



«УТВЕРЖДАЮ»

Заместитель директора по научной  
работе ИПСМ РАН,

доктор физико-математических наук

А.А. Назаров

«29» апреля 2026 г.

### ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем сверхпластичности металлов Российской академии наук (ИПСМ РАН) на диссертационную работу Гачеговой Елены 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

**Актуальность темы** диссертационного исследования. Работа посвящена изучению влияния лазерно-индуцированных остаточных напряжений на усталостную долговечность титановых сплавов с концентраторами напряжений, что является важной научной и прикладной задачей механики деформируемого твердого тела. В условиях эксплуатации авиационных конструкций усталостное разрушение является одной из основных причин разрушения конструкций, при этом значительная доля повреждений связана с концентраторами напряжений и ростом усталостных трещин. В связи с этим разработка методов управления остаточными напряжениями, способных повысить ресурс конструктивных элементов, представляет значительный интерес. Лазерная ударная обработка (ЛУО) рассматривается как один из наиболее перспективных методов формирования сжимающих остаточных напряжений глубоких, что обуславливает высокую актуальность выполненного исследования.

**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.

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы (169 наименований). Работа содержит 94 рисунков, 13 таблиц. Общий объём диссертации составляет 172 страниц.

**Во введении** обоснована актуальность темы исследования, показана степень ее разработанности, сформулированы цель и задачи работы, определены объект и предмет исследования, раскрыты научная новизна, теоретическая и практическая значимость,

приведены положения, выносимые на защиту, а также сведения о достоверности результатов и личном вкладе автора.

**В первой главе** представлен аналитический обзор литературы, посвященный механике усталостного разрушения, роли остаточных напряжений в повышении долговечности конструкций, а также современным методам их создания и определении. Особое внимание уделено лазерной ударной обработке, ее параметрам и физическим механизмам формирования остаточных напряжений. Проведен анализ современного состояния исследований и сформулированы нерешенные научные задачи.

**Во второй главе** подробно описан разработанный программно-аппаратный комплекс для реализации лазерной ударной обработки, включающий лазерную установку, оптическую систему, роботизированный манипулятор, систему определения остаточных напряжений и диагностическое оборудование. Показаны его функциональные возможности и особенности, обеспечивающие проведение исследований в широком диапазоне параметров обработки.

**В третьей главе** представлены результаты экспериментального исследования остаточных напряжений, формируемых при лазерной ударной обработке. Рассмотрены методы их определения (в том числе метод сверления отверстия и рентгеновская дифракция), выполнено сравнение различных подходов, а также изучено влияние параметров обработки и материала защитных покрытий на поле создаваемых остаточных напряжений и микроструктуру материала. На основе сравнения нескольких методик расчета остаточных напряжений с результатами измерений рентгеновской дифракцией выбрана оптимальная методика расчета. Показано, что при ЛУО сплава ВТ6 насыщение уровня остаточных напряжений происходит при интенсивности излучения  $10-12 \text{ ГВт/см}^2$ , и что это оптимальный уровень плотности мощности. Обосновано использование защитных покрытий из алюминиевой фольги и черной краски, которые формируют сжимающие остаточные напряжения наибольших уровня и глубины. Показано, что остаточные напряжения формируются без изменения микроструктуры сплава, за счет накопления дислокаций.

**В четвертой главе** исследовано влияние лазерной ударной обработки на усталостные свойства образцов с концентраторами напряжений. Приведены результаты усталостных испытаний для различных титановых сплавов, проанализировано влияние схем обработки и параметров ЛУО на долговечность, а также представлены результаты численного моделирования процесса. Показано, что наибольшее повышение усталостной долговечности образцов с концентраторами напряжений достигается, когда зона ЛУО находится непосредственно в зоне концентрации напряжений, то есть в области зарождения усталостной трещины. Доказано, что основным механизмом повышения усталостной долговечности путем ЛУО является увеличение длительности стадии зарождения за счет созданных остаточных напряжений сжатия.

**В заключении** сформулированы основные результаты и выводы диссертационного исследования, отражающие достижение поставленной цели, а также представлены рекомендации по практическому применению полученных результатов.

В целом структура работы является логически выверенной, содержание глав взаимосвязано, а изложение материала отличается последовательностью и обоснованностью.

Проведенный анализ содержания диссертации позволил сделать нижеследующие выводы.

**Научные положения, выводы и рекомендации**, представленные в диссертационной работе, являются обоснованными и достоверными. Это обеспечивается корректной постановкой цели и задач исследования, применением современных экспериментальных методов и использованием взаимодополняющих подходов к определению остаточных напряжений, включая метод сверления отверстия в соответствии со стандартом ASTM E837 и метод рентгеновской дифракции. Достоверность результатов подтверждается использованием современного оборудования, воспроизводимостью экспериментальных данных и согласованностью полученных результатов. Выводы логически следуют из проведенных исследований и подтверждаются представленными экспериментальными данными. В целом степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций следует оценить как высокую.

**Научная новизна работы** заключается в получении новых экспериментальных данных о закономерностях формирования остаточных напряжений при лазерной ударной обработке и их влиянии на усталостную долговечность титановых сплавов. В диссертации реализован программно-аппаратный комплекс, обеспечивающий проведение ЛУО в широком диапазоне плотностей мощности. Впервые для рассматриваемых материалов проведена комплексная верификация методики определения остаточных напряжений на глубинах до 1 мм с использованием сопоставления с методом рентгеновской дифракции. Установлены диапазоны плотности мощности лазерного излучения, при которых происходит эффективное формирование остаточных напряжений, а также показано, что превышение определенных значений не приводит к их существенному увеличению. Получены новые результаты о влиянии защитных покрытий и схем обработки на усталостную долговечность образцов с концентраторами напряжений.

