

О Т З Ы В

официального оппонента на диссертационную работу

ГАЧЕГОВОЙ ЕЛЕНА АЛЕКСЕЕВНЫ

«Влияние лазерно-индуцированных остаточных напряжений на усталостную долговечность титановых образцов с концентраторами напряжений»,
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.8 – Механика деформируемого твердого тела

Диссертационная работа Гачеговой Е.А. направлена на разработку научных и технологических подходов к повышению усталостной долговечности металлических материалов на примере титановых сплавов с применением перспективного метода лазерной ударной обработки.

Актуальность темы диссертационного исследования

Одной из наиболее частых причин разрушения конструкций, механизмов и деталей является усталостное разрушение металлов. В частности, выход из строя компонентов современных авиационных конструкций в 55% случаев происходит именно по этой причине. Определяющую роль в процессах зарождения и развития усталостных трещин играют остаточные напряжения. Поэтому особую значимость приобретают исследования, направленные на улучшение усталостной долговечности деталей аэрокосмической техники на основе углубления понимания природы остаточных напряжений и разработки новых способов их создания в приповерхностных слоях деталей, где и происходит зарождение усталостных трещин.

Одним из наиболее перспективных современных способов формирования остаточных напряжений на глубине порядка 1 мм, в том числе на поверхностях деталей сложной геометрии, является технология лазерной ударной обработки. Для наиболее эффективного применения указанной обработки при решении проблемы предотвращения и замедления усталостного разрушения важно не только рассмотрение в рамках механики разрушения фундаментальных научных задач влияния остаточных напряжений на усталостную долговечность конструкционных материалов, но и создание экспериментального программно-аппаратного технологического комплекса для лазерной ударной обработки деталей сложной формы в широком диапазоне плотностей энергии. Поэтому рассматриваемая диссертационная работа, направленная на решение отмеченных задач, является актуальной и практически важной.

Структура диссертации и ее основное содержание

Диссертация соискателя состоит из следующих разделов: введение; представленный в первой главе аналитический обзор современной литературы; глава с описанием программно-аппаратного комплекса по реализации лазерной ударной обработки; две исследовательские главы; заключение; список литературы, включающий 169 наименований. Работа изложена на 172 страницах.

Во введении показана актуальность тематики исследований, степень разработанности исследования, обозначены цель и задачи работы, а также сформулированы положения, выносимые на защиту диссертационной работы, и полученная научная новизна. Представлена теоретическая и практическая значимость исследований, методология, приведены данные о степени достоверности экспериментальных результатов, личном вкладе автора и апробации результатов исследований.

В первой главе диссертационной работы после анализа механики усталости/разрушения и влияния на эти процессы остаточных напряжений проведён обзор литературных источников, посвящённых таким наиболее распространённым методам создания остаточных напряжений в поверхностных слоях металлических материалов как дробеструйная и ультразвуковая ударная обработки, малопластическое выглаживание, а также исследования по использованию для этой цели лазерной ударной обработки при различных технологических режимах (влияние параметров лазерного излучения, количества проходов и перекрытия, применения поглощающих или защитных покрытий). Особое внимание уделено рассмотрению экспериментальных методов измерения остаточных напряжений. На основе анализа литературных данных и обсуждения проблематики изучения процессов, характерных для лазерной ударной обработки, обоснованы направления исследований, определены решаемые в диссертационной работе конкретные задачи, связанные с установлением закономерностей формирования остаточных напряжений при лазерной ударной обработке титановых сплавов, влиянием технологических параметров лазерной ударной обработки и схем расположения зоны обработки на усталостную долговечность образцов с различными концентраторами напряжений, а также с выбором и обоснованием наиболее корректной методики измерения остаточных напряжений при их неравномерном распределении по глубине поверхностного слоя.

Во второй главе проведено детальное описание универсального программно-аппаратного комплекса по реализации лазерной ударной обработки, предназначенного для повышения усталостных характеристик металлов и сплавов различного состава. Отмечено непосредственное участие автора в разработке аппаратно-программных средств, обеспечивающих высокую степень автоматизации и воспроизводимости процессов. Благодаря этому комплекс является эффективным инструментом как для научных

исследований (проведение фундаментальных экспериментов по изучению закономерностей взаимодействия электромагнитного излучения с веществом и формирования остаточных напряжений при лазерной ударной обработке) и оптимизации технологических режимов, так и для мелкосерийной обработки деталей.

