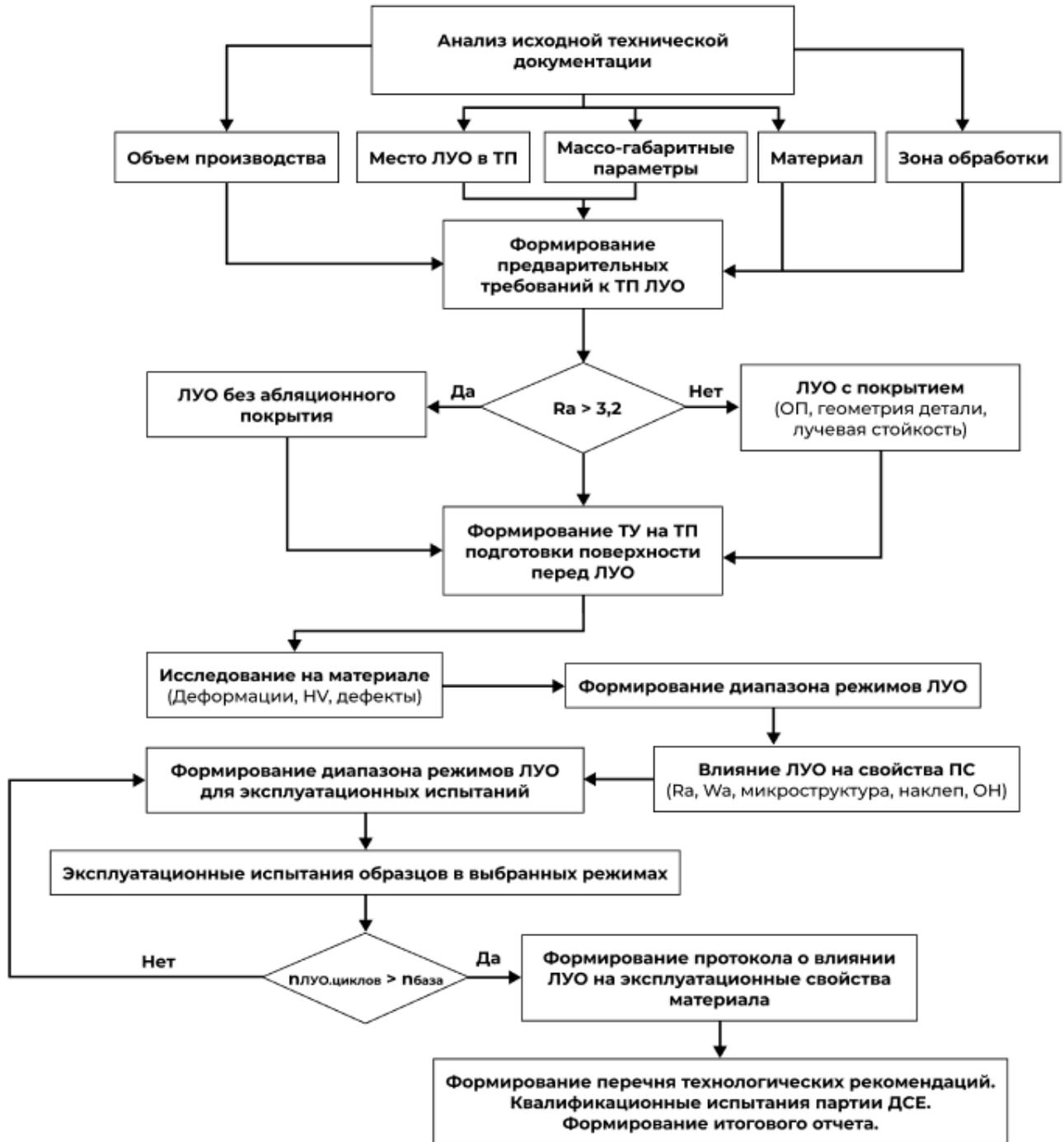


Рисунок 5.1 – Методика выбора режимов лазерной ударной обработки авиационных материалов

## 5.2 Рекомендации по обработке лопаток компрессора ГТД

Анализ результатов проведенных исследований позволил разработать рекомендации для обработки лопаток из титановых сплавов 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 (рисунок 5.2) 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.



Рисунок 5.2 – Дефект на поверхности лопатки ввиду некачественного нанесения абляционного покрытия

*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, вызванные пластическим течением материала. При обработки 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.

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

### **5.3 Опытная технологии 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, изготовленная из титанового сплава ВТ6. Общий вид лопатки представлен на рисунке 5.3.



Рисунок 5.3 – Общий вид лопатки из титанового сплава ВТ6

Целью данной работы являлась оценка влияния лазерной ударной обработки на предел выносливости компрессорных лопаток. Для достижения данной цели на базе ОКБ им. А.Люльки филиалом ПАО «ОДК-УМПО» были произведены испытания на усталость. Испытания производились методом лестницы в соответствии с ГОСТ РВ 2840-001-2008 на базе испытаний  $N=2 \cdot 10^7$  циклов.

На рисунке 5.4 представлена схема наклейки тензорезисторов для контроля величины напряжений в процессе испытаний.

