

На правах рукописи



Гачегова Елена Алексеевна

**ВЛИЯНИЕ ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННЫХ ОСТАТОЧНЫХ
НАПРЯЖЕНИЙ НА УСТАЛОСТНУЮ ДОЛГОВЕЧНОСТЬ ТИТАНОВЫХ
ОБРАЗЦОВ С КОНЦЕНТРАТОРАМИ НАПРЯЖЕНИЙ**

1.1.8 – Механика деформируемого твердого тела

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Пермь – 2026

Работа выполнена в Институте механики сплошных сред УрО РАН – филиале Федерального государственного бюджетного учреждения науки "Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук" («ИМСС УрО РАН»).

Научный руководитель: **Плехов Олег Анатольевич**, доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН.

Официальные оппоненты: **Макаров Алексей Викторович**, д.т.н., академик РАН, главный научный сотрудник лаборатории механических свойств ФГБУН "Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН", г. Екатеринбург;

Салимон Алексей Игоревич, к.ф.-м.н., заведующий кафедрой физической химии ФГАОУ ВО "Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»", г. Москва.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки "Институт проблем сверхпластичности металлов Российской академии наук", г. Уфа.

Защита состоится **27 мая 2026 г.** в 14:00 часов на заседании диссертационного совета Д 004.036.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки "Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук" (филиал – Институт механики сплошных сред УрО РАН) по адресу: 614018, г. Пермь, ул. Академика Королёва, 1; тел: (342) 237-84-61; факс: (342) 237-84-87; сайт: www.icmm.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Института механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук.

Автореферат разослан « ____ » апреля 2026 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор физико-математических наук, доцент

 / А.Л. Зуев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Современные авиационные конструкции проектируются таким образом, чтобы на протяжении всего срока службы летательного аппарата можно было избежать катастрофических отказов из-за усталости, коррозии или случайных повреждений. Этот подход к проектированию и эксплуатации более известен как принцип допустимости повреждений. На его основе оценивается несущая способность конструкции при наличии повреждений и устанавливаются интервалы между осмотрами. За последние 75 лет в авиационной промышленности произошел ряд аварийных ситуаций. Коррозия (16% случаев) и усталость (55% случаев) являются двумя наиболее частыми причинами разрушения, связанными с выходом из строя компонентов самолета. Усталостные трещины, как правило, возникают в области концентрации напряжений или в местах, подверженных воздействию агрессивных сред. В отдельных случаях усталостные трещины способны развиваться без обнаружения в интервалах между техническими обслуживаниями, что вызывает снижение прочности конструкции планера.

С середины прошлого века авиационная промышленность, а вместе с ней и научное сообщество, активно искали решение проблем, связанных с усталостным разрушением деталей аэрокосмической техники, совершенствовались методы прогнозирования поведения конструкций и способы улучшения их усталостной долговечности. Одним из таких способов являлось создание остаточных напряжений в приповерхностных слоях деталей. Понимание природы остаточных напряжений и разработка новых способов их создания привели к тому, что они стали корректирующим инструментом для увеличения срока службы дорогостоящих и ответственных деталей конструкций. Поэтому всестороннее исследование методов создания остаточных напряжений и их роли в сопротивлении коррозии и усталостному разрушению критически важно для соблюдения высоких норм безопасности.

Известно, что остаточные напряжения играют решающую роль в процессах зарождения и развития усталостных трещин. В настоящее время применяется несколько видов обработки поверхности для создания полезных остаточных напряжений, которые значительно улучшают эксплуатационные характеристики металлических конструкций. Все они отличаются по степени сложности их реализации, а также конечному результату. При решении задач, в которых критически важным является создание остаточных напряжений на глубине порядка 1000 мкм, и при работе с деталями сложной геометрии наиболее перспективной является лазерная ударная обработка (ЛУО).

За последние 30 лет развитие лазерных технологий привело к устойчивому росту числа академических и коммерческих поставщиков систем для реализации ЛУО за рубежом. Стандартная комплектация такого комплекса включает в себя высокоэнергетические лазерные установки и роботизированные манипуляторы, позволяющие осуществлять обработку деталей произвольной геометрии. Каждый комплекс данного типа ориентирован на выполнение конкретных

производственных задач по механической обработке деталей заданной номенклатуры.

Для решения фундаментальных научных задач и повышения универсальности методики, включая обработку деталей различных типов геометрии и материалов с возможностью управления остаточными напряжениями, требуется технологический комплекс, обеспечивающий обработку в регулируемых диапазонах интенсивности воздействий и проведение сопутствующих научных исследований.

Степень разработанности темы исследования. Проблемы повышения усталостной долговечности, коррозионной стойкости и влияния остаточных напряжений изучаются в рамках механики разрушения. Это фундаментальное направление механики сплошных сред посвящено исследованию поведения материалов, содержащих дефекты, трещины и микрповреждения. Ее основы были заложены еще в первой половине прошлого столетия в работах А.А. Гриффитса и Дж. Ирвина, которые ввели такие понятия, как энергетический критерий разрушения, коэффициент интенсивности напряжений (КИН). Их теории позволили оценивать критическое состояние тел с трещинами под действием нагрузок. В российской научной школе важный вклад в развитие прикладных аспектов механики разрушения внесли Н.Н. Давиденков, В.В. Панасюк, Н.Ю. Работнов, М.В. Келдыш, Е.М. Морозов, исследовавшие прочностные характеристики материалов в условиях сложного напряженного состояния.

Усталостное разрушение металлов, как одна из наиболее частых причин разрушения конструкций и деталей, активно исследовалось в работах А.А. Шанявского, В.Н. Шлянникова, О.Б. Наймарка, В.Э. Вильдемана, В.Ф. Терентьева, Дж. Пэриса, Д. Дагдейла и многих других. Их исследования охватывали закономерности накопления усталостных повреждений, влияние микроструктуры и остаточных напряжений на долговечность. Использование диаграмм Веллера, пороговых значений амплитуды КИН, а также статистических моделей позволило существенно продвинуть прогнозирование усталостного ресурса различных конструкций. Остаточные напряжения являются важным фактором, оказывающим существенное влияние на усталостную долговечность конструкционных материалов, при этом их воздействие может быть как положительным, так и отрицательным. Важный вклад в изучение природы остаточных напряжений и их контроля внесли такие ученые, как Н.Н. Давиденков, П.В. Трусов, А.М. Корсунский.

Одним из наиболее перспективных методов создания остаточных напряжений на поверхности деталей является ЛУО. Работы P. Prevéy, K. Abdullahi, J.T. Wang, Y. Zhang, K. Praveenkumar, H. Кашаева, R. Fabbro, L. Berthe показали, что ЛУО формирует глубокие сжимающие остаточные напряжения, которые значительно увеличивают ресурс обработанных деталей, а также улучшают их усталостные и антикоррозионные свойства. В последние годы число работ, посвященных всестороннему исследованию этого процесса, растет. Такие исследователи как H. Wang, Z. Qin, Y. Sano, J. Fournier и X. Li анализировали влияние параметров ЛУО (энергия импульса, длительность, частота, способы

защиты поверхности и т.д.) на глубину упрочненного слоя и механические свойства обработанных деталей и конструкций.

Целью диссертации является объяснение физических механизмов, лежащих в основе повышения усталостной долговечности металлических материалов при использовании ЛУО, и создание экспериментального комплекса для исследования ЛУО в широком диапазоне интенсивностей лазерного воздействия.

Для достижения поставленной цели были решены следующие **задачи**.

1. Создание экспериментального программно-аппаратного комплекса для ЛУО деталей сложной геометрии в широком диапазоне плотностей энергии.
2. Экспериментальная проверка эффективности ЛУО (методика определения остаточных напряжений на глубинах до 1 мм).
3. Экспериментальное исследование влияния параметров ЛУО на характеристики создаваемых остаточных напряжений в титановых сплавах ВТ1-0, ОТ4-0 и ВТ6.
4. Проведение усталостных испытаний титановых образцов с концентраторами напряжений после ЛУО.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем.