**Практическая и теоретическая значимость работы** состоят в развитии представлений о механизмах формирования остаточных напряжений при лазерной ударной обработке и их влиянии на усталостное поведение материалов. Практическая ценность заключается в разработке рекомендаций по выбору параметров ЛУО для повышения усталостной долговечности элементов конструкций, а также в создании экспериментальной базы данных распределений остаточных напряжений, которая может быть использована для верификации численных моделей. Разработанный программно-аппаратный комплекс может применяться как в научных исследованиях, так и при решении прикладных задач обработки деталей сложной геометрии.

Публикации по теме диссертации отражают основные результаты выполненного исследования. По теме работы опубликовано 14 научных работ, включая статьи в рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК и ведущие международные базы данных, а также получены патенты и зарегистрирована программа для ЭВМ. Это

свидетельствует о достаточной апробации результатов и их научной значимости. Результаты диссертационного исследования были доложены на международных и всероссийских конференциях, а также на научных семинарах. Автореферат соответствует содержанию диссертации и позволяет составить достаточно полное представление о ней.

По содержанию диссертации имеются следующие замечания и пожелания.

1. Анализ литературы проведен достаточно полно, однако без должного критического анализа, что не позволило автору четче сформулировать актуальную научную проблему, решаемую в диссертационной работе в рамках специальности «Механика деформируемого твердого тела».

2. В методической части диссертации, на наш взгляд, недостаточно убедительно обоснован выбор именно титановых сплавов ВТ1-0, ОТ4-0 и ВТ6 для проведения исследований.

3. По нашему мнению, было бы важно в целом сформулировать и выделить главный научный результат, полученный в диссертационной работе, который, по нашему мнению, теряется среди остальных выводов.

4. В работе не рассмотрен третий компонент напряжений в направлении нормали к поверхности, который был бы интересен, например, для внедрения в континуальные модели для моделирования.

5. Из каких физических соображений были взяты толщины поглощающих слоев из алюминиевой фольги, черной алкидной краски черной поливинилхлоридной ленты? Есть ли зависимость исследуемых эффектов от толщины этих покрытий?

6. В работе методом сверления измеряются нормальные компоненты тензора напряжений в плоскости датчика. При этом, поскольку взаимная ориентация растягивающих напряжений, прикладываемых к образцу, плоскости предполагаемого зарождения усталостной трещины и наведённых лазерной обработкой сжимающих остаточных напряжений в окрестности концентратора определяет эффективность задержки образования трещины, оценивались ли ориентация главных осей напряжений, получаемых после ЛУО, для того, чтобы оценить и предсказать эффективность лазерной обработки?

7. По тексту диссертации встречаются некоторые неточности. Например, в подразделе 4.1.1, на рис. 4.2 введены обозначения 1 и 2 для двух способов обработки, а на рис. 4.5, где приведены результаты усталостных испытаний, этим состояниям соответствуют обозначения 2 и 3, соответственно, потому что 1 обозначено необработанное состояние.

Указанные замечания носят частный характер или являются пожеланиями и не снижают общей положительной оценки работы, которая выполнена на высоком научном уровне, содержит новые научные результаты. Тема и содержание диссертации соответствуют паспорту специальности 1.1.8 – «Механика деформируемого твердого тела». Диссертация Гачеговой Е.А. вносит существенный вклад в развитие механики деформируемого твердого тела в области повышения усталостных свойств конструкционных материалов. Диссертационная работа отвечает всем требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации

№ 824 от 24.09.2013 (с изменениями и дополнениями), предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а её автор, Гачегова Елена Алексеевна, заслуживает присуждения искомой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.8. – Механика деформируемого твердого тела

Диссертация и отзыв на нее были заслушаны и обсуждены на расширенном заседании отдела «Сверхпластическая обработка перспективных материалов» Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем сверхпластичности металлов Российской академии наук 29 апреля 2026 г. (протокол № 1 от 29.04.2026). Текст отзыва принят единогласно.

Отзыв составил:

Доктор технических наук,  
главный научный сотрудник отдела  
«Сверхпластическая обработка  
перспективных материалов»

Тел.: +7 (347) 282-38-54,

Email: lutfullin.ramil@imsp.ru

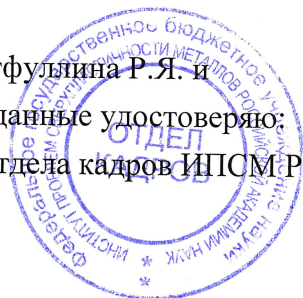


Лутфуллин Рамиль Яватович

29.04.2026

Докторская диссертация защищена по специальности  
05.02.01 – Материаловедение (машиностроение)

Подпись Лутфуллина Р.Я. и  
контактные данные удостоверяю:  
Начальник отдела кадров ИПСМ РАН



Т.П. Соседкина

29.04.2026 г.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем сверхпластичности металлов Российской академии наук, Россия, 450001, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. Степана Халтурина, 39, Тел. +7 (347) 223-64-07, email: imsp@imsp.ru