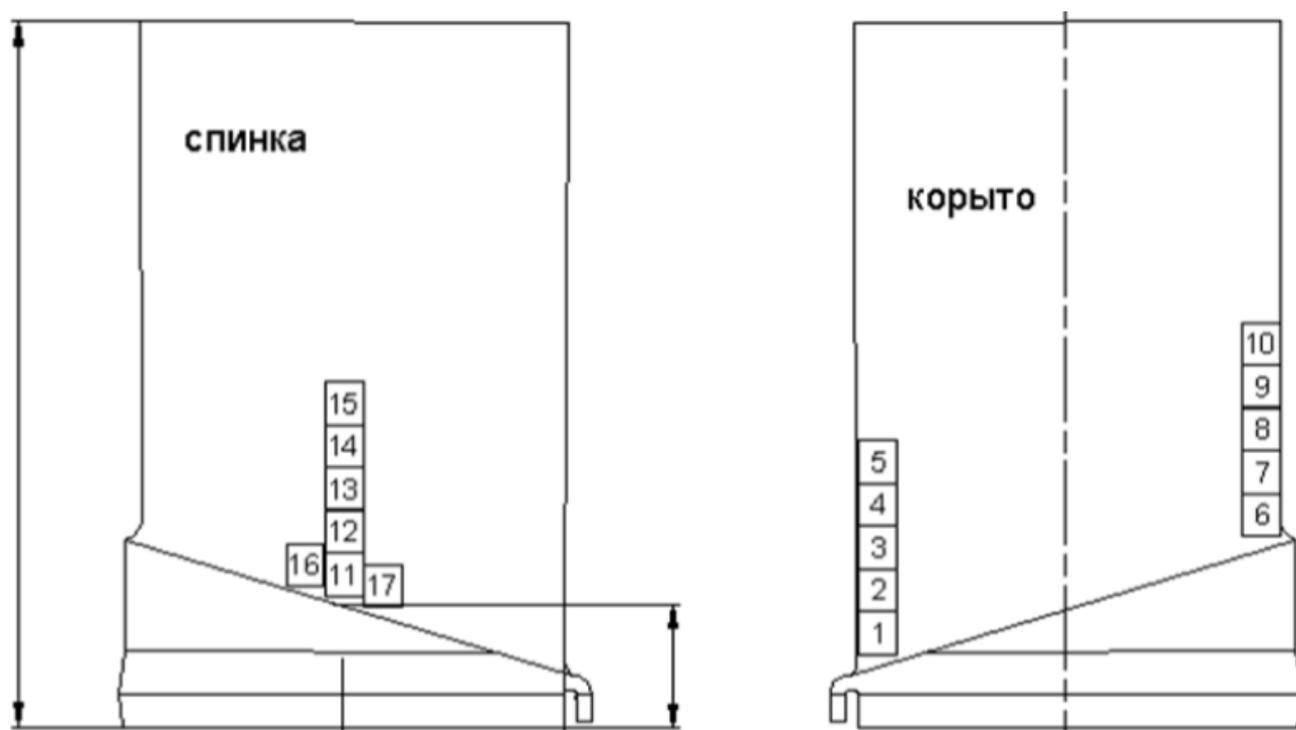


Рисунок 5.4 – Схема наклейки тензорезисторов

В таблице 5.1 указаны значения величины на тензодатчиках (на примере одной лопатки), а также значение количества циклов до разрушения детали.

Таблица 5.1 – Параметры испытаний на усталость

Величина тензонапряжения кгс/мм <sup>2</sup>	Число циклов, млн	Результат
Предел выносливости – 4 кгс/мм <sup>2</sup>	20	Выстоял
Предел выносливости – 2 кгс/мм <sup>2</sup>	20	Выстоял
Предел выносливости	20	Выстоял
Предел выносливости + 2 кгс/мм <sup>2</sup>	20	Выстоял
Предел выносливости + 4 кгс/мм <sup>2</sup>	20	Выстоял

Продолжение таблицы 5.1

Предел выносливости + 6 кгс/мм <sup>2</sup>	20	Выстоял
Предел выносливости + 8 кгс/мм <sup>2</sup>	8,4	Разрушился

На рисунке 5.5 показана фотография кромки лопатки после лазерной ударной обработки, а на рисунке 5.6 фотография трещины на лопатке после проведения усталостных испытаний.



Рисунок 5.5 – Обработка кромки лопатки методом ЛУО



Рисунок 5.6 – Трещина лопатке после проведения усталостных испытаний

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 целей, а именно:

1. Проведен анализ технологии ЛУО и разработана методика выбора режимов лазерной ударной обработки авиационных материалов, применяемых для изготовления лопаток.

2. Проведены 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. Разработаны рекомендации по технологии обработки рабочих лопаток компрессора ГТД из титановых сплавов на основе выявленных зависимостей.

4. Проведена апробация 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 (ЛУО) 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 обработки 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.

**СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ**

ЛУО – лазерная ударная обработка

ДСО – дробеструйная обработка

УЗО – ультразвуковая обработка

ППД – поверхностное пластическое деформирование

ГТД – газотурбинный двигатель

ЛА – летательный аппарат

ЭУ – энергетическая установка

ДСЕ – детали и сборочные единицы

НДС – напряженно-деформированное состояние

РЛ – рабочая лопатка

ПС – поверхностный слой

ОН – остаточные напряжения

КА – космический аппарат

ЛУОБП – лазерная ударная обработка без покрытия

ТЛУО – «теплая» лазерная ударная обработка

ФЛУОБП – фемтосекундная лазерная ударная обработка без покрытия

ПВХ – поливинилхлорид

ЧПУ – числовое программное управление

ПК – персональный компьютер

ЛИ – лазерное излучение

РЭМ – растровый электронный микроскоп

КД – конструкторская документация

**СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Петухов А.Н. Сопротивление усталости деталей ГТД. – М.: Машиностроение, 1993. – 240 с.: ил. ISBN 5-217-01888-7
2. Основы технологии производства газотурбинных двигателей: Учебник для студентов авиац. спец. вузов / А.М. Сулима, А.А. Носков, Г.З. Серебренников. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1996. – 480 с.: ил.
3. Основы технологии производства воздушно-реактивных двигателей. Учебник для студентов авиационных специальностей вузов/ А. М. Сулима, А. А. Носков, А. В. Подзей и др. – М.: Машиностроение, 1993 – 312 с.: ил.
4. Богуслаев, В. А., Муравченко, Ф. М., Жеманюк, П. Д., Яценко, В. К., Качан, А. Я., Цивирко, Э. И., Орлов, М. Р., Замковой, В. Е., Мозговой, В. Ф., Рубель, О. В. Технологическое обеспечение эксплуатационных характеристик деталей ГТД [Текст] / В. А. Богуслаев, Ф. М. Муравченко, П. Д. Жеманюк, В. К. Яценко, А. Я. Качан, Э. И. Цивирко, М. Р. Орлов, В. Е. Замковой, В. Ф. Мозговой, О. В. Рубель — Часть 1. Монография. — Запорожье: ОАО "Мотор Сич", 2003 — 396 с.
5. Askaryan, С.А.; Moroz, E. Pressure on evaporation of matter in a radiation beam. J. Exp. Theor. Phys. 1962, 43, 2319–2320.
6. Mirkin, L. Plastic deformation of metals caused by a 10<sup>-8</sup> sec laser pulse. Sov. Phys. Dokl. 1970, 14, 207–208
7. Fairand, В.Р.; Wilcox, В.А.; Gallagher, W.J.; Williams, D.N. Laser shock-induced microstructural and mechanical property changes in 7075 aluminum. J. Appl. Phys. 1972, 43, 3893–3895.
8. Fairand, В.Р.; Clauer, А.Н. Use of Laser Generated Shocks to Improve the Properties of Metals and Alloys. In Proceedings of the SPIE 0086, Industrial Applications of High Power Laser Technology, San Diego, CA, USA, 30 December 1976; Volume 86, pp. 112–119.
9. Clauer, А.Н. Laser Shock Peening, the Path to Production. Metals 2019, 9, 626. <https://doi.org/10.3390/met9060626>

10. See D. W. et al. The air force manufacturing technology laser peening initiative //Surface Engineering. – 2002. – Т. 18. – №. 1. – С. 32-36.

11. Jon Rankin, Jack Campbell and Lloyd Hackel. Enhancing Fatigue Lifetimes and Precision Component Shaping by Laser Peening / Jon Rankin, Jack Campbell and Lloyd Hackel. [Электронный ресурс] // JTEG - Joint Technology Exchange Group : [сайт]. — URL: <https://jteg.ncms.org/wp-content/gallery/Briefings/Laser-Peening-FRC-SW.pdf>.

12. М. Волков, А. Кишалов, Н. Орлов, В. Серебряков, В. Смирнов, А. Филатов. Лазерная очистка и лазерный наклеп – технологии улучшения свойств поверхности // Фотоника. – 2014. - №3. – С. 34-44.

13. Яшкова С. С. Лазерное поверхностное упрочнение // Молодой ученый. — 2017. — №1. — С. 99-101.

14. Горунов А.И., Шамсиев М.Р., Дронь А.О., Гильмутдинов А.Х. Перспективы применения лазерного упрочнения в авиационной промышленности // Образование и наука в России и за рубежом. – 2019. – №10. С 1-5.

15. Особенности лазерной ударной обработки / И. Н. Шиганов, Д. М. Мельников, А. И. Мисюров, М. В. Мельникова // Лазеры в науке, технике, медицине : Сборник научных трудов XXX МЕЖДУНАРОДНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ, Москва, 02–04 октября 2019 года / Под редакцией В.А.Петрова. Том 30. – Москва: Московское НТО радиотехники, электроники и связи им. А.С. Попова, 2019. – С. 201-205.

16. Григорьянц А. Г. и др. Снижение растягивающих остаточных напряжений в сварных соединениях алюминиевых сплавов методом лазерной ударной обработки //Цветные металлы. – 2018. – №. 10. – С. 86-91.