В **третьей главе** диссертации проведено комплексное исследование остаточных напряжений, генерируемых лазерной ударной обработкой в поверхностных слоях металлических сплавов, и влияния технологических параметров лазерной обработки на создаваемые остаточные напряжения, а также изучение микроструктуры и микротвердости титанового сплава ВТ6 после лазерной ударной обработки. На основании сравнения результатов применения методов сверления отверстий с данными послойного рентгеновского анализа выявлена оптимальная для неоднородно распределенных по глубине остаточных напряжений стандартизированная методика расчета ASTM E837 с кубическим распределением глубины измерений деформаций. Установлена оптимальная с точки зрения достижения максимального уровня сжимающих остаточных напряжений плотность мощности лазерного излучения (10–12 ГВт/см²) при лазерной ударной обработке титанового сплава, а также роль числа проходов обработки, перекрытия импульсов и различных поглощающих покрытий (алюминиевая фольга, черная краска и ПВХ-лента) на эффективность наведения остаточных напряжений. Методом EBSD-анализа не выявлено заметных микроструктурных изменений в титановом сплаве при лазерной ударной обработке, однако зафиксирован рост микротвердости в поверхностном слое при использовании всех типов поглощающих покрытий.

В **четвертой главе** диссертации рассмотрено влияние лазерной ударной обработки на усталостные свойства образцов титановых сплавов ВТ1-0, ОТ4-0 и ВТ6 с различными концентраторами напряжений (острым и круглым вырезами). После лазерной ударной обработки с правильно подобранными параметрами обработки и ориентацией тензора сжимающих остаточных напряжений достигнуто кратное увеличение усталостной долговечности образцов, а также показана возможность при сохранении усталостного ресурса в разы поднять допустимые рабочие нагрузки. Установлено, что для повышения усталостной долговечности наиболее эффективно размещение зоны лазерной ударной обработки непосредственно вокруг концентратора вне зависимости от его геометрии. Основным механизмом повышения усталостной долговечности после лазерной ударной обработки в исследованном диапазоне нагрузок и номенклатуры образцов определено увеличение периода зарождения усталостной трещины за счет созданных остаточных напряжений. Показано, что эффективность лазерной ударной обработки при наличии концентраторов напряжений определяется не столько уровнем прикладываемой энергии, сколько корректной пространственной локализацией зоны обработки. В программном комплексе ANSYS LS-Dyna, предназначенном для решения задач нестационарной

динамики, выполнено численное моделирование лазерной ударной обработки с различными зонами лазерного воздействия.

Научная новизна диссертационной работы

Можно выделить следующие важнейшие положения научной новизны работы.

Автором путем анализа и обобщения экспериментальных данных при определении оптимальных режимов лазерной ударной обработки экспериментально доказано, что формирование благоприятных сжимающих остаточных напряжений эффективно достигается при плотностях мощности более 3 ГВт/см^2 , приводящих к образованию и распространению упругопластической волны, однако увеличение плотности мощности свыше 12 ГВт/см^2 уже не оказывает дополнительного заметного влияния на уровень остаточных напряжений, генерируемых в поверхностных слоях титановых сплавов ВТ1-0, ОТ4-0 и ВТ6.

При реализации и верифицировании методики определения остаточных напряжений на основе сравнения методов сверления отверстия и рентгеновской дифракции для случая неоднородного по глубине до 1 мм распределения остаточных напряжений в металле установлено, что если напряжения не превышают 80% от предела текучести материала, их наиболее достоверное определение возможно с помощью методики анализа деформаций разгрузки с кубическим распределением шагов измерений.

Показано, что достигаемое в результате лазерной ударной обработки кратное увеличение усталостного ресурса образцов из титановых сплавов ОТ4-0, ВТ1-0 и ВТ6 с концентраторами напряжений обусловлено положительным влиянием сжимающих остаточных напряжений, формируемых в поверхностных слоях, преимущественно на стадию зарождения усталостной трещины. При этом важнейшими технологическими параметрами лазерной ударной обработки, определяющими усталостный ресурс образцов с концентраторами напряжений, являются материал защитного покрытия и место локальной обработки образца.