1. Реализован процесс ЛУО образцов произвольной геометрии в широком диапазоне плотностей энергии. Подобраны оптимальные режимы обработки, оказывающие наибольшее влияние на усталостный ресурс.
2. Реализована и верифицирована методика определения остаточных напряжений на глубинах до 1 мм на основе сравнения с методом рентгеновской дифракции.
3. Показано кратное увеличение усталостного ресурса образцов из титановых сплавов ОТ4-0, ВТ1-0 и ВТ6 с концентратором напряжений после ЛУО.

Теоретическая и практическая значимость работы. Разработан и собран программно-аппаратный комплекс, позволяющий изучать процесс ЛУО в широком диапазоне интенсивностей лазерного воздействия и проводить мелкосерийную обработку деталей сложной геометрии.

Сформулированы методические рекомендации применения ЛУО, обеспечивающие повышение усталостной долговечности металлических элементов конструкций с концентраторами напряжений.

Создана экспериментальная база данных профилей остаточных напряжений для дальнейшей верификации математической модели процесса ЛУО титановых сплавов ВТ6, ОТ4-0, ВТ1-0.

Подобраны защитные покрытия и режимы ЛУО, обеспечивающие кратное увеличение ресурса для образцов с концентраторами напряжений.

Методология, принятая в работе, основана на фундаментальных положениях механики деформируемого твердого тела и методах современной экспериментальной механики. В работе использовались классические и разработанные в «ИМСС УрО РАН» методики проведения циклических испытаний на рост усталостной трещины (метод падения электрического потенциала). ЛУО проводилась с использованием современного оборудования, определение остаточных напряжений осуществлялось с учетом международного стандарта ASTM E837.

Положения, выносимые на защиту:

1. Плотности мощности свыше 3 ГВт/см² приводят к образованию и распространению упругопластической волны и генерации остаточных напряжений; плотности мощности свыше 12 ГВт/см² не оказывают значительного влияния на величину остаточных напряжений, создаваемых в процессе ЛУО титановых сплавов ВТ1-0, ОТ4-0 и ВТ6. (п. 13. паспорта специальности МДТТ: Экспериментальные методы исследования процессов деформирования, повреждения и разрушения, в том числе объектов, испытывающих фазовые структурные превращения при внешних воздействиях).

2. В случае неоднородного по глубине распределения остаточных напряжений в металле их достоверное определение возможно с помощью методики анализа деформаций разгрузки с кубическим распределением шагов, если напряжения не превышают 80% от предела текучести материала. (п. 3. паспорта специальности МДТТ: Задачи теории упругости, теории пластичности, теории вязкоупругости).

3. Материал защитного покрытия и место обработки образца являются основными технологическими параметрами ЛУО, определяющими усталостный ресурс образцов с концентраторами напряжений (п. 13. паспорта специальности МДТТ: Экспериментальные методы исследования процессов деформирования, повреждения и разрушения, в том числе объектов, испытывающих фазовые структурные превращения при внешних воздействиях).

4. Лазерная ударная обработка оказывает влияние преимущественно на стадию зарождения усталостной трещины, формируя сжимающие остаточные напряжения в поверхностных слоях. (п. 10. паспорта специальности МДТТ: Прочность при сложных режимах нагружения. Теория накопления повреждений. Механика разрушения твердых тел).

Достоверность экспериментальных исследований обеспечивается соблюдением методологии проведения эксперимента, использованием поверенного метрологического оборудования, повторяемостью результатов и соответствием установленных закономерностей с частными результатами других авторов.

Личный вклад заключается в анализе современного состояния исследований по теме работы; ключевом участии в создании комплекса для ЛУО на базе «ИМСС УрО РАН», в частности, систем синхронизации режима работы лазера и системы манипулирования образцом, проектировании, настройке и юстировке оптических систем фокусировки лазерного луча; в расчете и экспериментальной проверке степени влияния защитных поверхностей на эффективность обработки; проведении ЛУО всех исследуемых образцов; подборе методики расчета остаточных напряжений и их измерении; в обработке и анализе экспериментальных данных. Автор лично провел все экспериментальные измерения, представленные в работе.

Реализация работы. Результаты получены в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (соглашение №075-15-2024-552).

Апробация работы. Основные положения и результаты исследований, представленные в диссертационной работе, докладывались и обсуждались на: VII научной конференции "Проблемы динамики и прочности машин, конструкций и механизмов – 2023", г. Екатеринбург, 2023 г.; XXII Зимней школе по механике сплошных сред, г. Пермь, 2021 г.; XXIII Зимней школе по механике сплошных сред, г. Пермь, 2023 г.; XIII Всероссийском съезде по теоретической и прикладной

механике, г. Санкт-Петербург, 2023 г.; The 26th International Congress of Theoretical and Applied Mechanics (ICTAM 2024), Корея, г. Тэгу, 2024 г.; 12th Annual conference of Society of Structural Integrity and Life (DIVK12), Сербия, г. Белград, 2024 г.; XXIV Зимней школе по механике сплошных сред, г. Пермь, 24-28 февраля 2025 г.

Публикации. По теме диссертации опубликовано **четырнадцать научных статей**, проиндексированных в международных системах цитирования или входящих в список журналов, рекомендованных ВАК. По результатам работы получено **три патента** и зарегистрирована **одна программа для ЭВМ**.

Основное содержание работы

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы (169 наименований). Работа содержит 94 рисунка, 13 таблиц. Общий объем диссертации составляет 172 страницы.

В **первой главе** диссертации приведен литературный обзор методов создания остаточных напряжений (ОН) с акцентом на исследования, посвященные ЛУО. Рассмотрены наиболее распространенные методы создания поверхностных ОН, такие как дробеструйная обработка, ультразвуковая ударная обработка, малопластическое выглаживание и ЛУО. Проведен анализ экспериментальных методов измерения ОН. Проанализированы основные проблемы, связанные с изучением данного метода обработки, и определено основное направление работы – комплексное исследование параметров ЛУО и их влияния на усталостную долговечность образцов из титановых сплавов с концентраторами напряжений.

Вторая глава диссертации описывает программно-аппаратный комплекс по реализации ЛУО в «ИМСС УрО РАН» (рисунок 1).

Универсальный комплекс для ЛУО предназначен для повышения усталостных характеристик металлов и сплавов различного состава. Установка обеспечивает обработку деталей сложной геометрии и охватывает широкий диапазон интенсивностей лазерного воздействия – от 1 до 90 ГВт/см², что позволяет оптимизировать параметры обработки в соответствии с требованиями задачи и свойствами материалов.

При непосредственном участии автора разработаны аппаратно-программные средства, обеспечивающие высокую степень автоматизации и воспроизводимости процессов, что делает комплекс для ЛУО эффективным инструментом как для научных исследований, так и для мелкосерийной обработки.