17. Григорьянц А. Г. и др. Особенности применения лазерной ударной обработки низкоэнергетическими источниками для снижения остаточных растягивающих напряжений в сварных швах алюминиевых сплавов //Сварочное производство. – 2020. – №. 9. – С. 3-11.

18. Плехов, О. А. Перспективы использования отечественной технологии лазерной ударной проковки для повышения усталостного ресурса деталей

авиационных конструкций / О. А. Плехов // Международный конгресс по аэронавтике : Сборник тезисов, Москва, 04–05 декабря 2023 года. – Москва: Центральный аэрогидродинамический институт им. проф. Н.Е. Жуковского, 2023. – С. 149-151.

19. Конечно-элементный анализ остаточных напряжений, возникающих в результате лазерной ударной проковки титанового сплава ВТ6 / О. А. Плехов, А. А. Костина, Р. И. Изюмов, А. Ю. Изюмова // Вычислительная механика сплошных сред. – 2022. – Т. 15, № 2. – С. 171-184. – DOI 10.7242/1999-6691/2022.15.2.13.

20. Численное моделирование остаточных напряжений, вызванных лазерной ударной проковкой, в титановом сплаве ВТ-6 / О. А. Плехов, А. А. Костина, М. С. Желнин [и др.] // Сборник тезисов XXVIII Всероссийской конференции по численным методам решения задач теории упругости и пластичности : Тезисы докладов, Красноярск, 10–15 июля 2023 года. – Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2023. – С. 105-108.

21. 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.

22. 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.

23. 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.

24. 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. 295-300.

25. Белоусов А.И. Надежность авиационных двигателей и энергетических установок [Текст] : учеб. Пособие / А. И. Белоусов; Минобрнауки России, Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королева (нац. исслед. ун-т). – Самара, 2011. – 193 с.

26. Белоусов М. Г., Цуркаль А. А. Исследование факторов, влияющих на повреждаемость и разрушение лопаток компрессоров авиационных двигателей //Труды МАИ: электронный журнал. – 2013. – №. 65. – С. 14.

27. Ющенко К. А. и др. Анализ причин разрушения лопаток осевого компрессора агрегата ГТК-25И //Автоматическая сварка. – 2008.

28. Портер, А. М. Исследование влияния длительности действия максимальных напряжений в цикле нагружения на малоцикловую усталость и длительную прочность вала ГТД из материала ЭИ 961-Ш / А. М. Портер, С. А. Букатый, А. Л. Водолагин // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королёва. – 2009. – № 3-2(19). – С. 55-63.

29. Бураго, Н. Г. Анализ напряженного состояния диска компрессора ГТД / Н. Г. Бураго, А. Б. Журавлев, И. С. Никитин // Вестник Пермского государственного технического университета. Механика. – 2011. – № 1. – С. 46-54.

30. Бессуднов И. А. Совершенствование технологий ремонта газотурбинных авиационных двигателей с использованием ресурсосберегающих технологий: дис. канд. техн. наук: 05.02.08. - Рыбинск, 2014. - 208 с.

31. Зырянов, А. В. Разработка метода диагностики камер сгорания ГТД на основе математического моделирования их рабочего процесса / А. В. Зырянов, Н.

С. Сенюшкин, В. Ф. Харитонов // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. – 2012. – Т. 16, № 2(47). – С. 98-105.

32. Сиротин Н.Н. Конструкция и эксплуатация, повреждаемость и работоспособность газотурбинных двигателей. М.: РИА «ИМ-Информ», 2002. 441 с.

33. Пчелкин Ю. М. Камеры сгорания газотурбинных двигателей. М.: Машиностроение, 1984. 280 с.

34. Конструкционная прочность: учебник / В.Б. Порошин. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2019. – 335 с.

35. Строение и свойства авиационных материалов: Учебник для вузов/ Белов А. Ф., Бенедиктова Г. П., Висков А. С. И др. Под ред. акад. Белова А. Ф., докт. техн. наук, проф. Николенко В. В. М.: Металлургия, 1989. 368 с.

36. Материаловедение и технологии обработки материалов: учеб. пособие / А. Ф. Третьяков, Л. В. Тарасенко. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014. – 541, [3] с. : ил.

37. Основы материаловедения (металлообработка) : учебник для студ. Учрежденный сред. проф. Образования / [В. Н. Заплатин, Ю. И. Сапожников, А. В. Дубов и др.] ; под ред. В.Н. Заплатина. – 8-е изд., стер – М.: Издательский центр «Академия», 2017. – 272 с.

38. Вдовин Р. А. и др. Формирование технологических основ изготовления рабочих лопаток турбины ГТД //Текст: электронный/РА Вдовин. – 2021.

39. Терентьев В.Ф., Петухов А.Н. Усталость высокопрочных металлических материалов. – М.: ИМЕТ РАН – ЦИАМ, 2013. – 515 с.: ил.

40. Неклюдов И.М., Камышанченко Н.В. Физические основы прочности и пластичности металлов. Дефекты в кристаллах. Часть II. Белгород: Из-во «Педагогика-Пресс» и Белгородский государственный университет.1997. 158 с.

41. Сулима А.М., Евстигнеев М.И. Качество поверхностного слоя и усталостная прочность деталей из жаропрочных и титановых сплавов. М.: «Машиностроение», 1974, 256 с.