Практическая значимость результатов

С непосредственным участием автора в ИМСС УрО РАН разработан и собран программно-аппаратный комплекс, который уже зарекомендовал себя в качестве универсального эффективного инструмента по комплексному изучению процесса лазерной ударной обработки в широком диапазоне интенсивностей лазерного воздействия и других технологических параметров лазерной обработки, а также проведения обработки образцов с различными концентраторами напряжений и мелкосерийной обработки деталей сложной геометрии.

Для серии титановых сплавов (BT6, OT4-0, BT1-0) получена уникальная экспериментальная база профилей распределения остаточных напряжений, формируемых при лазерной ударной обработке в поверхностных слоях на глубине до 1 мм, позволяющая проводить дальнейшую верификацию математической модели процесса лазерной ударной обработки.

Выработаны методические рекомендации по выбору защитных покрытий и режимов лазерной ударной обработки, обеспечивающих кратное увеличение усталостной долговечности для образцов титановых сплавов с концентраторами напряжений.

Получено два патента на способы лазерной обработки заготовки из титанового сплава и тонкой кромки лопатки, выполненной из титанового сплава, компрессора газотурбинного двигателя, патент на способ определения остаточных напряжений и зарегистрирована программа для лазерной ударной проковки лопаток компрессора.

Достоверность результатов и обоснованность выводов

Достоверность полученных результатов, обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертационной работе, базируется на использовании современных взаимодополняющих методов исследования и поверенного метрологического оборудования, соблюдении методологии проведения эксперимента, применении статистической обработки данных и воспроизводимости результатов. Анализ диссертационного исследования позволяет сделать вывод, что заявленные соискателем положения научной новизны, выносимые на защиту, базируются на достаточном объёме экспериментальных и теоретических результатов, хорошо обоснованы, согласуются между собой и не противоречат известным научным представлениям и результатам исследований других авторов.

Основные положения и результаты работы опубликованы в 14 научных статьях, проиндексированных в международных системах цитирования или входящих в список журналов, рекомендованных ВАК. Получены три патента на способы и зарегистрирована одна программа для ЭВМ.

Диссертация и автореферат написаны понятным научным языком. Содержание диссертации достаточно ясно раскрывает постановку, методы исследования и результаты решения рассмотренных задач. Автореферат отражает содержание основных результатов и положений, представленных в диссертации.

Соответствие содержания диссертации указанной специальности

По объектам, целям, методам проведенных исследований и содержанию диссертация соответствует паспорту специальности 1.1.8 – Механика деформируемого

твердого тела в пунктах п. 3 (Задачи теории упругости, теории пластичности, теории вязкоупругости), п. 10 (Прочность при сложных режимах нагружения. Теория накопления повреждений. Механика разрушения твердых тел) и п. 13 (Экспериментальные методы исследования процессов деформирования, повреждения и разрушения, в том числе объектов, испытывающих фазовые структурные превращения при внешних воздействиях).

Замечания по работе

1. Формулировки положений 1 и 2 раздела «Научная новизна» носят заявительный характер («Реализован процесс..., Подобраны оптимальные режимы обработки..., Реализована и верифицирована методика...»), не раскрывая существо полученных научных результатов. Это затрудняет оценку их научной новизны. Полученные в работе новые научные результаты в содержательной форме приведены автором в разделе «Положения, выносимые на защиту».

2. В разделе 1.2.1 при обсуждении методов определения остаточных напряжений не рассмотрена методика многомасштабного картирования остаточных напряжений на основе микро-кольцевого ионного травления в двух-лучевом сканирующем ионно-электронном микроскопе, которая, по утверждению авторов (Корсунский А.М., Статник Е.С. и др.), позволяет изучать не только макронапряжения I рода, но и трудно определяемые остаточные напряжения II и III рода.

3. В работе встречаются отдельные «сомнительные» определения: на стр. 33 – «подземные измерения» применительно к послойным рентгеновским измерениям металлических сплавов; на стр. 43 – «роликовый шарик» («роликовый шар»), используемый при малопластическом выглаживании и глубокой холодной прокатке.

4. Сравнение результатов измерения остаточных напряжений после лазерной ударной обработки методами сверления отверстий и рентгеновской дифракции проведено на жаропрочном никелевом сплаве Инконель 718. Насколько обоснован перенос этих экспериментальных результатов на титановые сплавы, которые являлись основными объектами исследования в диссертации?