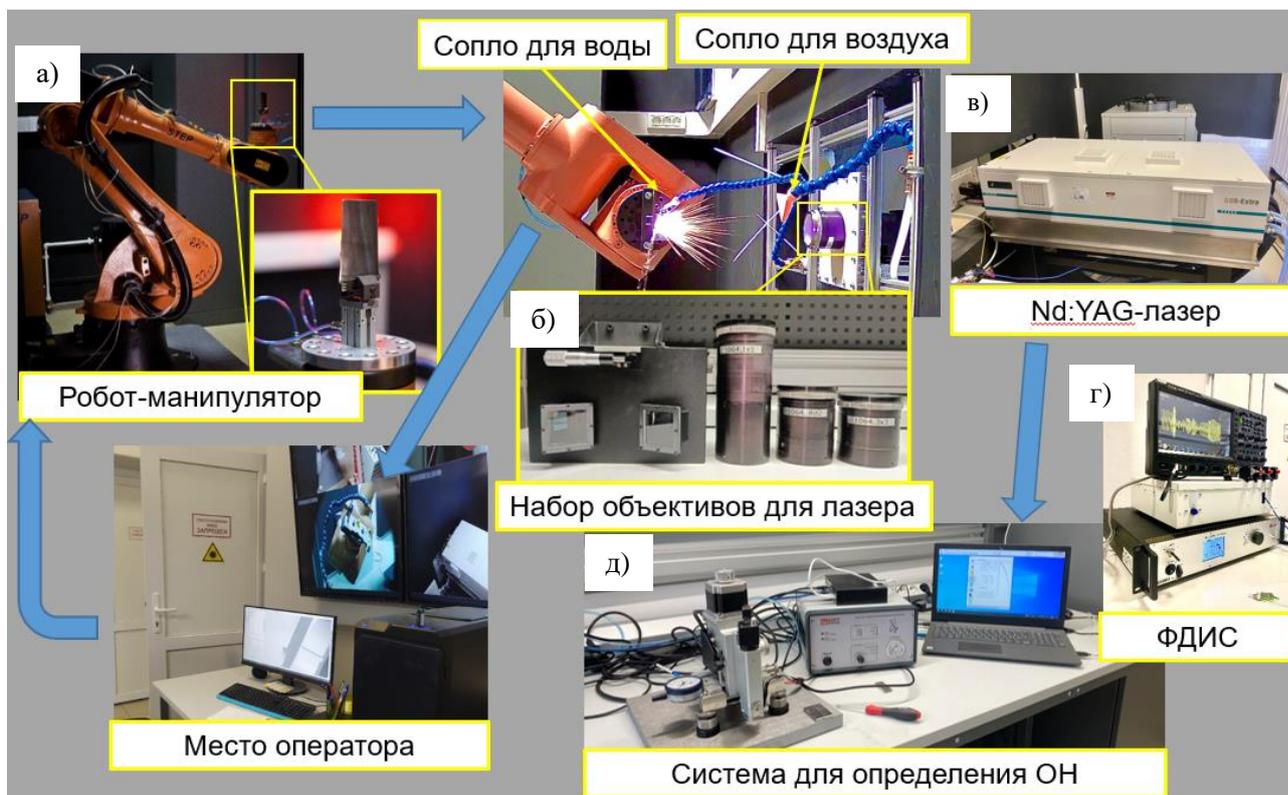


Рис. 1. Программно-аппаратный комплекс для ЛУО материалов «ИМСС УрО РАН»: а) робот манипулятор Step SR50; б) набор объективов; в) Nd:YAG лазер Beamtech SGR-Extra-10; г) фотонный доплеровский измеритель скорости (ФДИС); д) система для измерения ОН MTS3000-Restan

Основным элементом комплекса является импульсный твердотельный Nd:YAG лазер Beamtech SGR-Extra-10 (рис. 1в) с модулятором дробности и максимальной энергией в импульсе 9 Дж. Также имеется оптическая система (рис. 1б), которая позволяет фокусировать луч в круг диаметром 2 мм и квадраты со стороной 1 мм и 3 мм. Управление лазером производится автоматически при помощи пульта роботизированного манипулятора (рис. 1а) грузоподъемностью до 50 кг и точностью позиционирования детали 0,25 мм. После обработки получаемые ОН оцениваются при помощи автоматизированной системы измерения остаточных напряжений MTS3000-Restan (рис. 1д). Данная система используется для выполнения простых и точных измерений методом тензометрического сверления отверстия с помощью высокоскоростной воздушной турбины (400 000 об/мин) в соответствии со стандартом ASTM E837. Также в комплекс входит фотонный доплеровский измеритель скорости (рис. 1г), позволяющий измерять скорость свободной поверхности во время лазерного удара и оценивать амплитуду и длительность импульса давления, вызванного расширением плазмы.

В первой части **третьей главы** производился анализ методик расчета ОН, полученных после сверления отверстия, и сравнение их с методом рентгеновской дифракцией. Комбинирование этого метода с послойным травлением поверхности образца позволило получить профиль ОН на глубине до 1 мм. Для случая неравномерного распределения ОН по глубине существует три метода оценки профиля ОН: интегральный метод, дифференциальный метод и

стандартизированный метод ASTM E837 для неравномерного распределения ОН по глубине.

Измерения ОН методом рентгеновской дифракции проводились совместно с ФГБОУ ВО Санкт-Петербургский государственный морской технический университет.

На рисунке 2 представлены три профиля ОН, полученные методом сверления отверстия и один, полученный методом рентгеновской дифракции.

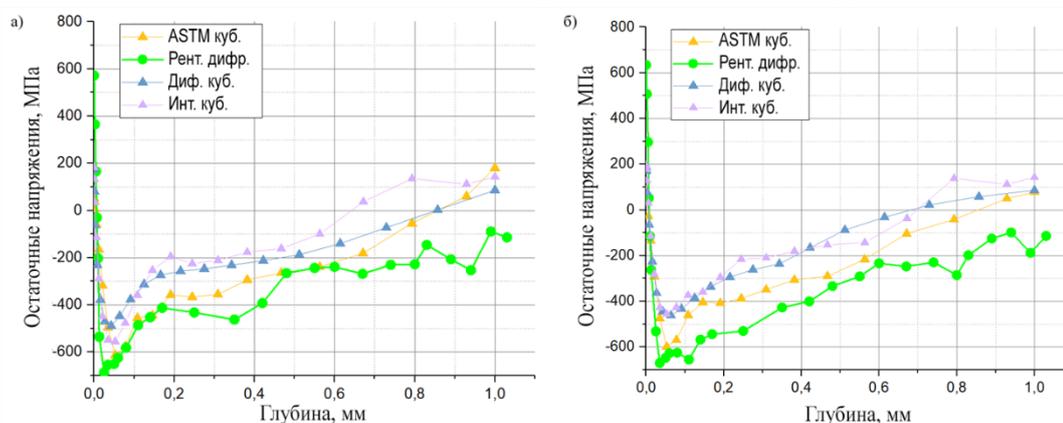


Рис. 2. Сравнение профилей ОН, полученных методами сверления отверстия и рентгеновской дифракции: а) нормальные напряжения вдоль оси X; б) нормальные напряжения вдоль оси Y

Анализ характера кривых распределения ОН, их максимальной величины и глубины на графиках (рисунок 2) показывает, что результаты, полученные методом рентгеновской дифракции, наиболее удовлетворительно соответствуют результатам, полученным методом сверления отверстия при обработке данных на основе стандартизированного подхода с кубическим распределением шагов измерений. Недостатком данного метода по сравнению с альтернативными методиками пересчета является меньшая корреляция с результатами метода рентгеновской дифракции при расчете растягивающих напряжений в поверхностном слое материала (10-20 мкм). Следует учитывать, что в обоих случаях точность измерений существенно зависит от состояния поверхности, которое ухудшается вследствие образования нагара в процессе прямого лазерного воздействия без защитного покрытия.

Вторая часть главы посвящена описанию эффектов, оказываемых различными параметрами ЛУО на создаваемые ОН. Объектом исследования являлись плоские образцы толщиной 2 мм, изготовленные из листа титанового сплава ВТ6. Геометрия образцов представлена на рисунке 3. Варьируемые параметры ЛУО указаны в таблице 1. После обработки лазерным ударом ОН были рассчитаны по методике, выбранной в первой части главы.

