

На правах рукописи



**Кожевников Глеб Денисович**

**МЕТОДИКА ОПТИМИЗАЦИИ РЕЖИМОВ ЛАЗЕРНОЙ УДАРНОЙ  
ОБРАБОТКИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ УСТАЛОСТНОЙ ПРОЧНОСТИ  
ДЕТАЛЕЙ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ**

2.5.15. - Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки  
летательных аппаратов

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

**Москва – 2026**

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

|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Научный руководитель:  | Ляховецкий Максим Александрович<br>кандидат технических наук                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| Официальные оппоненты: | Сахвадзе Геронтий Жорович, доктор технических наук, федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук, главный научный сотрудник<br><br>Жеребцов Сергей Валерьевич, доктор технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет», заведующий кафедрой материаловедения и технологии материалов |
| Ведущая организация:   | Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский университет науки и технологий»                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |

Защита состоится «19» октября 2026 года в 10 часов 00 мин. на заседании диссертационного совета 24.2.327.06 на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» по адресу: 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д.4.

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

[https://mai.ru/events/defence/?ELEMENT\\_ID=188604](https://mai.ru/events/defence/?ELEMENT_ID=188604)

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

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



Краев Вячеслав Михайлович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы диссертации.** Повышение ресурса и надежности деталей газотурбинных двигателей (ГТД) является одной из основных задач современного двигателестроения. Рабочие лопатки, диски и валы компрессора работают в условиях переменных аэродинамических, центробежных и вибрационных нагрузок, поэтому одним из основных механизмов их повреждения является усталостное разрушение.

Зарождение усталостных трещин в значительной степени связано с состоянием поверхностного слоя и наличием концентраторов напряжений, вызванных производственными дефектами или эксплуатационными повреждениями. К управляемым параметрам поверхностного слоя, влияющим на усталостную прочность деталей, относятся остаточные напряжения (ОН). Растягивающие ОН способствуют раскрытию и развитию трещин, тогда как сжимающие ОН снижают уровень результирующих напряжений при циклическом нагружении и могут повышать сопротивление усталостному разрушению.

Для формирования сжимающих ОН применяются методы поверхностного пластического деформирования, включая дробеструйную обработку, ультразвуковое упрочнение, малопластичное выглаживание и лазерную ударную обработку. Лазерная ударная обработка (ЛУО) представляет интерес как бесконтактный метод упрочнения, при котором пластическая деформация поверхностного слоя формируется под действием ударной волны, возникающей при образовании плазмы под воздействием короткого лазерного импульса высокой интенсивности.

В инженерной практике эффективность режима ЛУО часто оценивается по максимальной величине сжимающих ОН и глубине их залегания, т.е. положению границы перехода от сжимающих напряжений к растягивающим. Однако увеличение уровня сжимающих напряжений у поверхности может сопровождаться ростом компенсирующих растягивающих напряжений в глубине материала, изменением формы детали после обработки и смещением зон максимальных напряжений при динамическом нагружении в нежелательные области. Поэтому выбор режима ЛУО должен учитывать не только параметры эпюры ОН, но и их влияние на запас усталостной прочности детали.

В связи с этим актуальность работы определяется необходимостью разработки расчетно-экспериментальной методики оптимизации режимов лазерной ударной обработки, основанной на валидированной численной модели и позволяющей выбирать параметры обработки с учетом влияния сформированного остаточного напряженно-деформированного состояния на запас усталостной прочности детали.

**Степень разработанности темы.** Физические основы лазерной ударной обработки сформированы в исследованиях лазерно-индуцированных ударных волн и расширения плазмы в ограниченном канале. Существенный вклад в развитие данного направления внесли Г.А. Аскарьян, Е.М. Мороз, N.C. Anderholm, R. Fabbro, P. Peyre, L. Berthe, A.H. Clauer. В их работах были заложены представления о механизме формирования импульсного давления,

роли ограничивающего слоя и влиянии лазерного ударного воздействия на состояние поверхностного слоя материала.

С конца 1990-х годов основным инструментом анализа ЛУО стало конечно-элементное моделирование, применяемое для оценки влияния параметров процесса (энергии импульса, длительности импульса, диаметра пятна, перекрытия и числа проходов) на остаточные напряжения и деформации. Точность численного моделирования определяется корректностью задания давления плазмы, выбором модели материала и экспериментальной валидацией. В существующих подходах оптимизация режимов ЛУО, как правило, ориентирована на достижение заданной величины и глубины сжимающих остаточных напряжений, тогда как влияние сформированного остаточного напряженно-деформированного состояния на запас усталостной прочности детали при последующем нагружении учитывается недостаточно полно.

**Объект исследования:** технологический процесс лазерной ударной обработки деталей газотурбинных двигателей.

**Предмет исследования:** методика оптимизации напряженно-деформированного состояния детали с учетом динамических нагрузок и состояния поверхностного слоя после лазерной ударной обработки для повышения усталостной прочности, а также численная модель процесса лазерной ударной обработки.

**Цель исследования:** разработка методики оптимизации режимов лазерной ударной обработки деталей газотурбинных двигателей, обеспечивающей повышение запаса усталостной прочности за счет формирования рационального распределения остаточных напряжений.

**Задачи исследования:**

1. Проанализировать современные методы повышения усталостной прочности деталей газотурбинных двигателей, физико-механические основы лазерной ударной обработки, а также существующие подходы к моделированию и оптимизации режимов лазерной ударной обработки.
2. Разработать численную модель процесса лазерной ударной обработки для титанового сплава ВТ6, позволяющую рассчитывать остаточное напряженно-деформированное состояние детали после импульсного ударно-волнового воздействия.
3. Разработать и реализовать комплексную методику экспериментальной валидации численной модели лазерной ударной обработки на образцах из титанового сплава ВТ6.
4. Разработать и апробировать расчетно-экспериментальную методику оптимизации режимов лазерной ударной обработки для повышения запаса усталостной прочности конструктивно-подобных элементов деталей газотурбинного двигателя.

**Научная новизна результатов исследования:**

1. Разработана численная модель процесса лазерной ударной обработки титанового сплава ВТ6 и комплексная методика её экспериментальной валидации по трем параметрам: форме одиночного отпечатка, параметрам эпюры остаточных напряжений и изгибу образцов после упрочнения.

2. Установлена область применимости разработанной численной модели лазерной ударной обработки для титанового сплава ВТ6, в которой достигается качественное и количественное совпадение экспериментальных и расчетных данных:

- Длительность лазерного излучения от 16 до 70 нс,
- Интенсивность лазерного излучения от 1 до 8 ГВт/см<sup>2</sup>,
- Количество повторных импульсов (проходов) от 1 до 3 раз.

3. Впервые предложена комплексная методика оптимизации режимов лазерной ударной обработки на основе критерия Гудмана для максимизации запаса прочности при динамическом нагружении детали/образца, состоящая из определения целевой эпюры поверхностных остаточных напряжений, обеспечивающей достижение максимального запаса усталостной прочности, и подбора технологических параметров лазерной ударной обработки для её воспроизведения.

**Теоретическая и практическая значимость результатов исследования:**

1. Разработана комплексная расчетно-экспериментальная методика рационального выбора режимов лазерной ударной обработки на основе критерия Гудмана для максимизации запаса прочности при динамическом нагружении деталей газотурбинных двигателей.

2. Разработан режим лазерной ударной обработки образцов-имитаторов спинки рабочей лопатки ГТД, который позволил повысить предел выносливости на 28%.

3. Разработан опытный технологический процесс лазерной ударной обработки спинки пера рабочей лопатки компрессора из титанового сплава ВТ6, который позволил повысить усталостную прочность рабочей лопатки на 16%.

4. Результаты диссертационной работы внедрены в опытно-конструкторские работы «ОКБ им. А. Люльки» филиал ПАО «ОДК-УМПО» при разработке технологического процесса лазерной ударной обработки рабочих лопаток в соответствии с Решением №45/2025 от 30.05.2025 г.