42. Основы прогрессивной технологии и рациональные методы обработки деталей авиационных двигателей. Под ред. канд. техн. Наук А. П. Иванова. М., «Машиностроение». 1975, 375 с.
43. Овсеенко, Е. С. Поверхностный слой мало жестких деталей, упрочненных методами поверхностного пластического деформирования / Е. С. Овсеенко // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2011. – № 2(160). – С. 52-55.
44. Kumar H., Singh S., Kumar P. Modified shot peening processes—A review //International Journal of Engineering Sciences & Emerging Technologies. – 2013. – Т. 5. – №. 1. – С. 12-19.
45. Зык, Е. Н. Оценка возможности повышения уровня усталостной прочности деталей в период эксплуатации ударными методами ППД / Е. Н. Зык // Современные наукоемкие технологии. – 2016. – № 11-1. – С. 36-40.
46. Luo X., Dang N., Wang X. The effect of laser shock peening, shot peening and their combination on the microstructure and fatigue properties of Ti-6Al-4V titanium alloy //International Journal of Fatigue. – 2021. – Т. 153. – С. 106465.
47. Yin F. et al. Overview of ultrasonic shot peening //Surface Engineering. – 2017. – Т. 33. – №. 9. – С. 651-666.
48. Rakita M. et al. Ultrasonic shot peening //International Journal of Computational Materials Science and Surface Engineering. – 2013. – Т. 5. – №. 3. – С. 189-209.
49. G. Askar'yan, E. Moroz, Sov. J. Exp. Theor. Phys. 1963, 16, 1638.
50. 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.
51. Gupta R. K. et al. Laser shock peening and its applications: a review //Lasers in Manufacturing and Materials Processing. – 2019. – Т. 6. – №. 4. – С. 424-463.

52. Jia W. et al. Effect of laser shock peening on the mechanical properties of a near- $\alpha$  titanium alloy //Materials Science and Engineering: A. – 2014. – Т. 606. – С. 354-359.
53. Maawad E. et al. Investigation of laser shock peening effects on residual stress state and fatigue performance of titanium alloys //Materials Science and Engineering: A. – 2012. – Т. 536. – С. 82-91.
54. Zou S. et al. Surface integrity and fatigue lives of Ti17 compressor blades subjected to laser shock peening with square spots //Surface and Coatings Technology. – 2018. – Т. 347. – С. 398-406.
55. Ширяев А. А., Миленин А. С., Таиров Д. Ф. Влияние методов упрочнения на предел выносливости лопаток из титанового сплава //Перспективы развития двигателестроения: материалы междунар. науч.-техн. конф. им. НД Кузнецова (21–23 июня 2023 г.): в 2 т.-Текст: электронны. – 2023.
56. Neuman, F. Momentum transfer and cratering effects produced by giant laser pulses. Appl. Phys. Lett. 1964, 4, 167–169.
57. Gregg, D.W.; Thomas, S.J. Momentum transfer produced by focused laser giant pulses. J. Appl. Phys. 1966,37, 2787–2789.
58. Braginskii, V.B.; Minakova, I.I.; Rudenko, V.N. Mechanical effects in the interaction between pulsed electromagnetic radiation and a metal. Sov. Phys. Tech. Phys. 1967, 112, 753–757.
59. Afanasev, Y.V.; Krokhin, O.N. Vaporization of matter exposed to laser emission. Sov. Phys. JETP 1967, 25, 639–645.
60. Skeen, C.H.; York, C.M. Laser-induced “blow-off” phenomena. Appl. Phys. Lett. 1968, 12, 369–371.
61. O’Keefe, J.D.; Skeen, C.H. Laser-induced stress-wave and impulse augmentation. Appl. Phys. Lett. 1972, 21, 464–466.
62. Anderholm, N.C. Laser-generated stress waves. Appl. Phys. Lett. 1970, 16, 113–115.
63. Anderholm, N.C. Paper Bk9. APS Bull. 1968, 13, 388.