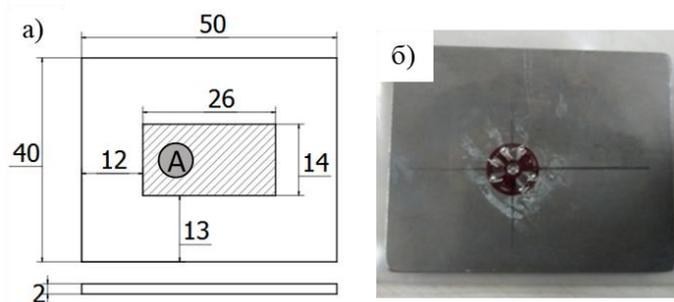


Рис. 3. Геометрия плоских образцов для определения профилей ОН (а), образец после измерений (б)

Таблица 1. Варьируемые параметры ЛУО

Энергия, Дж	1, 2, 3, 4, 8
Перекрытие лазерных пятен, %	0, 30, 50
Геометрия лазерного пятна	Круг Ø2 мм, квадрат со стор. 1 мм
Количество проходов	1, 2

На рисунках 4-5 в относительных единицах представлены результаты измерений ОН, нормированные на максимальную величину (глубину) сжимающих ОН, достигнутую при всех режимах ЛУО. Анализ результатов показывает, что плотность мощности свыше 3 ГВт/см^2 приводит к образованию упругопластической волны и генерации ОН в материале, плотность мощности $10\text{-}12 \text{ ГВт/см}^2$ является оптимальной для создания значительного уровня ОН, плотность мощности свыше 12 ГВт/см^2 не способствует повышению уровня ОН. Повторная обработка лазерным ударом этой же области с заменой защитного покрытия позволяет значительно увеличить глубину слоя сжимающих ОН и незначительно повысить максимальные ОН. Влияние геометрии пятна на генерацию ОН не выявлено. Экспериментально установлено, что при плотности мощности лазерного излучения свыше 15 ГВт/см^2 происходит разрушение защитного алюминиевого покрытия, что приводит к локальным дефектам и ухудшению качества обработки.

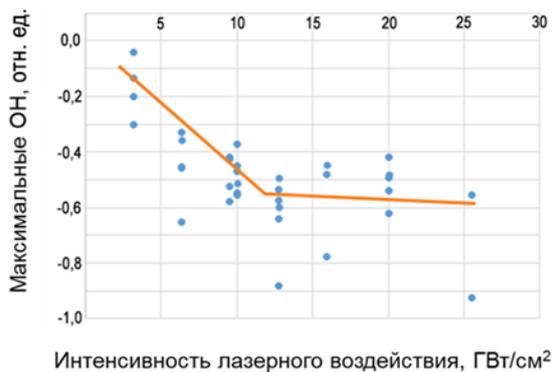


Рис. 4. Зависимость максимальных ОН от плотности мощности энергии

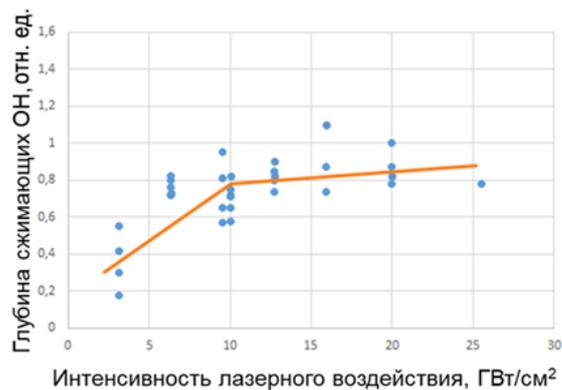


Рис. 5. Зависимость глубины ОН от плотности мощности энергии

В заключительной части главы проводилось исследование влияния различных материалов защитных покрытий. Обработывались пластины из титанового сплава ВТ6. Параметры ЛУО: плотность мощности 10 ГВт/см², геометрия пятна – квадрат со стороной 1 мм, укладка лазерных пятен – без перекрытий. Исследовалось три покрытия: алюминиевая фольга толщиной 80 мкм, черная краска с толщиной слоя 40 мкм и ПВХ лента толщиной 100 мкм. Также для сравнения рассматривался вариант с обработкой без покрытия. Решение одномерной задачи о распространении упругой волны в слоистой среде позволило определить оптимальные комбинации защитного покрытия и обрабатываемого материала. При использовании фольги и четной краски доля энергии, переходящей в материал составляет 90 %, при использовании ПВХ ленты потери энергии достигают 40 %.

Результаты расчетов подтверждаются экспериментальными данными, представленными на рисунке 6, и показывают, что ЛУО с использованием алюминиевой фольги обеспечивает наибольшую глубину слоя сжимающих ОН, который достигает 0,6 мм. Максимальные сжимающие ОН (400 МПа) были получены при использовании черной краски.

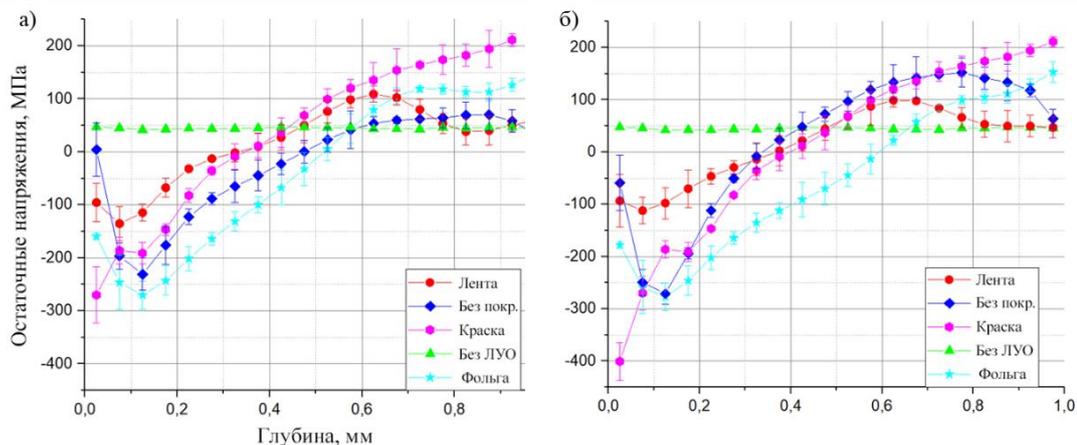


Рис. 6. Профили остаточных напряжений по глубине: а) нормальные напряжения вдоль оси X; б) нормальные напряжения вдоль оси Y

Также в данной главе исследовалось влияние ЛУО на микроструктуру титанового сплава ВТ6 с глобулярной и пластинчатой микроструктурой. Исследования не выявили заметных изменений морфологии микроструктуры, несмотря на наличие значительных остаточных напряжений, определенных методом сверления отверстий. Не наблюдалось поворота α -пластин в направлении пластического течения или сплющивания α -зерен. Также не было зафиксировано интенсивного образования малоугловых границ деформационного происхождения, двойникования и связанного с этим измельчения микроструктуры. Таким образом, можно заключить, что лазерная ударная обработка не приводит к структурным превращениям или изменению микроструктуры материала, а формируемые ею остаточные напряжения накладываются на исходное напряженное состояние без изменения его природы. Следовательно, напряжения, возникающие в результате лазерной ударной обработки, можно рассматривать как добавочный вклад в напряженное состояние материала, повышающий уровень сжимающих остаточных напряжений без изменения его микроструктуры.