**Методология и методы исследования.** В работе применены расчетные и экспериментальные методы исследования. Экспериментальная часть включала регистрацию параметров лазерного излучения, лазерную ударную обработку образцов и рабочей лопатки, измерение профиля поверхности, определение остаточных напряжений, оценку изгиба образцов и проведение сравнительных усталостных испытаний. Расчетная часть выполнена с использованием конечно-элементного анализа в явной и неявной постановке в программном комплексе ANSYS и включала моделирование импульсного ударно-волнового воздействия, расчет остаточного напряженно-деформированного состояния и оценку запаса усталостной прочности по критерию Гудмана.

**Достоверность результатов** обеспечивается применением апробированных расчетных методов конечно-элементного анализа, использованием сертифицированного и поверенного экспериментального оборудования, воспроизводимостью результатов измерений, а также комплексным сопоставлением расчетных и экспериментальных данных. Численная модель валидирована по трем уровням отклика: форме отпечатка после одиночного и повторного воздействия, распределению остаточных

напряжений по глубине и изгибу образцов после обработки. Эффективность выбранных режимов подтверждена сравнительными усталостными испытаниями образцов-имитаторов и рабочей лопатки.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Численная модель процесса лазерной ударной обработки и результаты её комплексной экспериментальной валидации.
2. Комплексная методика рационального выбора режимов лазерной ударной обработки на основе критерия Гудмана для максимизации запаса прочности при динамическом нагружении деталей газотурбинных двигателей.
3. Результаты сравнительных усталостных испытаний образцов-имитаторов спинки рабочей лопатки ГТД из титанового сплава ВТ6, обработанных по рациональным режимам лазерной ударной обработки.
4. Опытный технологический процесс лазерной ударной обработки рабочей лопатки компрессора ГТД из титанового сплава ВТ6 и результаты сравнительных усталостных испытаний.

**Апробация работы.** Основные положения и результаты диссертационной работы доложены и обсуждены на международных и всероссийских научно-технических конференциях: «Авиация и космонавтика» (Москва, 2022-2025), «Гагаринские чтения» (Москва, 2023-2024), Фортковская конференция «Уравнение состояния вещества» (2025), Международная научно-техническая конференция по авиационным двигателям «International Conference on Aviation Motors» (ICAM 2025).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 15 работ, из них 4 работы в рецензируемых научных изданиях и изданиях, приравненных к ним, 1 патент на изобретение и 1 программа для ЭВМ.

**Вклад автора в проведение исследований.** Автором выполнен анализ современного состояния исследований по ЛУО и подходам к ее численному моделированию; разработана численная модель процесса ЛУО титанового сплава ВТ6; проведена расчетно-экспериментальная валидация по форме отпечатка, распределению остаточных напряжений и изгибу образцов; разработана методика оптимизации режимов ЛУО с учетом динамического нагружения и критерия запаса усталостной прочности; выполнены расчеты по выбору целевых профилей остаточных напряжений и технологических параметров обработки для образцов-имитаторов и рабочей лопатки КНД.

**Внедрение результатов исследований.** Результаты диссертационной работы внедрены в опытно-конструкторские работы «ОКБ им. А. Люльки» филиал ПАО «ОДК-УМПО» при разработке технологического процесса лазерной ударной обработки рабочих лопаток в соответствии с Решением №45/2025 от 30.05.2025 г.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованных источников из 115 наименований и 3 приложений. Общий объем диссертации составляет 142 страницы и включает 72 рисунка и 10 таблиц.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы, показана степень ее разработанности, сформулированы объект, предмет, цель и задачи исследования, приведены научная новизна, практическая значимость, положения, выносимые на защиту, сведения об апробации, публикациях, личном вкладе автора и внедрении результатов.

**В первой главе** рассматриваются базовые представления об усталостном разрушении, приведен сравнительный анализ методов повышения усталостной прочности и подходов к моделированию лазерной ударной обработки. Показано, что зарождение усталостных трещин в значительной степени определяется локальным напряженно-деформированным состоянием, концентраторами напряжений, производственными дефектами и эксплуатационными повреждениями.

Рассмотрены методы поверхностного упрочнения, направленные на формирование сжимающих ОН. Обоснован выбор ЛУО как метода, позволяющего формировать сравнительно глубокий слой сжимающих ОН (до 1,5 мм) без прямого механического контакта с инструментом и без выраженного наклепа, характерного для дробеударных методов поверхностного упрочнения. Установлено, что эффективность ЛУО определяется совокупностью энергетических, геометрических и технологических параметров, а также условиями последующего циклического нагружения.

Проведен анализ двух основных подходов к численному моделированию ЛУО: прямого моделирования и метода собственных деформаций. Прямое моделирование позволяет более полно воспроизводить физические стадии процесса обработки, но требует значительных вычислительных затрат. Метод собственных деформаций является вычислительно экономичным, однако точность его применения зависит от способа задания или идентификации эквивалентного поля деформаций и обоснованности переноса этого поля на детали иной геометрии. Показано, что существующие подходы к оптимизации режимов ЛУО в основном ориентированы на достижение заданной величины и глубины ОН и недостаточно полно учитывают влияние сформированного состояния на запас усталостной прочности детали при последующем нагружении.

**Во второй главе** представлена разработанная численная модель лазерной ударной обработки. Расчетная схема включает определение пространственно-временного распределения давления плазмы в ограниченном канале и явный динамический анализ распространения ударной волны и упругопластического отклика материала с помощью конечно-элементного моделирования (КЭМ), а также последующее определение остаточного напряженно-деформированного состояния после обработки.

Основное отличие модели от ранее разработанных связано со способом задания импульсного давления. В расчетной постановке давление задается с отдельным учетом временной и пространственной составляющих. Временная зависимость давления определяется на основе модели Фаббро с учетом экспериментально измеренной длительности и формы лазерного импульса, а амплитуда давления задается через измеренную энергию и распределение

интенсивности по пятну. Полученная временная характеристика давления нормируется к безразмерному виду и далее используется для задания формы импульсной нагрузки в КЭМ. Пространственная составляющая давления формируется на основе экспериментально измеренного распределения интенсивности лазерного излучения по пятну воздействия. В расчете учитывается неоднородность энергии по пятну, при этом не требуется решать полную газодинамическую задачу расширения плазмы.

Для описания поведения материала при высокоскоростном нагружении рассмотрены идеально упругопластическая модель, модель Джонсона–Кука и модель Зерилли–Армстронга. Для расчетной модели ЛУО выбрана модель Джонсона–Кука без температурного множителя, так как в принятой постановке учитывается механическое действие давления плазмы на поверхность детали. Параметры модели приняты для титанового сплава Ti6Al4V, являющегося зарубежным аналогом сплава ВТ6; корректность выбранного описания материала проверялась последующим сопоставлением расчетных и экспериментальных результатов.

Конечно-элементная реализация выполнена в программном комплексе ANSYS LS-DYNA в явной динамической постановке. Нагрузка вводилась как нестационарное нормальное давление, распределенное по обрабатываемой поверхности. Для моделирования последовательной обработки использовалась серия смещающихся во времени и пространстве импульсов давления с учетом заданного перекрытия между пятнами. При многократном воздействии применялось численное демпфирование, рассматриваемое не как физический механизм ЛУО, а как расчетное допущение для ускоренного затухания остаточных колебаний после прохождения ударной волны.

**В третьей главе** описаны экспериментальная база и методики исследования. Для экспериментальной валидации численной модели использовались образцы из титанового сплава ВТ6 различной формы и толщины. Перед обработкой образцы подвергались электроэрозионной резке, шлифованию, полированию и вакуумному отжигу. Лазерная ударная обработка выполнялась на установке LS85 с применением лазерных устройств длительностью импульса 16 и 70 нс. Энергетические параметры контролировались измерителем Ophir Nova II и сенсором Ophir PE-25-C. Профили отпечатков и изгиб образцов измерялись на лазерном конфокальном микроскопе Olympus LEXT OLS 5000. Остаточные напряжения определялись механическим методом Н.Н. Давиденкова на автоматизированной установке МерКулОН «Тензор-3».