5. При описании рис. 3.3 не обсуждаются причины фиксируемого методом рентгеновской дифракции формирования высокого уровня растягивающих напряжений (600 МПа) на поверхности сплава Инконель 718 после лазерной ударной обработки. Отмечается, что метод сверления отверстий «уступает» рентгеновскому «в точности определения величины растягивающих напряжений на поверхности материала». Из этого можно заключить, что большее доверие вызывают результаты рентгеновского метода. Тогда не ускорят ли опасные остаточные напряжения на поверхности сплава после лазерной ударной обработки зарождение усталостных трещин, которые и возникают преимущественно именно на поверхности? Приводила ли лазерная ударная обработка к появлению растягивающих напряжений в тонких поверхностных слоях титановых

сплавов, для анализа напряженного состояния которых рентгеновский метод, по-видимому, не применялся? Не обсуждены причины значительного увеличения уровня сжимающих напряжений при удалении от обработанной лазером поверхности титановых сплавов на глубину 0,1-0,5 мм (рис. 3.17, 4.4б).

6. Сделанный в работе вывод об отсутствии структурных изменений в сплаве ВТ6 при лазерной ударной обработке основан только на результатах углубленного EBSD-анализа на сканирующем электронном микроскопе. Однако для образца с исходной глобулярной микроструктурой потемнение контраста связывается с накоплением дислокаций, хотя и отмечается ограниченная чувствительность EBSD-методики к таким процессам. При этом в работе не обсуждены причины наблюдаемого на рис. 3.10 упрочнения титанового сплава ВТ6 в результате лазерной ударной обработки. Для изучения влияния лазерной ударной обработки на тонкую дислокационную структуру, повышение плотности дислокаций можно рекомендовать применение методов рентгеноструктурного анализа и просвечивающей электронной микроскопии.

7. К сожалению, имеются отдельные недостатки в оформлении работы: на стр. 93 в обозначениях кривых на рис. 3.2; на стр. 110 при ссылке на рис. 3.16 ошибочно указана исходная микроструктура сплава; на стр. 114 титановый сплав ВТ6 назван титаном ВТ6; встречаются опечатки, пропуски слов, пунктуационные ошибки.

Отмеченные частные замечания не изменяют общей безусловно положительной оценки диссертационной работы и не снижают ее научной и практической значимости.

Заключение

Диссертационная работа Е.А. Гачеговой является законченной научно-квалификационной работой, выполненной соискателем на актуальную тему на высоком научно-методическом уровне. Представленное исследование характеризуется обоснованностью вынесенных на защиту научных положений, выводов и практических рекомендаций. По своим целям, задачам, содержанию, методам исследования диссертационная работа, заявленная на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, соответствует специальности 1.1.8 – Механика деформируемого твердого тела. В работе содержится решение важной задачи разработки научных и технологических основ применения передового метода лазерной ударной обработки для эффективного повышения усталостной долговечности металлических материалов за счет формирования в их поверхностных слоях благоприятных сжимающих остаточных напряжений.

Таким образом, по актуальности и объему выполненных исследований, новизне, достоверности, научной и практической значимости полученных результатов и выводов

диссертационная работа Е.А. Гачеговой «Влияние лазерно-индуцированных остаточных напряжений на усталостную долговечность титановых образцов с концентраторами напряжений» отвечает требованиям ВАК «Положения о присуждении ученых степеней» п.9, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, а ее автор Гачегова Елена Алексеевна заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.8 – Механика деформируемого твердого тела.

Официальный оппонент,

доктор технических наук, академик РАН, главный научный сотрудник лаборатории механических свойств Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук

Макаров Алексей Викторович
08.05.2026

Докторская диссертация защищена по специальности 05.16.01 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов

Адрес: 620108, г. Екатеринбург, ул. Софьи Ковалевской, д. 18, ИФМ УрО РАН
Телефон (343) 378-36-40 e-mail: avm@imp.uran.ru

Я, Макаров Алексей Викторович, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.



Подпись *Макарова А.В.*
заверяю
ученый секретарь ИФМ УрО РАН
И.Ю. Арапова
8 мая 2026 г.