Четвертая глава работы посвящена изучению влияния ЛУО на усталостную долговечность образцов из титановых сплавов ВТ1-0, ОТ4-0, ВТ6 с концентраторами напряжений. В первой части этой главы описывалось влияние расположения зоны обработки на усталостную долговечность образцов с боковым V-образным вырезом из технического титана ВТ1-0 и образцов с боковым полукруглым вырезом из титанового сплава ОТ4-0. Условия ЛУО образцов с боковым V-образным вырезом из технического титана ВТ1-0 представлены на рисунке 7. Исследовалось две схемы обработки. Первая схема предполагала расположение зоны ЛУО на расстоянии 1,5 мм от вершины выреза, вторая схема – обработку вокруг концентратора напряжений. Образцы подвергались последовательному лазерному ударному воздействию с обеих сторон. После ЛУО были измерены ОН в центре обеих зон. Графики, представленные на рисунке 7, показывают, что профили ОН на обоих образцах коррелируют по глубине залегания и амплитуде.

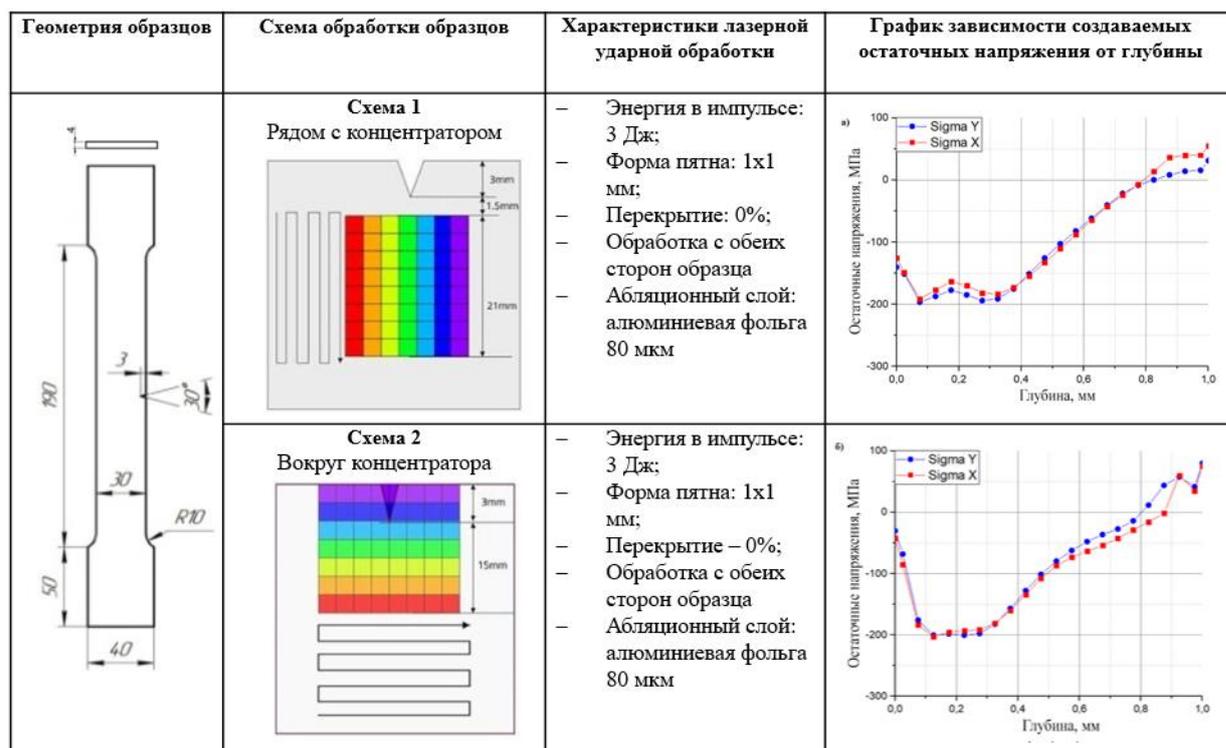


Рис. 7. Схема ЛУО и профили ОН для образцов из технического титана ВТ1-0

Исследование усталостных свойств плоских образцов из технического титана ВТ1-0 без ЛУО и после нее проводилось на сервогидравлической испытательной машине Vi-00-100 в условиях одноосного циклического деформирования с коэффициентом асимметрии цикла $R=0,1$ при максимальной нагрузке в цикле 8 кН.

Согласно результатам усталостных испытаний, представленным на рисунке 8, первая схема обработки привела к достоверному ухудшению усталостных характеристик образцов с V-образным концентратором, что выразилось в снижении циклической долговечности на 30% по сравнению с исходным состоянием. Образцы, обработанные по второй схеме, показали прирост усталостной долговечности примерно в два раза. Данный эффект обусловлен тем, что при смещении зоны обработки от концентратора напряжений в ней формируется область сжатия, окруженная зоной растягивающих напряжений. Усталостная трещина зарождается в зоне растягивающих напряжений, что интенсифицирует ее развитие. К тому моменту, когда трещина распространяется в зону обработки, ее скорость роста оказывается значительной, в результате чего влияние сжимающих ОН становится несущественным, и эффект от ЛУО не наблюдается.

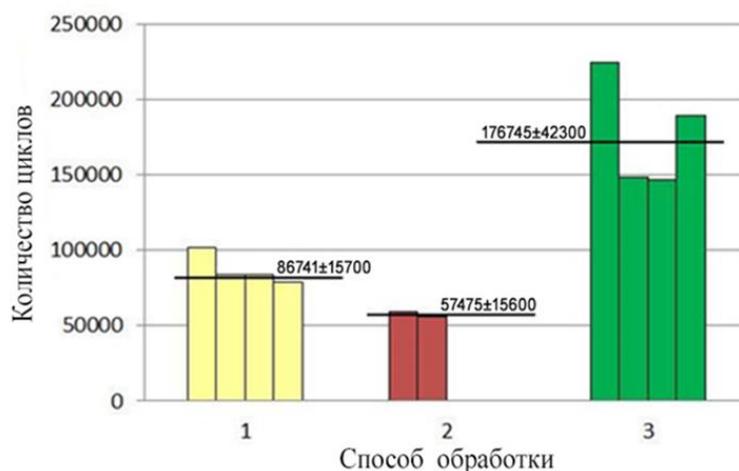


Рис. 8. Результат усталостных испытаний образцов из технического титана VT1-0

Аналогичный режим ЛУО и условия циклического деформирования использовались для исследования влияния ЛУО на усталостную долговечность образцов из титанового сплава ОТ4-0, геометрия которых показана на рисунке 9. Зона обработки включала концентратор напряжений.

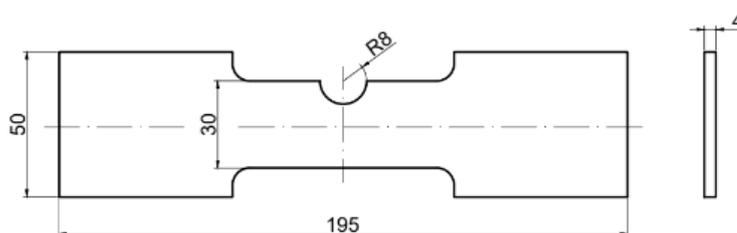


Рис. 9. Геометрия образцов с полукруглым боковым вырезом из титанового сплава ОТ4-0

Результаты циклических испытаний (рисунок 10) показали, что ЛУО оказывает положительный эффект на усталостную долговечность образцов, количество циклов до разрушения обработанных образцов выросло на 85%. Таким образом, показано, что ЛУО при оптимальном расположении зоны лазерного ударного воздействия значительно увеличивает усталостную долговечность образцов с концентратором напряжений.