**В четвертой главе** выполнена расчетно-экспериментальная валидация численной модели ЛУО и определены границы ее применимости для титанового сплава ВТ6. Методика валидации по трем параметрам позволила отдельно проверить локальный пластический отклик, распределение остаточных напряжений и интегральное формоизменение образца.

#### *Валидация по отпечатку*

Валидация по форме отпечатка проводилась путем сопоставления расчетных и экспериментальных данных формы профиля и максимальной глубины отпечатка. Экспериментальные профили снимались с топографических

карт поверхности, усредненный профиль отпечатка для каждой длительности импульса строился по серии из трех отпечатков.

Для моделирования одиночного воздействия использовалась трехмерная КЭМ сегмента зоны обработки с локальным сгущением сетки в области действия импульса. Результаты сравнения экспериментальных и расчетных профилей отпечатков представлены на рисунке 1.

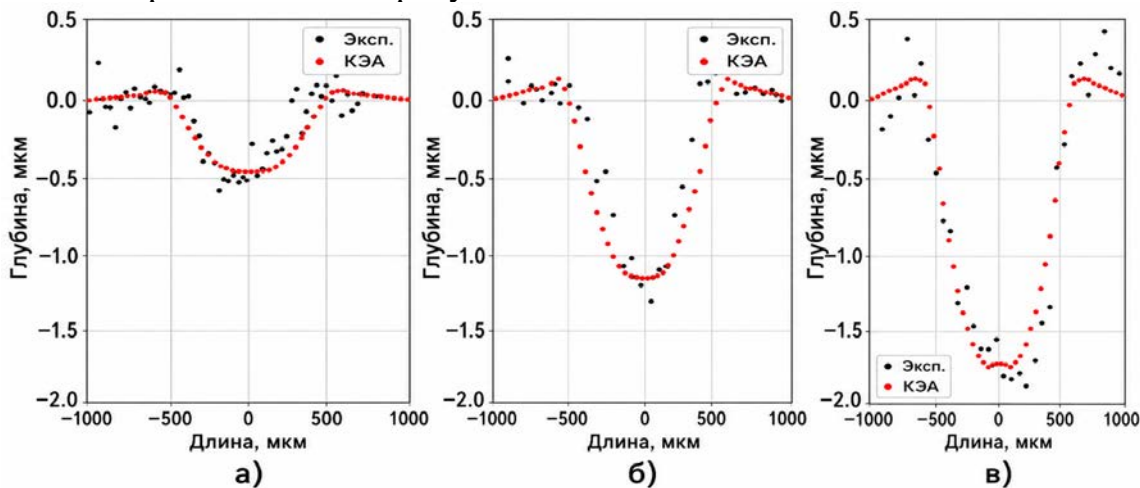


Рисунок 1 – Профили деформаций отпечатков после обработки на системе с длительностью импульса 16 нс: а) 1,6 ГВт/см<sup>2</sup>; б) 2,44 ГВт/см<sup>2</sup>; в) 3,45 ГВт/см<sup>2</sup>

Установлено, что расчетные профили согласуются с экспериментальными по форме и максимальной глубине отпечатка. Увеличение длительности импульса приводит к более выраженному остаточному отпечатку, что связано с увеличением времени действия давления плазмы на поверхность образца.

При повышении интенсивности лазерного излучения до уровня около 8 ГВт/см<sup>2</sup> экспериментальные и расчетные значения максимальной глубины отпечатка хорошо согласуются между собой. При интенсивностях более 8 ГВт/см<sup>2</sup> экспериментально измеренные значения глубины отпечатка перестают увеличиваться и выходят на плато, тогда как расчетная модель продолжает прогнозировать увеличение глубины (рисунок 2). Это расхождение связано с дополнительными физическими эффектами, такими как плазмообразование на границе раздела вода-воздух, которые не учитываются в принятой модели расширения плазмы в ограниченном канале.

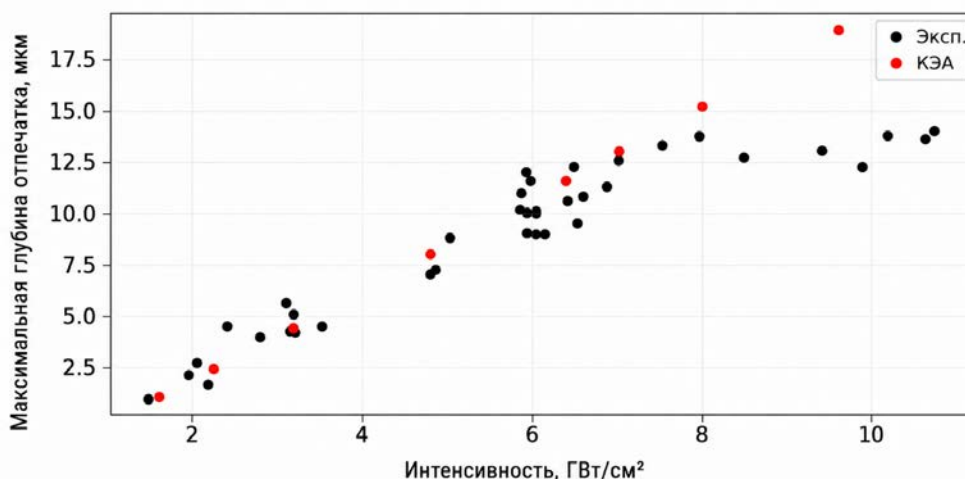


Рисунок 2 – Зависимость максимальной глубины отпечатка от интенсивности лазерного излучения

Дополнительно оценивалось влияние повторных воздействий на максимальную глубину отпечатка. Численная модель хорошо предсказывает накопление остаточной пластической деформации при нагружении до 3-х повторных импульсов. При большем числе повторных ударов возрастает влияние процессов, не описанных в расчетной постановке, поэтому данный диапазон принят как граница применимости модели по количеству повторных проходов.

#### *Валидация по распределению ОН*

Второй уровень валидации выполнен по распределению остаточных напряжений по глубине. Для сопоставления использовались образцы толщиной 1, 2 и 4 мм. Сравнение выполнялось по общей форме эпюры, уровню остаточных напряжений у поверхности, глубине залегания сжимающей зоны (рисунок 3). Для количественной оценки расхождения расчетных и экспериментальных результатов использовались средняя абсолютная ошибка (MAE), среднеквадратичная ошибка (RMSE) и нормированная среднеквадратичная ошибка (NRMSE) (таблица 1).