64. Metz, S.A.; Smidt, F.A. Production of vacancies by laser bombardment. *Appl. Phys. Lett.* 1971, 19, 207–208.
65. Mallozzi, P.; Fairand, B. Altering Material Properties. US3850698A, 26 November 1974.
66. Fairand, B.P.; Clauer, A.H.; Jung, R.G.; Wilcox, B.A. Quantitative assessment of laser-induced stress waves generated at confined surfaces. *Appl. Phys. Lett.* 1974, 25, 431–433.
67. Fairand, B.P.; Clauer, A.H. Effect of water and paint coatings on the magnitude of laser-generated shocks. *Opt. Commun.* 1976, 18, 588–591.
68. Fairand, B.P.; Clauer, A.H. Laser generation of high-amplitude stress waves in materials. *J. Appl. Phys.* 1979, 50, 1497–1502.
69. Fairand, B.P.; Clauer, A.H. Laser generated stress waves: Their characteristics and their effects to materials. *AIP Conf. Proc.* 1979, 50, 27–42.
70. Clauer, A.H.; Fairand, B.P. Interaction of laser-induced stress waves with metals. In *Applications of Lasers in Materials Processing*; Metzbower, E.A., Ed.; American Society for Metals: Metals Park, OH, USA, 1979; pp. 1–22.
71. Clauer, A.H.; Dulaney, J.L.; Rice, R.C.; Koucky, J.R. Laser Shock Processing for Treating Fastener Holes in Aging Aircraft. In *Durability of Metal Aircraft Structures*; Atluri, S.N., Harris, C.E., Hoggard, A., Miller, N., Sampath, S.G., Eds.; Atlanta Technology Publications: Atlanta, GA, USA, 1992; pp. 350–361.
72. Clauer, A.H.; Holbrook, J.H.; Fairand, B.P. Effects of Laser Induced ShockWaves on Metals. In *Shock Waves and High-Strain-Rate Phenomena in Metals: Concepts and Applications*; Meyers, M.A., Murr, L.E., Eds.; Springer: Boston, MA, USA, 1981; pp. 675–702.
73. Ford, S.C.; Clauer, A.H.; Fairand, B.P.; Galliher, R.D. Investigation of Laser Shock Processing; U.S. Air Force Wright Aeronautical Laboratories: Wright-Patterson Air Force Base, OH, USA, 1980; Volume 2.
74. Ivetic, G.; Meneghin, I.; Troiani, E.; Molinari, G.; Ocaña, J.; Morales, M.; Porro, J.; Lanciotti, A.; Ristori, V.; Polese, C.; et al. Fatigue in laser shock peened open-hole thin aluminium specimens. *Mater. Sci. Eng. A* 2012, 534, 573–579.

75. Clauer, A.H.; Walters, C.T.; Ford, S.C. The Effects of Laser Shock Processing on the Fatigue Properties of 2024-T3 Aluminum. In *Lasers in Materials Processing*; ASM International: Metals Park, OH, USA, 1983; pp. 7–22.

76. Zhang C., Dong Y., Ye C. Recent developments and novel applications of laser shock peening: A review // *Advanced Engineering Materials*. – 2021. – T. 23. – №. 7. – C. 2001216.

77. D. Devaux, R. Fabbro, L. Tollier, E. Bartnicki // *Journal of Applied Physics*. 1990. Vol. 68. P. 775-784. doi:10.1063/1.346783

78. Ye C. et al. Ultrahigh dense and gradient nano-precipitates generated by warm laser shock peening for combination of high strength and ductility // *Materials science and engineering: A*. – 2014. – T. 609. – C. 195-203.

79. Ye C. et al. Fatigue performance improvement in AISI 4140 steel by dynamic strain aging and dynamic precipitation during warm laser shock peening // *Acta materialia*. – 2011. – T. 59. – №. 3. – C. 1014-1025.

80. Liao Y., Ye C., Cheng G. J. INVITED // A review: Warm laser shock peening and related laser processing technique. *Opt. Laser Technol.* – 2016. – T. 78. – C. 15-24.

81. Karthik D., Swaroop S. Laser peening without coating induced phase transformation and thermal relaxation of residual stresses in AISI 321 steel // *Surface and Coatings Technology*. – 2016. – T. 291. – C. 161-171.

82. Sathyajith S., Kalainathan S., Swaroop S. Laser peening without coating on aluminum alloy Al-6061-T6 using low energy Nd: YAG laser // *Optics & Laser Technology*. – 2013. – T. 45. – C. 389-394.

83. Sakino Y., Sano Y., Kim Y. C. Application of laser peening without coating on steel welded joints // *International Journal of Structural Integrity*. – 2011. – T. 2. – №. 3. – C. 332-344.

84. Sano Y. et al. Improvement in fatigue performance of friction stir welded A6061-T6 aluminum alloy by laser peening without coating // *Materials & Design (1980-2015)*. – 2012. – T. 36. – C. 809-814.

85. Li Y. et al. The effects of the confining medium and protective layer during femtosecond laser shock peening // *Manufacturing Letters*. – 2021. – T. 27. – C. 26-30.

86. Montross C. S. et al. Laser shock processing and its effects on microstructure and properties of metal alloys: a review //International journal of fatigue. – 2002. – T. 24. – №. 10. – C. 1021-1036.
87. Kruusing A. Underwater and water-assisted laser processing: Part 1—general features, steam cleaning and shock processing //Optics and lasers in engineering. – 2004. – T. 41. – №. 2. – C. 307-327.
88. Ruschau J. J. et al. Fatigue crack nucleation and growth rate behavior of laser shock peened titanium //International Journal of Fatigue. – 1999. – T. 21. – C. S199-S209.
89. Rubio-González C. et al. Effect of laser shock processing on fatigue crack growth of duplex stainless steel //Materials Science and Engineering: A. – 2011. – T. 528. – №. 3. – C. 914-919.
90. Wang F., Yao Z., Deng Q. Experimental study on laser shock processing of brass //Journal of University of Science and Technology Beijing, Mineral, Metallurgy, Material. – 2007. – T. 14. – №. 6. – C. 529-532.
91. Gomez-Rosas G. et al. Laser Shock Processing of 6061-T6 Al alloy with 1064 nm and 532 nm wavelengths //Applied Surface Science. – 2010. – T. 256. – №. 20. – C. 5828-5831.
92. Ziwen C. A. O. et al. Investigation of surface integrity on TC17 titanium alloy treated by square-spot laser shock peening //Chinese Journal of Aeronautics. – 2012. – T. 25. – №. 4. – C. 650-656.
93. Cao Z. et al. Numerical simulation of residual stress field induced by laser shock processing with square spot //Journal of Shanghai University (English Edition). – 2011. – T. 15. – C. 553-556.
94. Peyre P. et al. Laser-shock processing of aluminium-coated 55C1 steel in water-confinement regime, characterization and application to high-cycle fatigue behaviour //Journal of materials science. – 1998. – T. 33. – №. 6. – C. 1421-1429.
95. Gagliardi M. A. et al. Relative defect density measurements of laser shock peened 316L stainless steel using positron annihilation spectroscopy //Journal of Nondestructive Evaluation. – 2011. – T. 30. – C. 221-224.