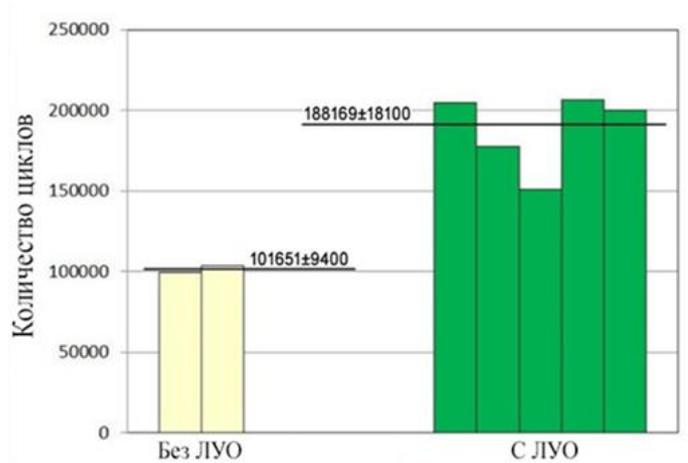


Рис. 10. Результат усталостных испытаний образцов из титанового сплава ОТ4-0

В заключительной части главы представлены результаты усталостных испытаний образцов из титанового сплава ВТ6 с полукруглым боковым вырезом (геометрия аналогична рисунку 9), обработанных с разными схемами наложения лазерных пятен.

Исследуемые схемы ЛУО представлены на рисунке 11. Варьировались следующие параметры ЛУО: энергия лазерного луча, геометрия лазерного пятна, перекрытие лазерных пятен и местоположение области обработки.

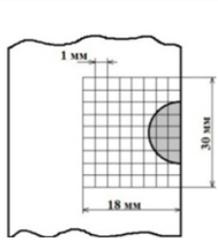
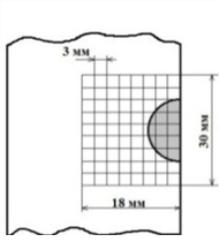
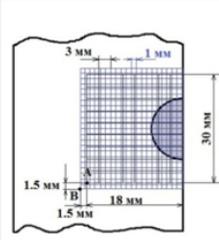
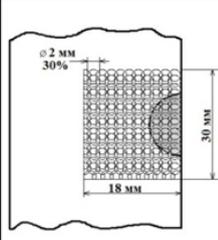
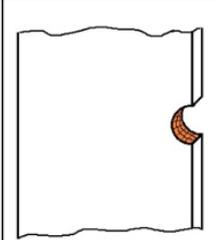
Схема 1	Схема 2	Схема 3	Схема 4	Схема 5
				
Энергия в импульсе: 1 Дж; Форма пятна квадрат со стороной 1 мм; Интенсивность лазерного воздействия: 10 ГВт/см ² ; Перекрытие: 0%.	Энергия в импульсе: 5 Дж; Форма пятна квадрат со стороной 3 мм; Интенсивность лазерного воздействия: 5,56 ГВт/см ² ; Перекрытие: 0%.	Энергия в импульсе: 2 / 1 Дж; Форма пятна: квадрат со стороной: 3 / 1 мм Интенсивность лазерного воздействия: 2,22 / 10 ГВт/см ² Перекрытие: 0%.	Энергия в импульсе: 2 Дж; Форма пятна: круг Ø2 мм; Интенсивность лазерного воздействия: 6,37 ГВт/см ² ; Перекрытие: 30%.	Энергия в импульсе: 1 Дж; Форма пятна квадрат со стороной 1 мм; Интенсивность лазерного воздействия: 10 ГВт/см ² ; Перекрытие: 30%.

Рис. 11. Параметры режимов ЛУО плоских образцов с полукруглым боковым вырезом из титанового сплава ВТ6

На рисунке 12 представлены профили ОН, полученные при использовании схем обработки №1-4. При схеме №5 ЛУО проводилась в торцевой части полукруглого выреза, где использование метода сверления отверстия для определения ОН невозможно. Во всех остальных случаях измерение ОН проводилось в центре обработанной зоны. С точки зрения оптимального соотношения глубины и максимальной величины сжимающих ОН наиболее эффективной является схема №4, при которой сжимающие ОН формируются на глубине до 0,8 мм, а их максимальное значение достигает 500 МПа.

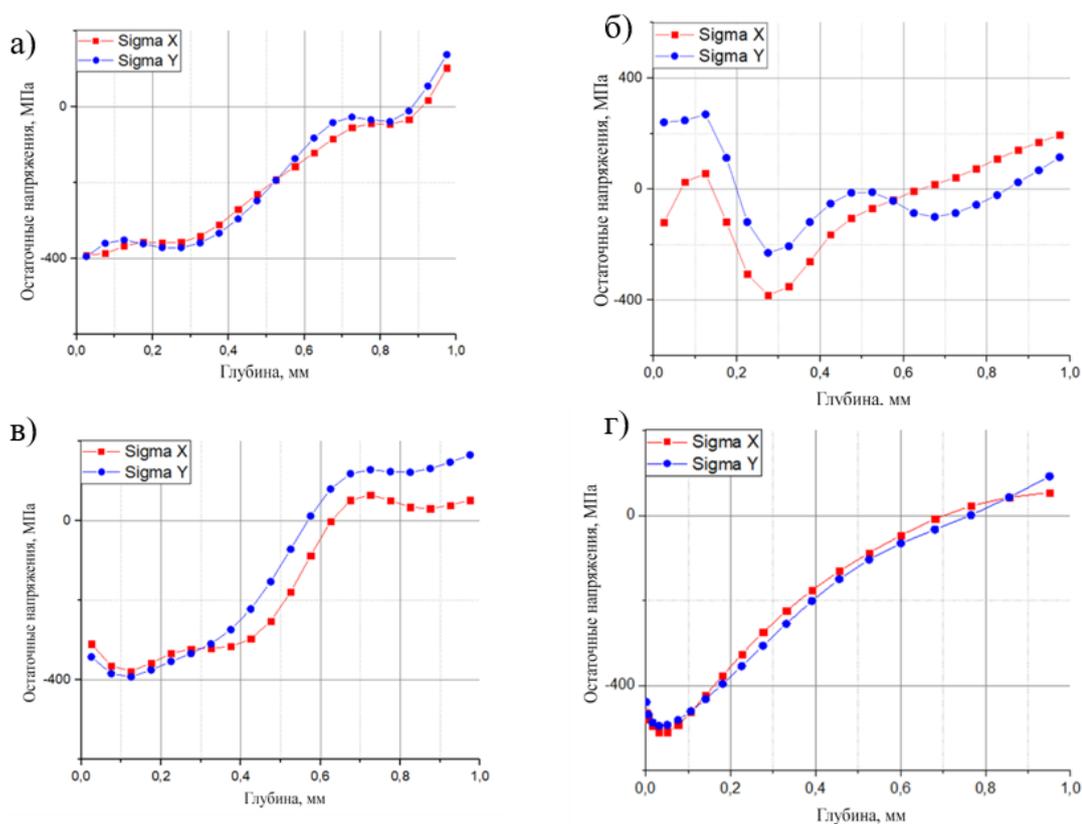


Рис. 12. Профили ОН, полученные при обработке с разными схемами: а) схема №1; б) схема №2; в) схема №3; г) схема №4

Исследование усталостных свойств образцов с полукруглым боковым вырезом из титанового сплава ВТ6 проводилось в условиях, описанных выше при максимальной силе нагружения 10 кН. Была испытана серия образцов (21 шт.), среди которых два образца были обработаны по модифицированной первой схеме. У одного из них обрабатывались фронтальная, тыльная поверхности и торец в вырезе. Обработка второго образца проводилась с энергией в импульсе 3 Дж.