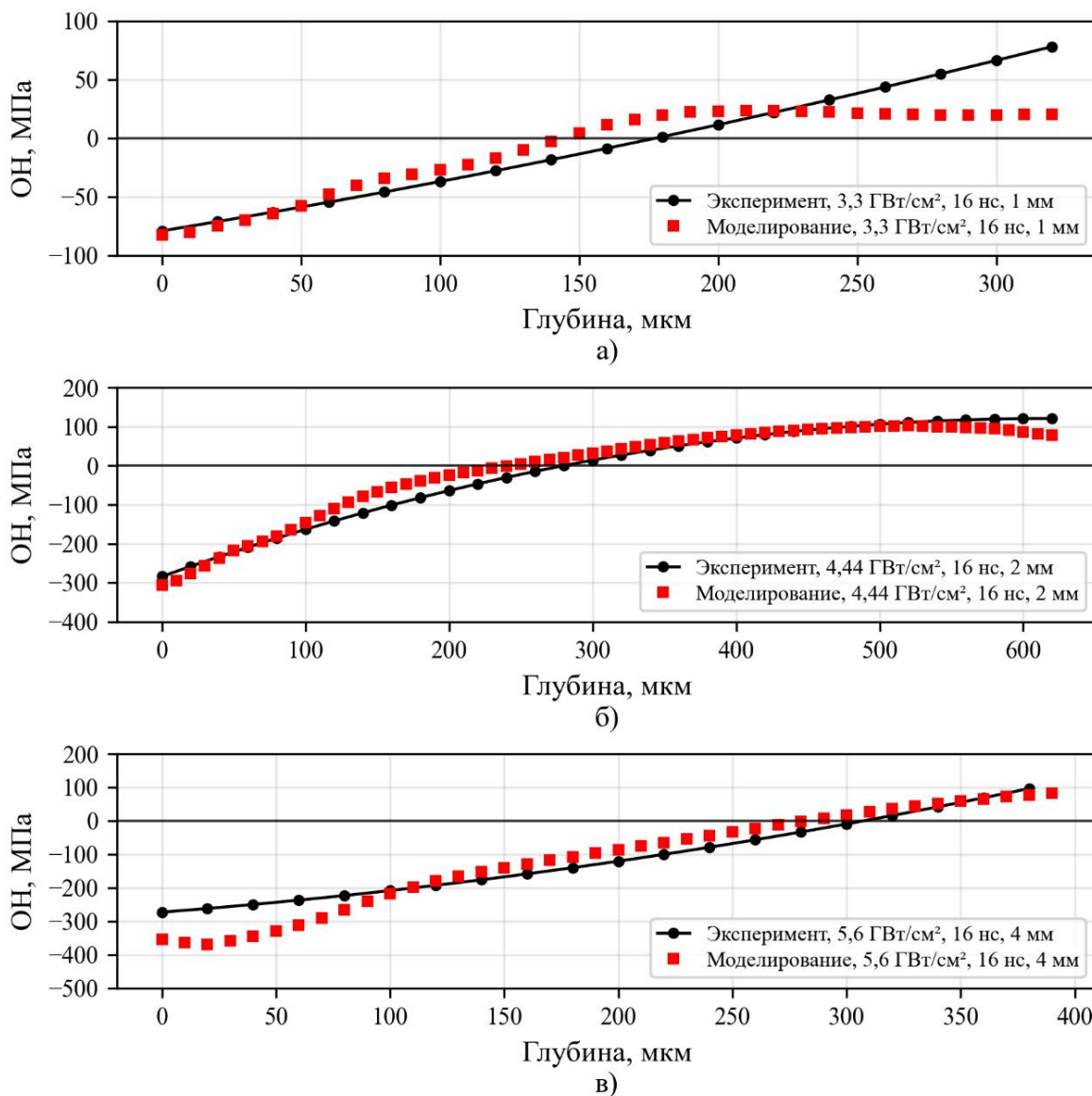


Рисунок 3 – Сравнение экспериментальных и расчётных эпюр поверхностных остаточных напряжений по глубине после ЛУО на образцах: а – 1 мм, 3,3 ГВт/см²; б – 2 мм, 4,44 ГВт/см²; в – 4 мм, 5,6 ГВт/см²

Таблица 1 – Количественное сравнение между экспериментальными и расчетными эпюрами остаточных напряжений.

| Режим                           | MAE, МПа | RMSE, МПа | NRMSE, % |
|---------------------------------|----------|-----------|----------|
| 3,3 ГВт/см <sup>2</sup> , 1 мм  | 16,56    | 22,06     | 14%      |
| 4,44 ГВт/см <sup>2</sup> , 2 мм | 19,18    | 23,48     | 5,8%     |
| 5,6 ГВт/см <sup>2</sup> , 4 мм  | 37,37    | 46,55     | 12,12%   |

Расчетные эпюры, представленные на рисунке 3, воспроизводят основные признаки измеренных: сжимающую область у поверхности, изменение уровня напряжений по глубине и переход к растягивающей зоне. Для рассмотренных режимов нормированная ошибка находилась в диапазоне 5,8-14 %. Наилучшее согласование получено для режима 4,44 ГВт/см<sup>2</sup> и образца толщиной 2 мм, где расчет хорошо описал как уровень остаточных напряжений, так и глубину их залегания. Для режима 3,3 ГВт/см<sup>2</sup> основное расхождение связано с зоной растягивающих напряжений в глубине образца. Для режима 5,6 ГВт/см<sup>2</sup> расчет хорошо передает глубину залегания ОН и положение растягивающей зоны, но завышает уровень приповерхностных сжимающих напряжений.

#### *Валидация по изгибу образца*

Третий уровень валидации выполнен по изгибу образцов после ЛУО. Прогнозирование формоизменения после обработки необходимо, поскольку для тонкостенных деталей ГТД, таких как лопатка, возможно коробление из-за высокого уровня ОН, которое может привести к превышению геометрических допусков.

Для расчета использовалась трехмерная КЭМ образца размером 20×5×1 мм; зона обработки имела размер 10×5 мм, а характерный размер элемента в зоне обработки составлял 50 мкм. Образец закреплялся консольно и обрабатывался в тех же режимах, что и при валидации по ОН. Изгиб рассматривался как интегральный отклик конструкции на сформированное остаточное напряженное состояние.

При валидации по изгибу сравнивались форма кривой прогиба по длине образца, максимальное значение прогиба, положение зоны начала изгиба и различие профилей по двум продольным кромкам. Экспериментальные профили показали, что после последовательной обработки образец деформируется неравномерно: наряду с изгибной составляющей проявляется крутильная, обусловленная траекторией обработки.

Численная модель передает направление изгиба, увеличение прогиба вдоль свободной части образца и различие профилей по двум кромкам. Для режима 3,3 ГВт/см<sup>2</sup> количественное сопоставление ограничено тем, что измеренный прогиб близок к разрешающей способности используемого оборудования. Результаты сопоставления расчетных и экспериментальных профилей изгиба после ЛУО представлены на рисунке 4.

По результатам исследования установлена область применимости разработанной модели: длительность лазерного излучения 16-70 нс, интенсивность 1-8 ГВт/см<sup>2</sup>, количество повторных проходов - до 3-х. В этом диапазоне модель может использоваться для расчета остаточного напряженно-деформированного состояния, сравнительной оценки режимов ЛУО и последующей постановки задачи оптимизации.

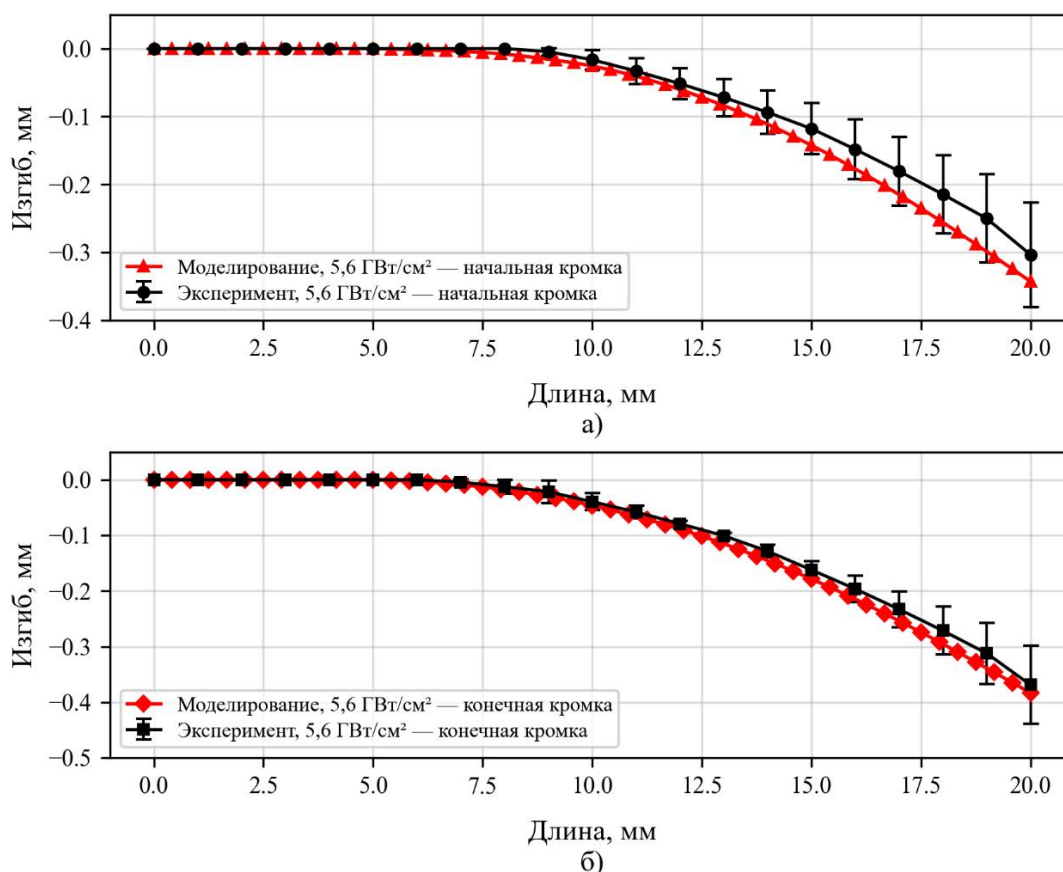


Рисунок 4 – Сравнение расчётных и экспериментальных профилей изгиба образца после ЛУО при интенсивности 5,6 ГВт/см²: а – кромка начала обработки; б – кромка конца обработки

**В пятой главе** представлена методика оптимизации режимов ЛУО для повышения усталостной прочности деталей ГТД и ее апробация. Прямой поиск оптимальных параметров обработки с помощью валидированной модели является нерациональным из-за высоких вычислительных затрат и большого числа возможных сочетаний энергии, диаметра пятна, длительности импульса и перекрытия.

В связи с этим задача оптимизации разделена на два этапа. На первом этапе определяется целевое распределение поверхностных остаточных напряжений, обеспечивающее максимальный расчетный запас усталостной прочности при заданном динамическом нагружении. На втором этапе подбираются технологические режимы ЛУО, при которых разработанная численная модель воспроизводит распределение остаточных напряжений, наиболее близкое к целевому.

Общая схема методики приведена на рисунке 5. Она включает подготовку расчетной модели, экспериментальное определение динамического напряженного состояния, оптимизацию целевого профиля остаточных напряжений и расчетный подбор режима лазерной ударной обработки с последующей экспериментальной проверкой.

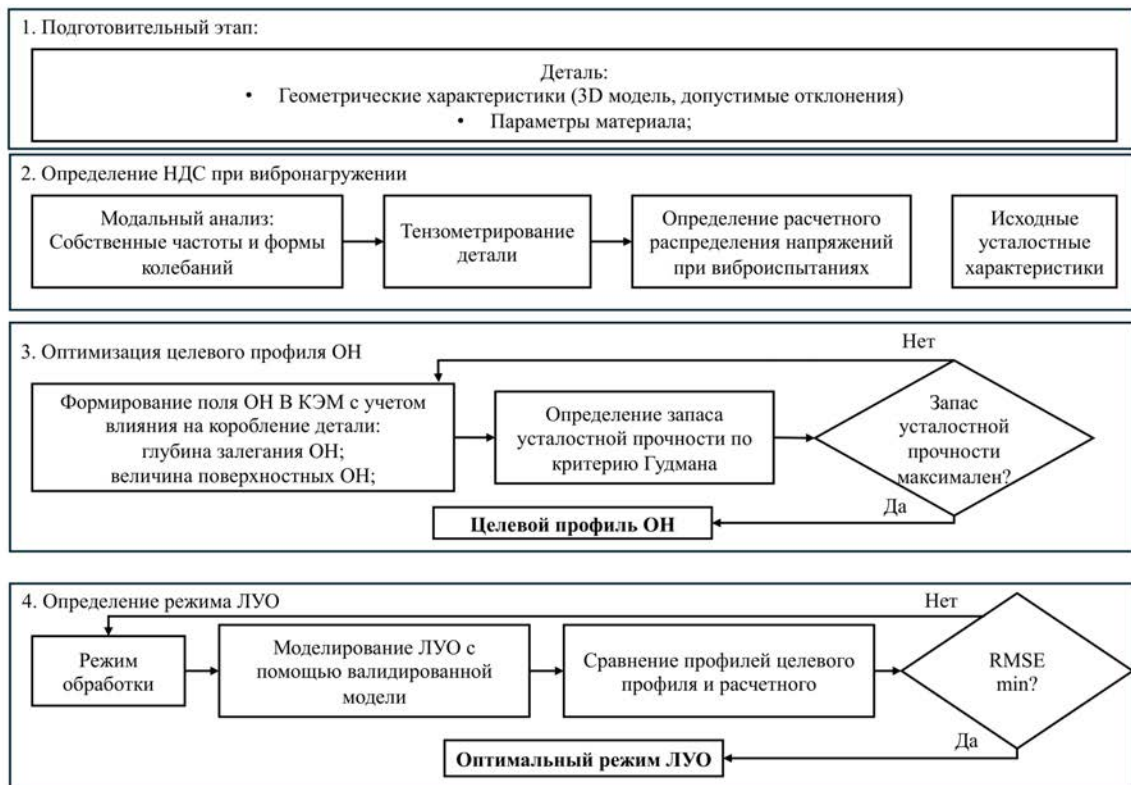


Рисунок 5 - Методика оптимизации режимов лазерной ударной обработки для повышения усталостной прочности деталей газотурбинных двигателей

Для оценки запаса усталостной прочности использован критерий Гудмана. Динамическое напряженное состояние детали или образца определялось по результатам модального анализа. Поскольку модальный расчет задает распределение напряжений в относительном виде и не определяет их фактический уровень при испытательной нагрузке, расчетные напряжения нормировались по данным тензометрирования. После такой нормировки полученное поле использовалось как амплитудная составляющая цикла нагружения. Остаточные напряжения после обработки учитывались как средняя составляющая напряженного состояния:

$$n_i = \frac{\sigma_{-1} * \left(1 - \frac{\sigma_m^{(i)}}{\sigma_B}\right)}{\sigma_a^{(i)}}, \quad (1)$$

где  $n_i$  – коэффициент запаса усталостной прочности в  $i$ -м узле;  $\sigma_a^{(i)}$  – амплитуда динамических напряжений,  $\sigma_m^{(i)}$  – среднее напряжение цикла, определяемое остаточными напряжениями;  $\sigma_{-1}$  – предел выносливости материала;  $\sigma_B$  – предел прочности материала.

В качестве входных параметров варьировались глубина залегания и величина поверхностных ОН. Величина поверхностных ОН ограничивалась значением условного предела текучести. Глубина залегания ограничивалась 40% от толщины образца путем применения штрафной функции, связанной с формой расчетной эпюры, глубиной перехода от сжатия к растяжению.

Целевой функцией оптимизации являлась максимизация значения коэффициента запаса усталостной прочности:

$$n_{min} \rightarrow \max, \quad (2)$$

где  $n_{min}$  – минимальное значение коэффициента запаса усталостной прочности по всем узлам конечно-элементной модели:

$$n_{min} = \min(n_i) \quad (3)$$

Принятая постановка позволяет учитывать и полезное действие поверхностных сжимающих ОН, и возможное неблагоприятное влияние компенсирующих растягивающих напряжений в глубине материала.

Второй задачей оптимизации являлось нахождение режима обработки, с помощью валидированной численной модели, при котором наиболее близко повторяется целевая эпюра ОН. В качестве вектора варьируемых параметров были приняты: энергия, диаметр, длительность импульса лазерного излучения и процент перекрытия. Границы энергии, диаметра и длительности импульса лазерного излучения приняты исходя из границ применимости валидированной модели и возможностей оборудования. Нижняя граница значения перекрытия выбрана исходя из минимального значения, при котором достигается обработка всей требуемой площади и равна 32%. Верхняя граница принята исходя из технологической стойкости абляционного покрытия.

Результаты прямого моделирования процесса ЛУО интерполировались на расчетные глубины целевого профиля. Мерой близости расчетного профиля ЛУО к целевому профилю принималось среднеквадратичное отклонение.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} * \sum_{i=1}^N (\sigma_{\text{Инт.ЛУО}}(h_i) - \sigma_{\text{ОН}}(h_i))^2}, \quad (4)$$

где  $N$  – число точек для сравнения,  $h$  – глубина  $i$ -точки целевого профиля мм,  $\sigma_{\text{Инт.ЛУО}}$  – интерполированное расчетное напряжение МПа,  $\sigma_{\text{ОН}}$  – целевое напряжение МПа.

В качестве целевой функции была принята минимизация среднеквадратичного отклонения:

$$RMSE(x^{(2)}) \rightarrow \min$$

Для решения обеих задач использована байесовская оптимизация, поскольку значение целевой функции определяется только после конечно-элементного анализа, а аналитическое выражение функции и ее производные отсутствуют. Начальная выборка формировалась методом латинского гиперкуба, дальнейший поиск выполнялся с использованием гауссовского процесса и функции приобретения Expected Improvement.

Апробация методики выполнена на образце-имитаторе спинки рабочей лопатки из титанового сплава ВТ6. Геометрия образца выбрана таким образом, чтобы при вибрационном нагружении по первой изгибной форме максимум напряжений локализовался в центре перехода от зоны закрепления к рабочей поверхности образца.

На этапе определения динамических напряжений выполнен модальный анализ образца. Для реализации методики выбрана первая форма колебаний (собственная частота - 896 Гц), так как при ней максимальные напряжения локализуются в области перехода.

Поскольку результаты модального анализа имеют относительный характер, они были нормированы по экспериментальным данным тензометрирования при вибрационных испытаниях. Полученный коэффициент нормализации составил  $5,01 \cdot 10^{-3}$ . В результате было получено нормализованное распределение напряжений при виброиспытаниях (рисунок 6).

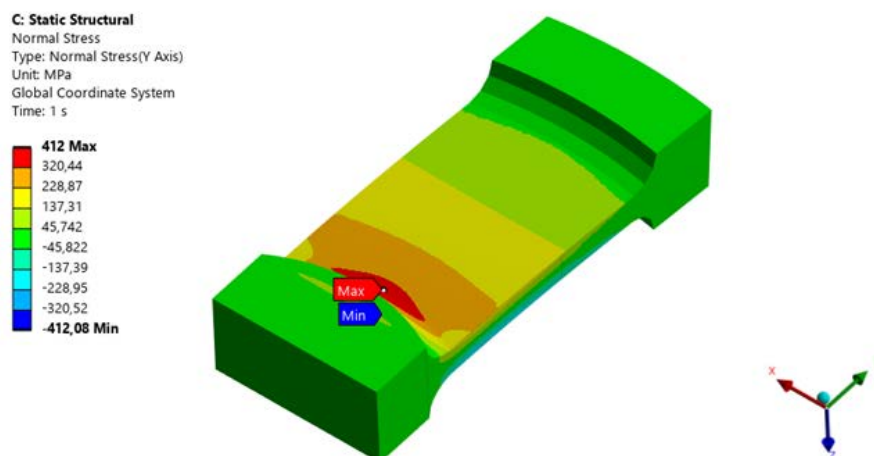


Рисунок 6 – Нормализованное распределение нормальных напряжений по оси Y после тензометрирования

По результатам предварительных усталостных испытаний исходных образцов-имитаторов для базы  $N = 20 \times 10^6$  циклов предел выносливости составил 412 МПа.

Для формирования произвольного профиля ОН в КЭМ применялся термоупругий подход: в зоне обработки задавалось поле температуры, эквивалентное распределению собственных деформаций, после чего выполнялся статический анализ при коэффициенте линейного температурного расширения, равном единице.

Оптимизация целевого профиля выполнялась в два шага. На первом шаге локализовалась область экстремума в широком диапазоне параметров; было установлено, что рациональная область соответствует поверхностным ОН порядка -200...-300 МПа и глубине залегания более 800 мкм. На втором шаге уточнялись значения величины и глубины залегания ОН. Результаты оптимизации второго шага представлены на рисунке 7.

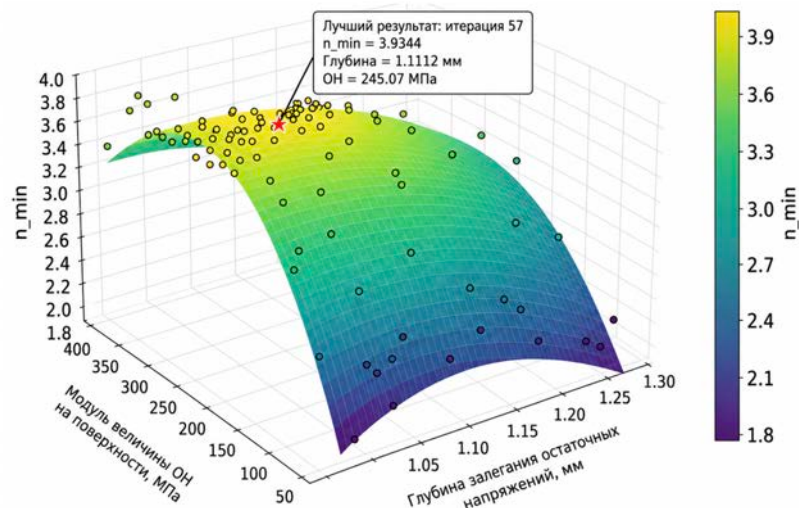


Рисунок 7 – Результат оптимизации остаточного напряженного состояния по критерию Гудмана

В результате оптимизации целевого профиля для образца-имитатора определены глубина залегания остаточных напряжений  $h_{ON} = 1,11$  мм и величина остаточных напряжений на поверхности  $\sigma_{ON} = -250$  МПа. Максимальное значение коэффициента запаса по Гудману составило 3,93. Показано, что чрезмерное увеличение модуля сжимающих напряжений у поверхности приводит к росту компенсирующих растягивающих напряжений в центральной части сечения и может привести к тому, что под поверхностью с учетом приложенной нагрузки могут образоваться напряжения выше, чем на неупрочненном образце.

После определения оптимального целевого профиля решалась задача подбора технологически реализуемых режимов ЛУО. Для образца-имитатора получен следующий режим: энергия импульса - 3,83 Дж, длительность импульса - 70 нс, диаметр пятна - 2 мм, перекрытие пятен - 50%. Среднеквадратичное отклонение расчетного профиля от целевого составило 34 МПа. Сравнение целевого профиля, результата прямого моделирования и экспериментального профиля, измеренного на прямоугольных образцах толщиной 4 мм, приведено на рисунке 8.

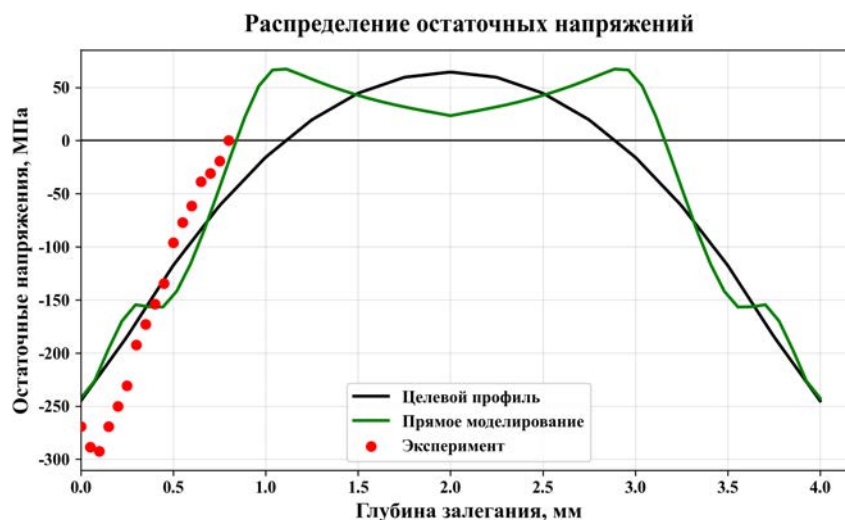


Рисунок 8 – Распределение остаточных напряжений по глубине для образца-имитатора: целевой профиль, прямое моделирование и эксперимент

Экспериментальная проверка выбранного режима выполнена на вибрационном стенде. Сравнение предела выносливости проводилось по шести образцам, обработанным в выбранном режиме. Среднее значение предела выносливости после ЛУО составило 526,6 МПа, максимальное – 588,4 МПа. По сравнению с исходным состоянием, для которого предел выносливости составлял 412 МПа, среднее значение предела выносливости после ЛУО увеличилось на 28 %, рисунок 9.