96. Zhang X. C. et al. Improvement of fatigue life of Ti–6Al–4V alloy by laser shock peening //Materials Science and Engineering: A. – 2010. – T. 527. – №. 15. – C. 3411-3415.
97. Hatamleh O. A comprehensive investigation on the effects of laser and shot peening on fatigue crack growth in friction stir welded AA 2195 joints //International Journal of Fatigue. – 2009. – T. 31. – №. 5. – C. 974-988.
98. Hatamleh O., DeWald A. An investigation of the peening effects on the residual stresses in friction stir welded 2195 and 7075 aluminum alloy joints //Journal of Materials Processing Technology. – 2009. – T. 209. – №. 10. – C. 4822-4829.
99. Montross C. S., Florea V., Swain M. V. The influence of coatings on subsurface mechanical properties of laser peened 2011-T3 aluminum //Journal of materials science. – 2001. – T. 36. – C. 1801-1807.
100. Cheng G. J., Shehadeh M. A. Dislocation behavior in silicon crystal induced by laser shock peening: A multiscale simulation approach //Scripta Materialia. – 2005. – T. 53. – №. 9. – C. 1013-1018.
101. Hong X. et al. Confining medium and absorptive overlay: Their effects on a laser-induced shock wave //Optics and Lasers in Engineering. – 1998. – T. 29. – №. 6. – C. 447-455.
102. Zhou Z. et al. Thermal relaxation of residual stress in laser shock peened Ti–6Al–4V alloy //Surface and Coatings Technology. – 2012. – T. 206. – №. 22. – C. 4619-4627.
103. Cao Y., Shin Y. C., Wu B. Parametric study on single shot and overlapping laser shock peening on various metals via modeling and experiments. – 2010.
104. Ye C. et al. Microstructure and mechanical properties of copper subjected to cryogenic laser shock peening //Journal of Applied Physics. – 2011. – T. 110. – №. 8.
105. Guo Y. B., Caslaru R. Fabrication and characterization of micro dent arrays produced by laser shock peening on titanium Ti–6Al–4V surfaces //Journal of Materials Processing Technology. – 2011. – T. 211. – №. 4. – C. 729-736.

106. Thareja R. K., Shukla S. Synthesis and characterization of zinc oxide nanoparticles by laser ablation of zinc in liquid //Applied Surface Science. – 2007. – T. 253. – №. 22. – C. 8889-8895.
107. Ling X., Peng W., Ma G. Influence of laser peening parameters on residual stress field of 304 stainless steel. – 2008.
108. Jiang Y. et al. Research on precision control of sheet metal forming by laser shock waves with semi-die //Optics & Laser Technology. – 2013. – T. 45. – C. 598-604.
109. Wagner L. et al. Surface layer properties and fatigue behavior in Al 7075-T73 and Ti-6Al-4V: Comparing results after laser peening; shot peening and ball-burnishing //International Journal of Structural Integrity. – 2011. – T. 2. – №. 2. – C. 185-199.
110. Wu J. et al. Microstructures and mechanical properties of  $\beta$  forging Ti17 alloy under combined laser shock processing and shot peening //Surface and Coatings Technology. – 2017. – T. 328. – C. 283-291.
111. Lan L. et al. Effects of laser shock peening on microstructure and properties of Ti-6Al-4V titanium alloy fabricated via selective laser melting //Materials. – 2020. – T. 13. – №. 15. – C. 3261
112. Sun R. et al. Fatigue behavior of Ti-17 titanium alloy subjected to different laser shock peened regions and its microstructural response //Surface and Coatings Technology. – 2020. – T. 383. – C. 125284
113. Shen X. et al. Improvement in mechanical properties of titanium alloy (Ti-6Al-7Nb) subject to multiple laser shock peening //Surface and Coatings Technology. – 2017. – T. 327. – C. 101-109
114. He W. F. et al. A study of the microstructure and hardness of Ti-5Al-2Sn-2Zr-4Mo-4Cr by laser shock peening //Applied Mechanics and Materials. – 2011. – T. 84. – C. 471-475
115. Zhang Q. et al. Effect of ultrasonic shot peening on microstructure evolution and corrosion resistance of selective laser melted Ti-6Al-4V alloy //Journal of Materials Research and Technology. – 2021. – T. 11. – C. 1090-1099

116. Rondepierre A. et al. Review on Laser Interaction in Confined Regime: Discussion about the Plasma Source Term for Laser Shock Applications and Simulations //Metals. – 2021. – Т. 11. – №. 12. – С. 2032

117. Климков Ю. М., Хорошев М. В. Лазерная техника: Учебное пособие – М.: МИИГАиК, 2014. – 143 с.: ил

118. Lu J.Z., Luo K.Y., Zhang Y.K. et al. Grain refinement mechanism of multiple laser shock processing impacts on ANSI 304 stainless steel// Acta Mater 58(16). 2010. — P. 5354–5362

119. Колобов Ю.Р., Жидков М.В., Голосов Е.В., Вершинина Т.Н., Кудряшов С.И., Ионин А.А., Бетехтин В.И. Формирование оксидного покрытия на поверхности титана при воздействии лазерного излучения фемтосекундной длительности// Письма в ЖТФ, 2018, том 44, № 24. С. 128-134

120. Umaphathi A., Swaroop S. Residual stress distribution and microstructure of a multiple laser-peened near-alpha titanium alloy //Journal of Materials Engineering and Performance. – 2018. – Т. 27. – С. 2466-2474

121. Чегуров М. К., Сорокина С. А. Основы фрактографического анализа изломов образцов из конструкционных сплавов //Нижний Новгород: Нижегородский гос. техн. ун-т им. РЕ Алексева. – 2018

122. Шанявский А. А. Модели зарождения и развития усталостного разрушения под поверхностью металлов //Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. – 2012. – №. 179. – С. 32-44

## ПРИЛОЖЕНИЕ 1

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2793015

**Способ нанесения абляционного покрытия для  
снижения термических дефектов при обработке деталей  
методом лазерного ударного упрочнения**

Патентообладатель: *федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
"Московский авиационный институт (национальный  
исследовательский университет)" (RU)*

Авторы: *Королев Даниил Дмитриевич (RU), Ляховецкий  
Максим Александрович (RU), Лесневский Леонид Николаевич  
(RU), Кожевников Глеб Денисович (RU)*

Заявка № 2022114867

Приоритет изобретения 01 июня 2022 г.

Дата государственной регистрации  
в Государственном реестре изобретений  
Российской Федерации 28 марта 2023 г.

Срок действия исключительного права  
на изобретение истекает 01 июня 2042 г.



*Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности*

*Ю.С. Зубов*

## ПРИЛОЖЕНИЕ 2

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2022666065

**Программное обеспечение для расчета параметров  
ионизированного газа при воздействии когерентного  
излучения**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Московский авиационный институт (национальный  
исследовательский университет)» (RU)*

Авторы: *Кожевников Глеб Денисович (RU), Королев Даниил  
Дмитриевич (RU), Ляховецкий Максим Александрович (RU)*

Заявка № 2022665170

Дата поступления 11 августа 2022 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 24 августа 2022 г.

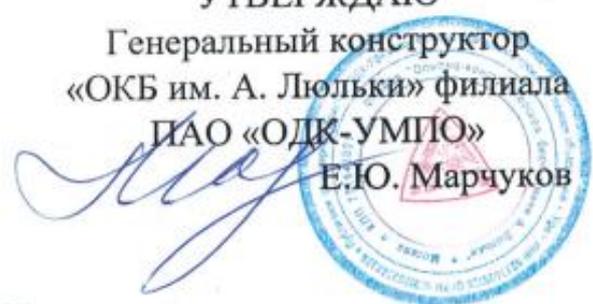


Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов

## ПРИЛОЖЕНИЕ 3

УТВЕРЖДАЮ  
 Генеральный конструктор  
 «ОКБ им. А. Люльки» филиала  
 ПАО «ОДК-УМПО»  
 Е.Ю. Марчуков



## Акт

об использовании результатов исследований «Разработка технологии лазерной ударной обработки для повышения усталостной прочности компрессорных лопаток из титановых сплавов авиационных двигателей»

Комиссия в составе главного конструктора А.Н. Мухина, начальника отдела 100 С.Н. Донцова, начальника управления прочности М.А. Богданова, настоящим актом подтверждает использование в «ОКБ им. А. Люльки» филиала ПАО «ОДК-УМПО» при проведении поисковых работ результатов исследований Королева Д.Д. аспиранта кафедры 205 «Технология производства двигателей летательных аппаратов» Московского авиационного института, полученных при подготовке диссертационной работы.

Результаты, полученные Королевым Д.Д., могут быть использованы для модернизации существующих, а также создания новых технологических процессов изготовления лопаток компрессора ГТД.

Предложенные Королевым Д.Д. методика выбора режимов лазерной ударной обработки авиационных материалов и рекомендации по обработке компрессорных лопаток могут быть рекомендованы при подборе оптимального режима лазерной ударной обработки компрессорных лопаток ГТД для повышения их усталостной прочности.

Главный конструктор



А.Н. Мухин

Начальник отдела 100



С.Н. Донцов

Начальник управления прочности



М.А. Богданов