Результаты усталостных испытаний представлены на рисунке 13. Среднее количество циклов до разрушения образцов без обработки составило 130 тысяч, с доверительным интервалом (при уровне значимости 0,1) ± 26 тысяч; после схемы обработки №1 – 140 ± 25 тысяч, после схемы №2 – 99 ± 20 тысяч, после схемы №3 – 115 ± 33 тысяч, после схемы №4 – 133 ± 49 тысячи. Из четырех испытанных образцов, обработанных по схеме №5, два не были доведены до разрушения с числом циклов наработки 1 миллион и 3 миллиона, два других образца разрушились не в зоне концентратора напряжений, а в области захвата с числом циклов наработки 1 миллион и 1,15 миллиона. Таким образом, показано, что режимы, предполагающие ЛУО плоскостей образцов (схемы №1-4 и модифицированная схема №1 «Схема 1 (3 Дж)»), не дают значительного увеличения усталостной долговечности по сравнению с контрольными образцами без обработки. Модификация схемы №1 «Схема 1 + Торец» позволила повысить ресурс примерно в 4 раза. Вместе с тем, при ЛУО торца в области выреза (схема №5) усталостная долговечность демонстрирует как минимум семикратное увеличение по сравнению с образцами без обработки. Это, вероятно, связано с тем, что в процессе ЛОУ было создано поле

сжимающих ОН, обеспечивающее совпадения ориентации главных осей тензора ОН и моды зарождения и развития трещины. Компоненты сжимающих ОН, достигающие при выбранном режиме обработки максимальных значений 400 МПа, полностью нивелировали коэффициент концентрации напряжений в вершине выреза и препятствовали образованию трещины нормального отрыва.

Таким образом, с точки зрения повышения усталостного ресурса плоских образцов из титанового сплава ВТ6, схема ЛУО №5 является наиболее эффективной.

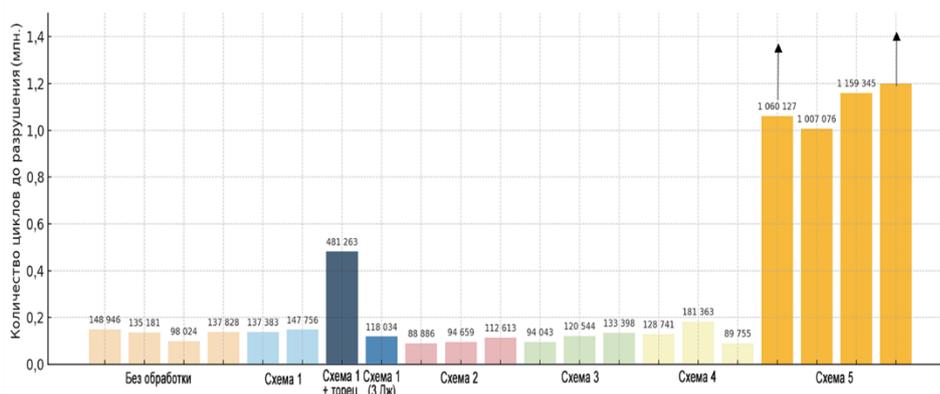


Рис. 13. Результаты усталостных испытаний образцов из титанового сплава ВТ6 без ЛУО и после ЛУО по схемам №1-5

Дополнительно были проведены эксперименты с максимальной нагрузкой $F_{\max} = 16,5$ кН, с неизменной величиной коэффициента асимметрии цикла $R=0,1$ и частотой нагружения 10 Гц.

Основным критерием выбора величины нагрузки для образцов после ЛУО являлось соответствие количества циклов до разрушения на обработанном образце и базовом образце (при максимальной нагрузке в цикле 10 кН). С целью экономии времени, ресурса лазерной ударной установки и материала было проведено численное моделирование процесса лазерной ударной обработки с последующим растяжением образца с различной прикладываемой максимальной нагрузкой (10 кН, 15 кН, 16,5 кН и 18 кН). По результатам численного моделирования были построены средние по толщине образца графики зависимости величины напряжений в направлении нагружения (в данном случае S_x) от ширины образца в направлении от вершины бокового надреза к кромке для образца без лазерной ударной обработки при величине прикладываемой силы 10 кН и для образца с исходным полем остаточных напряжений, индуцированным ЛУО, при различных величинах прикладываемых нагрузок (рисунок 14).

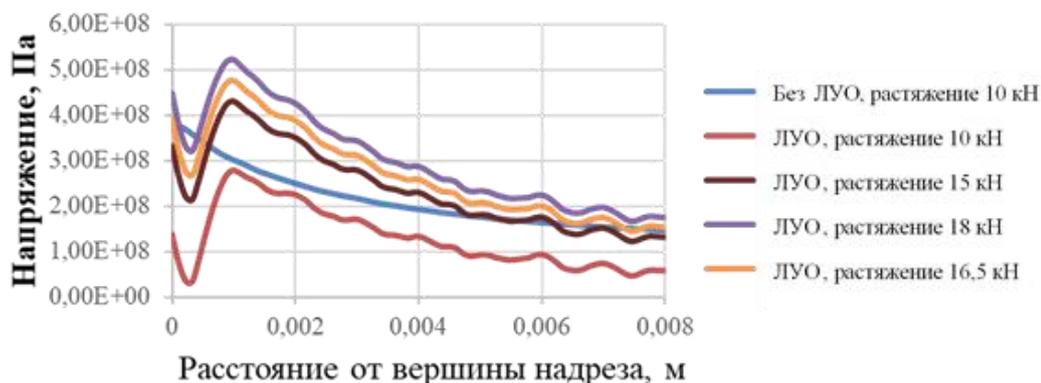


Рисунок 14. График зависимости напряжения S_x вдоль оси нагружения от расстояния от вершины выреза к кромке образца

Анализ полученных численных результатов показывает, что наибольшее соответствие величины напряжений в вершине надреза наблюдается при растяжении образца после ЛУО с силой 16,5 кН.

Всего было испытано 16 образцов, из которых 10 образцов при максимальной нагрузке в цикле 10 кН (6 шт. находились в исходном состоянии – изготовлены методом электроэрозионной резки из листа титанового сплава ВТ6 в состоянии поставки, отшлифованы, 4 шт. были подвергнуты лазерной ударной обработке в выбранном режиме, описанном выше) и 6 образцов при максимальной нагрузке в цикле 16,5 кН (1 образец находился в исходном состоянии без ЛУО, 5 шт. были подвергнуты ЛУО в выбранном режиме, описанном выше). Результаты эксперимента представлены на рисунке 15.

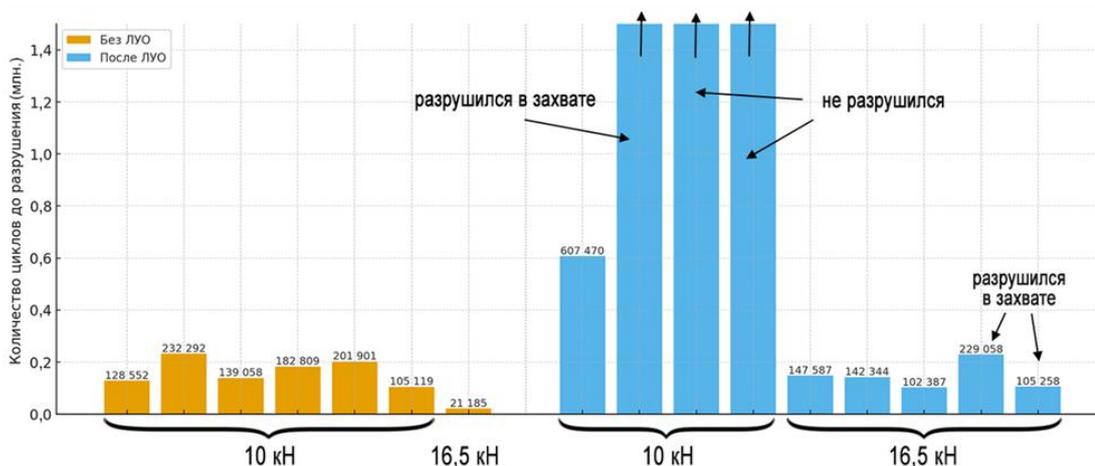


Рисунок 15. Диаграмма результатов усталостных испытаний базовых и обработанных образцов

По результатам усталостных испытаний показано, что лазерная ударная обработка позволяет не только существенно увеличить число циклов до разрушения при заданной нагрузке, но и, при сохранении заданной долговечности, повысить допустимую рабочую нагрузку образцов.

