

Председателю диссертационного совета
Д 004.036.01 на базе Федерального
государственного бюджетного учреждения науки
Пермский Федеральный Исследовательский Центр
(филиал – Институт механики сплошных сред)
Уральского отделения Российской академии наук
академику РАН, доктору технических наук,
профессору В.П. Матвеевко
614018, г. Пермь, ул. Академика Королёва 1

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Гачеговой Елены Алексеевны
«Влияние лазерно-индуцированных остаточных напряжений на усталостную
долговечность титановых образцов с концентраторами напряжений»,
представленную по специальности 1.1.8 – Механика деформируемого
твёрдого тела, на соискание ученой степени кандидата физико-
математических наук

Актуальность темы.

Работа Гачеговой Е.А. посвящена решению важной научной задачи – установлению условий формирования в результате лазерной ударной обработки (ЛУО) сжимающих остаточных напряжений, благоприятных для повышения усталостной долговечности, и размерных характеристик полей этих напряжений. Целенаправленное формирование полей сжимающих остаточных напряжений традиционно рассматриваются как эффективный подход для повышения долговечности ответственных элементов инженерных систем, испытывающих в процессе эксплуатации циклические нагрузки, поскольку такие остаточные напряжения существенно замедляют процессы зарождения и роста усталостных трещин. ЛУО, вышедшая в 1990-2010 гг. в мировой практике на уровень промышленной технологии, сертифицированной для авиационной отрасли, относительно мало представлена и развита в Российской Федерации, и её применение для суверенного отечественного двигателестроения крайне нуждается в создании собственной научной, методической, метрологической, инструментальной и кадровой базы. Многие материаловедческие аспекты формирования остаточных напряжений в результате ЛУО неоднозначно представлены в литературе либо намеренно из коммерческих соображений оставляются без

должного освещения, что особенно остро ставит задачу (как автор обозначает в сформулированной цели диссертации) установления физических механизмов, лежащих в основе повышения усталостной долговечности металлических материалов при ЛУО.

Выбор объектов исследования - пластинчатых образцов из промышленных титановых сплавов из числа применяемых при производстве компрессоров современных турбинных авиадвигателей – также является актуальным. Однако наиболее актуальным, по моему мнению, является создание экспериментального комплекса для исследования ЛУО в широком диапазоне интенсивностей лазерного воздействия и верификация с его помощью стандарта ASTM E837-13, что позволяет подойти к созданию отечественного стандарта по определению остаточных напряжений методом сверления, не являющегося всего лишь прямым и некритическим переводом национального стандарта недружественной страны.

Поставленные цель и задачи, а также фактические результаты диссертации сформировали собою **научную новизну, а также теоретическую и практическую значимость** представленной к защите работы.

Обоснованность научных положений, выводов, рекомендаций и достоверность полученных результатов. Достоверность результатов исследования, обоснованность положений, выносимых на защиту, а также выводов по работе несомненна (и удостоверена многочисленными публикациями в уважаемых научных журналах мирового уровня репутации), и обеспечена рациональной постановкой цели и задач, последовательным характером проведения исследования, применением современных экспериментальных методов и не противоречит общефизическим принципам и ранее опубликованным данным.

Структура и содержание работы.

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка литературы из 170 источников. Основной текст диссертации содержит 172 страницы, представленный материал проиллюстрирован 94 рисунками и 13 таблицами.

Во **введении** традиционно показана актуальность диссертационной работы, уровень разработанности темы, цель и задачи, научная новизна, методология и методы исследования, положения, выносимые на защиту, достоверность результатов, личный вклад автора.

В **первой главе** кратко представлены основные положения теории механики разрушения (Гриффицс, Ирвин, Черепанов) и, в наибольшей степени, разрушения при многоциклового усталости (Пэрис, Терентьев). Далее с привлечением более 80 источников читатель вводится в основную проблематику контроля остаточных напряжений для повышения долговечности конструкций, и прежде всего с помощью ЛУО. Скрупулёзно

описаны методы целенаправленного создания сжимающих остаточных напряжений на поверхности сложных изделий и отдельно методы их систематического надежного определения. Более трети первой главы посвящены физическим механизмам, лежащим в основе ЛУО как технологии: формирование, нагрев и адиабатическое охлаждение плазмы, экранирование ограничивающим слоем, рассеяние тепла в защитных покрытиях. Раскрыто влияние факторов плотности мощности энергии лазера, размеров и формы лазерного пятна, распределения энергии в лазерном пятине, перекрытия лазерных пятен и количества проходов.

Поведенный обзор публикаций по проблематике технологии ЛУО выявил ряд неисследованных вопросов как в отношении физики формирования ударной волны, так и в отношении отклика материалов и геометрии изделий, при создании поля сжимающих остаточных напряжений. Это позволило автору сформулировать цели и задачи работы, которые направлены на разработку теоретического, инструментального и методического обеспечения контроля остаточных напряжений.

Во второй главе с некоторой детализацией описан разработанный и освоенный автором программно-аппаратный комплекс лазерной ударной обработки в Институте Механики сплошных сред УрО РАН в составе твердотельного лазера с набором фокусирующих линз, роботизированного комплекса позиционирования образцов и изделий относительно лазерного луча, автоматизированной системы для измерения остаточных напряжений методом сверления, фотонного доплеровского измерителя скорости объектов при прохождении ударной волны.

В третьей главе систематически изложены результаты решения автором принципиальных методических вопросов – сопоставление между собой интегрального, дифференциального и стандартизированного (ASTM E837-13) методов определения остаточных напряжений в глубине модифицированного ЛУО слоя при сверлении отверстий с одновременной тензометрической регистрацией деформации при релаксации остаточных напряжений, а также с широко распространенным и общепринятым неразрушающим рентгеновским методом $\sin^2\psi$. Утвердившись в принятии стандартизированного метода как основного, автор последовательно исследует вопросы влияния интенсивности лазерного воздействия, степени перекрытия лазерных пятен и количества проходов лазера на профиль сжимающих остаточных напряжений, создаваемых с помощью ЛУО, в подповерхностном слое образцов, т.е. на величину сжимающих остаточных напряжений и глубину, до которой распространяются такие напряжения. Важной частью этой главы являются разделы, посвященные теоретическому анализу и экспериментальному исследованию влияния материальной природы защитного слоя, а также вопросам эволюции микроструктуры титановых сплавов под действием ЛУО.

В четвертой главе исследуется взаимосвязь стратегии применения ЛУО, т.е. параметров интенсивности, применяемого защитного слоя, положения и размеров зон обработки ЛУО относительно вершин концентраторов, и результатов циклического нагружения образцов с целенаправленно введенными концентраторами. При изучении кинетики роста усталостной трещины было показано положительное влияние сформированных остаточных напряжений на усталостную долговечность для некоторых стратегий ЛУО – в целом достигается кратное увеличение числа циклов до разрушения при сравнении с необработанными образцами.

Замечания по диссертационной работе.

1. Текст диссертации Е.А. Гачеговой носит характер собрания изложений (с элементами углубленного анализа) собственных ранее опубликованных научных публикаций. Такой подход не вызывает критики, однако недостаточно проясненными остаются вопросы выбора объектов исследования, в частности, верификация метода из ASTM E837-13 осуществлена на никелевом сплаве IN718, а все остальные результаты получены на трёх титановых сплавах (BT1-0, OT4-0, BT6), причем пластины имели толщину 2, 3 и 4 мм. Было бы полезно представить данные о формировании остаточных напряжений в одном из титановых сплавов для разных толщин пластинчатых образцов. В главе 4 применяются различные средние усилия при циклическом нагружении – было бы полезно представить эти усилия через номинальные рабочие напряжения в сечении образца, в т.ч. в процентах от предела текучести.

2. Автором надежно установлено, что сжимающие остаточные напряжения распространяются на глубину до 0,9 – 1,0 мм. С учетом необходимости балансировать эти напряжения растягивающими напряжениями при толщине образца 2 - 4 мм, следует ожидать существенного коробления образцов, которое не изучалось или, по крайней мере, не было представлено в тексте и иллюстративных материалах.

3. Изучение (в т.ч. теоретическое) положительного влияния защитных слоёв было ограничено алюминиевой фольгой, поливиниловой лентой и черной алкидной краской, причём автором обсуждаются аспекты практического применения алюминиевой фольги и чёрной алкидной краски для ЛУО сложных по форме изделий. С учётом большого и положительного влияния защитных покрытий остаётся ощущение недостаточной полноты исследования этого фактора – а) других материалов покрытий; б) толщины покрытия; в) комбинирования покрытий.

4. В главе 4 на рисунках 4.19-4.23 б) представлена эволюция теплового потока при усталостном испытании – эти результаты далее никак не обсуждаются и не используются. На рисунке 4.25 представлена (как следует из подписи к рисунку) форма импульса давления при ЛУО, примененной к

сплаву ТС-4. Из текста складывается впечатление, что данные о форме импульса давления используются для расчётов остаточных напряжений по формуле 4.1. В то же время другие константы в этих расчётах приводятся для ВТ6. И, хотя сплав ТС-4 и ВТ6 являются аналогами, в тексте было бы полезно однозначно указать на допущение об их идентичности.

5. К сожалению, автором в Главе 1 были допущены обидные ошибки в записях формул 1.1, 1.8, 1.15, 1.16 и 1.18, а также ряд описок и неудачных словоупотреблений.

Оформление диссертации. Диссертация оформлена в соответствии с требованиями ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям (ГОСТ Р 7.0.11-2011). Материал диссертации изложен последовательно и логично, в традиционном научном стиле изложения. **Автореферат** диссертации соответствует её содержанию.

Публикации по работе. Результаты исследований полностью отражены в 15 публикациях автора, проиндексированных в отечественных и международных системах цитирования и входящих в список журналов, рекомендованных ВАК. По результатам работы получено три патента и одно свидетельство о регистрации программы для ЭВМ.

Соответствие паспорту специальности. Оппонируемая диссертация полностью соответствует паспорту научной специальности 1.1.8. – механика деформируемого твердого тела.

Заключение. Работа Е.А. Гачеговой производит впечатление рационально спланированной и методически успешно реализованной, что позволило получить в т.ч. новые результаты экспериментального, теоретического и прикладного плана. Сформулированные положения, выносимые на защиту, и выводы обладают научной новизной и свидетельствуют о достижении цели исследования.

Диссертация Е.А. Гачеговой направлена на создание научной методической, инструментальной и информационной основы для перевода лазерной ударной обработки для повышения усталостной долговечности авиационной техники на высокие уровни готовности технологии. Она, очевидно, имеет существенное значение для транспортного и общего машиностроения при разработке, проектировании, производстве и эксплуатации ответственных элементов конструкций, а также контроля их технического состояния. К важным практическим приложениям результатов работы Е.А. Гачеговой относятся доказательная оценка эффективности защитных покрытий при ЛУО и надежная практическая валидация стандарта ASTM E837-13 для определения остаточных напряжений.

Диссертация Е.А. Гачеговой является завершённой научно-квалификационной работой, выполненной на высоком научном уровне, и содержит новые научно обоснованные результаты, имеющие существенное практическое значение для развития страны. По совокупности использования

современного испытательного оборудования, научных подходов и полученных результатов, работа Е.А. Гачеговой заслуживает высокой оценки.

Диссертация «Влияние лазерно-индуцированных остаточных напряжений на усталостную долговечность титановых образцов с концентраторами напряжений» отвечает требованиям «Положения о присуждении учёных степеней» П. П.9. предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук, а её автор Е.А. Гачегова заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.8. – механика деформируемого твердого тела.

Салимон Алексей Игоревич,
Кандидат физико-математических наук,

Заведующий кафедрой физической химии
Федерального государственного автономного
образовательного учреждения высшего
образования «Национальный
исследовательский технологический
университет «МИСИС»

г.Москва, Ленинский проспект д. 4 стр. 1
+7(926)059-73-14
a.salimon@misis.ru

«05» мая 2026 г.

Подпись Салимона А.И. удостоверяю:

ПОДПИСЬ
Проректор по безоп
и общим вопросам
НИТУ МИСИС