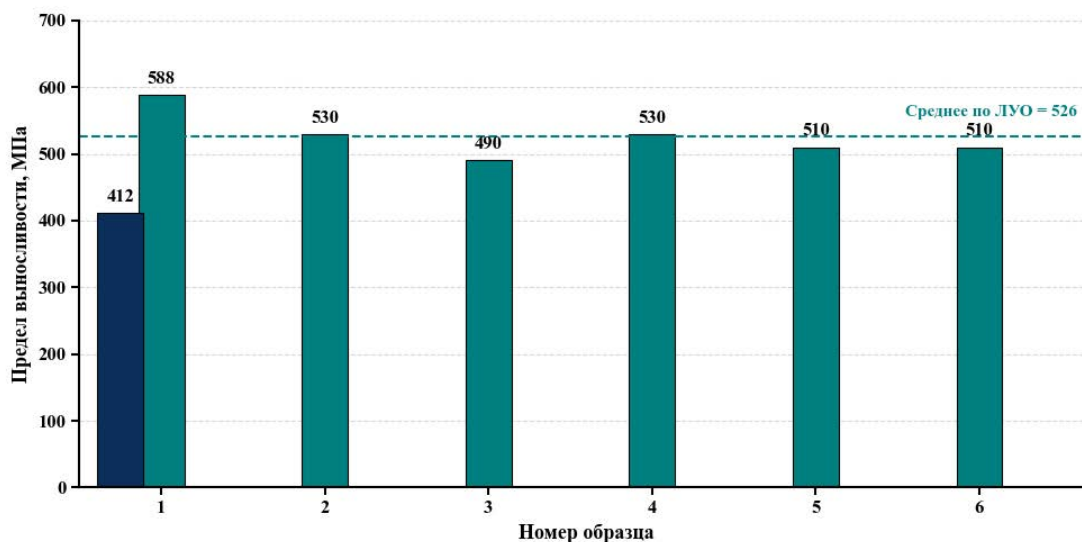


Рисунок 9 – Результаты усталостных испытаний образцов-имитаторов спинки рабочей лопатки

Фрактографический анализ показал изменение места зарождения усталостной трещины после ЛУО. В исходных образцах очаги располагались на поверхности или на глубине ~ 41 мкм от поверхности. После ЛУО очаги разрушения смещались в глубину материала на 0,5-0,9 мм.

В пятой главе также представлено применение разработанной методики для обработки спинки рабочей лопатки компрессора низкого давления из титанового сплава ВТ6. По сравнению с образцом-имитатором эта задача сложнее из-за переменной толщины профиля пера и неоднородного распределения напряжений при виброиспытаниях.

Для сокращения длительности усталостных испытаний часть пера удалялась электроэрозионным способом, поэтому реализация методики проводилась на обрезанной лопатке.

По результатам модального анализа и тензометрирования установлено, что максимальные напряжения при рассматриваемой форме колебаний локализуются в области выходной кромки и спинки лопатки, рисунок 10.

B: Modal  
User Defined Result  
Expression: SEQV / 2927  
08.05.2026 18:11

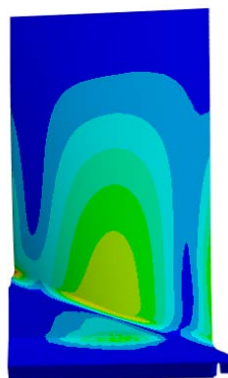
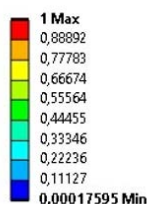


Рисунок 10 – Распределение относительных эквивалентных напряжений в рабочей лопатке КНД

Расчетное распределение напряжений было сопоставлено с данными тензометрирования. Экспериментальные данные подтвердили расположение зон максимальных напряжений и общую картину напряженного состояния, в результате чего было получено нормированное расчетное поле для задачи оптимизации целевого профиля ОН.

Оптимизация целевого профиля остаточных напряжений выполнялась для области спинки лопатки, в которой уровень внешних напряжений превышал 0,5 от максимального значения. Остаточные напряжения задавались со стороны спинки лопатки, а диапазоны варьирования величины поверхностных ОН и глубины их залегания были приняты аналогичными диапазонам, использованным при апробации на образце-имитаторе.

В результате оптимизации для спинки рабочей лопатки КНД определен целевой профиль с величиной остаточных напряжений около  $\sigma_{ОН} = -332$  МПа на поверхности и глубиной залегания сжимающей зоны  $h_{ОН} = 880$  мкм. Максимальный коэффициент запаса усталостной прочности по критерию Гудмана составил 2,67. Результат оптимизации приведен на рисунке 11.

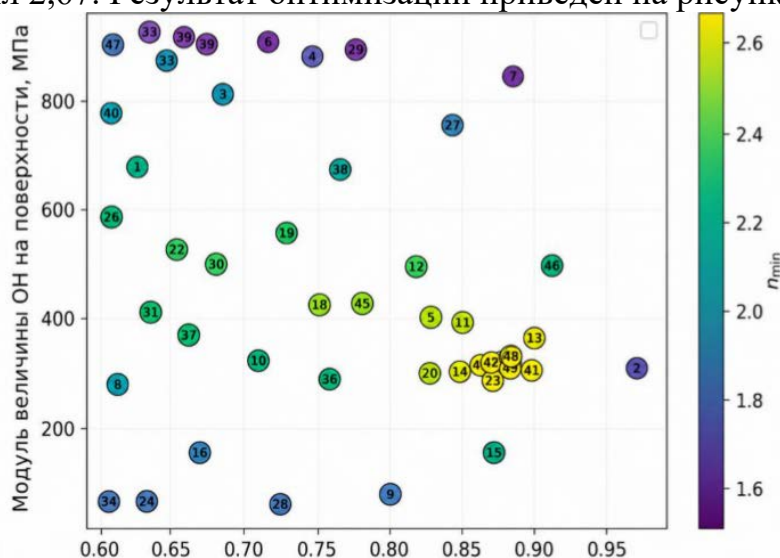


Рисунок 11 – Результат оптимизации остаточного напряженного состояния спинки рабочей лопатки КНД по критерию Гудмана

После определения целевого профиля решалась задача подбора технологических параметров ЛУО с использованием валидированной численной модели. Для рабочей лопатки КНД подобран технологически реализуемый режим, наиболее близко воспроизводящий целевой профиль: энергия импульса - 2,43 Дж, длительность импульса - 20 нс, диаметр пятна - 1,72 мм, перекрытие пятен - 34 %.

Сравнение целевого профиля и профиля, полученного прямым моделированием процесса ЛУО, приведено на рисунке 12. Полученный режим выбран для последующей экспериментальной проверки на рабочих лопатках.

Усталостные испытания рабочих лопаток КНД, обработанных в выбранном режиме, показали повышение усталостной прочности на 16 % по сравнению с лопатками, обработанными по серийной технологии. Полученные результаты внедрены в опытно-конструкторские работы «ОКБ им. А. Люльки» филиал ПАО «ОДК-УМПО» при разработке технологического процесса лазерной ударной обработки рабочих лопаток в соответствии с Решением №45/2025 от 30.05.2025 г.

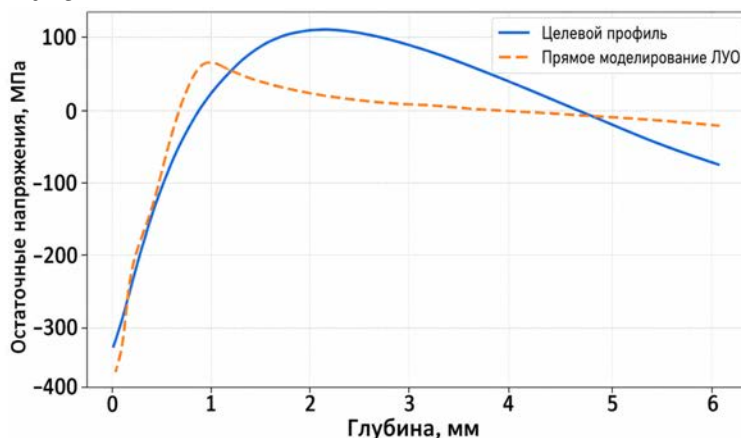


Рисунок 12 – Распределение остаточных напряжений по глубине для рабочей лопатки КНД: целевой профиль и результат прямого моделирования ЛУО

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Выполнен анализ технологических методов повышения усталостной прочности деталей ГТД и подходов к моделированию ЛУО. Показано, что при выборе режима обработки недостаточно учитывать только максимальную величину сжимающих остаточных напряжений и глубину их залегания. Для тонкостенных деталей необходимо учитывать компенсирующие растягивающие напряжения, динамическое напряженное состояние и возможное формоизменение после обработки.

2. Разработана численная модель ЛУО титанового сплава ВТ6. В расчетной постановке давление задается как функция радиальной координаты и времени, пиковое давление определяется по локальной интенсивности лазерного излучения, временная форма задается по экспериментальному профилю импульса, а упругопластическое поведение материала описывается моделью Johnson-Cook без температурного множителя.

3. Выполнена валидация численной модели по форме одиночного отпечатка, параметрам эпюры остаточных напряжений и изгибу образцов после

упрочнения. Нормированная среднеквадратичная ошибка между расчетными и экспериментальными эпюрами остаточных напряжений составила 14 % для режима 3,3 ГВт/см<sup>2</sup>, 5,8 % для режима 4,44 ГВт/см<sup>2</sup> и 12,12 % для режима 5,6 ГВт/см<sup>2</sup>.

4. Установлена область применимости модели для титанового сплава ВТ6: длительность лазерного излучения 16-70 нс, интенсивность 1-8 ГВт/см<sup>2</sup>, количество повторных импульсов от 1 до 3.

5. Разработана комплексная методика оптимизации режимов ЛУО на основе критерия Гудмана, включающая определение целевой эпюры поверхностных остаточных напряжений и подбор технологических параметров ЛУО для ее воспроизведения.

6. Методика апробирована на образце-имитаторе спинки рабочей лопатки ГТД. По результатам оптимизации выбран режим ЛУО: энергия импульса - 3,83 Дж, длительность импульса - 70 нс, диаметр пятна - 2 мм, перекрытие пятен - 50 %. Среднеквадратичное отклонение расчетного профиля от целевого составило 34 МПа.

7. Экспериментальная проверка выбранного режима показала повышение предела выносливости образцов-имитаторов: среднее значение после ЛУО составило 526,6 МПа против 412 МПа в исходном состоянии, что соответствует увеличению на 28 %.

8. Разработан опытный технологический процесс ЛУО рабочей лопатки КНД из титанового сплава ВТ6 с учетом переменной толщины профиля пера.

9. Для области спинки лопатки с уровнем динамических напряжений более 0,5 от максимального значения определен целевой профиль остаточных напряжений около -332 МПа на поверхности и глубиной залегания сжимающей зоны около 880 мкм; максимальный расчетный коэффициент запаса усталостной прочности составил 2,67.

10. Для спинки рабочей лопатки КНД оптимизирован режим ЛУО: энергия импульса - 2,43 Дж, длительность импульса - 20 нс, диаметр пятна лазерного излучения - 1,72 мм, перекрытие пятен - 34 %. Усталостные испытания обработанных лопаток показали повышение усталостной прочности на 16 % по сравнению с лопатками, обработанными по серийной технологии.

## **ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

**Публикации в рецензируемых научных изданиях и изданиях, приравненных к ним**

1. The Effect of Laser Shock Peening on the Physical and Mechanical Properties of the Surface Layer of D16 Aluminum Alloy / D. D. Korolev, G.D. Kozhevnikov, D. A. Tokachev [et al.] // Russian Aeronautics. – 2023. – Vol. 66, No. 4. – P. 829-837. – DOI 10.3103/s1068799823040244. – EDN OBMIUL.

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

3. Surface Integrity and Fatigue Performance of Laser Shock Peened VT6 Titanium Alloy / M. A. Lyakhovetsky, D.D. Korolev, G.D. Kozhevnikov, L.E. Agureev, G.N. Kravchenko, E.V. Zabenko. // Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. – 2025. – Vol. 19, No. 5. – P. 1154–1161. – DOI: 10.1134/S1027451025701642.

4. Валидация численной модели процесса лазерной ударной обработки по распределению остаточных напряжений и изгибу образцов из титанового сплава ВТ6 / Г.Д. Кожевников // Насосы. Турбины. Системы. – 2026. – № 2(59). – С. 111-120.

#### **Патенты, свидетельства и иные результаты**

1. 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». – EDN DYRXXF.

2. 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». – EDN GJCDJJ.

#### **Научные статьи и тезисы докладов в сборниках трудов международных и всероссийских конференций**

1. 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 21-й международной конференции, Москва, 21–25 ноября 2022 года / Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет). – Москва: Издательство "Перо", 2022. – С. 126-128. – EDN PZCPQG.

2. Токачев, Д. А. Влияние типов абляционных покрытий на характеристики поверхностного слоя алюминиевого сплава Д16 при обработке методом лазерного ударного упрочнения / Д. А. Токачев, Д. Д. Королев, Г. Д. Кожевников // Гагаринские чтения - 2023 : Сборник тезисов докладов XLIX Международной молодежной научной конференции, Москва, 11–14 апреля 2023 года. – Москва: Издательство "Перо", 2023. – С. 180-181. – EDN BDMGAI.

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

4. Трегулов, Д. Ф. Исследование влияния радиального распространения плазмы при численном моделировании лазерного ударного упрочнения титанового сплава Ti6Al4V / Д. Ф. Трегулов, Г. Д. Кожевников // Гагаринские чтения 2024 : Сборник тезисов докладов 50-ой Международной молодежной научной конференции, Москва, 09–12 апреля 2024 года. – Москва: ООО "Издательство "Перо", 2024. – С. 111-112. – EDN PUQYLU.
5. Кожевников Г.Д. Численное моделирование коробления рабочей лопатки ГТД при лазерной ударной обработке / Г. Д. Кожевников, Д. Ф. Трегулов, К. П. Шкарина // Авиация и космонавтика : Тезисы 23-й Международной конференции, Москва, 18–22 ноября 2024 года. – Москва: ООО "Издательство "Перо", 2024. – С. 72-73. – EDN EZPNKD.
6. Исследование влияния остаточных напряжений после лазерной ударной обработки на коробление деталей, изготовленных из титанового сплава ВТ6 / Токачев Д. А., Кожевников Г.Д., Шкарина К. П., Ляховецкий М. А. // 24-я Международная конференция «Авиация и космонавтика», Москва, 17–21 ноября 2025 года : тезисы. – Москва : Издательство «Перо», 2025 – С. 102.
7. Development and simulation of laser shock peening process for additively manufactured samples made from titanium alloy / Isaakov V. V., Shibaev S. A., Petrov M. A., Korolev D. D., Kozhevnikov G.D. // IEFM 2025 : Book of Abstracts, Elbrus, 01–06 марта 2025 года. – Elbrus, 2025. – P. 110. – EDN PSCJRS.
8. Разработка методики оптимизации режимов лазерной ударной обработки с помощью численного моделирования / Кожевников Г.Д., Королев Д. Д., Ляховецкий М. А., Токачев Д. А. // Международная научно-техническая конференция по авиационным двигателям ICAM 2025 : сборник тезисов / Государственный научный центр РФ «ЦИАМ имени П. И. Баранова». – Москва : ЦИАМ им. П. И. Баранова, 2025. – 1361 с. : ил. – ISBN 978-5-94049-062-3. – С. 1316–1317.
9. Лазерная ударная обработка: отечественное оборудование и влияние на эксплуатационные свойства различных материалов / Королев Д. Д., Кожевников Г.Д., Ляховецкий М. А., Ионов А. В. // Международная научно-техническая конференция по авиационным двигателям ICAM 2025 : сборник тезисов / Государственный научный центр РФ «ЦИАМ имени П. И. Баранова». – Москва : ЦИАМ им. П. И. Баранова, 2025. – 1361 с. : ил. – ISBN 978-5-94049-062-3. – С. 1313–1315.