В заключении изложены основные выводы по диссертационной работе.

1. Экспериментально показано, что плотность мощности лазерного воздействия выше 3 ГВт/см^2 приводит к образованию и распространению упруго-пластической волны в титановых сплавах ВТ1-0, ОТ4-0, ВТ6 и созданию сжимающих ОН; увеличение интенсивности лазерного излучения свыше $10\text{-}12 \text{ ГВт/см}^2$ не способствует повышению уровня ОН, создаваемых в процессе ЛУО.
2. Характеристики ОН не зависят от геометрии лазерного пятна, увеличение количества проходов лазерного луча позволяет увеличить глубину залегания слоя ОН, практически не меняя максимальные значения этих напряжений.
3. Методика расчета, учитывающая неоднородное распределение ОН по глубине, с кубическим распределением шагов измерения является оптимальной при использовании метода сверления отверстия и позволяет достоверно определять ОН в диапазоне значений, не превышающих 80% предела текучести материала.
4. На основе решения одномерной задачи о распространении упругих волн в слоистой среде показано, что материал защитного покрытия оказывает определяющее влияние на эффективность ЛУО.
5. ЛУО с правильно подобранными параметрами обработки и ориентацией тензора сжимающих ОН позволяет кратно увеличить усталостный ресурс, а при сохранении усталостного ресурса в разы поднять рабочие нагрузки образцов с концентраторами напряжений из титановых сплавов ВТ1-0, ОТ4-0 и ВТ6.
6. Для исследованного диапазона воздействий и номенклатуры материалов основное влияние ЛУО проявляется в замедлении процесса зарождения усталостной трещины в образцах с концентраторами напряжений.

Основные публикации по теме диссертации:

1. Iziyomova A., Vshivkov A., Prokhorov A., **Gachegova E.**, Davydov D. Heat dissipation and fatigue crack kinetic features of titanium alloy Grade 2 after laser shock peening // Fracture and Structural Integrity. – 2022. – Vol. 16, №. 62. – P. 516-526.
2. Kostina A., Zhelnin M., **Gachegova E.**, Prokhorov A., Vshivkov A., Plekhov O., Swaroop S. Finite-element study of residual stress distribution in Ti-6Al-4V alloy treated by laser shock peening with varying parameters // Fracture and Structural Integrity. – 2022. – Т. 16. – №. 61. – С. 419–436.
3. Iziyomova A., Zhelnin M., Kostina A., Vshivkov A., **Gachegova E.**, Plekhov O., Swaroop S. Fatigue life investigation of notched TC4 specimens subjected to different patterns of laser shock peening // Fracture and Structural Integrity. – 2023. – Vol. 17, №. 65. – P. 100-111.
4. **Gachegova E.**, Davydov D., Mironov S., Kalinenko A., Ozerov M., Zharebtsov S., Plekhov O. The Influence of Absorbing Coating Material on the Efficiency of Laser Shock Peening // Metals. – 2024. – Vol. 14, №. 9. – P. 1045.

5. Vshivkov A. N., Iziyuma A. Yu., **Gachegova E. A.**, Plekhov O. A. Structural and Fatigue Features of Ti64 Alloy after Different Laser Shock Peening // Russian Physics Journal. – 2024. – Vol. 67, №. 3. – P. 287-295.
6. Vshivkov A. N., Iziyuma A. Yu., **Gachegova E. A.**, Bartolomei M. L., Plekhov O. A., Ugolnikov M. V., Ilinykh A. V., Wildemann V. E. Crack Propagation Under Residual Stress Field Induced by Laser Shock Peening // Russian Physics Journal. – 2024. – Vol. 67, №. 9. – P. 1449-1455.
7. Verezhak M., Vshivkov A., **Gachegova E.**, Bartolomei M., Mayer A., Swaroop S. Application of deep learning for technological parameter optimization of laser shock peening of Ti-6Al-4V alloy // Fracture and Structural Integrity. – 2024. – Vol. 18, № 70. – P. 121-132.
8. **Гачегова Е. А.**, Сихамов Р., Фенцке Ф., Кашаев Н., Плехов О. А. Влияние лазерной ударной проковки на мало- и многоцикловую усталость титанового сплава ОТ4-0 // Прикладная механика и техническая физика. – 2022. – Т. 63. – №. 2. – С. 182–191.
9. Прохоров А. Е., Вшивков А. Н., **Гачегова Е. А.**, Плехов О. А. Использование метода лазерной ударной проковки в целях увеличения усталостного ресурса металлических материалов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2022. – Т. 88. – №. 1-1. – С. 92.
10. Бартоломей М. Л., Изюмова А. Ю., **Гачегова Е. А.**, Вшивков А. Н., Плехов О. А., Swaroop S. Численный анализ остаточных напряжений при двухстороннем симметричном лазерном ударном упрочнении тонких пластин из титанового сплава ВТ6 // Вычислительная механика сплошных сред. – 2024. – Т. 17. – №. 4. – С. 411–421.
11. Гончар А. В., Плехов О. А., Курашкин К. В., **Гачегова Е. А.**, Вшивков А. Н. Определение остаточных напряжений в образце из стали AISI 316Ti ультразвуковым методом после лазерной ударной проковки // Дефектоскопия. – 2025. – № 4. – С. 16–28.
12. Bartolomei M., Iziyuma A., Vshivkov A., **Gachegova E.**, Plekhov O. Numerical investigation of residual stress field induced by laser shock peening // Procedia Structural Integrity. – 2025. – Vol. 72. – P. 135–140.
13. **Gachegova E. A.**, Plekhov O. A., Vshivkov A. N. Studies on laser shock peening with different absorbing coatings // Procedia Structural Integrity. – 2025. – Vol. 72. – P. 260–264.
14. **Gachegova E. A.**, Vinogradov I. M., Iziyuma A. Yu., Vshivkov A. N., Bartolomei M. L., Kudryashev I. S., Plekhov O. A., Zherebtsov S. V. Comparative Analysis of Methods for Measuring Residual Stresses in a Nickel Alloy after Laser Shock Peening // Diagnostics, Resource and Mechanics of Materials and Structures. – 2025. – Vol. 4. – P. 65–86.
15. Способ обработки плоской заготовки из титанового сплава с концентратором напряжений : пат. 2796661 С1 Рос. Федерация / Изюмова А. Ю.,

Бартоломей М. Л., Вшивков А. Н., Плехов О. А., **Гачегова Е. А.** – заявл. 19.09.2022 ; опубл. 29.05.2023.

16. Способ лазерной ударной обработки тонкой кромки лопатки, выполненной из титанового сплава, компрессора газотурбинного двигателя : пат. 2833635 С1 Рос. Федерация / Амосов К.А., Скрябиков С.В., Кузьменко С.В., Вшивков А.Н., Плехов О.А., **Гачегова Е.А.**, Изюмова А.Ю., Прохоров А.Е. – заявл. 24.07.2024 ; опубл. 28.01.2025.

17. Способ определения распределения остаточных напряжений по толщине металлоизделия с высокими поверхностными градиентами : пат. 2834607 С1 Рос. Федерация / Петухов Д.С., Келлер И.Э., Плехов О.А., **Гачегова Е.А.**, Максимов А.Б. – заявл. 27.06.2024 ; опубл. 11.02.2025.

18. Программа для лазерной ударной проковки лопаток компрессора : свид. о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2023682641 Рос. Федерация / **Гачегова Е.А.**, Вшивков А.Н. – № 2023681059 ; заявл. 13.10.2023 ; опубл. 27.10.2023. – Заявитель: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук.