«Институт механики сплошных сред УрО РАН» – филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки пермского федерального исследовательского центра уральского отделения российской академии наук

На правах рукописи

ГАЧЕГОВА ЕЛЕНА АЛЕКСЕЕВНА

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

Специальность 1.1.8 – Механика деформируемого твердого тела

ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:
Доктор физико-математических наук,
член-корреспондент РАН
Плехов Олег Анатольевич

Пермь – 2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Современные конструкции самолетов проектируются таким образом, чтобы на протяжении всего срока службы летательного аппарата можно было избежать катастрофических разрушений из-за усталости, коррозии или случайных повреждений [1]. 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 [2]. Тем не менее, за последние 75 лет был зафиксирован ряд поломок авиационной техники, обусловленный конструктивно-производственными дефектами. Коррозия (16% случаев) и усталость (55% случаев) являются двумя наиболее частыми механизмами отказа, связанными с выходом из строя компонентов самолета [3]. Усталостные трещины, как правило, возникают в зонах концентрации напряжений, при наличии дефектов в материале или в местах, подверженных воздействию агрессивных сред. Особую опасность представляет латентное развитие таких трещин, которое может оставаться невыявленным в интервалах между регламентными работами, что приводит к ослаблению конструкции планера.

Примером, демонстрирующим подобный сценарий, является катастрофа с рейсом 101 авиакомпании Chalk’s Ocean Airways, произошедшая в 2005 году. Данные официального расследования свидетельствуют о том, что усталостные трещины в нижних обшивках крыла возникли в местах коррозии вокруг сливного отверстия топливного поддона и крепежного отверстия, примыкающего к заднему стрингеру. После разрушения нижней обшивки возникли усталостные трещины, которые распространились в различных местах заднего лонжерона, что привело к существенному снижению остаточной прочности конструкции. Трещины в лонжероне быстро достигли критической длины, при которой правое крыло отделилось от самолета [4].

С середины прошлого века авиационная промышленность, а вместе с ней и научное сообщество активно искали решение проблем, связанных с усталостным разрушением деталей аэрокосмической техники. Велась непрерывная работа по совершенствованию методологии прогнозирования эксплуатационных характеристик конструкций, методик их испытаний на усталостную долговечность и используемых авиационных материалов. Именно в этот период значительную актуальность приобрели исследования в области управления остаточными напряжениями, которые рассматривались в качестве одного из ключевых факторов повышения усталостной прочности. Понимания природы остаточных напряжений, а также разработка новых, более универсальных методов их генерации, обусловили усиление их роли на этапе проектирования. Параллельно они нашли применение в качестве эффективного корректирующего средства для повышения ресурса дорогостоящих и критически важных элементов конструкций.

В связи с этим, методы создания остаточных напряжений, наряду с комплексным анализом их влияния на эксплуатационные характеристики, требуют систематического и всестороннего исследования.

Известно, что остаточные напряжения играют решающую роль в скорости распространения усталостных трещин [5]. В настоящее время применяется несколько видов обработки поверхности для создания полезных остаточных напряжений, которые значительно улучшают эксплуатационные характеристики металлической конструкции. Все они сильно отличаются по степени сложности их реализации, а также конечному результату. На данный момент наиболее актуальной и перспективной обработкой является лазерная ударная обработка (ЛУО). ЛУО позволяет добиться глубоких и значительных сжимающих напряжений с точным контролем и повторяемостью результата, обеспечиваемыми лазерными технологиями [6-7].

Развитие лазерных технологий за последние 30 лет стимулировало рост числа коммерческих и научных поставщиков систем для ЛУО за рубежом. Многие из подобных систем основаны на использовании крупногабаритных лазерных установок высокой энергии, генерирующих импульсы с энергией в несколько джоулей. Помимо этого, в комплексы по реализации ЛУО, как правило, входят роботизированные манипуляторы, позволяющие осуществлять обработку деталей произвольной геометрии.

В отличие от зарубежных тенденций к разработке портативных установок для ЛУО, на отечественном рынке данная технология находится на начальной стадии развития. Это определяет актуальность задач по экспериментальному подтверждению ее эффективности, воспроизводимости и экономической целесообразности в России. Следовательно, приоритетной задачей для науки и промышленности является установление корреляции между параметрами ЛУО, формируемыми остаточными напряжениями и эксплуатационными характеристиками материалов. Данное исследование является основой для разработки прогностических моделей, надежных технологических систем и оптимизированных стратегий обработки.

Степень разработанности темы исследования. Проблемы повышения усталостной долговечности и исследования влияния остаточных напряжений на поведение усталостных трещин изучаются в рамках механики разрушения. Её основы были заложены еще в первой половине прошлого столетия в работах А.А. Гриффитса [8] и Дж. Ирвина [9], которые ввели такие понятия, как энергетический критерий разрушения, коэффициент интенсивности напряжений (КИН). Их теории позволили оценивать критическое состояние тел с трещинами под действием внешних приложенных нагрузок.

Особое место в развитии отечественной и мировой школы механики разрушения занимают работы советских и российских ученых. Так, В.В. Панасюк [10] разработал энергетические и силовые критерии трещиностойкости, определившие основы прогноза хрупкого и усталостного разрушения. М.В. Келдыш [11] внес фундаментальный вклад в прикладную механику и расчет динамической прочности авиационных и космических конструкций, что имело важнейшее значение для анализа процессов разрушения в экстремальных условиях эксплуатации. Е.М. Морозов [12] вне с значительный вклад в развитие теоретических основ механики разрушения, в частности – в формулировку энергетических критериев роста трещин в упруго-пластических телах, а также в разработку методов прикладной оценки прочности элементов конструкций с дефектами (трещинами, контактами). Р.П. Тимошенко [13], основоположник современной теории упругости и сопротивления материалов, заложил методологическую базу, которая широко используется при решении задач механики разрушения.

В отечественной научной школе сформировался широкий круг исследователей, внесших значительный вклад в развитие механики усталостного разрушения и изучение остаточных напряжений. В работах Г.П. Черепанова [14] предложен энергетический подход к описанию роста трещин, ставший основой для термодинамической теории разрушения и определения критерия трещиностойкости материалов. Работы Г.Р. Писаренко [15] и Р.Е. Михайлова [16] были посвящены вопросам прочности и прогнозированию трещиностойкости конструкций. Важный вклад в изучение процессов накопления повреждений и усталости внесли А.Н. Орлов, В. Л. Инденбом [17] и Л.А. Сосновский [18], исследовавшие закономерности развития трещин в условиях сложного напряженного состояния.

Значительную роль в развитии подходов к анализу остаточных напряжений сыграли представители школы физической мезомеханики – В.Е. Панин [19], исследовавший механизмы локализации пластических деформаций, и Ю.Н. Работнов [20], развивший теорию ползучести и долговечности материалов, а также модели накопления повреждений при длительном и циклическом нагружении. Исследования П.И. Кудрявцева [21] были направлены на разработку методов диагностики и контроля остаточных напряжений в конструкциях, содержащих сварные соединения, а работы Б.А. Колачева [22] посвящены влиянию остаточных напряжений на прочность и разрушение титановых и алюминиевых сплавов. В прикладной области следует отметить труды Г.И. Нестеренко [23], внесшего вклад в развитие методологии оценки усталостной долговечности авиационных конструкций, и M.A. Daeubler [24], изучавшего микроструктурные механизмы усталостного разрушения.

Современные исследования в области нелинейной динамики разрушения и моделирования эволюции остаточных напряжений активно развиваются в работах В.Ф. Терентьева [25], О.Б. Наймарка [26], Ю.Г. Матвиенко [27], В.Н. Шлянникова [28], которые предложили новые подходы к описанию процессов зарождения и роста усталостных трещин в металлических материалах.

Усталостное разрушение металлов, как одна из наиболее частых причин выхода из строя конструкций и деталей, активно исследовалось в работах многих отечественных и зарубежных ученых. J. Paris [29] сформулировал известный закон роста усталостной трещины (закон Пэриса), который стал основным инструментом прогнозирования долговечности в современной механике разрушения. J. Schijve [30] внес значительный вклад в разработку методов оценки усталостной долговечности элементов авиационных конструкций и исследовал влияние переменной амплитуды нагружения на рост трещин. В.Ф. Терентьев [25] сосредоточил внимание на усталостном разрушении титановых сплавов, выявив влияние их микроструктуры и остаточных напряжений на долговечность, что имеет большое значение для авиационных и энергетических приложений. А.А. Шанявский [31] разработал методы диагностики и прогнозирования усталостного ресурса авиационных конструкций, предложив *концепцию* допустимого повреждения (damage tolerance) применительно к летательным аппаратам. В.Н. Шлянников [28] исследовал закономерности роста трещин и механические характеристики материалов при циклическом нагружении, уделяя особое внимание проблеме трещиностойкости в условиях сложного напряженного состояния. В.Э. Вильдеман [32] занимался изучением кинетики усталостного разрушения и моделированием процессов накопления повреждений в металлических материалах.

Использование диаграмм Веллера, пороговых значений амплитуды КИН, а также статистических моделей позволило существенно продвинуть предсказание усталостного ресурса различных конструкций. Значительное внимание в задачах повышения ресурса конструкций уделяется управлению остаточными напряжениями, которые способны оказывать на него существенное как положительное, так и отрицательное влияние.

Формирование представлений о природе остаточных напряжений и разработка методов их контроля нашли отражение в трудах Н.Н. Давиденкова [33], который одним из первых в отечественной науке классифицировал остаточные напряжения и показал их роль в прочности конструкций. В работах П.В. Трусова развиты методы численного моделирования эволюции остаточных напряжений при пластическом деформировании. В последние десятилетия в работах А.М. Корсунского [35] исследованы методы диагностики напряженно-деформированного состояния материалов и влияние технологических факторов на распределение остаточных напряжений.

Зарубежные ученые также активно участвовали в развитии данной темы. Например, D.V. Nelson [36] исследовал влияние остаточных напряжений на рост усталостных трещин и разработал метод «Hologruphic-hole drilling» для измерения этих напряжений в подповерхностных слоях материала. Или же M.T. Hutchings [37], который внес значительный вклад в использовании метода нейтронной дифракции для измерения остаточных напряжений.

Одним из наиболее перспективных методов создания остаточных напряжений как на поверхности, так и в объеме материала является лазерная ударная обработка (ЛУО). Значительный вклад в развитие этого направления внесли как зарубежные, так и отечественные исследователи. A.H. Clauer [38] одним из первых продемонстрировал эффективность ЛУО для повышения усталостной долговечности алюминиевых и титановых сплавов, заложив основы промышленного применения метода. R. Fabbro [39] разработал физическую модель взаимодействия лазерного импульса с поверхностью материала и описал процессы образования ударных волн при ограниченной абляции. P. Peyre [40] систематизировал исследования влияния параметров лазерного импульса на глубину и характер распределения остаточных напряжений, а также изучал их влияние на зарождение и рост усталостных трещин. L. Berthe [41] подробно исследовал динамику распространения ударных волн в материалах и внес вклад в экспериментальные методы диагностики остаточных напряжений после ЛУО. P.S. Prevéy [42] сосредоточил внимание на изучении остаточных напряжений и разработке методов их контроля, показав роль ЛУО в увеличении коррозионной стойкости и сопротивления усталости. Y. Sano [43] стал одним из пионеров применения ЛУО без защитного покрытия (LSPwC), разработав технологии, использованные для предотвращения коррозионного растрескивания в атомной энергетике. J.T. Wang [44] и Y.K. Zhang [45] исследовали влияние параметров ЛУО на усталостное поведение авиационных деталей и предложили методы оптимизации процесса. В последние годы работы Q. Liu [46], J. Qin [47], P. Ballard [48] и X. Li [49] расширили понимание влияния частоты импульсов, формы лазерного пятна, защитных покрытий и схем наложения импульсов на формирование остаточных напряжений и повышение долговечности конструкций. Среди отечественных ученых стоит выделить Н. Кашаева [50], О.А. Плехова [51], которые исследовали применение ЛУО для сварных соединений и авиационных сплавов, а также продемонстрировал перспективы этой технологии для повышения долговечности элементов авиационных конструкций.

Таким образом, объединение подходов механики разрушения, анализа остаточных напряжений и применения современных методов поверхностного упрочнения, таких как ЛУО, представляет собой важное направление в обеспечении надежности металлических конструкций, особенно тех, которые подвержены воздействию циклических нагрузок, приводящих к усталостному разрушению.

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.

Задачи исследования:

1. Создание экспериментального программно-аппаратного комплекса для ЛУО деталей сложной геометрии в широком диапазоне плотностей энергии.
2. Экспериментальная проверка эффективности ЛУО при создании остаточных напряжений (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, с целью иллюстрации эффекта ЛОУ на усталостную долговечность.

Научная новизна диссертационной работы

1. Реализован процесс ЛУО образцов произвольной геометрии в диапазоне плотностей энергии от 3 до 90 ГВт/см^2. Предложены 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:

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

2. Сформулированы методические рекомендации применения ЛУО, обеспечивающие повышение усталостной долговечности металлических элементов конструкций с концентраторами напряжений.
3. Создана экспериментальная база данных профилей остаточных напряжений для дальнейшей верификации математической модели процесса ЛУО титановых сплавов ВТ6, ОТ4-0, ВТ1-0.
4. Подобраны защитные покрытия и режимы ЛУО, обеспечивающие кратное увеличение ресурса для образцов с концентраторами напряжений.

Методология и методы диссертационного исследования, принятые в работе, основаны 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/см^2 приводят к образованию и распространению упругопластической волны и генерации остаточных напряжений; плотности мощности свыше 12 ГВт/см^2 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 усталостную долговечность 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 автора 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 влияние 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 исследования, 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.

Работа в полном объеме обсуждалась на семинарах кафедры Математическое моделирование систем и процессов Пермского национального исследовательского политехнического университета, кафедры Экспериментальная механика и конструкционное материаловедение Пермского национального исследовательского политехнического университета, кафедры Кафедра материаловедения и технологии материалов Санкт-Петербургского государственного морского технического университета.

Публикации:

По теме диссертации опубликовано 14 работ, включая 4 статьи в журналах, рекомендованных ВАК России, 10 статей в зарубежных журналах перечня Scopus и Web of Science; получены 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ, 3 патента на изобретение.

ГЛАВА 1. МЕТОДЫ СОЗДАНИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

1.1. Механика усталости и разрушения

Механика разрушения основана на предположении, что все конструкционные материалы содержат внутри себя дефекты или трещины, которые являются потенциальными концентраторами напряжений и, как следствие, при приложении внешней нагрузки инициируют процесс разрушения. Серьезный вклад в развитие механики разрушения внесли в своих работах такие ученые, как Гриффитс, Пэрис, Ирвин, Афанасьев, Черепанов и др.

В 1920 году Гриффитс установил, что трещина может образовываться или расти только в том случае, если процесс приводит к уменьшению или сохранению постоянной общей энергии образца с трещиной. Энергетический баланс Гриффитса для постепенного увеличивающейся площади трещины dA описывается формулой 1.1:

$$\frac{dE}{dA} = \frac{d\Pi}{dA} + \frac{dW_S}{dA} = 0 \quad , \tag{1.1}$$

где E – общая энергия, П – потенциальная энергия, поставляемая внутренней энергией деформации и внешними силами, а W_S – энергия, необходимая для создания новых поверхностей. -dП/dA называется скоростью высвобождения энергии деформации (G). В работе [52] показывается, что G равен:

$$G = \frac{\pi\sigma^2 a}{E} \quad , \tag{1.2}$$

$$G = (1-\nu^2)\frac{\pi\sigma^2 a}{E} \quad , \tag{1.3}$$

G можно соотнести с коэффициентом интенсивности напряжений (КИН) с помощью уравнений 1.4 и 1.5:

$$K = \sqrt{GE} \quad , \tag{1.4}$$

$$K = \sqrt{\frac{GE}{1-\nu^2}} \quad . \tag{1.5}$$

Усталость – это прогрессирующее и локализованное повреждение, которое возникает, когда материал подвергается циклической нагрузке. Максимальное приложенное напряжение, вызывающее усталостное разрушение, может быть намного меньше предела прочности или даже предела текучести материала. Усталостное разрушение начинается в микроскопическом масштабе, проявляясь в микротрещинах или дефектах, которые постепенно растут под действием циклического напряжения до тех пор, пока не происходит полное разрушение. Подробно эти процессы описывались в фундаментальных трудах по механике разрушения, например, в монографии Терентьева В. Ф. и Кораблевой Р. А. «Усталость металлов» [53], где рассматриваются закономерности зарождения и роста усталостных трещин с учетом современных представлений металлофизики. В частности, подчеркивается, что развитие усталости связано не только с локальными концентрациями напряжений, но и с дислокационными процессами, приводящими к накоплению структурных повреждений в объеме материала.

Элемент или конструкция на протяжении всего срока службы обычно подвергаются циклическому напряжению с изменяющимися верхними и нижними пределами напряжения. Этот тип нагрузки обычно называют нагрузкой переменной амплитуды, однако для упрощения обычно принимают нагрузку постоянной амплитуды, обычно в форме синусоидальной волны, как показано на рисунке 1.1.

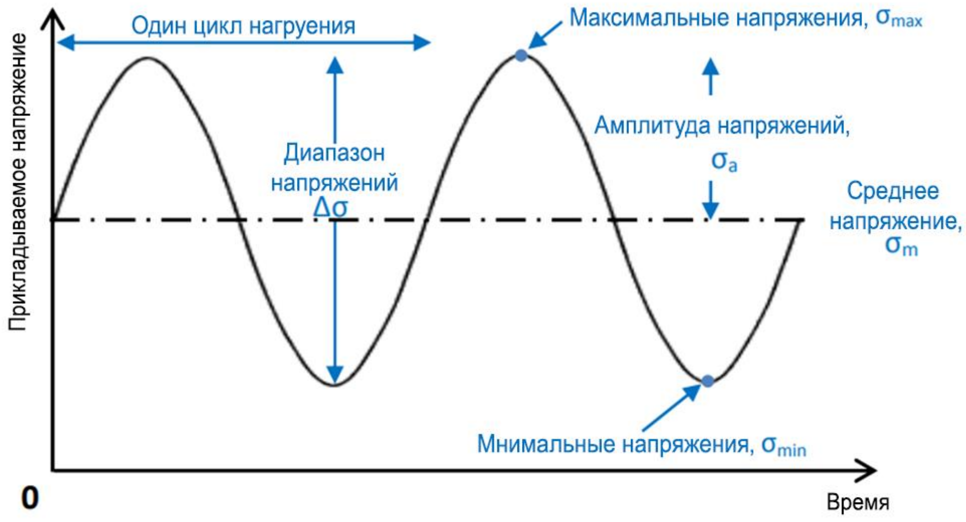


Рисунок 1.1 – Основные параметры цикла нагружения

Цикл характеризуется несколькими основными величинами: амплитудой (уравнение 1.6), средним напряжением (уравнение 1.7) и коэффициент асимметрии цикла (уравнение 1.8):

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{макс.} - \sigma_{мин.}}{2}, \tag{1.6}$$

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{макс.} + \sigma_{мин.}}{2}, \tag{1.7}$$

$$R = \frac{\sigma_{макс.}}{\sigma_{мин.}}\ . \tag{1.8}$$

Усталость металлов проявляет себя в возникновении микротрещин в местах концентрации напряжений, а именно на поверхности или в подповерхностном слое, в местах резкого изменения сечения или возле других концентраторов. Усталостный трещины появляются постепенно и распространяются с небольшой скоростью вглубь детали, пока ее сечение не уменьшится до критической величины, после чего наступает хрупкий долом изделия.

Сопротивление металлов усталостному разрушению характеризуется пределом выносливости. Им называют напряжение цикла, которое выдерживает металл без разрушения при любом количестве циклов. Предел выносливости определяют при испытаниях с определенной асимметрией цикла и обозначают σ_R. Его находят по диаграмме, впервые предложенной в работах Веллера, которую строят в координатах $\sigma - N$, где N – это количество циклов (рисунок 1.2). При определении предела выносливости ограничиваются 10^7 циклами (это количество циклов называют базой испытаний).

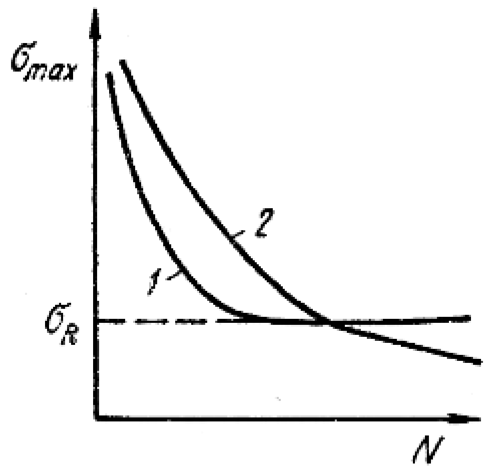


Рисунок 1.2 – Кривые выносливости: 1 – для сталей (физический предел выносливости), 2 – для цветных металлов [54]

По кривым усталости находят еще один важный критерий – долговечность при усталости. Под долговечностью понимают число циклов нагрузки, которое выдерживает материал без разрушения при определенном напряжении.

Процесс [55] усталостного разрушения начинается с пластической деформации поверхностных слоев детали. Перемещение дислокаций в условиях повторно-переменных нагрузок наблюдается даже при напряжениях ниже предела выносливости. Скорость локальных пластических деформаций при циклическом деформировании на несколько порядков выше скорости пластической деформации при статической нагрузке. С повышением числа циклов в поверхностных слоях возрастает плотность дислокаций и количество вакансий. При достижении базового количества циклов формируется поверхностный упрочненный слой металла с большим количеством зародышевых трещин размер которых не достиг критического. Дальнейший рост количества циклов не может вызывать дальнейшего развития разрушения в таком слое. И только когда напряжения превышают предел выносливости, трещины достигают критической длины, после чего начинается процесс их слияния в магистральную трещину и ее распространение.

Процесс роста усталостной трещины занимает лишь 5-10 % общего времени эксплуатации детали до окончательного разрушения. Все остальное время приходится на зарождение и постепенное подрастание трещин, многие из которых со временем прекращают свое развитие вследствие упрочнения металла в местах сконцентрированных напряжений возле вершины трещины. Дальнейшее развитие получают только те, которые имеют достаточно большую длины и острую вершину. Одна из них и приводит к окончательному разрушению.

Зона долома, как правило, имеет кристаллическую поверхность, характерную для хрупкого разрушения при статических испытаниях.

1.1.1. Стадии усталостного разрушения

Исследования 20-го века показали, что усталостная трещина начинает расти как невидимая микротрещина в полосе скольжения. Позднее было выявлено, что зарождение таких микротрещин начинается уже на ранних этапах циклического нагружения. Настолько ранних, что начаться этот процесс может почти сразу после приложения циклических нагрузок, которые превышают предел выносливости. Несмотря на столь раннее появление, микротрещина остается невидимой значительную часть усталостного деформирования образца.

После зарождения трещины, рост трещины может оставаться слабым и неустойчивым из-за эффектов микроструктуры, например, границ зерен и др. Однако, после некоторого роста микротрещин вдали от места зарождения можно наблюдать более регулярный рост. Различные стадии усталостного разрушения показаны на рисунке 1.3. Стоит отметить, что разрушение образца при усталостном деформировании включает в себя две основных стадии: период зарождения трещины и период роста трещины. Крайне важно различать эти два периода, поскольку некоторые поверхностные факторы оказывают сильное влияние на процесс зарождения, но, в то же время, не оказывают значительного воздействия на рост трещины. Одним из таких факторов является шероховатость поверхности. Агрессивные среды могу влиять как на период зарождения трещины, так и на период роста трещины, но различными способами.

Рисунок 1.3 – Стадии усталостного разрушения [30]

Зарождение трещины

Процесс зарождения трещины и ее рост является следствием циклического скольжения в полосах скольжения. Следовательно, циклическая пластическая деформация является результатом движения дислокаций. Как уже упоминалось ранее, усталость возникает при амплитуде напряжений, которая меньше предела текучести материала. На столь низком уровне напряжений пластическая деформация ограничена небольшим количеством зерен. Пластическая деформация намного легче возникает в зернах на поверхности материала, потому что в таком случае материал окружает ее только с одной стороны. Пластическая деформация в поверхностных зернах ограничена гораздо меньше, чем в приповерхностных слоях, а значит такая деформация может произойти при более низком уровне напряжений.

Циклическое скольжение требует циклического напряжения сдвига. На микромасштабе оно не имеет однородного распределения. В кристаллографических областях оно отличается от зерна к зерну в зависимости от их размеров и форм, ориентации и упругой анизотропии материала. В некоторых зернах на поверхности материала эти факторы более благоприятны для циклического скольжения, в других нет. Если это скольжение произойдет на поверхностном зерне, шаг скольжения будет создан на поверхности материала.

Поверхность материала подвергается воздействие окружающей среды и будет покрыта оксидным слоем в большинстве окружающих сред. Скольжение во время увеличения нагрузки также подразумевает деформационное упрочнение в полосе скольжения. Следовательно, после разгрузки большее напряжение сдвига будет присутствовать на той же полосе, только в противоположном направлении. Что сделает обратное скольжение более предпочтительным. В итоге полное обратимое скольжение невозможно из-за сложности удаления оксидного слоя и деформационного упрочнения. Обратное же скольжение, происходящее в той же полосе скольжения, происходит в параллельной плоскости скольжения. Такая же последовательность наблюдается и в последующих циклах. После нескольких циклов можно наблюдаться формирование постоянных полос скольжения. Эти полосы являются местами, где может образоваться трещина.

На рисунке 1.4 показано, как циклическое скольжение приводит к зарождению трещины.

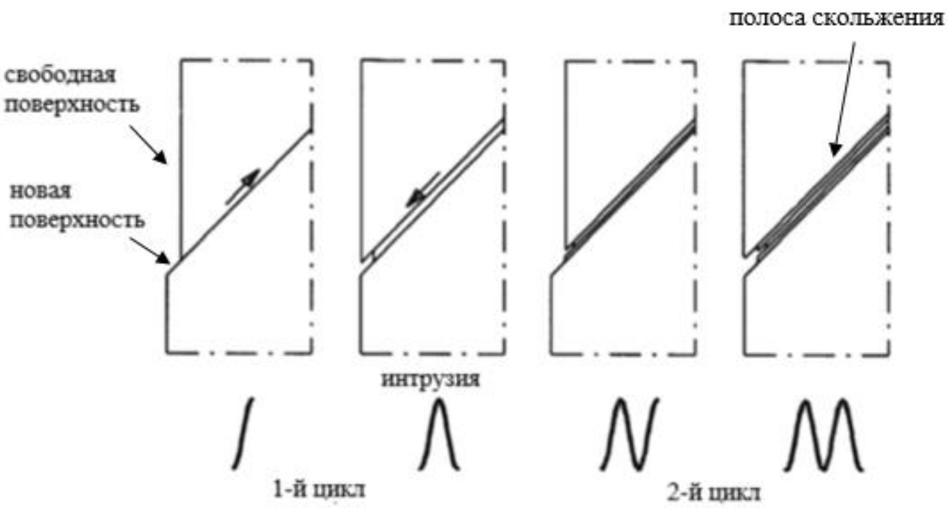


Рисунок 1.4 – Циклическое скольжение и зарождение трещины [30]

Низкие ограничения на циклическое скольжение на поверхности материала является фактором, который способствует зарождению трещины на свободной поверхности. На практике это связано с концентрацией напряжений вблизи отверстий и других геометрических неоднородностей. Еще одним фактором, способствующим зарождению трещин, является шероховатость поверхности материала. В итоге можно сказать, что в периоде зарождения трещины усталость является поверхностным явлением.

Рост трещины

Предполагается, что период зарождения завершается, когда рост микротрещины больше не зависит от состояния поверхности материала. Это означает, что период роста трещины начинается, если сопротивление трещинообразованию материала контролирует скорость роста трещины. Размер микротрещины при переходе от периода зарождения к периоду роста трещины может существенно отличаться для различных типов материалов. Переход зависит от микроструктурных барьеров, которые должна преодолеть растущая микротрещина, и эти барьеры отличаются от материала к материалу.

Период зарождения трещины включает в себя начальный рост микротрещины. Поскольку скорость ее роста еще невелика, период зарождения может охватывать значительную часть усталостного ресурса. Это иллюстрирует обобщенная картина кривых роста трещин, представленная на рисунок 1.5, где схематично показано развитие трещины в зависимости от процента израсходованного усталостного ресурса (= n/N), где n - число циклов усталости, а N - усталостная долговечность до разрушения. Полное разрушение соответствует n/N = 1 = 100%.

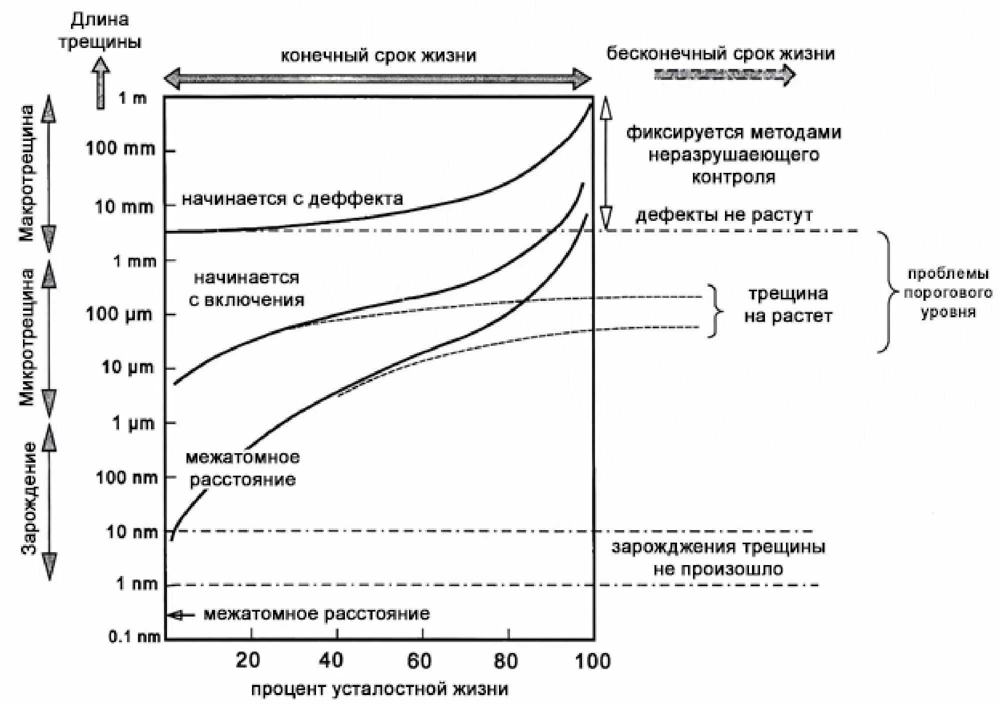


Рисунок 1.5 – Схематическое поведение роста усталостной трещины в зависимости от размера дефекта [30]

На рисунке 1.5 представлены три различные зависимости. Во всех случаях трещина зарождается в самом начале процесса усталостного деформирования, однако с разными значениями начальной длины трещины. Нижняя кривая соответствует зарождению микротрещины на «идеальной» поверхности материала. Средняя кривая представляет собой зарождение трещины от включения, которое кратко обсуждается далее. Верхняя кривая связана с возникновением трещины из-за дефекта материала, который не должен был присутствовать, например, дефекта в сварном соединении. Из этого рисунка можно сделать следующие выводы:

1. Микротрещины, зарождающиеся на идеальной свободной поверхности, могут иметь субмикронную длину. Однако трещины, зародившиеся на включении, будут начинаться с размера, аналогичного размеру включения. Размер может быть в субмиллиметровом диапазоне. Только трещины, начинающиеся от макродефектов, могут сразу иметь заметную длину.

2. Две нижние кривые роста трещин иллюстрируют, что большая часть усталостного ресурса проходит при размере трещины менее 1 мм, то есть при практически невидимом размере трещины.

3. Пунктирные линии на рисунке 1.5 указывают на возможность того, что трещины не всегда растут до разрушения. Это означает, что в материале должны быть барьеры, которые останавливают рост трещин.

1.2. Остаточные напряжения и их влияние на усталостные свойства конструкций

Остаточные напряжения (ОН) – это напряжения, которые существуют и уравновешиваются внутри тела после устранения воздействий, вызвавших их появление [56]. Из-за отсутствия внешней нагрузки их еще иногда называют внутренними.

Эти напряжения могут иметь величины, сравнимые с пределом текучести материала. ОН могут быть напряжениями растяжения и сжатия. Роль остаточных напряжений в контексте усталостного разрушения крайне важна. Нежелательные растягивающие остаточные напряжения могут негативно сказаться на сопротивлении усталости, в то время как сжимающие ОН могут значительно повысить усталостную долговечность [57].

Исторически термин «остаточное напряжение» связан с тем, что распределение этих напряжений в материале часто остается как следствие неоднородной пластической деформации. Остаточные растягивающие и сжимающие напряжения всегда возникают вместе. Возможное распределение остаточных напряжений показано на рисунке 1.6.

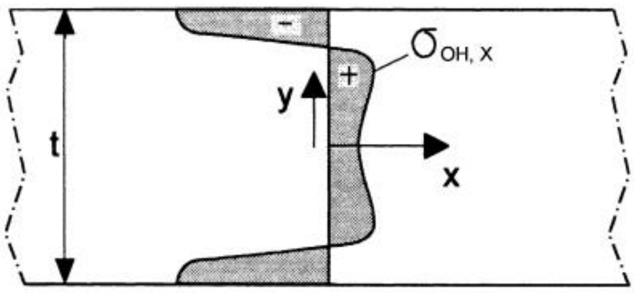


Рисунок 1.6 – Распределение остаточных напряжений

В условиях отсутствия внешней нагрузки, растягивающие ОН должны быть уравновешены ОН сжатия. Точнее, ввиду отсутствия внешней нагрузки распределение остаточных напряжений должно удовлетворять уравнению равновесия:

$$\int_{-t/2}^{t/2} \sigma_x dy = 0. \tag{1.9}$$

Аналогично, при отсутствии внешнего момента, должно выполняться следующее уравнение:

$$\int_{-t/2}^{t/2} y\sigma_x dy = 0. \tag{1.10}$$

Внешняя нагрузка, приложенная к элементу конструкции, создает распределение напряжений, зависящее от величины нагрузки и геометрии тела. Если поведение материала остается упругим, то напряженно деформированное состояние элемента конструкции будет складываться из внешней нагрузки и остаточных напряжений.

Когда к образцу прикладывается циклическая нагрузка, внешнее напряжение ($\sigma_{вн.нагр.}$) создает в нем циклическое напряжение с определенной амплитудой ($\sigma_а$) и средним значением ($\sigma_{ср.}$). Однако в материале всегда присутствует остаточное напряжение ($\sigma_{он}$). Оно не влияет на амплитуду напряжения, но изменяет среднее напряжение:

$$\sigma = \sigma_{вн.нагр.} + \sigma_{OH} \quad . \tag{1.11}$$

Если локальное остаточное напряжение имеет положительное значение, оно способствует увеличению среднего напряжения ($\sigma_{ср.}$), что негативно сказывается на усталостной долговечности. В случае отрицательного остаточного напряжения, наоборот, $\sigma_{ср.}$ уменьшается, что положительно сказывается на усталостных свойствах.

$$\sigma_a = \sigma_{a,вн.нагр.} \quad , \tag{1.12}$$

$$\sigma = \sigma_{ср.,вн.нагр.} + \sigma_{OH} \quad . \tag{1.13}$$

Остаточные напряжения могут быть довольно большими по величине. Из-за высоких сжимающих ОН $\sigma_{макс.}$ может быть низким или даже отрицательным. В последнем случае рост микротрещин маловероятен.

Поскольку остаточные напряжения не влияют на амплитуду напряжений, циклическое скольжение на поверхности материала все еще возможно, а также может происходить зарождение микротрещин. Однако если такие микротрещины не раскрываются при $\sigma_{макс.}$, их рост не происходит. Если $\sigma_{макс.}$, учитывая сжимающие ОН, положительно, то рост микротрещин возможен, но скорость их роста снижается из-за меньшего значения $\sigma_{макс.}$.

Стоит отметить, что ОН имеют последствия не только для усталости. Известно, что растягивающие остаточные напряжения могут быть особенно вредными, если материал чувствителен к коррозии под напряжением. Помимо этого, механическая обработка материала, внутри которого имеются поля ОН, может привести к короблению. Например, если поверхностный слой удален с одной стороны пластины, показанной на рисунке 1.6, распределение остаточных напряжений больше не удовлетворяет уравнениям равновесия 1.10 и 1.11, если образец не деформировался. Следовательно, в таком случае должно произойти коробление (а именно – изгиб пластины), которое изменит распределение остаточных напряжений так, чтоб система вновь стала равновесной.

Остаточные напряжения классифицируют по их масштабу на напряжения I, II и III рода. Такая классификация была впервые сформулирована Н.Н. Давиденковым [58].

1.Остаточные напряжения первого рода (макронапряжения. Действуют в масштабах всего изделия или крупных его частей (от мм до м). Могут возникать из-за неравномерного охлаждения (термообработка, сварка), механической обработки (шлифовка, штамповка, гибка) или различия в коэффициентах теплового расширения (КТР) в случае композиционных материалов. Такие напряжения влияют на прочность конструкций, их усталостные свойства и коррозионную стойкость. Могут быть измерены методом рентгеновской дифракции, сверлением отверстий, ультразвуковой дифракцией и др.

2.Остаточные напряжения второго рода (микронапряжения). Возникают в пределах одного зерна или между различными фазами материала (от 1-100 мкм). Причинами их появления могут служить разориентация зерен, различие в КТР или модулях упругости между фазами, осаждение включений или карбидов. Оказывают влияние на предел текучести, поведение усталостных трещин и эффект Баушингера[1]. Измеряются рентгеновской дифракцией с высоким разрешением, нейтронографией и электронной микроскопией.

3.Остаточные напряжения третьего рода. (субмикроскопические напряжения). Действуют на атомарном уровне (1-100 нм). Появляются вследствие точечных дефектов, дислокаций, старения и упрочнения материала. Такие напряжения оказывают влияние на диффузию, ползучесть и наклеп. Могут померены при помощи таких методов, как рентгеновская спектроскопия, просвечивающая электронная микроскопия, Мессбауэровская спектроскопия и атомно-зондовая томография.

Стоит отметить, что остаточные напряжения, рассматриваемые в данной работы, действуют на макроуровне. Подробнее о причинах их появления и методах измерения таких напряжений будет рассказано в следующих разделах главы.

1.2.1. Методы определения остаточных напряжений

Методы измерения остаточных напряжений с некоторой долей условности можно разделить на две основные группы: физические и механические [59].

Среди группы физических методов наибольшее распространение получил рентгеновский метод. Тогда как оптический, магнитный, ультразвуковой, физико-химический и методы, основанные на измерении твердости до настоящего времени не получили достаточно широкого применения.

Что касается механических методов измерения ОН, то они могут быть разделены еще на три основные подгруппы: расчетные, экспериментальные неразрушающие и экспериментальные разрушающие.

К первым относятся методы, в которых на основе данных о механических свойствах материала, форме и размерах исследуемой детали, а также изменении условий внешней среды (температура, действующие на деталь силы и т.д.) теоретически рассчитываются остаточные напряжения. Зачастую такие методы не позволяют достаточно точно определить ОН при сложных неизотермических процессах.

К экспериментальным неразрушающим методам относятся такие методы, в которых на основе изменений размеров деталей в результате воздействия наведенных ОН определяется их величина. В ходе таких измерений деталь не разрушается, следовательно, она остается пригодной к эксплуатации.

К экспериментально разрушаемым методам относятся те методы, в ходе которых ОН определяются по деформациям, возникающим в результате рассечения детали. Эта подгруппа считается наиболее важной и подразделяется на методы частичного и полного разрушения изделия. К первым относятся такие известные методики как метод сверления отверстия, метод сечений, метод столбика и др. Ко второй группе относятся метод изгиба до разрушения, метод ударного разрушения, метод кручения до разрушения и прочие.

Далее будут описаны наиболее распространенные методы определения ОН.

Метод рентгеновской дифракции

Измерение остаточного напряжения путем дифракции зависит от соотношения между длиной волны излучения, расстоянием между выбранными плоскостями решетки в кристаллическом материале и углом, под которым излучение когерентно и упруго рассеивается правильно ориентированными плоскостями кристаллической решетки. Эту зависимость можно выразить законом Брэгга (уравнение 1.14) [60]:

$$n\lambda = 2d\sin\theta \quad , \tag{1.14}$$

где n — целое число, λ — длина падающей волны, d — расстояние между плоскостями кристаллической решетки, а θ — угол между падающим лучом и плоскостями рассеяния (рисунок 1.8).

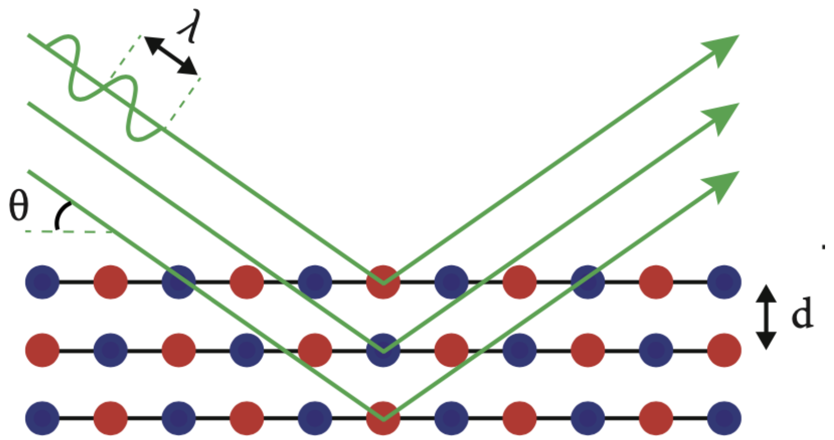


Рисунок 1.8 – Дифракция в кристаллическом материале

Напряжения, присутствующие внутри материала, создают деформации и, следовательно, изменения межплоскостного расстояния d. При небольшом изменении d угол θ, заданный законом Брэгга, претерпит определенное изменение:

$$\frac{\Delta d}{d} = -\cos\theta\Delta\theta \quad . \tag{1.15}$$

Остаточное напряжение, определенное с помощью дифракции рентгеновских лучей, представляет собой среднее арифметическое напряжение в объеме материала, определяемое площадью облучения, которая может варьироваться от квадратных сантиметров до величины менее квадратного миллиметра, и глубиной проникновения рентгеновского луча. Коэффициент линейного поглощения материала используемого излучения определяет глубину проникновения. В методах, обычно используемых для сплавов железа, никеля и алюминия, 50% излучения дифрагируется от слоя глубиной менее 5 мкм.

Поскольку проникновение рентгеновских лучей очень неглубоко (<10 мкм), предполагается, что в дифрагирующем поверхностном слое существует состояние плоского напряжения. Распределение напряжений тогда описывается главными напряжениями σ_1 и σ_2 в плоскости поверхности, при этом напряжения не действуют перпендикулярно свободной поверхности, как показано на рисунке 1.9. Нормальная составляющая σ_3 и касательные напряжения $\sigma_{13} = \sigma_{31}$ и $\sigma_{23} = \sigma_{32}$, действующие вне плоскости поверхности образца, равны нулю. Компонент деформации, перпендикулярный поверхности, существует в результате сокращений коэффициента Пуассона, вызванных двумя главными напряжениями.

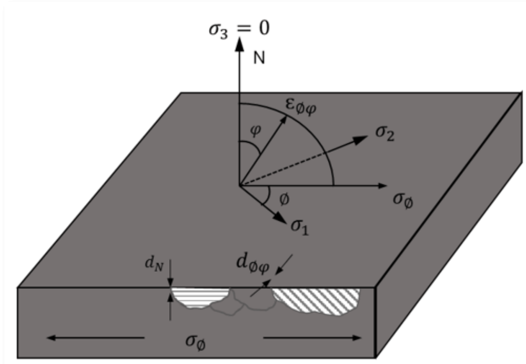


Рисунок 1.9 – Плоское напряженное состояние на измеряемой поверхности

Тогда деформация поверхности образца под углом φ к главному напряжению σ_1 определяется выражением:

$$\sigma_{\varphi\psi} = \left(\frac{\nu}{E}\right)\sigma_\varphi \sin^2\psi - \left(\frac{\nu}{E}\right)(\sigma_1 + \sigma_2) \quad . \tag{1.16}$$

Уравнение 1.16 связывает поверхностное напряжение σ_φ в любом направлении, определяемом углом φ, с деформацией φψ в направлении (φ, ψ) и главными напряжениями на поверхности. Если dφψ — расстояние между плоскостями решетки, измеренное в направлении, определяемом φ и ψ, деформацию можно выразить через изменения расстояния между кристаллической решеткой:

$$\sigma_3 = 0 \quad , \tag{1.17}$$

$$\sigma_{\varphi\psi} = \frac{\Delta d}{d_0} = \frac{d_{\varphi\psi} - d_0}{d_0} \quad , \tag{1.18}$$

где d0 – период решетки без напряжений. Подставляя в уравнение 1.16 и решая dφψ:

$$d_{\varphi\psi} = \left[\left(\frac{1+\nu}{E}\right)_{hkl} \sigma_\varphi d0\right]\sin^2\psi - \left(\frac{\nu}{E}\right)_{hkl} d_0(\sigma_1 + \sigma_2) + d_0 \quad , \tag{1.19}$$

где соответствующие упругие константы $(1 + \nu/E)_{hkl}$ и $(\nu/E)_{hkl}$ теперь находятся в кристаллографическом направлении, нормальном к плоскостям решетки (hkl), в которых измеряется деформация. Уравнение 16 дает связь между шагом решетки и двухосными напряжениями на поверхности образца. Шаг решетки $d\varphi\psi$ является линейной функцией $\sin^2\psi$.

Источники ошибок первостепенной важности в инженерных приложениях можно разделить на три категории: ошибки, зависящие от выборки, аналитические ошибки и инструментальные ошибки.

Ошибки, зависящие от образца, могут возникать из-за слишком крупного размера зерна, сильной текстуры или взаимодействия геометрии образца с рентгеновским лучом. Градиенты как поверхностного, так и подповерхностного напряжения часто встречаются при механической обработке и шлифовании и могут вызывать ошибки до 500 МПа, даже изменяя знак поверхностного напряжения. Поправки на проникновение рентгеновского луча в градиент подповерхностных напряжений можно внести с помощью электрополировки для удаления слоев с мелким шагом порядка 5-10 мкм. Электрополировка для подземных измерений приведет к релаксации напряжений в открытых слоях. Если напряжения в удаленных слоях велики, а жесткость образца мала, то релаксация может составлять порядка сотен МПа.

Аналитические ошибки могут возникнуть из-за правильности предполагаемой модели напряжения, использования неточных упругих констант или метода определения местоположения дифракционного пика.

Инструментальные погрешности возникают из-за несоосности дифракционного аппарата или смещения образца. Смещение образца от центра гониометра является основной инструментальной погрешностью.

Нейтронная дифракция

Существенными преимуществами нейтронографии перед другими методами являются большая глубина проникновения в конструкционные материалы и угол рассеяния, близкий к 90°. Последнее свойство позволяет собирать данные о деформации по существу из одного и того же объема пробы в трех перпендикулярных направлениях образца. Ограничениями метода нейтронной дифракции являются низкий поток частиц по сравнению, например, с методом синхротронного рентгеновского излучения, а также тот факт, что расходимость пучка обычно не позволяет очень точно определить измерительный объем [61]. Если требуется высокое разрешение или если образец толстый, накопление данных занимает много времени.

Метод сверления отверстий

Метод сверления отверстий, описанный в стандарте ASTM E837 [62], считается полуразрушающим методом измерения остаточных напряжений. Его выполняют путем создания отверстия в центре розетки тензорезистора, соединенного с испытуемым образцом. Измерения проводят на различной глубине, фиксируя значения деформации по толщине образца. Измеряются локальные изменения деформации из-за появления отверстия, и на основе этих измерений рассчитываются ослабленные остаточные напряжения (рисунок 1.10). Метод сверления отверстий обычно считается полуразрушающим, поскольку просверленное отверстие не может заметно нарушить структурную целостность испытуемой детали. В зависимости от типа используемого калибра-розетки просверленное отверстие обычно имеет диаметр 2 или 4 мм. Во многих случаях при необходимости отверстие также можно заткнуть, чтобы вернуть деталь в эксплуатацию после измерения остаточных напряжений.

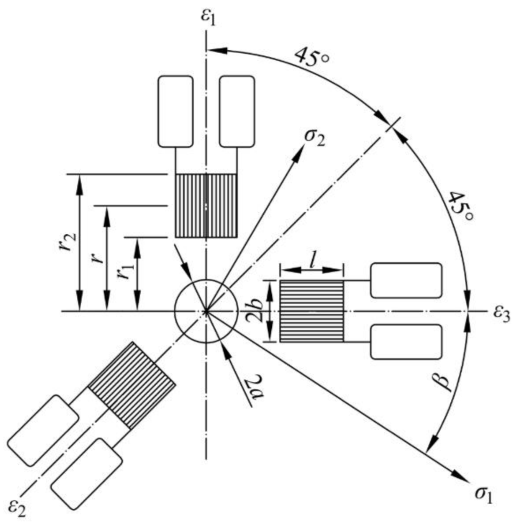


Рисунок 1.10 - Устройство тензодатчика для метода сверления отверстий [63]

На основе уравнения Кирша [64] взаимосвязь между высвободившейся деформацией и остаточными напряжениями следующая:

$$\begin{cases} \sigma_{1.2} = \dfrac{\varepsilon_1 + \varepsilon_3}{4A} \mp \dfrac{\sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_3)^2 + (2\varepsilon_2 - \varepsilon_1 - \varepsilon_3)^2}}{4B} \\ \tan 2\beta = \dfrac{2\varepsilon_2 - \varepsilon_1 - \varepsilon_3}{\varepsilon_1 - \varepsilon_3} \end{cases}, \tag{1.20}$$

где ε_1, ε_2 и ε_3 – деформации в соответствующем направлении, измеренные розеткой деформаций; σ_1 и σ_2 — главные напряжения; A и B – константы, которые определяются свойствами материала, диаметром отверстия и размером розетки деформации; β – угол направления главного напряжения.

Методика подходит только в тех случаях, когда:

- Материал изотропен и демонстрирует линейное поведение напряжения-деформации.
- Напряжения существенно не меняются с глубиной. Если напряжения меняются в зависимости от глубины, измеренное снятие напряжений представляет собой среднее между напряжением вверху и внизу просверленного отверстия. В таких случаях можно использовать различные

методы для уменьшения возникающей ошибки с помощью математических методов (интегральный метод, метод степенных рядов, сплайн-метод).

- Измеренные напряжения составляют не более 80% предела текучести материала. Если релаксация напряжений вокруг просверленного отверстия превышает предел текучести материала, возникнет ошибка из-за пластичности, поскольку уравнения, используемые в методе сверления отверстия, предполагают только линейно-упругое поведение материала. Существуют различные методы, помогающие преодолеть эту проблему пластичности, например, использование поправочных коэффициентов, которые учитывают эффекты пластичности.

- Напряжения действуют параллельно измеряемой поверхности, поскольку используемая теория упругости предполагает двумерную картину напряжений.

- При введении отверстия не возникает никаких напряжений, а отверстие просверлено в концентрическом центре розетки тензорезистора. Если центровка не проведена, остаточные напряжения могут быть рассчитаны с точностью до 3% от фактического значения. Расположение отверстия ближе к одной из розеток, приведет к переоценке напряжения в этом направлении. В случаях, когда эксцентриситет все же имеет место, получаются ошибки в пределах 20–30 % [65].

К недостаткам метода сверления отверстий можно отнести:

- Умеренная чувствительность тензодатчика, которая меньше, чем, например, у метода рентгеновской дифракции.

- Ограниченная глубина измерений (1-2 мм).

- Сложное определение внутренних напряжений в ситуациях, когда напряжения неравномерны по глубине отверстия и приближаются к пределу текучести материала.

Метод кольцевого сердечника

Метод кольцевого керна для измерения остаточных напряжений является разновидностью метода сверления отверстий. Это метод механического тензодатчика, используемый для определения основных остаточных напряжений в зависимости от глубины в материалах, в которых можно предположить линейную теорию упругости (металл, керамика, полимеры). Кольцевая канавка, необходимая для снятия напряжений, может быть обработана подходящим устройством для механического рассечения и удалена электролитической полировкой или электроэрозионной обработкой. Розетки тензодатчиков обычно используются для измерения снятых напряжений на поверхности цилиндрического сердечника. Схематическая установка метода представлена на рисунке 1.11.

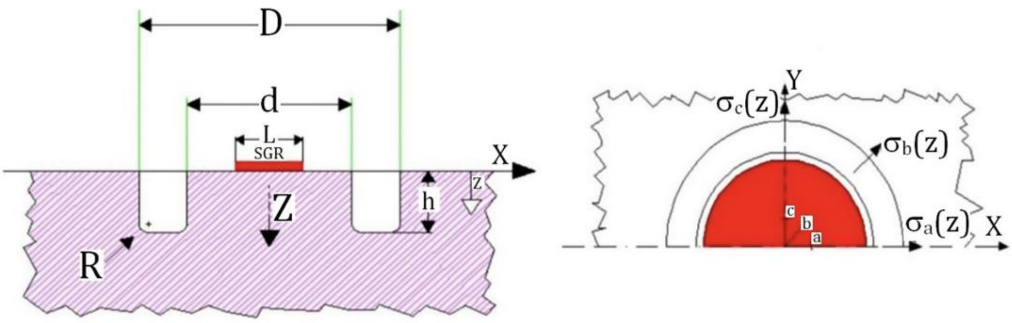


Рисунок 1.11 – Схематичное изображение метода кольцевого сердечника [66]

Метод секционирования

Метод секционирования (метод послойного удаления) представляет собой разрушающий механический способ измерения остаточных напряжений, основанный на последовательном удалении слоев материала с последующим анализом возникающих деформаций. Физическая суть метода заключается в том, что при удалении части материала, находящегося в напряженном состоянии, нарушается внутреннее равновесие напряжений, что приводит к характерным деформациям оставшейся части образца. Эти деформации, будучи точно измеренными, позволяют рассчитать исходное распределение остаточных напряжений в материале.

Технология проведения измерений включает несколько ключевых этапов. Вначале производится подготовка образца - на его поверхность наклеиваются тензодатчики или наносится контрольная сетка для последующих измерений, фиксируется исходная геометрия. Затем осуществляется последовательное удаление слоев материала механическим способом (фрезерованием, шлифовкой) или электрохимическим растворением, при этом толщина каждого удаляемого слоя обычно составляет 0,1-0,5 мм. После каждого цикла удаления фиксируются возникающие деформации: изменение кривизны образца, деформации в различных направлениях, смещение контрольных точек. Полученные данные обрабатываются с использованием методов теории упругости для расчета распределения напряжений.

Математическое описание метода для пластины толщиной h предполагает расчет напряжений σ(z) на глубине z по формуле:

$$\sigma(z)=\left(\frac{E}{1-\nu^2}\right)\left[\frac{(h-z)^2 d^2\varepsilon}{dz^2}+\frac{4(h-z)d\varepsilon}{dz}+2\varepsilon\right], \qquad (1.21)$$

где E – модуль упругости, ν – коэффициент Пуассона, ε – измеренная деформация, z – глубина от поверхности. Эта зависимость позволяет рассчитать полный профиль остаточных напряжений по глубине материала.

Данный метод секционирования обладает рядом важных преимуществ: он позволяет получить детальную информацию о распределении напряжений по глубине, применим для различных материалов (металлов, композитов), дает данные о градиенте напряжений (рисунок 1.12). Однако он имеет и существенные ограничения – он является разрушающим, требует точного контроля толщины удаляемого слоя, отличается трудоемкостью процесса и не подходит для серийного контроля изделий.

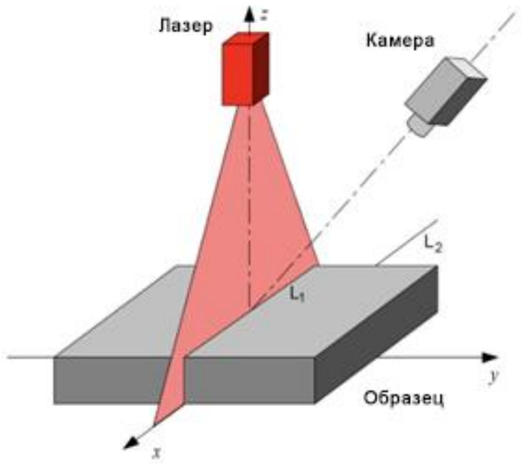


Рисунок 1.12 – Типовая система для реализации метода секционирования [67]

Метод Давиденкова

Метод Давиденкова – это механический способ определения остаточных напряжений, основанный на измерении упругих деформаций, возникающих при нарушении равновесия напряженного состояния материала. Этот метод был разработан советским ученым Н.Н. Давиденковым и относится к категории разрушающих механических методов.

Принцип заключается в том, что при удалении части материала (например, путем надреза или вырезания участка) нарушается баланс внутренних напряжений. Это приводит к перераспределению напряжений и возникновению видимых деформаций (изгиба, искривления или изменения размеров) в оставшейся части образца.

Методика определения остаточных напряжений заключается в следующем. С поверхности детали в двух взаимно перпендикулярных направлениях вырезаются призматические образцы длиной λ, шириной b и толщиной δ (рисунок 1.13) [68].

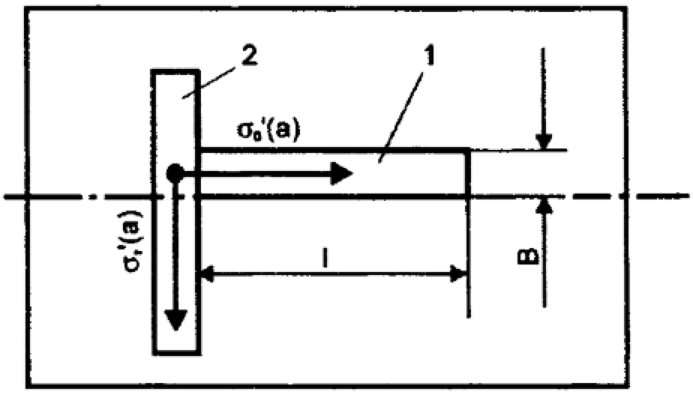


Рисунок 1.13 – Схема вырезки образцов для определения остаточных напряжений в деталях типа пластин и цилиндров: 1 – продольный образец; 2 – поперечный (или кольцевой)

В основном используется для определения напряжений первого рода в металлических материалах.

Таким образом, традиционные физические и механические методы позволяют определить остаточные напряжения с различной степенью точности, однако зачастую требуют разрушения детали или дают лишь локальную информацию о напряженном состоянии.

Для преодоления этих ограничений были разработаны новые подходы, сочетающие экспериментальные измерения с расчетным анализом, основанные на теоретических моделях формирования остаточных напряжений.

Одним из таких современных методов является подход, использующий решение обратной задачи теории собственных деформаций (ТСД), который позволяет по результатам измерений деформаций восстанавливать трехмерное распределение остаточных напряжений без нарушения целостности образца.

Суть метода заключается в том, что на основе экспериментально измеренных упругих деформаций или смещений, возникающих в результате снятия внешних нагрузок либо удаления материала, вычисляется поле собственных деформаций, которое, в свою очередь, позволяет определить трехмерное распределение остаточных напряжений [69-70]. Такой подход не требует разрушения образца, обеспечивает возможность анализа деталей сложной формы и хорошо согласуется с физической природой остаточных напряжений как реакции упругой среды на введенное поле несовместимых деформаций. Преимуществом данного метода является универсальность и возможность объединения данных, полученных различными экспериментальными методами (механическими, рентгеновскими, нейтронографическими и др.), что обеспечивает высокую точность и устойчивость результатов.

1.2.2. Методы создания остаточных напряжений

Многие производственные процессы, такие как сварка, механическая обработка, формовка, закалка, литье и ковка, могут вызывать остаточные напряжения в компонентах как неотъемлемый побочный продукт. Эти напряжения зачастую являются нежелательными, и иногда в производственный процесс добавляют дополнительные этапы для создания полезных сжимающих остаточных напряжений в критически важных для безопасности местах. К таким методам относятся дробеструйная обработка [71-74], малопластическое выглаживание [75-76], глубокая прокатка [77-78], лазерная ударная обработка [79-81] и ультразвуковая ударная обработка [82]. Ниже будут приведены наиболее распространенные на данный момент методы упрочнения.

Дробеструйное упрочнения (ДУ)

ДУ является широко используемой обработкой поверхности в промышленности из-за ее экономического эффекта, простоты использования и возможности применения обработки на месте [83]. Упрочнение существует с эпохи формовки металлов, когда для придания формы деталям или инструментам использовали удары молотка. Эти удары приводят к образованию ОН на поверхности материала, что продлевает срок его эксплуатации [84]. Первым типом упрочнения, применяемым в промышленности, было ДУ. Ранее известное как дробеструйная обработка (shot blasting), дробеструйное упрочнение использовалось для увеличения срока службы материалов, таких как пружинные витки, в 1920-х годах [85]. Дробь может быть изготовлена из стальной литой дроби, проволочной дроби, керамических или стеклянных шариков, в зависимости от морфологии и типа материала, требующего обработки. Диаметр дроби может варьироваться от 50 микрон до 6 мм в диаметре. Дробь малого диаметра также известна как дробь с мелкими частицами и используется для деталей сложной формы. Литая стальная дробь сферической формы является наиболее широко используемой формой материала и может иметь диаметр от 180 до 1000 микрон. Если внесение железистых загрязнений является недостатком поверхности обрабатываемого материала, используется хромированная дробь [86]. Дробь подается на материал через центробежное вращающееся колесо или воздушно-струйное сопло, как показано на рисунок 1.14.

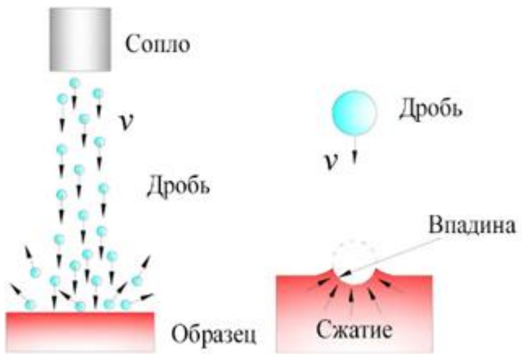


Рисунок 1.14 – Схема дробеструйной обработки [87]

Литая дробь доступна в разных диапазонах твердости, чтобы обеспечить твердость дроби по сравнению с обрабатываемым материалом, что позволяет передавать энергию материалу, а не использовать ее для разрушения дроби.

Малопластическое выглаживание (МВ) и глубокая холодная прокатка (ГХП)

МВ и ГХП основаны на одной и той же концепции обработки, которая заключается в том, что на поверхность обрабатываемого материала помещается роликовый шарик. Прикладывается давление, и роликовый шар прокатывается по поверхности. ОН регулируются диаметром шарика и давлением, оказываемым на материал. Разница между этими двумя методами заключается в том, что МВ – это запатентованный компанией Lambda Technologies метод, в котором используется постоянное измерение прилагаемой силы, чтобы обеспечить ограничение наклепа (холодной обработки), но достаточное для создания сжимающего остаточного напряжения [88] (рисунок 1.15). ГХП не является регламентированной формой обработки, и степень наклепа вносимая в материал, значительно выше, чем при МВ [89].

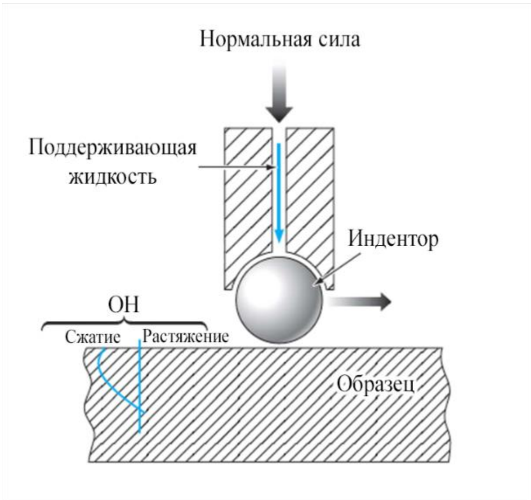


Рисунок 1.15 – Схема метода малоплостического выглаживания

Ультразвуковая ударная обработка поверхности (УУО)

Ультразвуковая ударная обработка – это процесс холодной обработки, в котором используется высокочастотное и высокоскоростное воздействие наконечника твердосплавного инструмента для пластической деформации материала с целью создания полезных сжимающих остаточных напряжений рисунок 1.16. Эти остаточные сжимающие напряжения создаются путем наклепа с целью замены остаточных растягивающих напряжений в металлических поверхностях и сварных соединениях. В сварных соединениях одной из важных задач является повышение усталостной прочности сварных швов, которые могут подвергаться воздействию динамических напряжений и склонны к растрескиванию под напряжением [90].

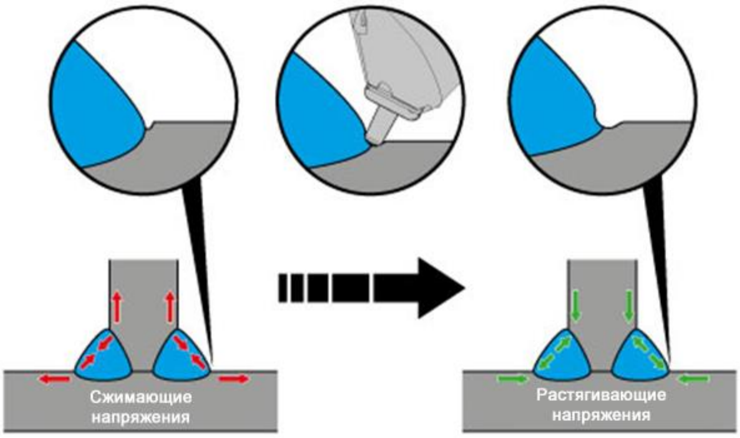


Рисунок 1.16 – Принципиальная схема ультразвуковой ударной обработки

Применение ультразвуковой ударной обработки оказывает комплексное воздействие на сварное соединение и значительно увеличивает применяемость сварных соединений при изготовлении металлоконструкций.

Установка состоит из ультразвукового инструмента, блока электроники и соединительных элементов. Для обеспечения работы в цеховых и полевых условиях, установка оснащена встроенной системой охлаждения.

Лазерная ударная обработка (ЛУО)

С начала этого столетия лазерная ударная обработка стала все чаще использоваться в промышленности в связи с ростом интереса к исследованиям этого метода обработки поверхности. Основы ЛУО были заложены в СССР и в США в 1960-х годах [91], но до 90-х годов лазерное упрочнение не рассматривалось как подходящий метод обработки поверхности из-за того, что люди были уверены, что при помощи лазера невозможно загнать внутрь образца достаточно большие ОН, не повредив при этом саму поверхность.

В процессе ее развития появилось три метода: прямая абляция [92], ограниченная абляция [93-94] и ограниченная абляция с жертвенным слоем (поглощающим или защитным покрытием) [95-97]. Суть данного метода заключается в следующем. Кратковременные высокоэнергетические импульсы используются для создания на поверхности материала высокоэнергетической плазмы, которая очень быстро расширяется. Тем самым она вызывает давление на поверхности материала, которое запускает упругопластическую волну вглубь материала, которая пластические деформирует его (рисунок 1.17). Эта волна и создает остаточные напряжения, которые остаются в образце после достижения системой равновесия. ЛУО приводит к характерному распределению этих остаточных напряжений по глубине, где высокие сжимающие остаточные напряжения рядом с поверхностью уменьшаются и могут превратиться в растягивающие остаточные напряжения рядом с центральными слоями материала.

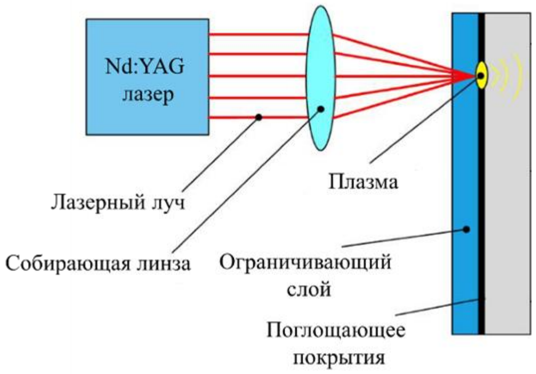


Рисунок 1.17 – Типовая схема реализации метода ЛУО

В настоящее время обычно используется метод обработки с ограниченной абляцией и защитным слоем. В качестве ограничивающего слоя зачастую используется либо вода, либо стекло. Однако вода является более универсальным средством для удержания плазмы, так как она может быть подана на поверхность практически любой геометрии, в то время как стекло подходит лишь для испытаний плоских образцов. В роли защитного покрытия чаще всего используют черную краску, металлическую фольгу или виниловую ленту. Дальше этот аспект будет рассмотрен подробнее. Что касается различных лазерных систем, то исследователи все чаще отдают предпочтение установкам с неодимовым стеклом с модуляцией добротности (Nd: стекло) и кристаллическая лазерная система на алюмоиттриевом гранате (YAG) [98-99].

Основными задачами, с которыми успешно справляется ЛУО:

- Улучшение усталостных и антикоррозионных свойств (рисунок 1.18);
- продление срока службы деталей и конструкций;
- повышение микротвердости поверхности деталей;
- “залечивание” трещин.

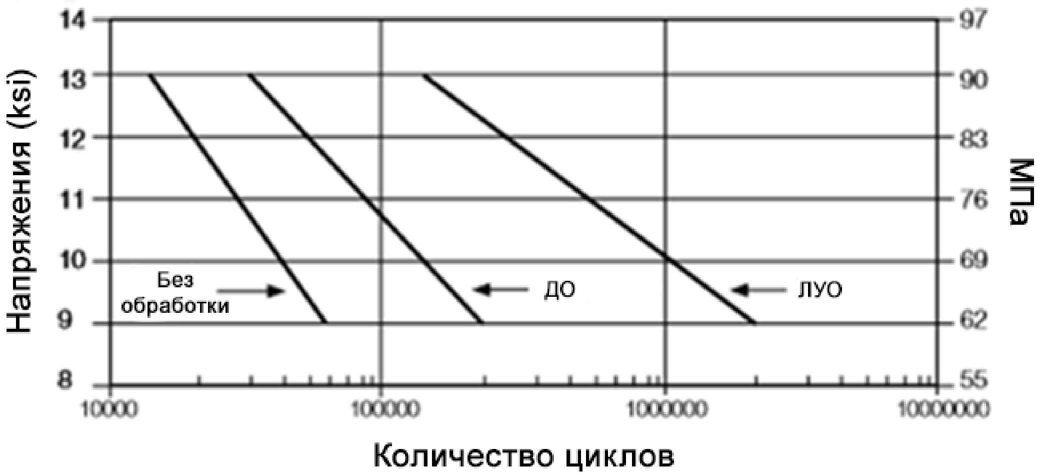


Рисунок 1.18 – Результаты усталостных испытаний алюминиевых образцов до и после обработки [100]

Особый интерес к описываемой технологии проявляют аэрокосмические компании. Там ЛУО применяют при производстве двигателей для уменьшения отказов деталей из-за усталостного разрушения.

Общепринятой практикой стало применение лазерного упрочнения для лопаток газотурбинных двигателей [101-102].

Начиная с 90-х годов компания Toshiba использует адаптированную удаленную систему лазерного упрочнения на атомных реакторах для предотвращения коррозионного растрескивания компонентов реактора [103].

Также ведутся разработки применения упрочнения для биомедицинских имплантатов из сплавов Mg-Ca [104]. Однако в этой области еще не до конца исследовано влияние ОН на совместимость имплантата с тканями организма.

В последнее время в самолетостроении широко применяется сварное соединение вместо заклепочного, в особенности для соединения стрингеров, с целью уменьшения веса самолета и увеличения прочности соединения. Однако, использование лазерного соединения привело к появлению новой проблемы. Так как в случае заклепочного соединения стрингер и фюзеляж – отдельные детали, то образовавшаяся трещина в фюзеляже не угрожает стрингеру, в отличие от сварного соединения, где стрингер и фюзеляж после сварки являются сплошной деталью. Для предотвращения распространения трещины на стрингер, ведутся исследования по применения лазерного упрочнения вдоль сворного шва, для увеличения резистивности к распространению трещины в этой области [105].

1.3. Параметры ЛУО

Существует несколько групп параметров, связанных с ЛУО, каждая из которых требует особого контроля и понимания их влияния на эффект упрочнения для достижения наилучшего результата (рисунок 1.19).

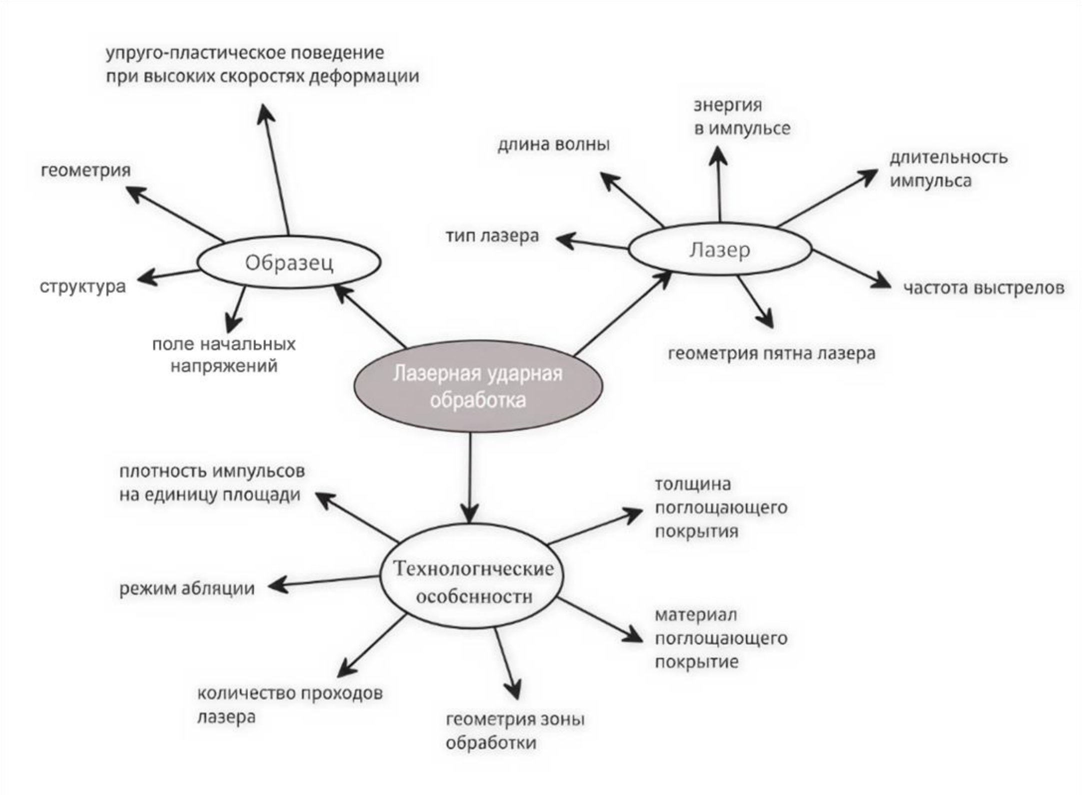


Рисунок 1.19 – Параметры, связанные с процессом ЛУО

Ниже будут рассматриваться основные параметры, оказывающие наибольший эффект на процесс лазерного упрочнения.

1.3.1. Плотность мощности энергии лазера

Интенсивность лазерного излучения или плотность мощности энергии являются решающим параметром при ЛУО. Обычно лазерном упрочнении металлических деталей значение плотности мощности энергии берут в диапазоне от 1 до 10 ГВт/см^2, исходя из свойств обрабатываемого материала. Плотность мощности энергии в данном случае определяется уравнением (1.22), где E_{Beam} – энергия в одном импульсе, τ_p – длительность импульса и A_{Beam} – площадь, покрываемая одним выстрелом, являются определяющими переменными [106]:

$$I = \frac{E_{Beam}}{\tau_p A_{Beam}} . \quad (1.22)$$

На рисунке 1.20 показано, что ударное давление, а, следовательно, и интенсивность обработки, напрямую зависят от плотности мощности лазерного излучения. Этот результат характерен для лазерного импульса с длиной волны 1064 нм и длительностью 25 нс [107]. Следует отметить, что сочетание указанных параметров, а также наличие или отсутствие поглощающего и ограничивающего слоев существенно влияют на достижимое пиковое давление и точку насыщения. При повышении плотности мощности возможен пробой удерживающей среды или воздуха, сопровождающийся образованием плазмы, частично экранирующей поверхность образца и снижающей эффективность обработки [108].

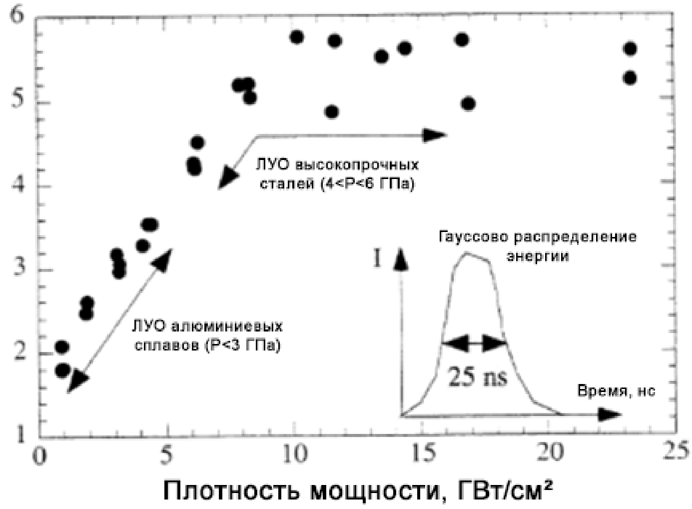


Рисунок 1.20 – Изменение пикового давления в зависимости от плотности мощности лазера в режиме ограниченной абляции [107]

Во время обработки создаваемое давление должно преодолеть динамический предел текучести материала, чтобы вызвать внутри него деформацию, которая необходима для создания остаточных напряжений [109]. Рисунок наглядно демонстрирует, что материалы с более низкой прочностью, например, алюминий, необходимо обрабатывать с плотностью мощности энергии, не превышающей 5 ГВт/см^2. Работа в одинаковых диапазонах параметров жизненно важна для достижения необходимого эффекта от обработки и предотвращения побочных эффектов, способных уменьшить величину и глубину достижимого сжимающего напряжения. Чрезмерное упрочнение может привести к необратимому повреждению материала за счет превышения предела прочности материала на излом или ухудшить качество обрабатываемой поверхности, что приводит к образованию впадин и мест зарождения усталостных трещин [110]. Эта точка насыщения является предельной точкой пластической деформации, при которой величина давления более чем в два раза превышает предел упругости по Гюгонио (HEL) материала. Его значение определяется уравнением 1.23, где ν — коэффициент Пуассона, а $\sigma_y{}^{dyn}$ — динамический предел текучести материала:

$$HEL = \frac{1-\nu}{1-2\nu}\sigma_y^{dyn} \quad . \tag{1.23}$$

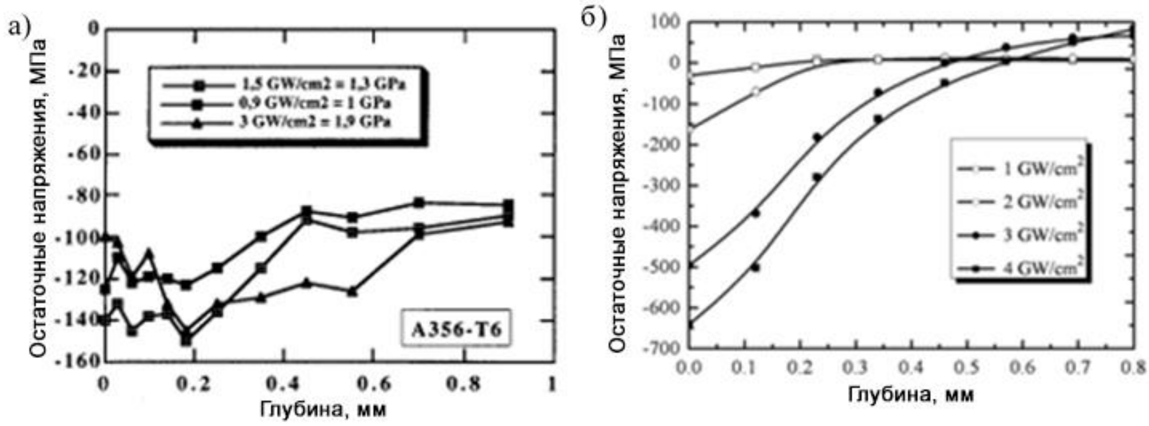


Рисунок 1.21 - ОН, вызванные ЛУО при различных плотностях мощности: а) алюминиевый сплав А356-Т6 [104], б) алюминиевый сплав А2024-Т62 [111]

Большинство лазерных источников, используемых для ЛУО, работают с почти идеальной формой временного профиля Гаусса или с плоской вершиной. Обычная длительность импульса лазера составляет от 0,1 до 50 нс [112]. На рисунке 1.22 показано изменение создаваемого пикового давления в зависимости от длительности импульса. Здесь наглядно продемонстрировано, что более короткие импульсы генерируют более высокие давления. Однако пробой напрямую зависит от ширины импульса, о чем свидетельствует более высокая точка насыщения. Эта точка может быть достигнута путем уменьшения длительности импульса. Например, при 0,6 нс мы будем иметь 100 ГВт/см^2, а при 10-25 нс – 10 ГВт/см^2. Этот факт следует учитывать при выборе параметров на основе длительности лазерной обработки [113].

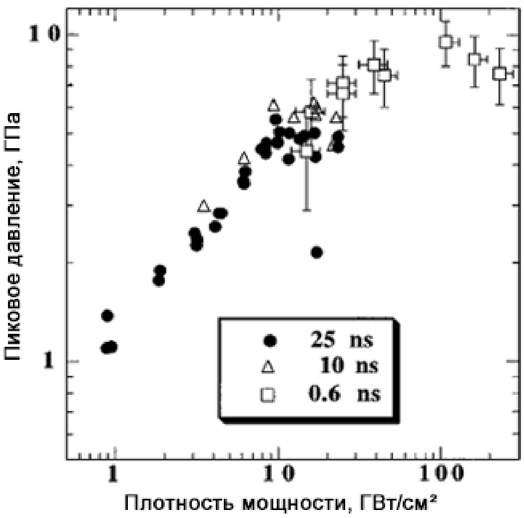


Рисунок 1.22 – Зависимость максимального давления от плотности мощности энергии для длительностей импульса 0,6 нс, 10 нс и 25 нс [113]

Однако, хотя более короткий импульс приводит к более высоким пиковым давлениям, Пейре и др. показали, что длительность лазерного импульса (τ_p) оказывает квазилинейное влияние на глубину воздействия (L_{pl}) [114]. Уравнение 1.24 обеспечивает эту зависимость, при которой более длинные импульсы пластифицируют материал на большую глубину из-за повышенного давления на образец, вызывая большие смещения поверхности, где C_e, C_p, – скорость упругих и пластических волн, а P_{max} – максимальное давление, вызываемое лазерным импульсом:

$$L_{pl} = \frac{C_e C_p \tau_p}{(C_e - C_p)} \left(\frac{P_{\max} - HEL}{2HEL} \right) . \tag{1.24}$$

На рисунке 1.23 показано, что более короткий импульс вызывает сжимающие остаточные напряжения высокой величины, но слой этих напряжений гораздо менее глубокий, чем при большей длительности импульса, как и предсказывало уравнение 1.24 [115].

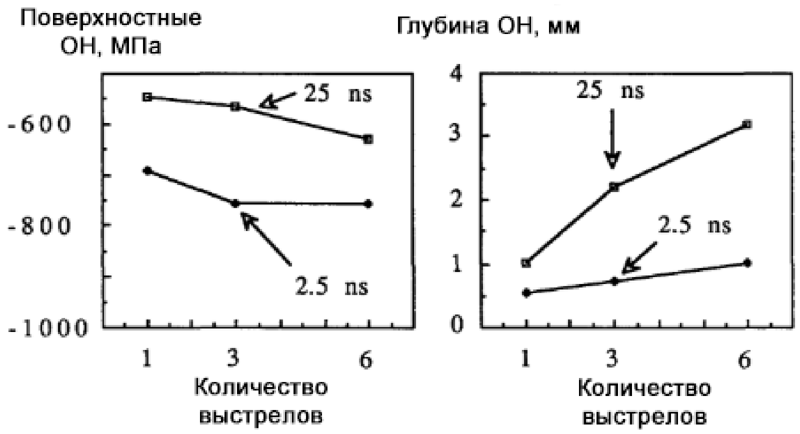


Рисунок 1.23 – Зависимость остаточного напряжения и глубины воздействия от длительности импульса и количества проходов, измеренная на образцах стали 35CF4 [115]

1.3.2. Давление плазмы, создаваемое в процессе ЛУО

Облучение и абляция твердой поверхности сфокусированным мощным лазером обычно создает высокотемпературную плазму. Активное расширение плазмы порождает механический импульс в твердом теле. В большинстве случаев ЛУО взаимодействие лазера с материалом ограничивается прозрачной средой, которая ограничивает распространение плазмы во внешнюю среду. Поведение создаваемой в процессе упрочнения плазмы можно разделить на три этапа, как описано в [116]:

1) Во время действия лазерного импульса (лазер включен) энергия нагревает плазму и создает упругопластическую волну, распространяющуюся вглубь образца с одной стороны и удерживаемую ограничивающим слоем с другой.

2) После окончания лазерного импульса (лазер выключен) плазма все еще давит на образец, но уже слабее из-за адиабатического охлаждения и потерь, определяемых работой плазмы с удерживающим материалом при продолжающемся расширении.

3) После полной рекомбинации плазмы нагретый газ внутри границы раздела расширяется и увеличивает импульс.

1.3.3. Фаза нагрева плазмы

Энергия лазерного импульса поглощается, увеличивая внутреннюю энергию плазмы и расширяя границу раздела между материалом образца и удерживающей средой. Толщина плазмы на этом этапе определяется как L(t). Давление плазмы можно определить с помощью энергетического баланса системы, который учитывает энергию на единицу площади поверхности, выделяемую лазером, внутреннюю энергию плазмы и работу силы давления. Окончательное соотношение давления плазмы P(t), включение предположения, что плазма является идеальным газом, привело к уравнению 1.25. Это уравнение показывает совпадение времени нарастания интенсивности лазерного импульса и импульса давления и определяет скорость затухания после превышения пиковой плотности мощности лазерного импульса

$$I(t) = P(t)\frac{dL(t)}{dt} + \frac{3}{2\alpha}\frac{d}{dt}\left[P(t)L(t)\right] \ , \tag{1.25}$$

где I(t) – плотность мощности энергии, а α – постоянная доля внутренней энергии, используемая для увеличения тепловой энергии плазмы. Уравнение (1.25) можно упростить, если принять во внимание постоянную интенсивность лазера (максимальное пиковое значение), которая определяется уравнением (1.26). Рост толщины плазмы определяется уравнением (1.27):

$$P_{\max}(GPa) = 0{,}01\sqrt{\frac{\alpha}{2\alpha+3}}\sqrt{ZI_0} \quad , \tag{1.26}$$

$$L(t) = L_0 + \frac{2P_0 t}{Z} \quad , \tag{1.27}$$

где L_o и P_o – начальная толщина и давление, а Z – ударное сопротивление границы раздела между ограничивающим слоем и образцом, которое определяется из уравнения (1.28) [117]:

$$\frac{2}{Z} = \frac{1}{Z_{покр.}} + \frac{1}{Z_{обр.}} \quad . \tag{1.28}$$

1.3.4. Адиабатическое охлаждение плазмы

Лазерный импульс заканчивается (лазер выключается) при длительности импульса τ_p. Поскольку в систему не поступает никакой дополнительной энергии, плазма теряет энергию за счет адиабатического охлаждения в окружающую среду. Характерный размер области занимаемой плазмой и давление определяются как $\mathrm{L}(\tau_p)$ и $P(\tau_p)$. Давление на этапе охлаждения характеризуется уравнением (1.29):

$$P(t) = P(\tau_p)\left(\frac{L(\tau_p)}{L(t)}\right)^{\gamma} \quad , \tag{1.29}$$

где γ – показатель адиабаты.

Характерный размер области занимаемой плазмой определяется уравнением (1.30):

$$L(t) = L(\tau_p)\left(1 + \frac{(\gamma+1)}{\tau}(t-\tau_p)\right)^{1/(\gamma+1)} . \tag{1.30}$$

По оценкам уравнения (1.30), давление в конце этапа нагрева уменьшилось до половины своего значения в момент времени 1,8 τ_p. Длительное падение давления является следствием наличия ограничивающего слоя.

Последний этап, определяющий поведение плазмы, не влияет на пластическую деформацию, поскольку давление упало до уровня ниже предела упругости материала.

1.3.5. Геометрическая форма и распределение энергии внутри пятна

В исследованиях и практических применениях ЛУО наиболее распространено использование лазерных пятен квадратной и круглой формы. Пространственный профиль пятна, определяемый его геометрией и распределением энергии, задается конструкцией лазерной оптической системы и оказывает существенное влияние на формирование поля остаточных напряжений.

Сложность отклика материала обусловлена интерференцией многочисленных ударных волн, генерируемых в процессе обработки. Ключевой особенностью полей остаточных напряжений, создаваемых ударными воздействиями, является их существенная неоднородность в зоне обработки. Как показано на рисунке 1.24 [118], для стали 1045 величина остаточных напряжений в центре лазерного пятна может быть ниже, чем на его периферии.

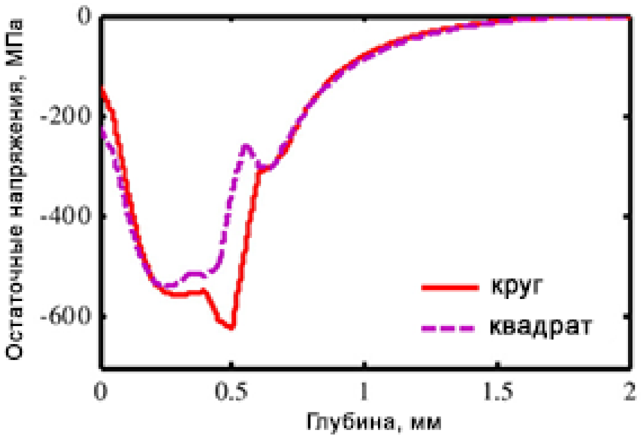


Рисунок 1.24 – Влияние геометрии пятна лазера на ОН [118]

Пейре и др. отмечали, что генерируемая ударная волна состоит из двух компонент: упругой (максимальные напряжения ниже предела упругости по Гюгонио материала) и упругопластической (максимальные напряжения выше этого предела). Упругая волна, имеющая более высокую скорость распространения, опережает пластическую и называется упругим предвестником.

Из-за разницы в скоростях ударное давление релаксировало под действием высокоскоростной упругой волны, отраженной от задней свободной поверхности образца. Взаимодействие с этой отраженной упругой волной и приводит к падению напряжения в центре лазерного пятна.

Как показано на рисунке 1.25, боковая разгрузочная волна, генерируемая на границе лазерного пятна, фокусируется к центру области воздействия, что усиливает падение остаточного напряжения в этой зоне. Однако в случае квадратного пятна фокусировка волн отсутствует, благодаря чему падение остаточного напряжения, вызванное взаимодействием распространяющихся ударных волн, оказывается менее выраженным [119].

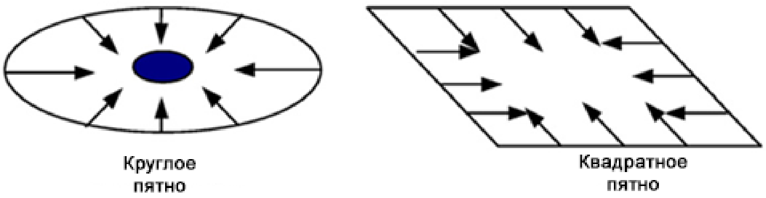


Рисунок 1.25 – Направление распространения волн напряжений от края лазерного пятна для случаев: (а) круглого и (б) квадратного пятна [119]

На рисунке 1.26 представлены примеры пространственного распределения энергии в импульсе для пучков гауссова профиля и профиля с равномерным распределением энергии. Энергия импульса варьировалась в диапазоне от 3 до 5 Дж [120].

Ли и др. установили, что гауссово распределение приводит к формированию более высокого и глубокого поля остаточных сжимающих напряжений по сравнению с равномерным распределением. Это объясняется тем, что гауссов импульс создает пиковое давление, в 1,5 раза превышающее давление от пучка с равномерным распределением, что увеличивает интенсивность лазерно-индуцированной ударной волны и уровень пластической деформации. Более высокая максимальная температура при гауссовом распределении энергии также способствует менее жесткому (более "горячему") характеру взаимодействия с материалом по сравнению с пучком с равномерным распределением.

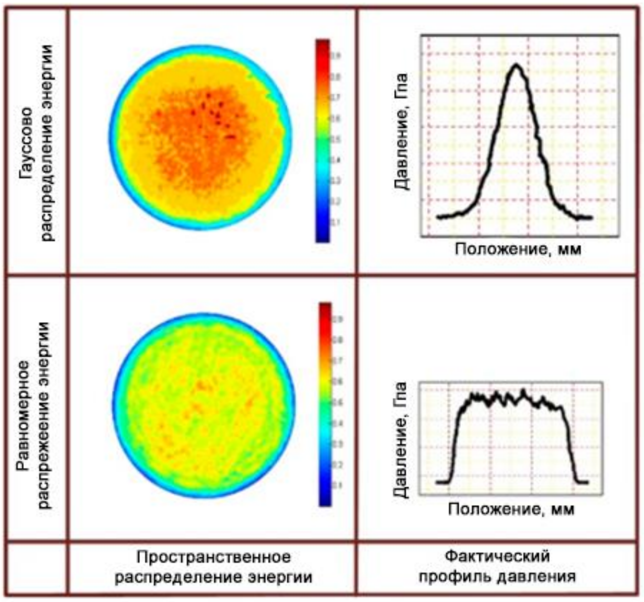
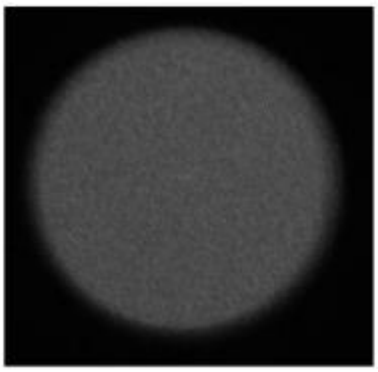


Рисунок 1.26 – Распределение энергии лазерных лучей и профиль давления по сечению пятна [120]

Ле Брас и др. охарактеризовал пространственное распределение интенсивности лазерного излучения в импульсе ЛУО с помощью дифракционного оптического элемента, рисунок 1.27 [121]. Распределение интенсивности лазерного излечения представлено величиной интенсивности пикселей изображения.

а) (a)



б)

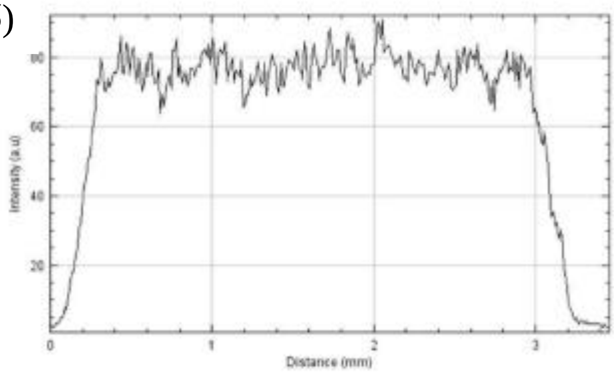


Рисунок 1.27 – Пространственная форма пятна (а) и измерение интенсивности лазерного излучения (б) [121]

1.3.6. Количество проходов и перекрытие ЛУО

В большинстве инженерных применений ЛУО используется на элементах конструкций, размеры которых на порядки превышают размеры одного лазерного пятна. Для покрытия требуемой области чаще всего используется несколько последовательно перекрывающихся лазерных выстрелов. В этом случае повышаются требования к синхронизации лазерных импульсов и положения образца для контролируемого размещения выстрелов на обрабатываемой поверхности. Общая схема обработки круглым пятном с перекрытиями представлена на рисунке 1.28.

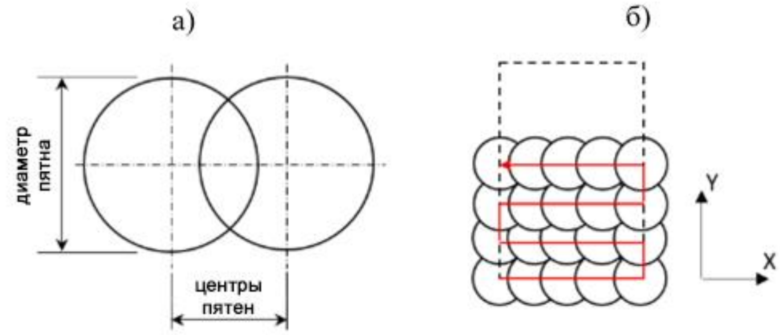


Рисунок 1.28 – (а) Схематичное изображение перекрытия лазерных пятен, (б) типичная траектория лазерного луча в процессе обработки

Реакция материала на перекрытие и количество проходов сильно зависит от его механических свойств, но их увеличение дает очевидные преимущества. Увеличение количества ударов в одну точку приводит к формированию остаточных напряжений на большей глубине. На рисунке 1.29 показано увеличение характерного размера (глубины) слоя сжимающих остаточных напряжений в углеродистой стали при увеличении количества ударов лазера [122].

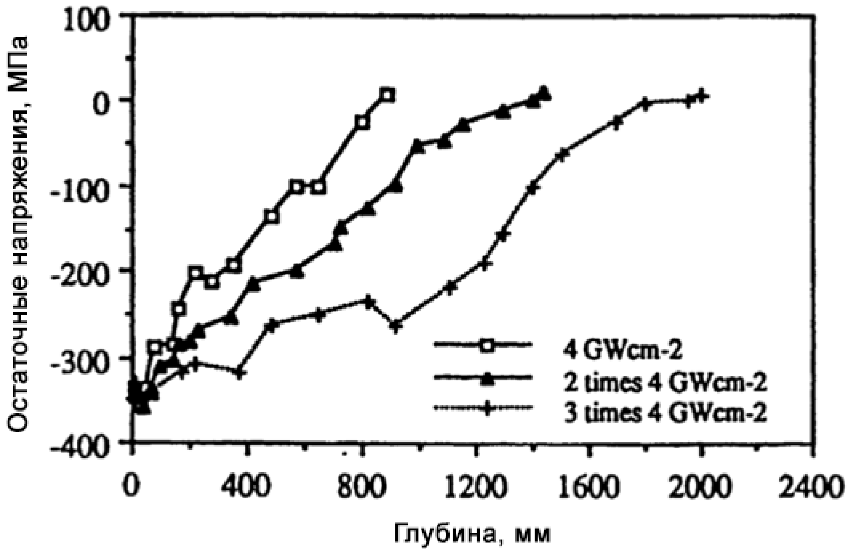


Рисунок 1.29 – Изменение профилей ОН в зависимости от количества проходов [122]

Нанесение нескольких лазерных пятен или слоев увеличивает равномерность поля остаточных напряжений, поскольку растягивающие напряжения в центре упрочненного пятна ослабляются. На рисунке 1.30 показано, что растягивающее остаточное напряжение на поверхности материала, созданное при первом проходе первого лазерного луча, полностью снято вторым слоем ЛУО [123].

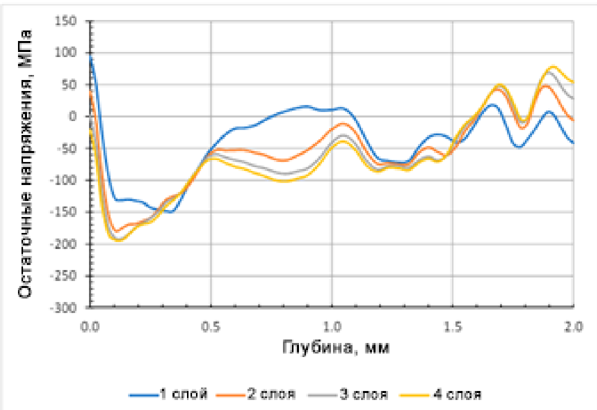


Рисунок 1.30 – Влияние количества слоев на ОН [123]

1.3.7. Поглощающие или защитные покрытия

Чтобы сохранить целостность поверхности обрабатываемых образцов, практически с самого начала развития технологии лазерного упрочнения исследователи использовали непрозрачные для лазерного излучения покрытия. Эти съемные термоабляционные покрытия призваны были защищать поверхность образцов, чтобы исключить процессы рекристаллизации или перегрева образца. Плазма образуется в процессе ионизации непрозрачного для лазерного излучения покрытия. Упругопластическая волна распространяется сквозь покрытие в материал, частично отражается на границе раздела, сохраняя при этом качество его поверхности.

В некоторых случаях нанесение на поверхность защитных покрытий невозможно или крайне затруднительно, например, при обработке деталей находящихся в эксплуатации ядерных реакторов или же при использовании очень низких энергий в процессе обработки, в случае которых эффект от упругопластической волны просто не заметен в материале образца [124].

Этот способ обработки известен как лазерная ударная обработка без покрытия (LSPwC) [125] или обработка в режиме прямой абляции. В этом случае плазма образуется за счет ионизации поверхности образца. Тепло передается в материал по мере развития волны, вызывая комбинированный термомеханический процесс. Зона термического воздействия обычно имеет толщину несколько микрон вблизи обрабатываемой поверхности. На рисунке 1.31 показаны основные эффекты и различия между этими типами процессов ЛУО [126].

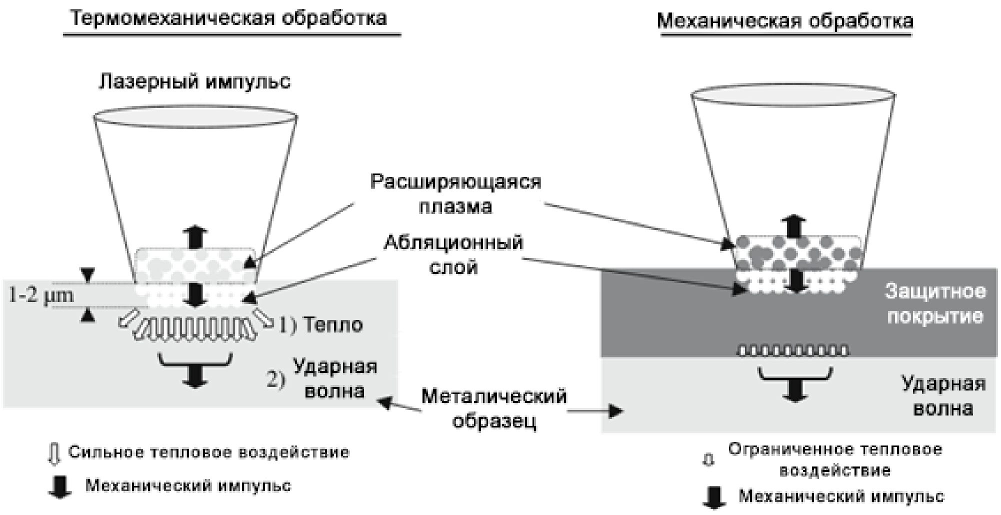


Рисунок 1.31 – Схемы механической и термомеханической ЛУО [126]

Во время облучения поверхности без изоляции от теплового воздействия пиковые температуры могут достигать 20 000 К за несколько микросекунд. Результирующие тепловые эффекты обычно происходят в пределах первых 50 мкм, при этом на глубину 50 мкм влияет дополнительное растягивающее остаточное напряжение, вызванное механической составляющей процесса [127-128].

На рисунках 1.32 [129] изображены фотографии поверхностей после ЛУО в различных материалах при использовании абляционного покрытия. Там, где поверхность была подвержена упрочнению, можно увидеть четкие периодическую структуру. Характерный размер и глубина элементов структуры зависит от параметров лазера и свойств материала. При использовании защитного слоя нет никаких следов изменения поверхности, связанных с абляцией. Это еще раз подтверждает вывод о том, что ЛУО с покрытием представлял собой чисто механический процесс холодной обработки.

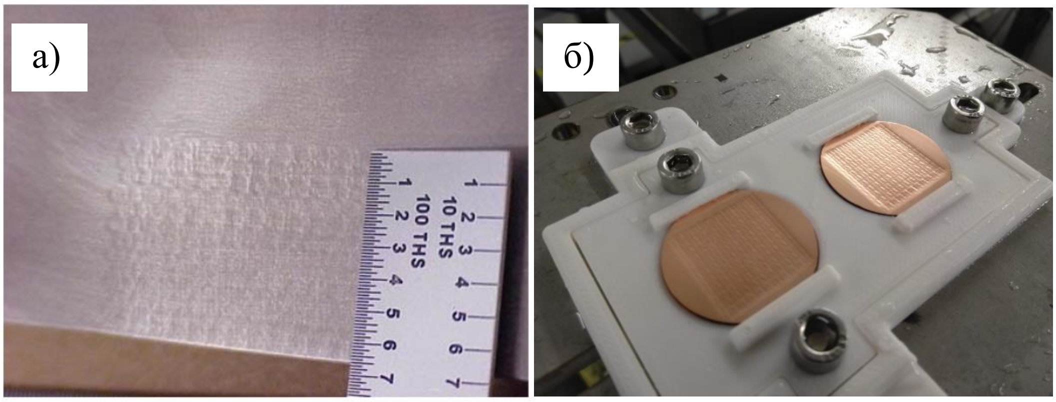


Рисунок 1.32 – Поверхности различных материалов после ЛУО с поглощающим покрытием: Ti-6Al-4V (а) [122], медь (б) [130]

Прямое облучение поверхности образца приводит к видимым изменениям поверхности вследствие абляции. На рисунке 1.33 показан пример изменения поверхности, вызванной абляцией во время обработки без защитного покрытия. Темные участки на поверхности образца вызваны образованием оксидного слоя, за счет взаимодействия между поверхностью и кислородом при высокой температуре.

Рисунок 1.33 – Поверхность образца после ЛУО без поглощающего слоя

При использовании LSPwC режима обработки, как правило, требуется множество выстрелов или большое перекрытие, чтобы получить равномерный профиль остаточного напряжения. Увеличение количества ударов приводит к усилению поверхностной абляции и подповерхностному (>5 мкм от обрабатываемой поверхности) повреждению структуры материала. Во всех случаях LSPwC можно достичь подходящей глубины сжимающего напряжения. Однако при этом обязательно следует учитывать изменения поверхности.

Наиболее часто используется три основных типа поглощающих покрытий: металлическая фольга (алюминиевая или стальная) [131-133], поливинилхлоридной лента [134] и органические черные краски [135]. При выборе того или иного материала необходимо учитывать плотность мощности энергии, с которой будет произведена обработка, так как не все покрытия способны выдержать большие нагрузки. Так, например, в [136] было показано, что краска не выдерживает обработку с плотностями мощности энергии больше 10 ГВт/см^2.

1.3.8. Аналитический обзор современного состояния тематики работы и нерешенных научных задач

Современное состояние исследований в области повышения усталостной долговечности металлических конструкций характеризуется возрастающим интересом к методам управления остаточными напряжениями, которые играют ключевую роль в зарождении и развитии усталостных трещин. Несмотря на наличие значительного числа работ, посвященных как механическим способам поверхностного упрочнения, так и ударно-волновым методам, остается еще множество нерешенных фундаментальных и прикладных задач, связанных с формированием остаточных напряжений в титановых сплавах и их влиянием на усталостное разрушение, особенно в условиях наличия в конструкциях концентраторов напряжений.

Существующие методы создания остаточных напряжений, такие как дробеструйная обработка, ультразвуковая ударная обработка, малопластическое выглаживание, обеспечивают улучшение усталостных свойств металлических деталей. Однако эти методы имеют ряд ограничений, включая малую глубину упрочненного слоя, неоднородность создаваемых напряжений, зависимость качества обработки от оператора и сложность повторяемости результатов. Для титановых сплавов, характеризующихся высокой чувствительностью к локальным концентрациям напряжений, малая глубина упрочнения является существенным недостатком, поскольку значительная часть процессов накопления повреждений происходит в подповерхностных слоях толщиной порядка сотен микрометров. Эти ограничения стимулировали разработку методов, основанных на генерации ударных волн высокой амплитуды. Среди них особое место занимает лазерная ударная обработка, которая сочетает в себе высокую управляемость процесса и значительную глубину упрочнения.

Лазерная ударная обработка позволяет формировать глубокие слои сжимающих остаточных напряжений, достигающие 1 мм и более, и обеспечивает высокую стабильность параметров воздействия. Технология характеризуется возможностью локальной обработки заданных областей сложной геометрии, что делает ее особенно перспективной для упрочнения зон концентраторов напряжений. Однако анализ публикаций показывает, что влияние технологических параметров ЛУО на формирование остаточных напряжений изучено недостаточно полно. В большинстве работ рассматриваются лишь отдельные параметры: энергия импульса, длительность, степень перекрытия или материал защитного покрытия. При этом отсутствуют систематические исследования, в которых бы одновременно изучалось влияние нескольких параметров при обработке титановых сплавов, особенно отечественных марок ВТ1-0, ОТ4-0 и ВТ6, отличающихся структурными и фазовыми характеристиками от зарубежных аналогов.

Также остаются нерешенными вопросы, связанные с применением различных методов измерения остаточных напряжений для анализа эффектов ЛУО. Метод рентгеновской дифракции обеспечивает высокую точность определения поверхностных напряжений, но его чувствительность ограничена несколькими десятками микрометров, что не позволяет анализировать подповерхностное распределение, характерное для ЛУО. Метод сверления отверстия позволяет определять напряжения до глубины порядка 1 мм, однако он чувствителен к локальной пластичности, качеству поверхности и эксцентриситету сверления, а также требует применения корректных алгоритмов пересчета деформаций в напряжения при неравномерном распределении остаточных напряжений. Несмотря на развитие вычислительных методов (интегрального, дифференциального и стандартизированного ASTM E837-13), отсутствуют работы, в которых было бы выполнено сопоставление различных методик на одном и том же материале после ЛУО. На фоне широкого распространения ЛУО это является существенным методическим пробелом, поскольку для корректного анализа эффективности обработки требуется достоверное измерение остаточных напряжений на глубинах до 1 мм.

Особое значение для практического применения ЛУО имеет вопрос о влиянии параметров обработки на формирование остаточных напряжений. В литературе приводятся противоречивые данные о зависимости глубины и величины сжимающих остаточных напряжений от плотности мощности лазерного излучения. Некоторые авторы отмечают, что увеличение плотности мощности выше определенного порога приводит к эффекту насыщения, тогда как другие демонстрируют дальнейшее увеличение глубины упрочнения. Аналогичные расхождения существуют в области исследования повторных проходов лазерного пятна и степени его перекрытия. Обработка с перекрытием иногда приводит к увеличению глубины упрочненного слоя, однако в ряде работ сообщается о минимальном влиянии этого параметра, что, вероятно, обусловлено различиями в типах материалов, методах подготовки поверхности и защитных покрытиях. Материал покрытия играет важную роль в формировании ударной волны, однако в большинстве работ представлены результаты лишь для отдельных типов покрытий и отсутствуют комплексные сравнительные исследования влияния фольги, красок и полимерных пленок при одинаковых условиях лазерного воздействия.

Существенным пробелом является отсутствие исследований, посвященных анализу влияния схем обработки на усталостный ресурс образцов с концентраторами напряжений. Не определены оптимальные зоны обработки, которые обеспечивают увеличение усталостной долговечности; отсутствуют данные о том, как смещение зоны ЛУО относительно концентратора влияет на механизм зарождения трещины, перераспределение локальных напряжений и скорость последующего роста трещины. Результаты исследований, выполненных в этой области, носят фрагментарный характер и зачастую противоречивы: в одних работах локальная обработка приводит к снижению ресурса вследствие формирования растягивающих напряжений в критических зонах, в других – к многократному увеличению долговечности.

Анализ работ, посвященных влиянию ЛУО на усталостные свойства титановых сплавов, показывает, что большинство исследований выполнено на образцах без концентраторов напряжений, тогда как реальные элементы авиационных конструкций содержат отверстия, переходы сечений и другие геометрические неоднородности, которые могут существенно влиять на усталостные свойства. ЛУО может существенно изменять как стадию зарождения усталостной трещины, так и начальные участки ее роста, однако количественные закономерности этих процессов в титановых сплавах российских марок практически не исследованы.

В результате анализа были выявлены проблемы, которые позволяют сделать вывод о том, что современное состояние исследований ЛУО характеризуется отсутствием комплексных экспериментальных данных, необходимых для понимания взаимосвязи между параметрами лазерного воздействия, распределением остаточных напряжений и усталостной долговечностью титановых сплавов с концентраторами напряжений. Недостаточно изучены особенности формирования остаточных напряжений в зависимости от геометрии лазерного пятна, количества проходов, степени перекрытия и материала защитного покрытия. Кроме того не разработаны критерии выбора схем обработки, обеспечивающих наилучший эффект упрочнения в зонах концентраторов. Недостаточная изученность механических и микроструктурных факторов, влияющих на эффективность ЛУО, затрудняет разработку инженерных рекомендаций по применению этого метода в промышленности.

Таким образом, актуальной научной задачей является исследование закономерностей формирования остаточных напряжений при лазерной ударной обработке титановых сплавов. Необходимо определить влияние технологических параметров лазерной ударной обработки и схем расположения зоны обработки на усталостную долговечность образцов с концентраторами напряжений. Кроме того, требуется выбрать и обосновать наиболее корректную методику измерения остаточных напряжений при неравномерном распределении по глубине. Решение данных задач позволит разработать научно обоснованные рекомендации по оптимизации параметров лазерной ударной обработки и обеспечению максимального увеличения ресурса деталей из титановых сплавов.

ГЛАВА 2. ОРИГИНАЛЬНЫЙ ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЙ КОМПЛЕКС ЛАЗЕРНОЙ УДАРНОЙ ОБРАБОТКИ ИМСС УРО РАН

Современные исследования в области ЛУО требуют использования экспериментальных комплексов, способных обеспечивать широкий диапазон управляемых параметров лазерного воздействия, а также интегрированные средства регистрации и анализа остаточных напряжений. Наличие такой базы позволяет проводить систематические исследования влияния параметров обработки на формирование напряженно-деформированного состояния, что имеет принципиальное значение для прогнозирования усталостной долговечности и живучести конструкционных материалов.

Особое внимание при создании подобных комплексов уделяется универсальности, возможности подбора режимов обработки под различные материалы и условия эксплуатации деталей и конструкций, а также совмещению функций научно-исследовательского и прикладного характера. С одной стороны, комплекс должен обеспечивать высокую степень управляемости параметрами лазерного излучения (энергии в импульсе, плотности мощности энергии, длительности импульса, количества проходов, перекрытий и т.д.), что необходимо для изучения фундаментальных закономерностей взаимодействия электромагнитного излучения с веществом и формирования остаточных напряжений. С другой стороны, он должен быть пригоден для решения инженерных задач, связанных с упрочнением конкретных деталей и элементов конструкций сложной геометрии для демонстрации эффекта обработки.

В рамках настоящей работы была поставлена задача разработки и сборки программно-аппаратного комплекса, который объединяет в себе функции исследовательской установки и экспериментального технологического оборудования. Такой подход позволяет одновременно решать задачи прикладного характера и формировать научную основу для оптимизации режимов ЛУО и дальнейшего внедрения технологии в промышленное производство.

2.1. Твердотельный импульсный Nd:YAG лазер Beamtech SGR-Extra-10

Основным элементом комплекса является импульсный твердотельный Nd:YAG лазер Beamtech SGR-Extra-10 (рисунок 2.1) с модулятором дробности, основные характеристики которого представлены в таблице 2.1.

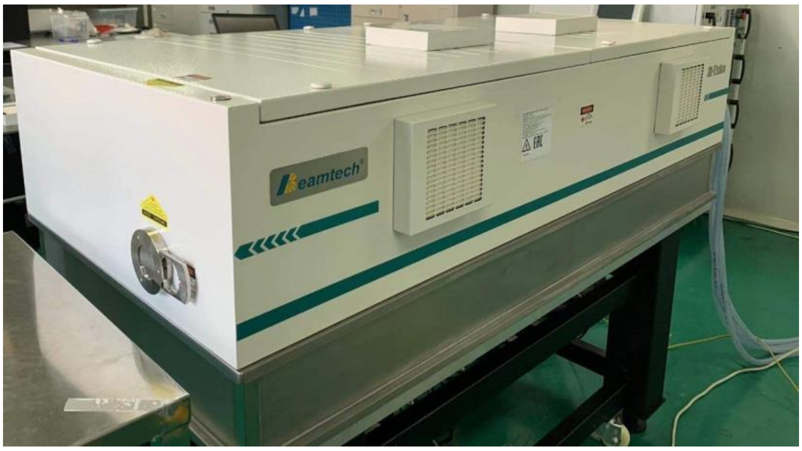


Рисунок 2.1 – Твердотельный лазер Beamtech SGR-Extra-10

Таблица 2.1 - Основные характеристики лазера Beamtech SGR-Extra-10

Длина волн	1064 нм
Максимальная частота импульсов	5 Гц
Максимальная энергия в импульсе	9 Дж
Длительность импульса	10 нс
Форма окуляра лазера	Круг диаметром 25 мм

Основная суть работы лазера заключается в том, что требуется изменение энергетического равновесия в материале лазера таким образом, чтобы энергия накапливалась в атомах, ионах или молекулах материала. Это достигается с помощью внешнего источника накачки, который переводит электроны с нижнего энергетического уровня на более высокий. Таким образом, излучение накачки создает «инверсию населенностей».

Электромагнитная волна с подходящей частотой, падающая на «инвертированный» лазерный материал, будет усиливаться, потому что падающие фотоны заставляют атомы на верхнем уровне переходить на нижний уровень, испуская дополнительные фотоны. В результате энергия извлекается из атомной системы и передается в поле излучения. Высвобождение накопленной энергии при взаимодействии с электромагнитной волной основано на вынужденном (индуцированном) излучении.

Режим работы лазера, широко используемый для генерации высокомощных импульсов, известен как модуляция добротности, или Q-Switch. Такое название режим получил благодаря тому, что его реализация приводит к изменению добротности Q резонатора. Коэффициент Q определяется как отношение запасенной энергии к потерям энергии за один цикл:

$$Q = \frac{\textit{накопл.эн.}}{\textit{потер.эн.}} \quad . \tag{2.1}$$

Режим модулирования добротности приводит к тому, что энергия накапливается в активной среде за счет оптической накачки, в то время как добротность резонатора снижается для предотвращения лазерной генерации. Несмотря на то, что накопленная энергия в активной среде высока, потери в резонаторе также высоки, поэтому лазерная генерация (вынужденное излучение) не возникает, а значит инверсия населенностей продолжает расти, достигая уровня, превышающего пороговое значение для нормальной генерации.

Время, в течение которого энергия может накапливаться, – это время жизни верхнего уровня. Если добротность резонатора резко повысить, накопленная энергия высвободится в виде очень короткого импульса высокой мощности.

Благодаря высокой инверсии населенностей активного элемента, система высвечивается (разряжается) за чрезвычайно короткое время. Результирующий пик мощности (гигантский импульс) на несколько порядков превышает мощность при свободной генерации. Благодаря чрезвычайно высокой мощности, такой импульс получил название «гигантский».

Типичная временная диаграмма модулирования добротности показана на рисунке 2.2. Низкая добротность резонатора не позволяет возникнуть лазерной генерации. Ближе к концу импульса лампы накачки, когда инверсия населенностей достигает своего максимального значения, добротность резонатора принимает высокое значение. В этот момент активная среда начинает генерировать огромное количество фотонов (вынужденное испускание), которое испускается резонатором в виде «гигантского» импульса.

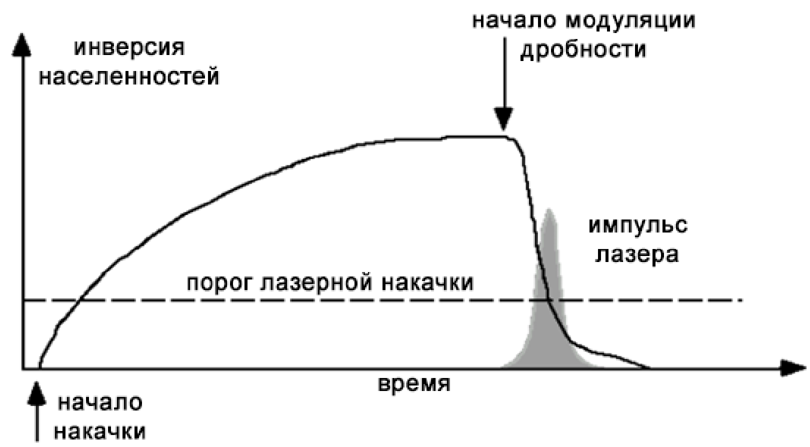
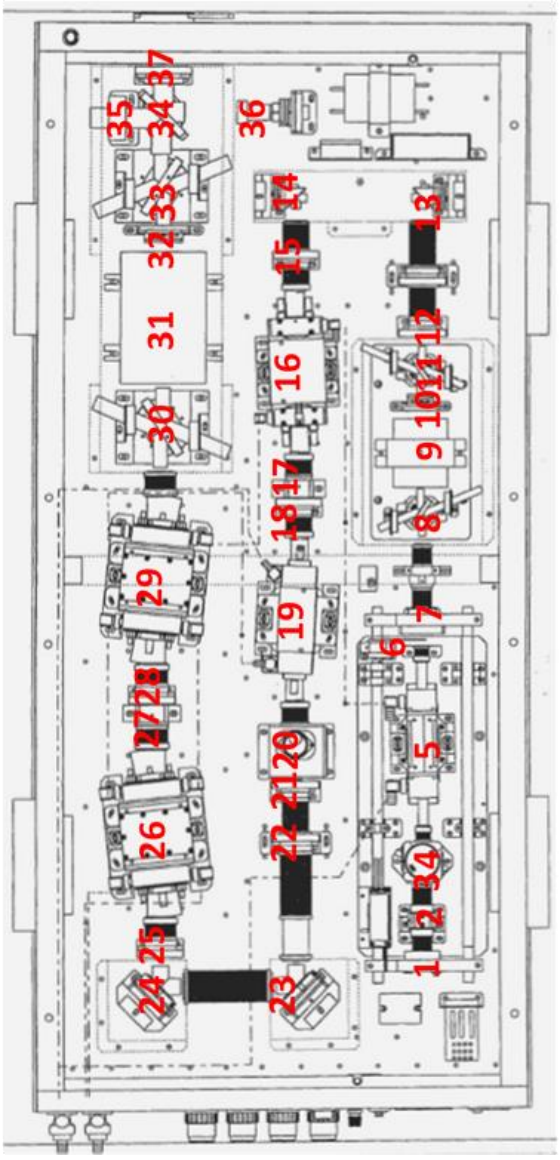


Рисунок 2.2 – Диаграмма модулирования добротности

Оптическая схема лазера представлена на рисунке 2.3.



1. Заднее зеркало
2. Модулятор дробности
3. 1/4 волновая пластина
4. Поляризатор
5. Камера осциллятора
6. Затвор
7. Выходное зеркало
8. Поляризатор
9. Магнитный сепаратор Фарадея
10. 1/2 волновая пластина
11. Поляризатор
12. Линза
13. 45-градусное отражающее зеркало
14. 45-градусное отражающее зеркало
15. Диафрагма
16. Усилитель (PRE)
17. Ротатор
18. Диафрагма
19. Усилитель (PRE)
20. Поляризатор
21. Линза
22. Линза
23. 45-градусное отражающее зеркало
24. 45-градусное отражающее зеркало
25. Диафрагма
26. Усилитель (AMP1)
27. Диафрагма
28. Линза
29. Усилитель (AMP2)
30. Поляризатор
31. Магнитный сепаратор Фарадея
32. 1/2 волновая пластина
33. Поляризатор
34. 45-градусное отражающее зеркало
35. Счетчик энергии
36. Лазерный диод
37. Выходное окно

Рисунок 2.3 – Схема оптического блока Nd:YAG лазера Beamtech SGR-Extra-10.

2.2. Набор объективов для лазера

Для реализации различной формы лазерных пятен могут использованы четыре оптических системы (рисунок 2.4), которые позволяет фокусировать луч: в круг диаметром 2 мм и квадраты со стороной 1 мм и 3 мм. При соответствующем подборе параметров лазерного ударного воздействия (частоты повторений импульса, энергии импульса, формы профиля луча) максимально возможная мощность воздействия, создаваемая на данной установке, составляет 90 ГВт/см^2.

Рисунок 2.4 – Набор объективов для Nd:YAG лазера Beamtech SGR-Extra-10

В таблице 2.2 представлен спектр возможный плотностей мощности лазерного ударного воздействия, реализуемых на установке, в зависимости от формы и размера профиля лазерного луча.

Таблица 2.2 – Спектр возможных плотностей мощности лазерного ударного воздействия в зависимости от формы и размера профиля лазерного луча

Профиль лазерного луча	**Площадь отпечатка, см^2**	**Энергия лазерного ударного воздействия, Дж**	**Плотность мощности лазерного ударного воздействия, ГВт/см^2**
Круг Ø2 мм	π10e-2	1	3,18
		2	6,37
		3	9,55
		4	12,74
		5	15,92
		6	19,11
		7	22,29
		8	25,48
		9	28,66

Продолжение таблицы 2.2

Квадрат со стороной 1 мм	10e-2	1	10
		2	20
		3	30
		4	40
		5	50
		6	60
		7	70
		8	80
		9	90
Квадрат со стороной 3 мм	9*10e-2	1	1,11
		2	2,22
		3	3,33
		4	4,44
		5	5,56
		6	6,67
		7	7,78
		8	8,89
		9	10

2.3. Роботизированный манипулятор STEP SR50

Управление лазером производится автоматически при помощи пульта роботизированного манипулятора (рисунок 2.5).

Рисунок 2.5 – Роботизированный манипулятор STEP SR50

Роботизированный шестиосевой манипулятор STEP SR50, обладающий грузоподъемностью до 50 кг и точностью позиционирования 0,25 мм, обеспечивает возможность автоматизированной обработки деталей произвольной геометрии.

Для расчета траекторий движения и формирования управляющих программ используется трехмерная модель детали, представляемая в формате STL и импортируемая в систему подготовки управляющих программ SprutCAM.

Сформированные траектории обработки конвертируются в управляющий код при помощи встроенного модуля Postprocessor Generator, реализованного на платформе .NET с использованием языка программирования C# и среды разработки Visual Studio Code. Внутри SprutCAM также реализована возможность написания кода на внутреннем языке Sprut4, применяемом для создания пользовательских операций, обработки событий и модификации траекторий инструмента.

Специализированное программное обеспечение, разработанное на базе платформы .NET, обеспечивает синхронизацию моментов включения и выключения лазера, подачи воды и воздуха с положением обрабатываемого образца для каждого режима обработки и конфигурации детали.

Управляющая программа загружается в пульт манипулятора и обеспечивает полностью автоматическое выполнение процесса лазерной обработки.

В ходе работы манипулятор автоматически позиционирует обрабатываемую деталь перед лазерным пучком так, чтобы луч падал нормально на поверхность. Управляющая система посредством TTL-сигнала подает команду лазерной установке на генерацию импульса. Манипулятор перемещает деталь со скоростью в диапазоне 0,1–500 мм/с, обеспечивая высокую точность позиционирования и равномерность наложения лазерных импульсов.

Линии проходов лазерного луча генерируются на основе трехмерной модели детали в формате STL, что позволяет обрабатывать поверхности сложной формы с высокой точностью и повторяемостью.

2.4. Автоматизированная система для измерения остаточных напряжений MTS3000-Restan

После обработки получаемые ОН оцениваются при помощи автоматизированной системы измерения остаточных напряжений MTS3000 – Restan (рисунок 2.6). Данная система используется для выполнения измерений методом тензометрического сверления отверстий с помощью высокоскоростной воздушной турбины (400 000 об / мин) в соответствии со стандартом ASTM E837.

На поверхности образца устанавливается тензодатчик с тремя измерительными решетками, в определенном месте которого просверливается отверстие диаметром 2 мм. Сверление происходит пошагово, в конце каждого шага при помощи установленного датчика фиксируются величины деформаций отверстия, возникающих при снятии сжимающих остаточных напряжений. Погрешность измерений деформации не превышает 1 мкм/м. На основе полученных данных решается обратная задача, результатом решения которой является профиль остаточных напряжений.

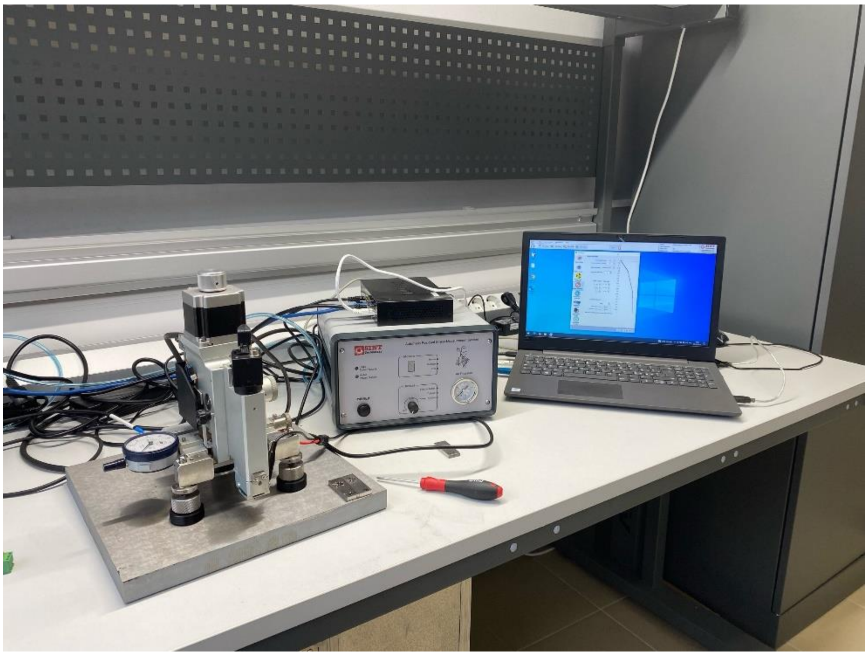


Рисунок 2.6 – Система для измерения ОН MTS3000-Restan

Обычно используется пять основных методов оценки распределения остаточных напряжений при сверлении отверстий: ASTM E837-13, относящийся к постоянному полю напряжений по толщине заготовки, ASTM E837-13, относящийся к неравномерному полю напряжений по толщине заготовки, ASTM E837-08, относящийся к постоянному полю напряжений по толщине заготовки, интегральный метод, относящийся к переменному по толщине полю напряжений (предложенный Г. Р. Шайером) и дифференциальный метод, относящийся к переменному по толщине полю напряжений на основе измерений коэффициента деформации (предложенный Х. Кокельманном и Vol. Шварцем).

2.5. Фотонный допплеровский измеритель скорости (ФДИС)

ФДИС (рисунок 2.7) предназначен для измерения скорости объектов в быстропротекающих процессах. Область его применения – экспериментальные измерения параметров быстропротекающих процессов в области физики экстремального состояния вещества.

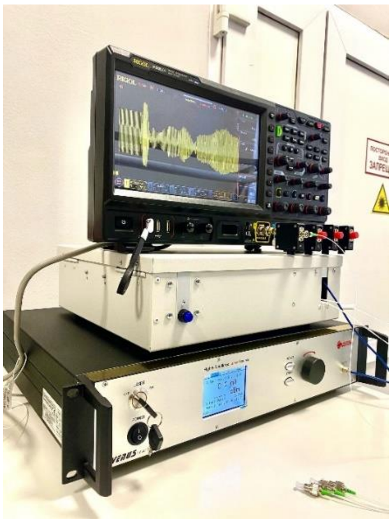


Рисунок 2.7 – Фотонный допплеровский измеритель скорости

ФДИС является комплексным прибором. В комплект входят осциллограф, одночастотный волоконный лазер, фотоприемники и измерительные зонды (4 шт.). Прибор предназначен для измерения скорости свободной поверхности образца при динамическом воздействии с помощью эффекта Доплера. Диапазон измерения скорости составляет 2 – 1200 м/с с точностью ±1 м/с.

Использование фотонного доплеровского измерителя скорости позволяет измерить скорость свободной поверхности образца по время лазерного удара. На рисунке 2.8 представлена принципиальная измерительная схема.

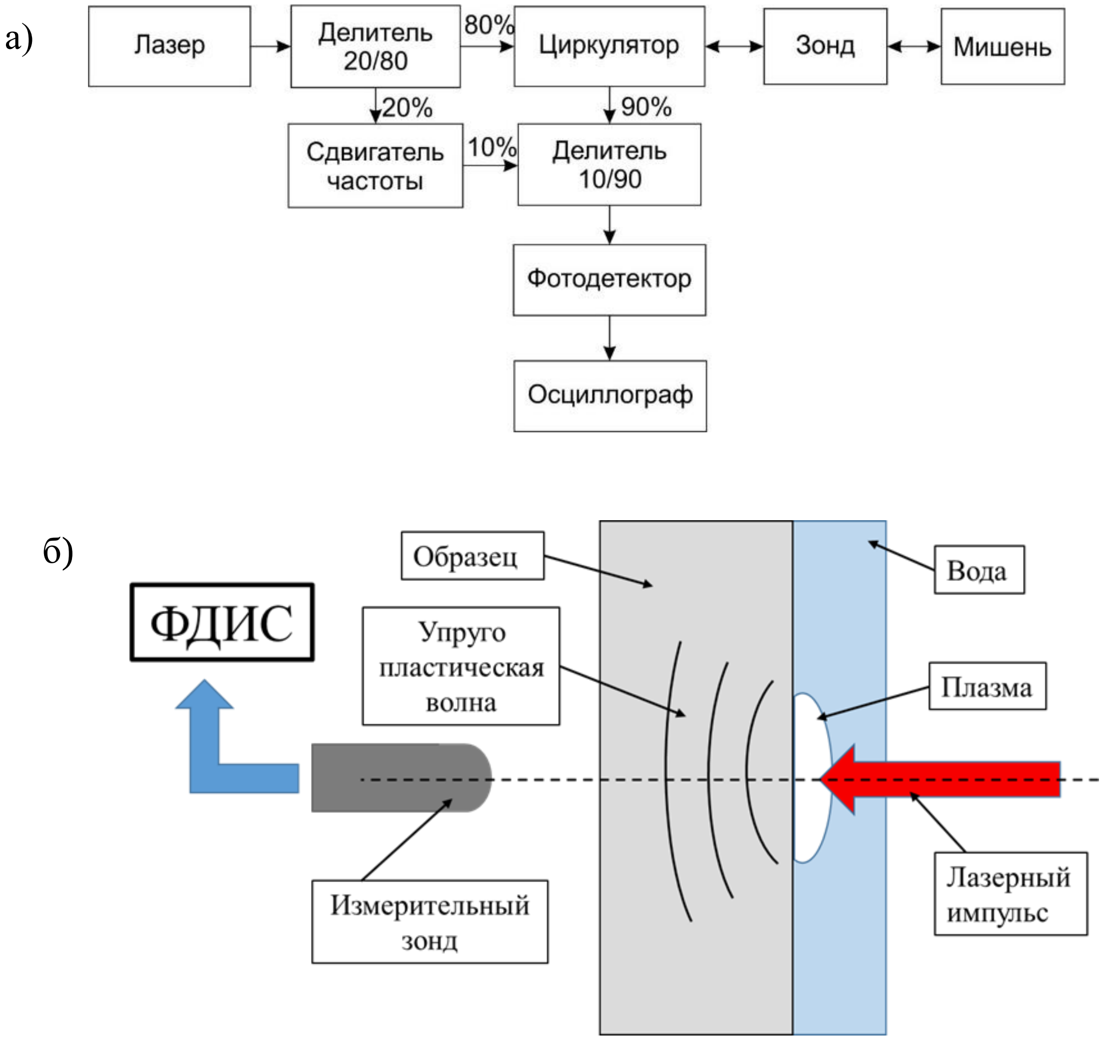


Рисунок 2.8 – Измерительная схема ФДИС (а) и схема проведения эксперимента (б)

Выводы

Разработанный комплекс сочетает функции исследовательской установки, обеспечивающей проведение фундаментальных экспериментов по изучению закономерностей взаимодействия электромагнитного излучения с веществом и формирования остаточных напряжений при лазерной ударной обработке, и экспериментального технологического оборудования, позволяющего отрабатывать режимы упрочнения и выполнять мелкосерийную обработку образцов и деталей.

В состав комплекса входят лазерный источник с регулируемыми параметрами, оптические системы формирования пятна, модуль управления и синхронизации, а также блока диагностики и программного обеспечения для обработки результатов. Такое решение обеспечивает гибкость настройки и высокую точность воспроизведения заданных режимов обработки.

Комплекс позволяет исследовать закономерности формирования остаточных напряжений в поверхностных слоях конструкционных материалов в зависимости от параметров лазерного воздействия. Это открывает возможность целенаправленного управления характеристиками напряженно-деформированного состояния.

ГЛАВА 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ, ФОРМИРУЕМЫХ В ПРОЦЕССЕ ЛУО

Основным результатом ЛУО являются остаточные напряжений, которые в последствии обеспечивают повышение усталостной долговечности образца. Несмотря на длительную историю исследования остаточных напряжений в металлах методы их измерения остаются вызывают большое число споров, часто нестандартизованы и трудно сопоставимы. Особенно сложным является измерение эпюр остаточных напряжений по глубине в материале. Все методы построения распределения остаточных напряжений по глубине являются разрушающими и их применение требует глубокого понимания механики процесса релаксации материала в процессе послойного разрушения и аккуратного использования методов механики сплошной среды для расчета величины остаточных напряжений по измеренным перемещениям или деформациям. Одним из перспективных по мнению автора работы является метод сверления отверстий.

В первой части этой главе будет подробнее описано измерение остаточных напряжений методом сверления отверстий, а также выбор методики расчета на основе сопоставления доступных в имеющемся программном обеспечении алгоритмов пересчета деформаций в напряжения.

Во второй части с использованием выбранного алгоритма пересчета будет исследовано влияние различных параметров лазерной ударной обработки на создаваемое поле остаточных напряжений.

3.1. Метод сверления отверстий

Полный процесс измерения остаточных напряжений с помощью пошагового сверления отверстий описан в стандарте ASTM E837. Основные этапы этого метода описаны ниже.

1) Установка трехэлементного тензорезистора.

Тензорезистор содержит три чувствительных элемента, расположенных под углами 0°, 45° и 90°. Центр трех элементов должен точно совпадать с будущим центром отверстия. Эксцентриситет и несоосность между центром сверла и розеткой приводят к погрешностям измерений. Предыдущие исследования показали, что 10% несоосность радиуса отверстия может привести к 5% погрешности измерений. Стандарт ASTM E837 ограничивает смещение сверла и центра розетки в пределах $\pm 0{,}004D_{\text{отв.}}$ или ±0,025 мм, в зависимости от того, какое из этих значений больше. Очень важно правильно ориентировать датчик относительно главных направлений предполагаемых напряжений.

2) Проверка работы тензорезистора.

После приклеивания и подключения датчика к измерительной системе проводится проверка электрической целостности цепи, нулевых показаний и чувствительности. Это обеспечивает корректность будущих измерений.

3) Сверление отверстия.

После установки датчика осуществляется поэтапное сверление отверстия строго по центру тензорезисторной розетки. Диаметр отверстия, как правило, составляет 2.0 мм, а глубина сверления — до 1 мм (в зависимости от толщины детали). Сверление проводится послойно, с остановками на заданных глубинах (например, через каждые 0.05 мм или 0.1 мм), чтобы на каждом шаге зафиксировать деформации.

4) Измерение деформаций.

После каждой ступени сверления фиксируются показания с тензорезисторных элементов: ε_1, ε_2, ε_3. Эти данные отражают локальные упругие деформации, вызванные снятием напряжений вокруг отверстия. Измерения проводятся до достижения нужной глубины или до стабилизации данных.

5) Обработка измеренных данных.

Собранные данные о деформациях обрабатываются для вычисления остаточных напряжений. В зависимости от используемого метода обработки (по стандарте ASTM 837, интегральный или дифференциальный), данные преобразуются в значения напряжений на разных глубинах.

- При использовании стандарта ASTM E837-13, применяются три калибровочных коэффициента (A, B, C).
- При использовании интегрального метода, решается обратная интегральная задача с применением численных алгоритмов и регуляризации.
- При использовании дифференциального метода, напряжения оцениваются на основе разности деформаций между шагами.

3.1.1. Алгоритмы пересчета остаточных деформаций в ОН

3.1.1.1. Интегральный метод

Интегральный метод представляет собой обобщенный математический подход к расчету остаточных напряжений из измеренных деформаций. Он не привязан к какому-либо стандарту и может применяться в научных исследованиях, особенно при работе со сложными геометриями, неоднородными материалами или произвольным распределением шагов сверления.

Основная идея метода заключается в том, что измеренные деформации на поверхности (или на каждом шаге углубления отверстия) являются результатом интегрального эффекта от распределения остаточных напряжений по глубине. Математически это записывается в виде интегрального уравнения свертки:

$$\varepsilon_i = \int_0^h K_i(z) \cdot \sigma(z) dz \quad , \tag{3.1}$$

где ε_i – измеренная деформация на i-м шаге сверления, $K_i(z)$ – функция влияния (определяется на основе численного решения о деформировании отверстия в бесконечной упругой среде), $\sigma(z)$ – искомое напряжение на глубине z, h – глубина отверстия.

Для практической реализации интеграл дискретизируется, и задача сводится к решению системы линейных уравнений. Однако обратная задача является плохо обусловленной — даже незначительные шумы в измерениях могут вызывать сильные колебания в восстановленном распределении напряжений. Поэтому обязательно используется регуляризация (например, метод Тихонова или сингулярное разложение матрицы), чтобы получить физически правдоподобный результат.

Интегральный метод требует расчета матрицы влияния (influence matrix), которая индивидуальна для каждого случая (геометрии отверстия, шага сверления, свойств материала). Это делает его мощным и гибким инструментом, но также требует более высокой квалификации и численных ресурсов.

3.1.1.2. Дифференциальный метод

Дифференциальный метод является одним из подходов к восстановлению остаточных напряжений по результатам поэтапного сверления отверстия. Он основан на предположении, что изменения измеренных деформаций между соседними глубинами сверления отражают влияние напряжений в тонком слое материала, удаляемом при этом шаге. Метод был впервые систематически предложен Кокельманом [137] и получил широкое распространение в инженерной практике благодаря своей простоте и хорошей разрешающей способности по глубине.

В отличие от интегрального метода, в котором измеренные деформации интерпретируются как результат накопленного влияния всех верхних слоев материала, дифференциальный метод рассматривает вклад только одного –

локального – слоя, находящегося между двумя соседними глубинами сверления. Таким образом, напряжения определяются шаг за шагом, путем дифференцирования кривой деформаций.

Предполагается, что каждый удаленный слой "высвобождает" определенную долю остаточных напряжений, вызывая перераспределение напряжения и упругую деформацию в оставшемся теле.

Остаточные напряжения рассчитываются послойно по следующей формуле (в упрощенном виде для тонких слоев):

$$\sigma(z_i) = \frac{E}{1-\nu} A_{ij}^{-1} \Delta\varepsilon_j \quad , \tag{3.2}$$

где $\sigma(z_i)$ – остаточное напряжение в слое I, E – модуль упругости, N – коэффициент Пуассона, $\Delta\varepsilon_j$ – измеренное изменение деформации после удаления j-го слоя, A_{ij} – коэффициенты чувствительности, которые определяют вклад напряжений в каждом слое в общую деформацию на поверхности (рассчитываются с помощью численного моделирования, например, методом конечных элементов).

Это система линейных уравнений, которую можно решить для определения значений остаточных напряжений в каждом слое.

3.1.1.3. ASTM E837-13: для неоднородного распределения ОН по глубине (ASTM E837-13: Non-Uniform Stress Field)

Метод ASTM E837-13: Non-Uniform Stress Field – это стандартизированный подход к определению остаточных напряжений в материале методом сверления отверстия, который учитывает неравномерное распределение напряжений по глубине. Этот метод является частью международного стандарта ASTM E837-13, официально признанного и применяемого в промышленности и исследовательской практике.

В отличие от упрощенного варианта с равномерным распределением остаточных напряжений, где предполагается постоянное напряжение по всей глубине отверстия, этот метод позволяет оценивать, как остаточные напряжения изменяются с глубиной – слой за слоем. Это особенно важно в случае поверхностных обработок, сварки, шлифования, закалки и других процессов, вызывающих переменное распределение внутренних напряжений.

Остаточные напряжения, первоначально присутствовавшие в материале, оцениваются по измеренным релаксированным деформациям (ε_1, ε_2 и ε_3) на каждом шаге по глубине отверстия (j) и основаны на теории линейной упругости. Рассчитанные напряжения вдоль осей тензодатчиков определяются как σ_1 и σ_3, а касательное напряжение, ориентированное под углом 45°, как τ_{13}. Комбинированные деформации (уравнения (3.3)-(3.5)) и соответствующие комбинированные напряжения (уравнения (3.6)-(3.8)) могут быть определены для последовательности глубин напряжения (k), где $k \le j$. Уравнения (3.9)-(3.11) дают оценку стандартной погрешности комбинированных деформаций. n – количество наборов данных о деформациях на различных уровнях глубины отверстия. Погрешность в измеренных деформациях должна быть охарактеризована, так как даже небольшие ошибки в деформациях могут привести к пропорционально большим ошибкам в расчетных напряжениях:

$$p_j = \frac{(\varepsilon_3 + \varepsilon_1)_j}{2} \quad , \tag{3.3}$$

$$q_j = \frac{(\varepsilon_3 - \varepsilon_1)_j}{2} \quad , \tag{3.4}$$

$$t_j = \frac{(\varepsilon_3 + \varepsilon_1 - 2\varepsilon_2)_j}{2} \quad , \tag{3.5}$$

$$P_k = \frac{((\sigma_3)_k + (\sigma_1)_k)}{2} \quad , \tag{3.6}$$

$$Q_k = \frac{((\sigma_3)_k - (\sigma_1)_k)}{2} \quad , \tag{3.7}$$

$$T_k = (\tau_{13})_k \quad , \tag{3.8}$$

$$p_{std^2} = \sum_{j=1}^{n-3} \frac{(p_t - 3p_{j+1} + 3p_{j+2} - p_{j+3})^2}{20(n-3)} \quad , \tag{3.9}$$

$$q_{std^2} = \sum_{j=1}^{n-3} \frac{(p_j - 3q_{j+1} + 3q_{j+2} - q_{j+3})^2}{20(n-3)} \quad , \tag{3.10}$$

$$t_{std^2} = \sum_{j=1}^{n-3} \frac{(t_j - 3t_{j+1} + 3t_{j+2} - t_{j+3})^2}{20(n-3)} \quad . \tag{3.11}$$

Интегральный метод связывает вышеуказанные уравнения через матричные соотношения, определенные в уравнениях 3.12-3.14, где E и v – модуль упругости и коэффициент Пуассона материала соответственно; $\bar{a}$ и $\bar{b}$ – калибровочные матрицы:

$$\bar{a}\vec{P} = \frac{E}{1+\nu}\vec{p} \quad , \tag{3.12}$$

$$\bar{b}\vec{Q} = E\vec{q} \quad , \tag{3.13}$$

$$\bar{b}\vec{T} = E\vec{t} \quad . \tag{3.14}$$

Калибровочная матрица $\bar{a}$ в уравнении (3.12) определяется как релаксация деформации, вызванная единичным изотропным напряжением в приращении j на глубине отверстия k. Калибровочная матрица $\bar{b}$ в уравнениях (3.13) и (3.14) имеет аналогичную физическую интерпретацию, но применяется к касательным напряжениям. Компоненты матриц определяются на основе полиномиальных коэффициентов, приведенных в стандарте ASTM. Эти коэффициенты получены путем калибровки методом конечных элементов для различных диаметров отверстий и типов тензорезисторов. Стандарты ASTM описывают процедуры интерполяции коэффициентов в зависимости от типа тензорезистора, толщины образца и фактически полученного диаметра отверстия. Для получения дополнительной информации по определению полиномиальных коэффициентов и аналитических процедур в зависимости от категории толщины следует обратиться к стандарту ASTM.

Регуляризация Тихонова предлагается как метод для предотвращения "плохой обусловленности" матриц $\overline{a}$ и $\overline{b}$ при использовании большого количества шагов по глубине отверстия. Если регуляризация не применяется, небольшие ошибки в измеренных деформациях могут привести к значительным ошибкам в рассчитанных напряжениях. Формируется трехдиагональная матрица "второй производной" (c), где число строк соответствует числу шагов по глубине отверстия, используемых в расчетах. Первая и последняя строки содержат только нули, а все прочие строки имеют вид [-1 2 -1] вдоль диагонали. Уравнения (3.12)-(3.14) дополняются регуляризатором второго порядка по Тихонову (модель сглаживания), как определено в уравнениях (3.15)-(3.17). Коэффициенты αP, αQ и αT регулируют степень регуляризации. Обычно подходят значения в диапазоне от 10^{-4} до 10^{-6}. Из-за регуляризации нерегуляризованные деформации не полностью соответствуют фактическим.

$$(\overline{a}^T\overline{a}+\alpha_P\overline{C}^T\overline{C})\vec{P}=\frac{E}{1+\nu}\overline{a}^T\vec{p}\ , \tag{3.15}$$

$$(\overline{b}^T\overline{b}+\alpha_Q\overline{C}^T\overline{C})\vec{Q}=E\overline{b}^T\vec{q}\ , \tag{3.16}$$

$$(\overline{b}^T\overline{b}+\alpha_T\overline{C}^T\overline{C})\vec{T}=E\overline{b}^T\vec{t}\ . \tag{3.17}$$

"Несоответствующие" вектора деформаций (p_{misfit}, q_{misfit} и t_{misfit}) определяются по уравнениям (3.18)-(3.20), а среднеквадратичное значение этих векторов – по уравнениям (3.21)-(3.23). Значения коэффициентов регуляризации должны быть оптимизированы по уравнениям (3.24)-(3.26) до тех пор, пока среднеквадратичное отклонение рассогласования не будет находиться в пределах 5% от стандартной ошибки комбинированных деформаций.

$$\vec{p}_{misfit} = \vec{p} - \frac{1+\nu}{E}\bar{a}\vec{P} \tag{3.18}$$

$$\vec{q}_{misfit} = \vec{q} - \frac{1}{E}\bar{a}\vec{Q} \tag{3.19}$$

$$\vec{t}_{misfit} = \vec{t} - \frac{1}{E}\bar{a}\vec{T} \tag{3.20}$$

$$p_{rms}{}^{2} = \frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n}(\vec{p}_{misfit})_j^2 \tag{3.21}$$

$$q_{rms}{}^{2} = \frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n}(\vec{q}_{misfit})_j^2 \tag{3.22}$$

$$t_{rms}{}^{2} = \frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n}(\vec{t}_{misfit})_j^2 \tag{3.23}$$

$$(\alpha_p)_{new} = \frac{p_{std}^2}{p_{rms}^2}(\alpha_p)_{old} \tag{3.24}$$

$$(\alpha_q)_{new} = \frac{q_{std}^2}{q_{rms}^2}(\alpha_q)_{old} \tag{3.25}$$

$$(\alpha_t)_{new} = \frac{t_{std}^2}{t_{rms}^2}(\alpha_t)_{old} \tag{3.26}$$

Декартовы компоненты напряжений на каждой номинальной глубине могут быть определены по уравнениям (3.27)-(3.28). Главные напряжения и их направления определяются по уравнениям (3.30) и (3.31).

$$(\sigma_1)_j = P_j - Q_j \tag{3.27}$$

$$(\sigma_3)_j = P_j + Q_j \tag{3.28}$$

$$(\tau_{13})_j = T_j \tag{3.29}$$

$$(\sigma_{\max})_k, (\sigma_{\min})_k = P_k \pm \sqrt{Q_k^2 + T_k^2} \tag{3.30}$$

$$\beta_k = \frac{1}{2}\tan^{-1}\left(\frac{-T_k}{-Q_k}\right) \tag{3.31}$$

3.2. Метод рентгеновской дифракции

Способ измерения основан на взаимодействии рентгеновских лучей с кристаллической решеткой материала. Его физические основы были описаны в первой главе.

Сам процесс измерения состоит из следующих шагов:

1. Установка образца – так как съемка происходит лишь в одном направлении, а результат нужен в двух, то нужно соблюдать точность позиционирования.
2. Выбор кристаллографической плоскости – в данном оборудовании имеется база данных материалов, вшитых в программное обеспечение, в ней имеются материалы, с которыми производилась работа соответственно на этих параметрах и производились измерения. По условиям метода $\sin^2\psi$

выбираются плоскости с высокими Бреговскими углами (2θ>120°), так как дальние порядки углов более чувствительны к деформациям.

3. Дифракционные пики регистрируются на разных углах (настраиваются в ПО), в данной работе измерения выполнялись по 15-20 углам в диапазоне ±25 градусов.
4. Построение графика dψ от sin2ψ – при помощи линейной аппроксимации определяем наклон прямой m, который связан с напряжениями.
5. Расчет напряжений осуществляется по формуле:

$$\sigma = \frac{Em}{(1+\nu)d\psi} \tag{3.32}$$

Глубина травления контролировалась индикатором часового типа с точностью измерения в 0,01 мм.

3.3. Сравнение результатов измерения ОН

В данном разделе проводится сравнение результатов пересчета остаточных напряжений при помощи различных алгоритмов метода сверления отверстий с напряжениями, полученными методом рентгеновской дифракции.

В качестве исследуемого материала был взят жаропрочный никелевый сплав Инконель 718, механические свойства которого представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Механические свойства никелевого сплава Инконель 718

Механические свойства	Величины
Коэффициент Пуассона	0,29
Модуль Юнга	190 ГПа
Предел текучести	1180 МПа
Предел прочности	1260 МПа

Для исследования режимов лазерной ударной обработки были предложены образцы следующего вида (рисунок 3.1), прямоугольные образцы с двумя квадратными областями обработки (для возможности изучения остаточных напряжений разными методами)

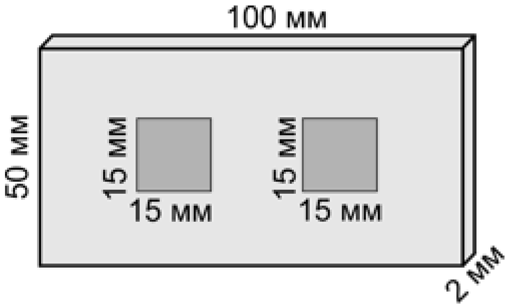


Рисунок 3.1 – Чертеж образца для исследования методов измерения ОН

Вырезка образцов из листа производилась электроэрозионным станком для того, чтобы исключить появления дополнительных остаточных напряжений.

Испытания проводились с использованием квадратного лазерного пятна со стороной 1 мм, энергии импульса 2 Дж и без перекрытий. В процессе ЛУО защитное покрытие не использовалось, а в качестве ограничивающего слоя использовался слой текущей воды толщиной 1 мм.

Для сравнения с методом рентгеновской дифракции были взяты следующие методы пересчета ОН: интегральный, дифференциальный и стандартизированный метод ASTM E837-13: для неравномерного распределения остаточных напряжений по глубине. Помимо этого, для каждого из методов бралось два типа распределения шагов измерений по глубине: линейное и кубическое.

На рисунке 3.2 представлены полученные результаты измерений остаточных напряжений. Для наглядности представления результатов сначала для каждой из трех методик проводилось сравнение измерений для различных распределений шагов по глубине (линейное и кубическое).

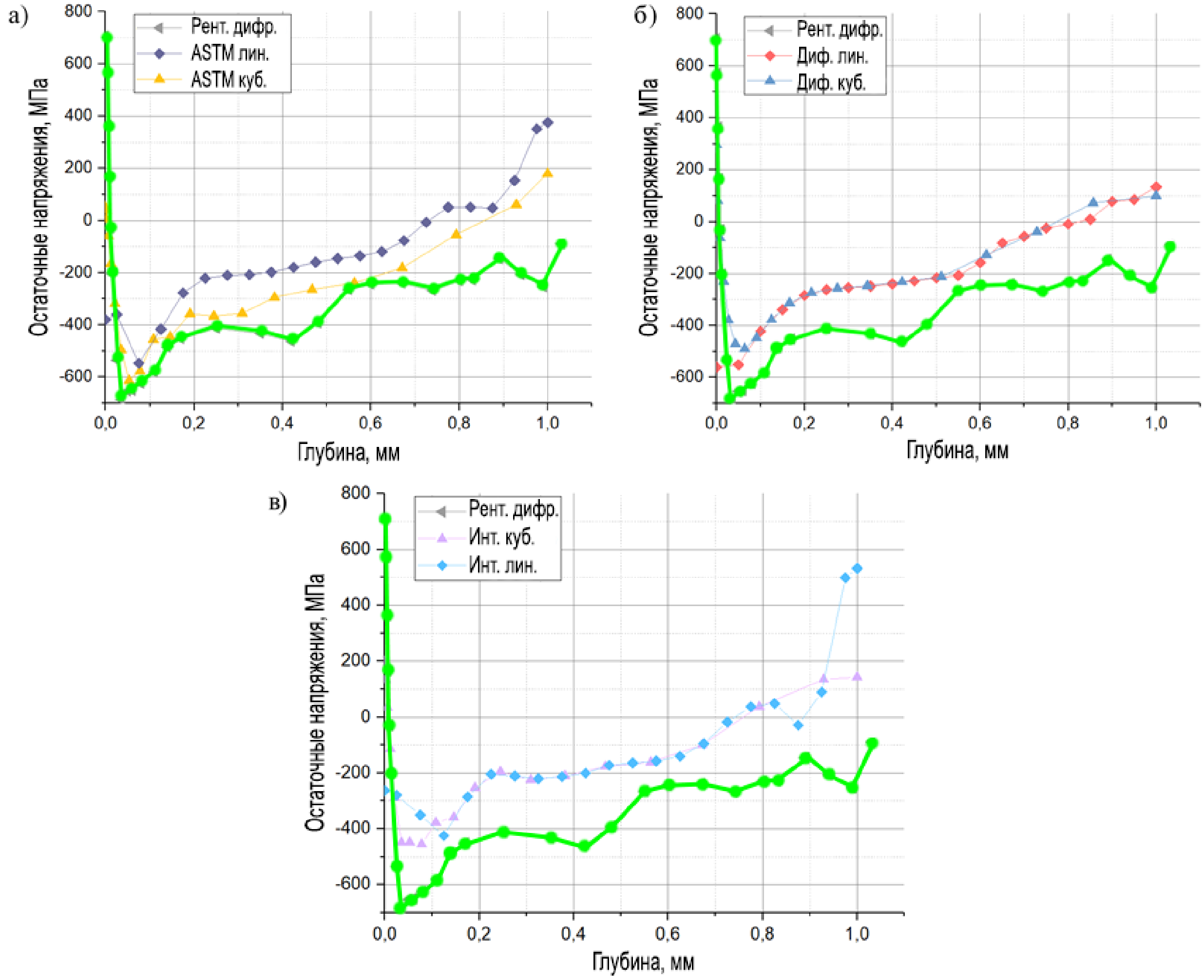


Рисунок 3.2 – Сравнение профилей нормальных ОН по оси X, полученных дифракционным методом сверления отверстий с различным распределением шагов измерений: а) для метода ASTM 837E; б) для дифференциального метода; в) для интегрального метода

Исходя из графиков можно сделать следующие выводы. Распределение шагов измерения не оказывает значительного влияния на величины получаемых ОН, зато дает более детальную картину о поле ОН вблизи поверхности (на глубине до 50 мкм). Это позволяет зафиксировать растягивающие напряжения, которые ожидаемо появляются на поверхности образцов, подверженных упрочнению без защитного покрытия.

В связи с полученным выше результатами далее проведено сравнение всех методик пересчета с кубическим распределением шагов измерения по глубине (рисунок 3.3).

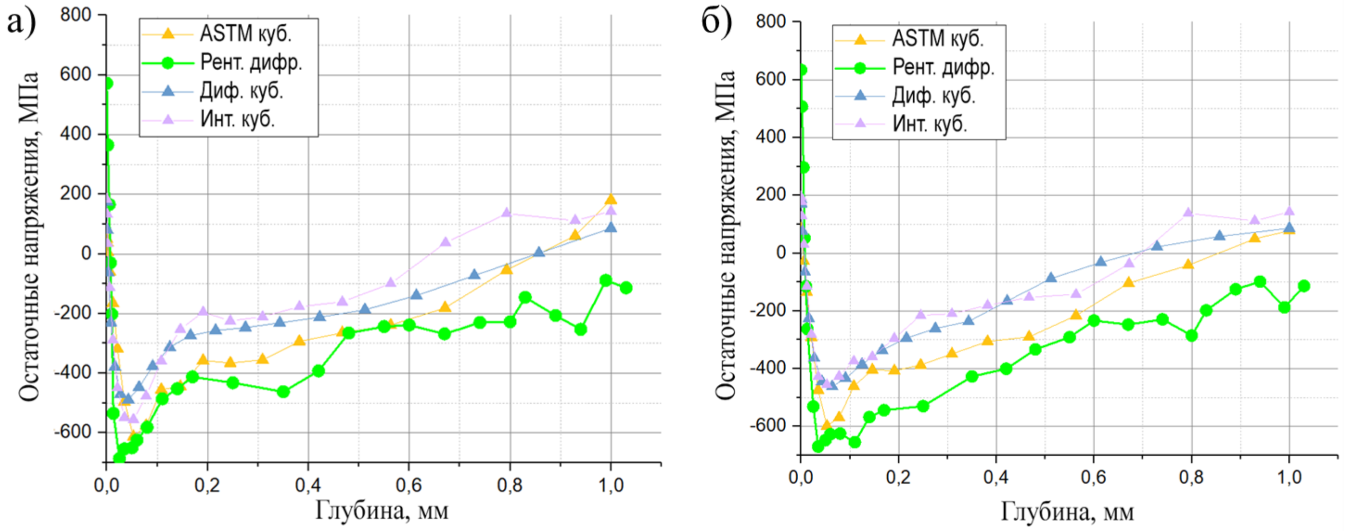


Рисунок 3.3 – Сравнение профилей ОН полученных методом сверления отверстий и дифракционным методом: а) нормальные напряжения вдоль оси X; б) нормальные напряжения вдоль оси Y

Из анализа полученных данных можно сделать вывод, что с точки зрения характера кривой распределения ОН, их максимальной величины и глубины большее совпадение с методом рентгеновской дифракции имеет стандартизированный метод с кубическим распределением шагов измерений. Единственное, в чем он уступает остальным методикам пересчета – это в точности определения величины растягивающих напряжений на поверхности материала. При этом необходимо отметить, что все методы измерений могут давать большую погрешность из-за качества поверхности, вызванной появлением нагара вследствие прямого воздействия лазерного излучения.

3.4. Влияние интенсивности лазерного воздействия, перекрытий и количества проходов лазера на создаваемые в процессе обработки ОН

3.4.1. Объект исследования

Объектом исследования являются плоские образцы, изготовленные из титанового сплава ВТ6, толщиной 2 миллиметра. Геометрия образцов представлена на рисунке 3.4.

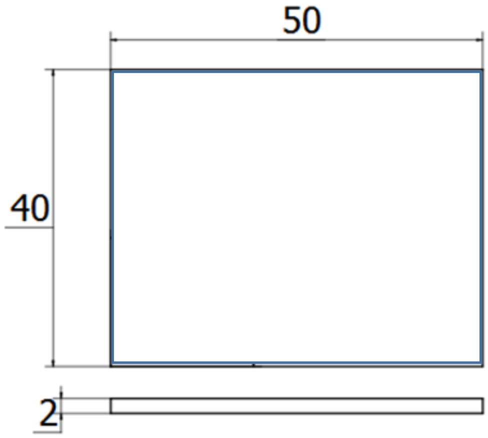


Рисунок 3.4 – Геометрия плоских образцов

Химический состав образов представлен в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Химический состав материала ВТ6 по ГОСТ 19807-91

AL	V	Si	Fe	C	O2	N2	H2	other
5.3-6.8	3.5-5.3	≤0.10	≤0.30	≤0.10	≤0.2	≤0.05	≤0.015	≤0.30

3.4.2. Условия обработки и измерения ОН

При ЛУО имеется возможность регулировать такие параметры как энергию импульса лазерного излучения, форму пятна лазерного луча, процент перекрытия между импульсами, количество проходов. Для оценки влияния параметров обработки на профиль остаточных напряжений реализованы 30 режимов обработки.

При обработке в качестве поглощающего слоя использовалась алюминиевая фольга толщиной 80 мкм на клеевой основе. Прочностных характеристик используемого защитного покрытия достаточно для реализации режимов обработки, в которых реализуется плотность мощности энергии менее 16 ГВт/см^2 и перекрытии менее 50%. Частота следования импульсов лазера составляла 5 Гц. По представленным режимам обработана серия плоских образцов (рисунок 3.5) и измерен профиль ОН.

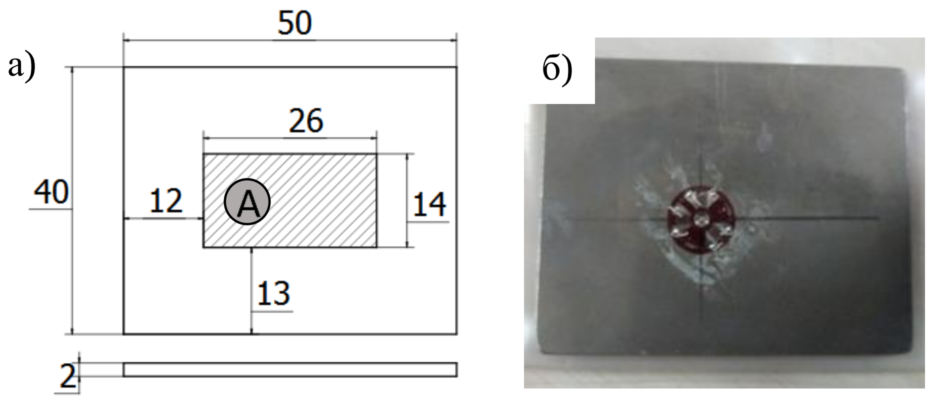


Рисунок 3.5 – Геометрия и фотография плоских образцов для определения профилей ОН

В таблице 3.3 приведены параметры ЛУО, которые варьировались в ходе обработки.

Таблица 3.3 – Варьируемые параметры обработки

Энергия, Дж	1, 2, 3, 4, 8
Перекрытия, %	0, 30, 50
Геометрия пятна	Круг Ø2 мм, квадрат со стороной 1 мм
Количество проходов	1, 2

3.4.3. Результаты эксперимента

Результаты эксперимента представлены на рисунках 3.6 и 3.7. Размерность для величины ОН приведена – относительных единицах. ОН нормировались на максимальную величину сжимающих ОН из всех исследованных режимов ЛУО.

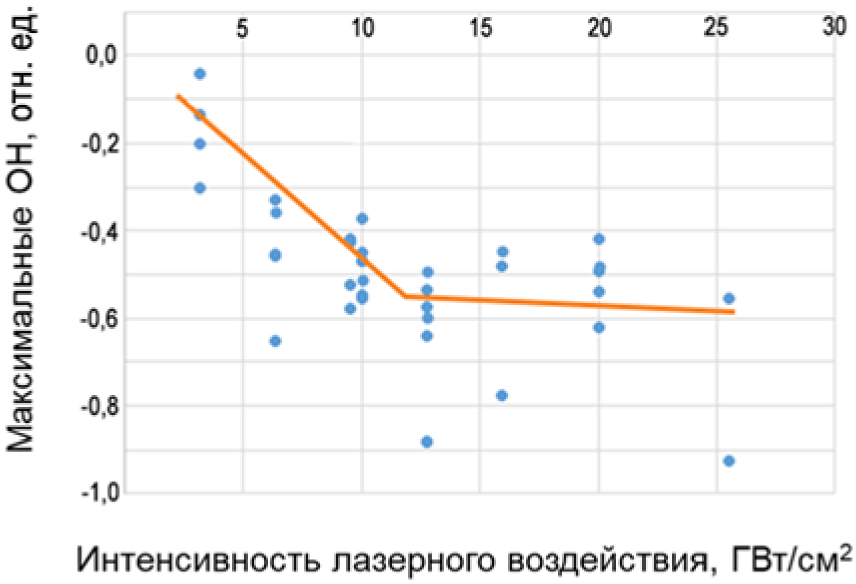


Рисунок 3.6 – Зависимость максимальных ОН от плотности мощности энергии

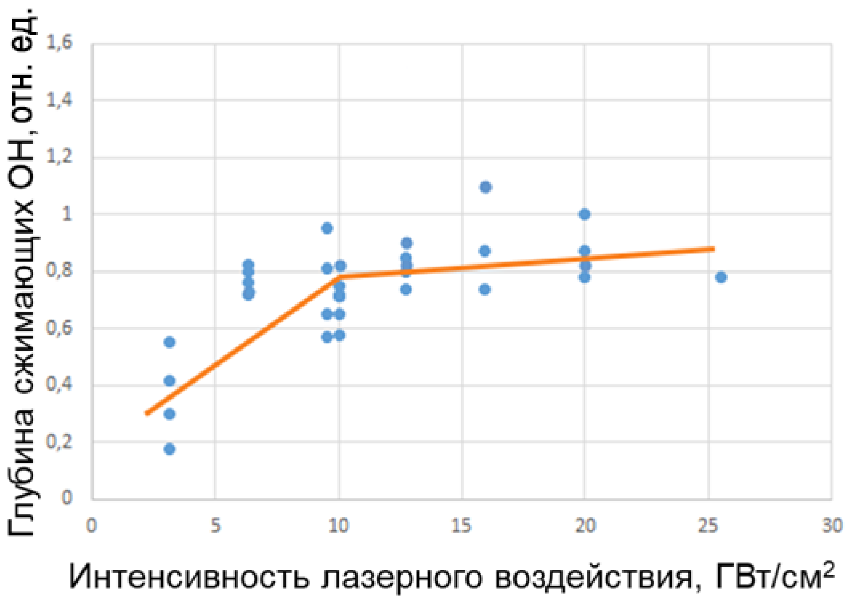


Рисунок 3.7 – Зависимость глубины ОН от плотности мощности энергии

Анализируя представленные выше данные, можно заключить, что при плотности мощности свыше 10 ГВт/см^2 уровень остаточных напряжений в образцах титана ВТ6 выходит на асимптоту. При увеличении числа проходов уровень ОН возрастает на 10-15% вне зависимости от формы.

Приведенные на рисунке 3.7, иллюстрирующем глубину остаточных напряжений (обращение остаточных напряжений в ноль), данные показывают, что при плотности мощности больше 10 ГВт/см^2 при одном проходе асимптоты по глубине воздействия не наблюдается, глубина линейно увеличивается. При увеличении числа проходов до двух удается увеличить глубину прорабатываемого слоя на 30 %.

В целом два прохода позволяют получить уровень ОН и глубину воздействия выше по сравнению с одним проходом. Процент перекрытия также позволяет изменить уровень и глубину ОН. Однако стоит иметь в виду, что при перекрытии в 50% и более происходит воздействие на уже обработанный материал и это может быть аналогично случаю с несколькими проходами и меньшим перекрытием. При плотности мощности более 15 ГВт/см^2 и перекрытии 50 % при обработке происходит разрыв фольги.

Явного влияния формы пятна на глубину ОН и уровень наведенных сжимающих ОН не выявлено. При квадратном пятне влияние перекрытия на глубину ОН проявляется слабее, чем при круглом пятне.

Увеличение процента перекрытия приводит к увеличению глубины и уровня сжимающих ОН.

Теоретический анализ процесса распространения упругопластической волны в материале позволяет утверждать, что на величину остаточных напряжений влияет амплитуда давления и как следствие плотность мощности энергии. Глубина остаточных напряжений определяется длительностью импульса. Смена асимптотики зависимости величины остаточных напряжений от плотности энергии в точке 10 ГВт/см^2 подтверждает эффект образования второго плазменного факела на границе ламинарный поток воды – воздух, ограничивающего передачу энергии лазерного излучение к поверхности материала.

Данный вывод подтверждает работа [138]. Плазма вторичного факела начинает поглощать значительную часть энергии лазера, приводя к тому, что повышение мощности лазера не вызывает дальнейшего повышения пикового давления первичной плазмы или даже приводит к его снижению. Такое явление называют оптическим пробоем. Он может быть зафиксирован и обработке первичным лучом лазера при достижении им некоторой пороговой мощности (обычно 8-10 ГВт/см^2).

3.5. Влияние поглощающего слоя на эффективность ЛУО

Как уже было упомянуто в первой главе, поглощающего покрытия играют не маловажную роль в эффективности лазерной ударной обработке. Поэтому целью данного этапа работы является изучение влияния различных материалов поглощающих покрытий на формируемые в процессе обработки ОН и микротвердость.

3.5.1. Аналитическая оценка эффективности ЛУО с различными материалами защитного покрытия

Для оценки эффективности защитного слоя (расчета доли энергии, которая будет отражаться при использовании алюминиевой фольги, виниловой ленты и краски) используем одномерную модель расширения плазмы и результаты решения задачи о распространении упругих волн в слоистой среде. Для режим ограниченной абляции, использовав связь пикового давления плазмы с плотностью мощности (уравнение (1.26)), где Z – акустический импеданс между поглощающим и защитным слоями, который находится по формуле (3.33).

$$\frac{2}{Z} = \frac{1}{Z_{покр.}} + \frac{1}{Z_{H_2O}} \tag{3.33}$$

Используя величины акустических импедансов для воды, титана, виниловой ленты, алюминия и краски: $Z(H_2O) = 0,15 \cdot 10^6$ $г/см^2\ с^{-1}$, $Z(Ti) = 2,2 \cdot 10^6$ $г/см^2\ с^{-1}$, $Z(Al)$

= 1,45·10⁶ г/см² с⁻¹, Z(Tape) = 0,25·10⁶ г/см² с⁻¹, Z(Paint) = 1.5·10⁶ г/см² с⁻¹ получим следующие значения Z:

$$
\begin{aligned}
&Z(H_2O+Ti)=0,28\cdot 10^6 г/см^2 с^{-1}\\
&Z(H_2O+Al)=0,27\cdot 10^6 г/см^2 с^{-1}\\
&Z(H_2O+\mathrm{Tape})=0,18\cdot 10^6 г/см^2 с^{-1}\\
&Z(H_2O+\mathrm{Paint})=0,27\cdot 10^6 г/см^2 с^{-1}
\end{aligned}
\tag{3.34}
$$

Исходя из соотношений (3.34) можно сделать вывод, что при использовании алюминиевой фольги, обработки без покрытия и при использовании краски генерируются практически одинаковые импульсы давления. При использовании виниловой ленты амплитуда импульса будет примерно на 20% меньше. Оценка импульса давления при плотности энергии 10 ГВт/см^2 дает следующие значения пиковых давлений:

$$
\begin{aligned}
&P(Ti)=4,5ГПа\\
&P(Al)=4,4ГПа\\
&P(Tape)=3,6ГПа\\
&P(Paint)=4,4ГПа
\end{aligned}
\tag{3.35}
$$

Другим важным процессом, влияющим на результат обработки, является отражение упругопластической волны на границе раздела между защитном покрытием и образцом. При значительной разнице акустических импедансов для поглощающего слоя и материала образца на границе раздела значительная часть энергии может отражаться. Для оценки доли прошедшей энергии используем следующее значение коэффициента прохождения по энергии $D_{эн.}$ и коэффициента прохождения по амплитуде $D_{ампл.}$:

$$
D_{эн.}=\left(\frac{2Z_{покр.}}{Z_{покр.}+Z_{обр.}}\right)^2 \tag{3.36}
$$

$$
D_{ампл.}=\frac{2Z_{покр.}}{Z_{покр.}+Z_{обр.}}
$$

(3.37)

Подставляя имеющиеся значения получаем:

$$
\begin{aligned}
&D_{эн.}(Ti + Al) = 0{,}891\\
&D_{эн.}(Ti + Tape) = 0{,}451\\
&D_{эн.}(Ti + Paint) = 0{,}900
\end{aligned}
\tag{3.38}
$$

$$
\begin{aligned}
&D_{ампл.}(Ti + Al) = 0{,}794\\
&D_{ампл.}(Ti + Tape) = 0{,}204\\
&D_{ампл.}(Ti + Paint) = 0{,}810
\end{aligned}
\tag{3.39}
$$

Из анализа соотношений (69)-(70) можно сделать вывод о том, что при использовании алюминиевой фольги или черной краски порядка 10% энергии теряется на границе покрытие-образец, что соответствует почти 20 % потери амплитуды импульса. Граница ПВХ лента образец практически непроницаема для волны и на нее теряется до 80% амплитуды импульса. С технологической точки зрения фольга обладает преимуществом с точки зрения скорости нанесения и может эффективно использоваться для деталей простой геометрии. При наличии малых радиусов закругления и усложнении геометрии возникает опасность потери адгезии между фольгой и деталью, что может приводить к разрыву защитного слоя или образованию дефектов на поверхности материла в области на несплошностей на границе прилегания защитного слоя. В этом случае использование краски является предпочтительным, хотя требует существенно больше времени для нанесения защитного слоя нужной толщины.

Далее для подтверждения результатов аналитической оценки был проведен эксперимент по обработке плоских образцов с использованием различных материалов покрытия.

3.5.2. Материал и методика испытаний

Образцы представляли собой тонкие пластинки толщиной 3 мм из титанового сплава ВТ6. Параметры ЛУО указаны в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Параметры лазерной ударной обработки

Плотность мощности энергии	10 ГВт/см^2
Геометрия пятна лазерного луча	Квадрат со стороной 1 мм
Перекрытие	0 %
Частота импульсов	5 Гц
Размер зоны обработки	30х30 мм

В качестве поглощающего слоя исследовались три материала покрытий: алюминиевая фольга толщиной 80 мкм, черная алкидная краска (толщина слоя 40 мкм) и черная поливинилхлоридная лента толщиной 100 мкм. Также рассматривался вариант обработки без покрытия.

Образцы для измерения микротвердости вырезались на электоэрозионном станке с минимальной мощностью, чтобы исключить термическое влияния искры на слой, полученный в результате лазерной ударной обработки.

Измерения проводились при помощи микротвердомера МЕТОЛАБ 502 согласно руководству по эксплуатации. Измерения проводили параллельно поверхности обработки с шагом 0,2 мм (10 измерений). Расстояние от поверхности для первой серии составляло 2 диагонали отпечатка порядка 0.05 мм. Следующие серии измерений (всего 11 серий) проводили с удалением от обработанной поверхности с шагом 0,1 мм. Нагрузка составляла 10 Н.

3.5.3. Результаты измерения ОН

Все три покрытия выдержали выбранный режим упрочнения, то есть во всех трех случаях поверхность оставалась чистой, без следов нагара, которые обычно появляются в результате обработки без покрытия или же при деформации защитного слоя (рисунок 3.8).

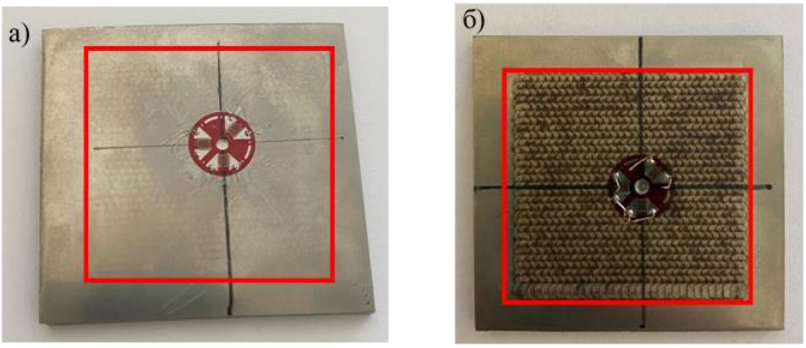


Рисунок 3.8 – Образец, упрочненный с поглощающим покрытием (а), упрочненный без поглощающего покрытия (б)

Сравнивая профили остаточных напряжений, полученные после обработки образцов (рисунок 3.9), обычно во внимание берут две величины: глубину слоя сжимающих ОН и максимальную величину сжимающих ОН.

По величине максимальных сжимающих остаточных напряжений лучший результат показала черная краска, у которой значение вдоль оси X достигло -400 МПа, а по глубине упрочненного слоя наибольшее значение было достигнуто при обработке с алюминиевой фольгой. Если рассмотреть все глубины сжимающих ОН, то можно увидеть, что у всех образцов она отличается не значительно, исключая случай с алюминиевой фольгой в направлении оси X, а вот по величина максимального значения видна существенная разница. Особенно это заметно в случае с виниловой лентой, где сжимающие напряжения достигла лишь отметки в -130 МПа.

Так же стоит отметить, что материал поглощающего покрытия оказал значительное влияние на остаточные напряжения на поверхности образца, которые играют важную роль в улучшении усталостных свойств материала. Так из профилей ОН видно, что при использовании виниловой ленты и режима без покрытия остаточные напряжения не превышают -100 МПа, тогда как с алюминиевой фольгой на поверхности мы имеем -180 МПа, а с черной краской это значение увеличивается до -400 МПа.

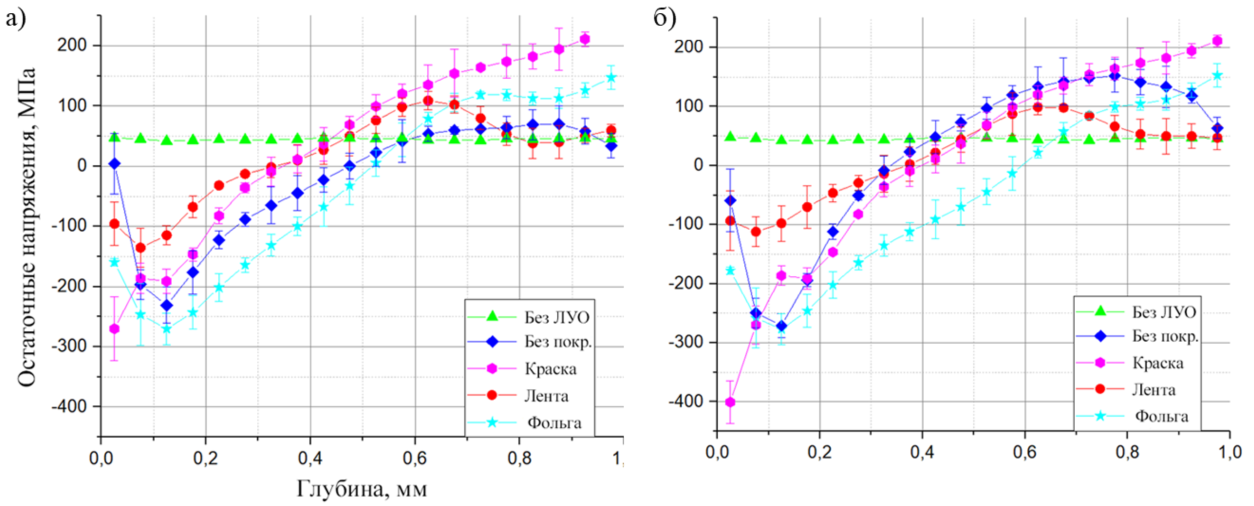


Рисунок 3.9 – Профили остаточных напряжений по глубине: а) Напряжения вдоль оси X; б) напряжения вдоль оси Y

Если посчитать интеграл вдоль профилей остаточных напряжений, мы также получим, что использование алюминиевой фольги является наиболее эффективным режимом обработки со значением -50,92 МПа*мм, тогда как у краски мы имеем 32,08 МПа*мм, у ленты 17,64 МПа*мм, а в случае без поглощающего слоя 22,37 МПа*мм. Такие значения получились в результате того, что в случае с краской мы имеем значительные растягивающие напряжения (200 МПа) на глубине 0,8-1 мм, тогда как в случае с лентой эти напряжения не превышают 110 МПа.

3.5.4. Измерение микротвердости после обработки лазерной ударной обработки

Микротвердость материала после обработки слабо зависит от физической природы материала защитного слоя. На рисунке 3.10 представлены зависимости микротвердости от глубины для всех исследованных материалов покрытий. Наиболее значительным изменение микротвердости при обработке с использованием виниловой ленты, где пиковое значение микротвердости достигло значения 350 HV. Режимы без покрытия и с краской дали очень схожие результаты как по профилю распределения микротвердости, так и по ее значениям.

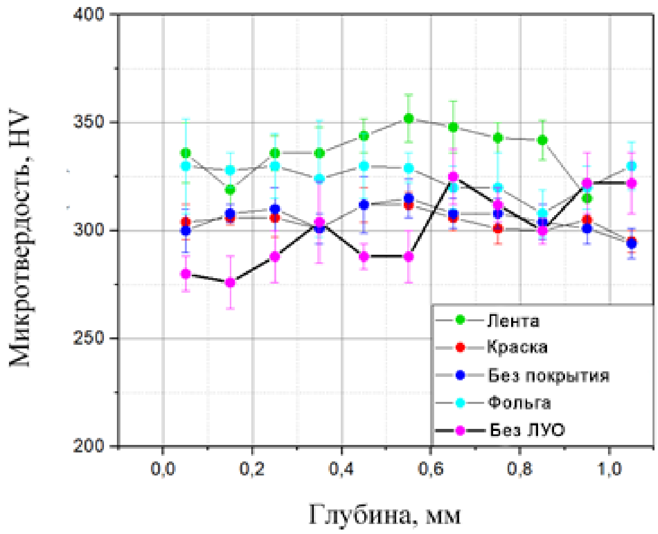


Рисунок 3.10 – Кривые зависимости микротвердости от глубины

3.6. Влияние лазерной ударной обработки на микроструктуру

Обработка материалов, в частности лазерным ударом, может существенно влиять на их микроструктуру, изменяя распределение фаз, плотность дефектов и характер зеренной структуры. Поэтому, помимо исследования остаточных напряжений и механических свойств, важно уделять внимание микроструктурным изменениям, так как именно они определяют стабильность и долговечность материала после обработки.

Несколько недавних исследований были посвящены микроструктурным процессам, вызываемым лазерной обработкой. В частности, в узком приповерхностном слое наблюдалось образование нанокристаллической структуры [139–140] и даже аморфизация [141]. Однако под этим слоем микроструктурные изменения, как правило, выражены значительно слабее.

Повышение плотности дислокаций часто отмечается как в α-фазе [142-143], так и в β-фазе [144]. Иногда также наблюдаются сдвиговые полосы [145]. Особый интерес представляет обнаружение механического двойникования в α-фазе [146], несмотря на то что данный механизм обычно считается нетипичным для титанового сплава ВТ6.

Хотя в предыдущих микроструктурных исследованиях был достигнут значительный прогресс, литературные данные остаются весьма противоречивыми [147]. В связи было принято решение исследовать микроструктурные изменения в титановом сплаве ВТ6 после лазерной ударной обработки. Для более полного анализа физических механизмов, ответственных за формирование остаточных напряжений, был проведен сравнительный анализ изменений микроструктуры материала в зависимости от его исходного состояния – для пластинчатой и глобулярной микроструктур.

3.6.1. Материал и методика испытаний

Геометрия образцов, их материал и условия ЛУО были аналогичными описанным в пункте 3.5.2. В качестве защитного покрытия использовалась алюминиевая фольга.

Пластинки из титанового сплава ВТ6 имели две разновидности микроструктуры – глобулярную и пластинчатую. Титановый сплав ВТ6 с глобулярной микроструктурой был предоставлен в виде прутка, полученного методом горячей прокатки. Пластинчатая микроструктура была сформирована путем отжига при температуре 1010°C в течение 15 минут с последующим охлаждением на воздухе.

После лазерной ударной обработки пластины с различными исходными микроструктурами были разрезаны по центру обработанной зоны. После этого их заливали в проводящую фенольную термопластичную смолу с графитовым наполнителем KonductoMet™ с помощью горячего пресса Buehler SimpliMet™ 4000 при температуре 170 °C и давлении 160 бар в течение 90 секунд, после чего охлаждали до комнатной температуры в течение 5 минут. Полученные таблетки шлифовали и полировали с использованием установок LaboPol-5 и Struers. Шлифование выполнялось абразивной бумагой с постепенным уменьшением зернистости до P2000 (размер абразивных частиц около 7 мкм). Для предотвращения перегрева на шлифовальный диск подавалась вода.

После механического шлифования проводилось полирование с применением алмазных суспензий с размером частиц 6, 3 и 1 мкм на бархатной салфетке MD-Nap. Финальная виброполировка выполнялась на установке Buehler VibroMet™ с использованием коллоидной суспензии диоксида кремния OP-S в течение длительного времени (до 24 часов).

Анализ EBSD проводился на растровом электронном микроскопе FEI Quanta 600 при ускоряющем напряжении 20 кВ и размере пучка 6. Диаметр апертуры составлял 50 мкм, рабочее расстояние – 15 мм. Шаг сканирования при получении обзорных карт (макроизображений) составлял 1-2 мкм, а при съемке области, обработанной ЛУО, с высоким разрешением – 0,1–0,2 мкм. Для минимизации ошибок определяли не менее семи линий Кикучи. Среднее значение коэффициента достоверности автоматического индексирования Кикучи-карт (confidence index, CI) превышало 0,1, что соответствует более чем 95 % корректно идентифицированных дифракционных карт.

Зерна, состоящие из двух или менее пикселей, удалялись в процессе «очистки» при помощи программного обеспечения TSL OIM Analysis 8. Из-за ограниченного углового разрешения метода EBSD границы с разориентацией менее 2° исключались из анализа. Границы с разориентацией от 2° до 15° классифицировались как малоугловые, а границы с разориентацией более 15° – как высокоугловые. Для микроструктурного анализа использовались две ключевые характеристики EBSD: индекс качества изображения (Image Quality, IQ) и средняя локальная разориентация (Kernel Average Misorientation, KAM).

Все исследования микроструктуры проводились на базе Белгородского государственного исследовательского национального университета.

3.6.2. Микроструктурные исследования

Титановый сплав ВТ6 является промышленным сплавом и относится к группе сплавов с двухфазной (α + β) структурой.

На рисунке 3.11 представлены типичные EBSD-карты сплава в исходном сфероидизированном состоянии. Видно, что микроструктура однородна, полностью глобулярная, со средним диаметром частиц α-фазы около 10 мкм.

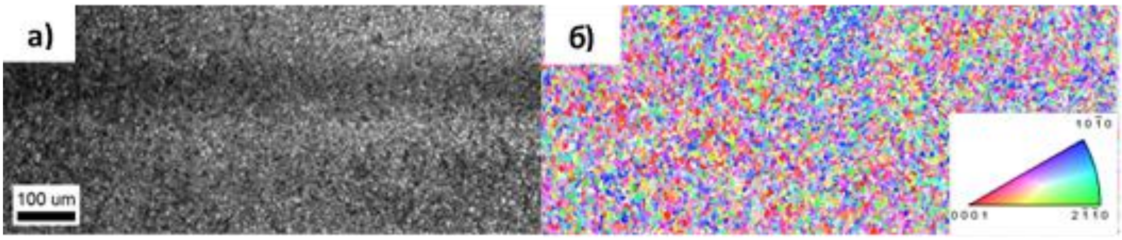


Рисунок 3.11 – EBSD-карты исходного материала с глобулярной микроструктурой: (а) карта качества изображения (IQ), (б) карта ориентаций зерен (KAM)

EBSD-карта исходного материала с пластинчатой микроструктурой показана на рисунке 3. Она отражает иерархическую структуру, включающую очень крупные (~1 мм) исходные (трансформированные) β-зерна, крупные (~100 мкм) α-колонии и чередующиеся пластины α- и β-фаз внутри колоний.

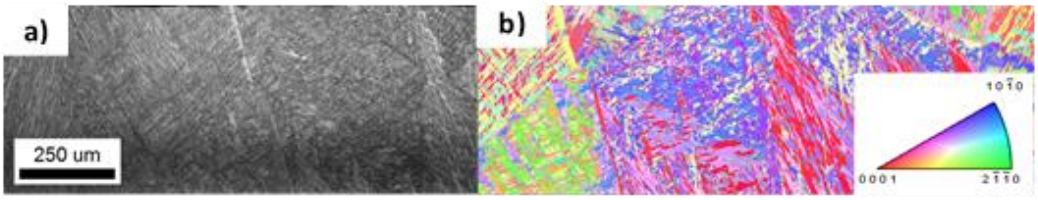


Рисунок 3.12 – EBSD-карты исходного материала с пластинчатой микроструктурой: (а) карта качества изображения, (б) карта ориентаций зерен

Обзорная EBSD-карта образца с исходной пластинчатой микроструктурой после лазерной ударной обработки представлена на рисунке 3.13.

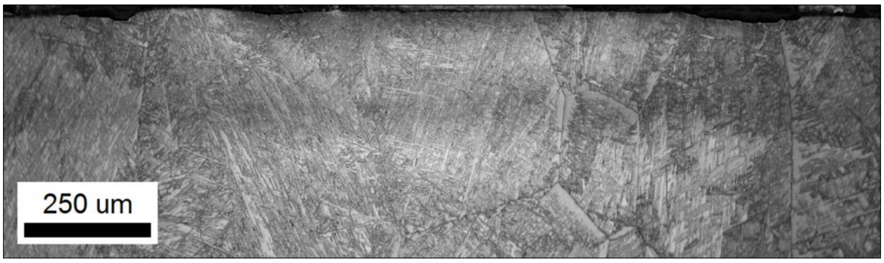


Рисунок 3.13 – Обзорная EBSD-карта качества изображения исходного материала с пластинчатой микроструктурой после ЛУО (поверхность расположена в верхней части микрофотографии)

Для более глубокого анализа микроструктурных изменений, вызванных лазерной ударной обработкой, была получена EBSD-карта с высоким разрешением (рис. 3.14).

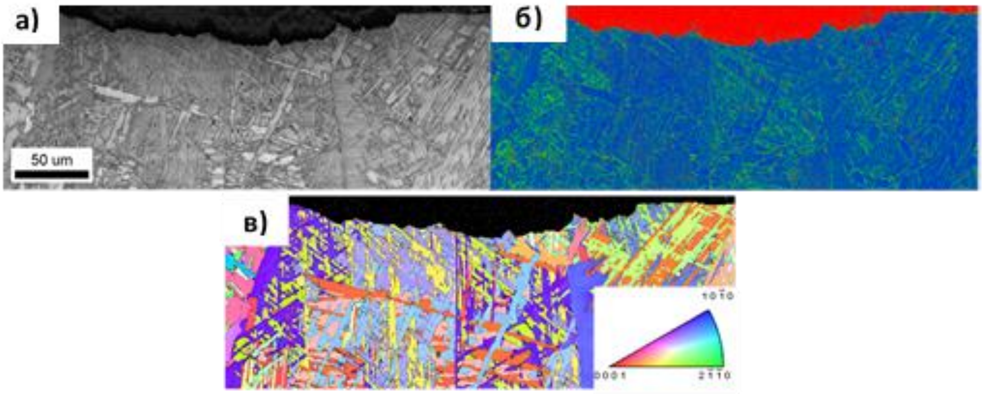


Рисунок 3.14 – EBSD-карты высокого разрешения материала с исходной пластинчатой структурой после ЛУО: (а) карта качества изображения, (б) карта локальной разориентации, (в) карта ориентаций

Как видно из карты качества изображения, существенных изменений в морфологии и размере α-пластин не наблюдается (рис. 3.14а). Кроме того, не зафиксировано поворота пластин в направлении преимущественного пластического течения металла, который обычно возникает при деформации пластинчатых структур. Также карты IQ и KAM не показали заметного изменения контраста, что указывает на отсутствие выраженного увеличения плотности дислокаций (рис. 3.14а, б). Карта ориентаций (рис. 3.14в) также не выявила образования малоугловых границ деформационного происхождения или двойников.

Обзорная EBSD-карта образца с исходной глобулярной микроструктурой после обработки поверхности показана на рисунке 3.15.

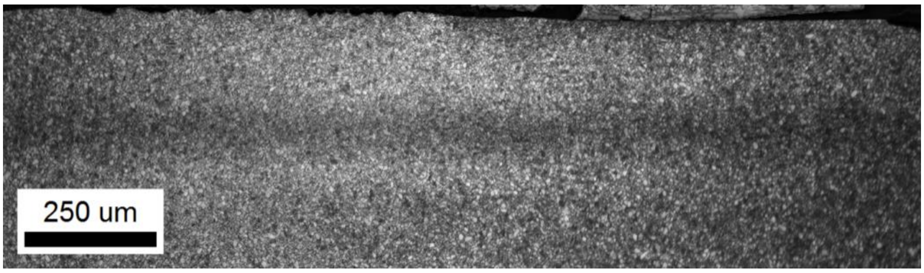


Рисунок 3.15 – Обзорная EBSD-карта качества изображения исходного материала с глобулярной микроструктурой после ЛУО

Обзорная EBSD-карта образца с исходной пластинчатой микроструктурой после лазерной ударной обработки представлена на рисунке 3.16.

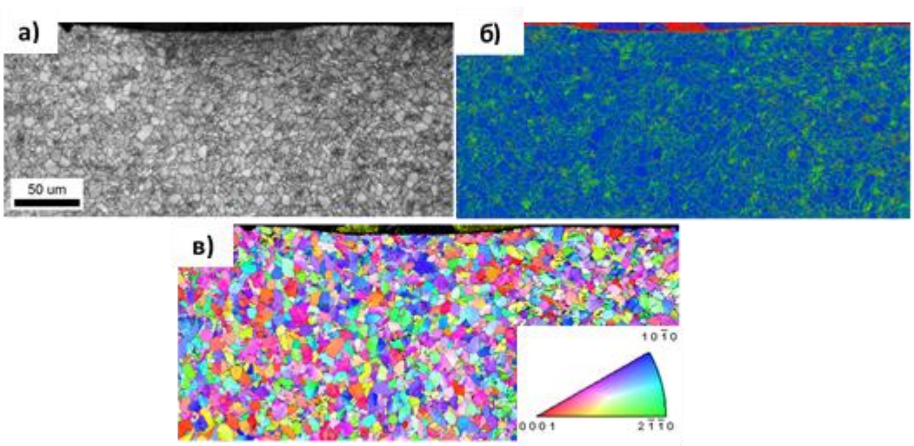


Рисунок 3.16 – EBSD-карты высокого разрешения поверхности материала с исходной глобулярной структурой: (а) карта качества изображения, (б) карта локальной разориентации, (в) карта ориентаций

Как видно из IQ-карты, не наблюдается изменений ни в размере, ни в форме зерен α-фазы (в частности, их сплющивания) – рис. 3.16а. Однако на этой карте заметно некоторое потемнение контраста, что можно интерпретировать как повышение общей плотности решеточных дислокаций. В то же время KAM-карта (рис. 3.16б) не демонстрирует значимых аномалий. Это можно объяснить следующим образом. Дислокации в металлических материалах делятся на два основных типа – геометрически необходимые и статистически накопленные. Геометрически необходимые дислокации создают градиенты ориентации и проявляются как контраст на KAM-картах. Статистически накопленные дислокации, напротив, лишь нарушают кристаллическую решетку (вызывая потемнение на IQ-картах), но не формируют градиентов ориентации.

Следовательно, наблюдаемые в работе эффекты можно связать с накоплением статистически накопленных дислокаций. Ориентационная карта (рис. 3.16в) также не показывает формирования малоугловых границ деформационного происхождения или двойников.

На рисунке 3.17 представлены результаты расчета остаточных напряжений (рис. 3.17а, б) по глубине образца в центре зоны обработки для различных исходных микроструктур. Несмотря на различия в термообработке материала и существенно разную микроструктуру (пластинчатую и глобулярную), лазерная ударная обработка с защитным металлическим слоем не показала заметного изменения остаточных напряжений.

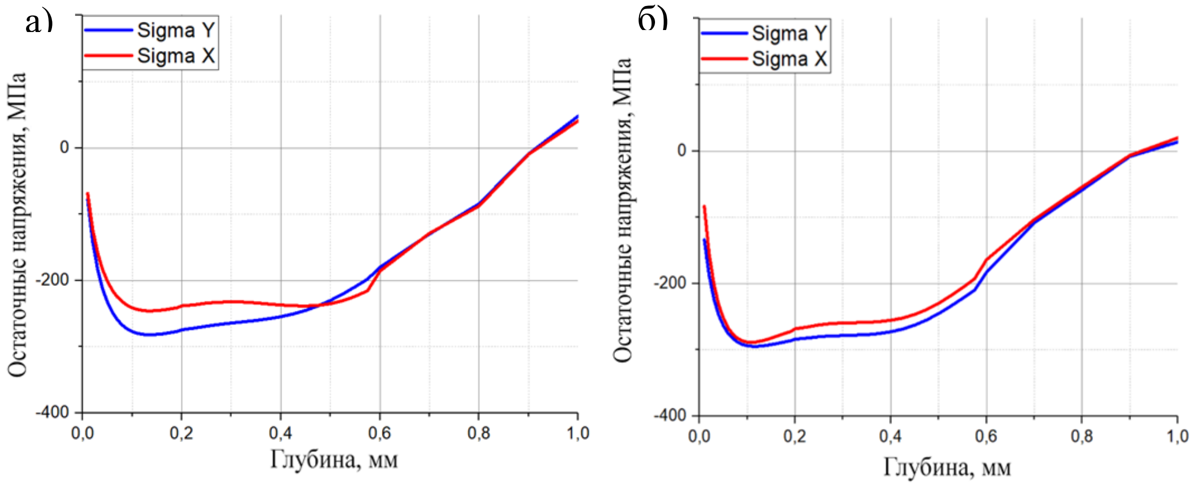


Рисунок 3.17 – Профили ОН образцов с разновидностями микроструктуры после ЛУО: (а) глобулярной, (б) пластинчатой

Выводы

На основании сравнения результатов применения методов сверления отверстий с данными рентгеновского анализа можно сделать вывод о том, что при использовании метода сверления отверстий оптимальной методикой расчета ОН неоднородно распределенных по глубине является стандартизированная методика ASTM E837 с кубическим распределением глубины измерений деформаций. Он имеет удовлетворительное соответствие с методом рентгеновской дифракции с точки зрения характера кривой распределения ОН, их максимальной величины и глубины. 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.

С использованием верифицированной методики оценки ОН для образцов из титанового сплава ВТ6 установлено, что при плотности мощности лазерного излучения выше 10–12 ГВт/см² уровень наведенных сжимающих остаточных напряжений достигает насыщения (асимптотического значения). Этот эффект соответствует модели о плазменном экранировании поверхности образца вторичным факелом на границе раздела ограничивающий слой (вода)-воздух и определяет верхний предел эффективности увеличения плотности мощности при лазерной ударной обработке.

Экспериментально показано, что увеличение числа проходов обработки обеспечивает рост глубины сжимающих остаточных напряжений на 15–20%. Процент перекрытия импульсов также способствует росту остаточных напряжений, однако оказывает меньшее влияние по сравнению с числом проходов, а форма лазерного пятна практически не влияет на глубину и уровень индуцированных напряжений.

Установлено, что оптимальной с точки зрения достижения максимального уровня остаточных напряжений является плотность мощности 10–12 ГВт/см². При дальнейшем увеличении параметра эффект упрочнения незначителен, что подтверждает наличие предельного уровня индуцируемых напряжений.

Анализ эффективности различных поглощающих покрытий показал, что алюминиевая фольга и черная краска обеспечивают формирование наибольшего уровня и глубины сжимающих напряжений. Выявлено, что на границе «покрытие–материал» теряется до 10% энергии (≈20% амплитуды импульса) для алюминиевой фольги и краски, тогда как использование ПВХ-ленты приводит к потере до 80% амплитуды. Эти данные уточняют количественные представления о влиянии поглощающего слоя на распространение ударной волны.

С технологической точки зрения фольга обладает преимуществом в скорости нанесения и может эффективно использоваться для деталей простой геометрии. При наличии малых радиусов закругления и усложнении геометрии возникает опасность потери адгезии между фольгой и деталью, что может приводить к разрыву защитного слоя или образованию дефектов на поверхности материла в области на несплошностей на границе прилегания защитного слоя. В этом случае использование краски является предпочтительным, хотя требует существенно больше времени для нанесения защитного слоя нужной толщины.

Анализ микротвердости образцов по глубине не выявил существенных изменений. Обработка приводила к увеличению микротвердости материала для всех типов поглощающего покрытия и влияет на ее однородность по глубине.

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. Отмеченные изменения ограничиваются умеренными колебаниями контраста на IQ- и KAM-картах, что указывает на увеличение плотности дислокаций.

Морфология исходной микроструктуры (пластинчатая или глобулярная) не оказала существенного влияния на микроструктурные процессы при лазерной ударной обработке. Однако этот результат может быть связан с ограниченной чувствительностью EBSD-методики к процессам, связанным только с накоплением дислокаций.

Таким образом, можно заключить, что лазерная ударная обработка не приводит к структурным превращениям в титане ВТ6 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.

Результаты решения поставленных задач опубликованы в работах [148-154]. В ходе выполнения этих задач была зарегистрирована программа для ЭВМ [155] и получено три патента на изобретение [156-158].

ГЛАВА 4. ВЛИЯНИЕ ЛУО НА УСТАЛОСТНЫЕ СВОЙСТВА ОБРАЗЦОВ С КОНЦЕНТРАТОРАМИ НАПРЯЖЕНИЙ

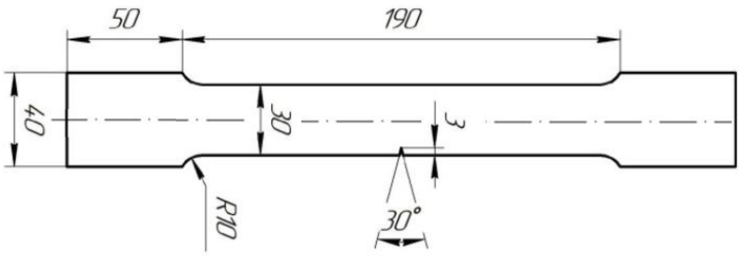
4.1. Влияние расположения зоны обработки на эффективность ЛУО

В этом разделе исследуется влияние расположения зоны обработки на усталостную долговечность образцов с двумя типами концентраторов напряжений, исходя из получаемых профилей ОН и результатов усталостных испытаний.

4.1.1 Материалы и условия эксперимента образцов из ВТ1-0

В экспериментах использовалось два типа плоских образцов толщиной 4 мм с острым и круглым концентраторами напряжений, представленные на рисунке 4.1. Образец с острым вырезом изготовлен из титанового сплава ВТ1-0, с круглым – из ОТ4-0.

а)



б)

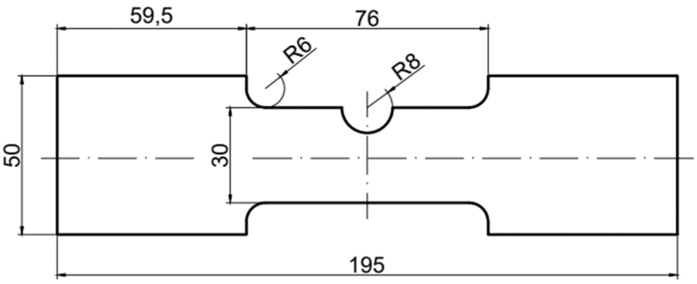


Рисунок 4.1 – Геометрия образцов с: острым вырезом (а), круглым вырезом (б)

Режим обработки, который использовался для упрочнения обоих типов образцов представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Параметры лазерной ударной обработки,

Плотность мощности энергии	30 ГВт/см^2
Геометрия пятна лазерного луча	Квадрат со стороной 1 мм
Перекрытие	0 %
Частота импульсов	5 Гц
Защитное покрытие	Алюминиевая фольга

В режимах обработки образцов из ВТ1-0 отличалось расположение зоны обработки. В первом случае обработка шла на расстоянии 1,5 мм от концентратора, а во втором вокруг концентратора (рисунок 4.2).

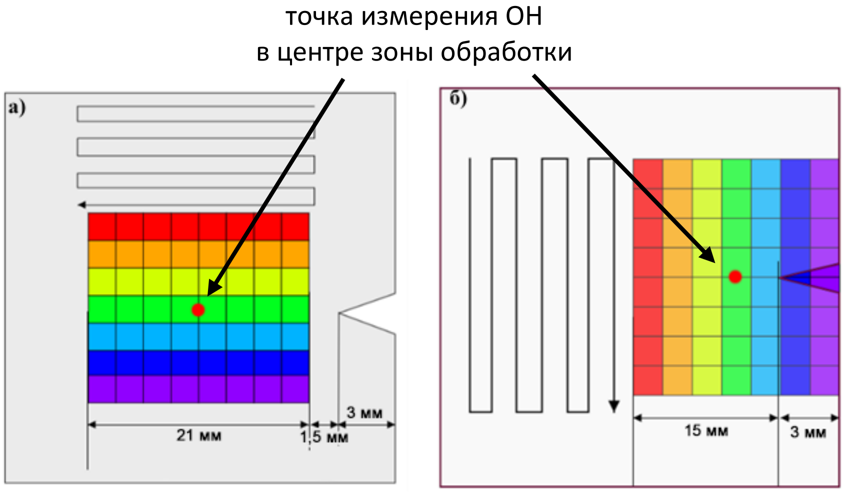


Рисунок 4.2 – Схемы обработки образцов из ВТ1-0: схема 1 – на расстоянии 1,5 мм от концентратора (а), схема 2 – вокруг концентратора (б)

Испытания на усталость проводились на серво-гидравлической машине Biss Bi-00-100 с максимальной нагрузкой 100 кН и частотой циклов 50 Гц. Нагрузка во время испытаний была выбрана 8 кН, а коэффициент асимметрии цикла 0,1. Длина трещины измерялась методом падения электрического потенциала, который заключается в регистрации изменения разности электрических потенциалов, вызванного развитием несплошности материала (усталостной трещины), при пропускании через образец постоянного или переменного электрического тока [159]. В этом методе на образец, который устанавливается неподвижно внутри ультразвуковой испытательной машины, помещаются четыре контакта. Пара внешних контактов используется для подачи постоянного тока 5 А на образец. Пара внутренних контактов используется для регистрации падения потенциала на образце. Кроме того, АЦП используется для измерения падения потенциала. Приборная точность электрического сопротивления составляет 30 мкОм.

Схема испытаний отображена и калибровочная кривая зависимости длины трещины от разности потенциалов на рисунке 4.3.

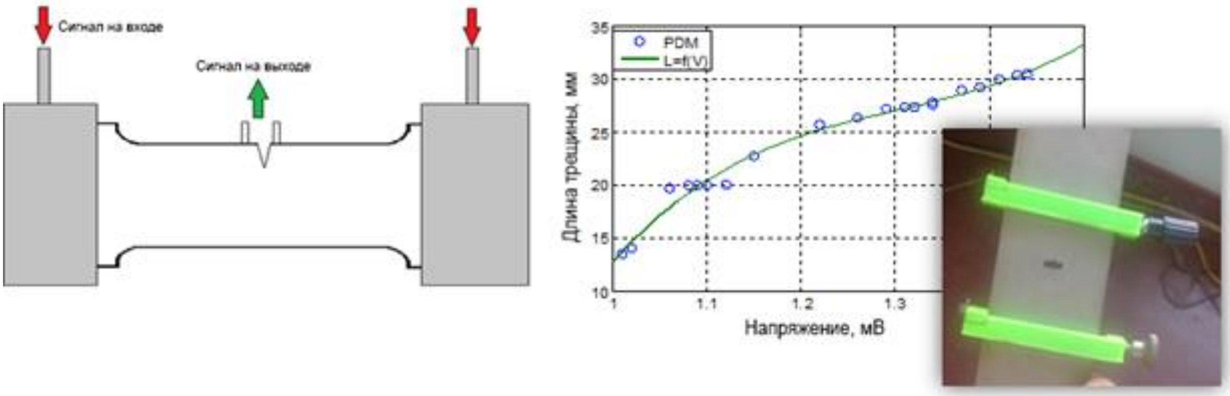


Рисунок 4.3 – Схема измерения длины трещины методом падения электрического потенциала

4.1.2 Результаты измерения ОН в сплаве ВТ1-0

Профили остаточных напряжений представлены в центре зоны обработки на рисунке 4.4. Обработка лазером позволила создать поле остаточных напряжений сжатия на глубину около 0,9 мм. Максимальное сжимающее напряжение, играющее существенную роль в контроле зарождения и распространения усталостных трещин, для обеих схем ЛУО достигает около 200 МПа на глубине около 0,3 мм. Отмечается, что обе схемы дают примерно одинаковый уровень и глубину остаточных напряжений.

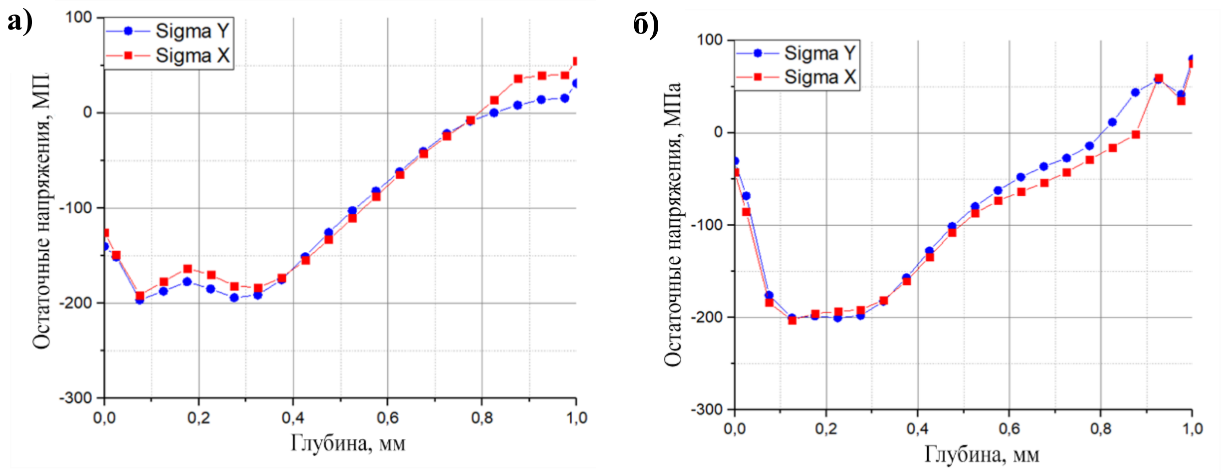


Рисунок 4.4 – Профили ОН по глубине при различных схемах обработки: рядом с концентратором напряжений (а), вокруг концентратора напряжений (б)

4.1.3 Результаты усталостных испытаний ВТ1-0

Результаты усталостных испытаний с 90% доверительным интервалом представлены на рисунке 4.5.

Показано, что пространственное расположение зоны лазерной ударной обработки оказывает существенное влияние на усталостную долговечность образцов. Для образцов без обработки среднее число циклов до достижения критической длины трещины составляет 86 741 ± 15 700 циклов и может рассматриваться как базовый уровень усталостного ресурса. Обработка, выполненная на расстоянии от концентратора напряжений, приводит к снижению усталостной долговечности до 57 475 ± 15 600 циклов, что свидетельствует о неблагоприятном влиянии данной схемы ЛУО на усталостные характеристики материала. Наиболее выраженное повышение ресурса наблюдается при обработке, выполненной вокруг концентратора напряжений, для которой среднее число циклов достигает 176 745 ± 42 300 циклов. В этом случае усталостная долговечность увеличивается примерно в 2 раза по сравнению с необработанными образцами и более чем в 3 раза по сравнению с обработкой, выполненной на расстоянии от концентратора, что указывает на наибольшую эффективность данной схемы ЛУО.

Это можно объяснить тем, что, размещение зоны обработки на расстоянии от концентратора напряжений приводит к возникновению зоны растягивающих напряжений в зоне выреза и сокращению стадии зарождения трещины. Сформировавшаяся трещина, попадая в область сжимающих остаточных напряжений, имеет значительную длину (значение коэффициента интенсивности напряжений в своей вершине) и влияние зоны обработки на ее кинетику минимально.

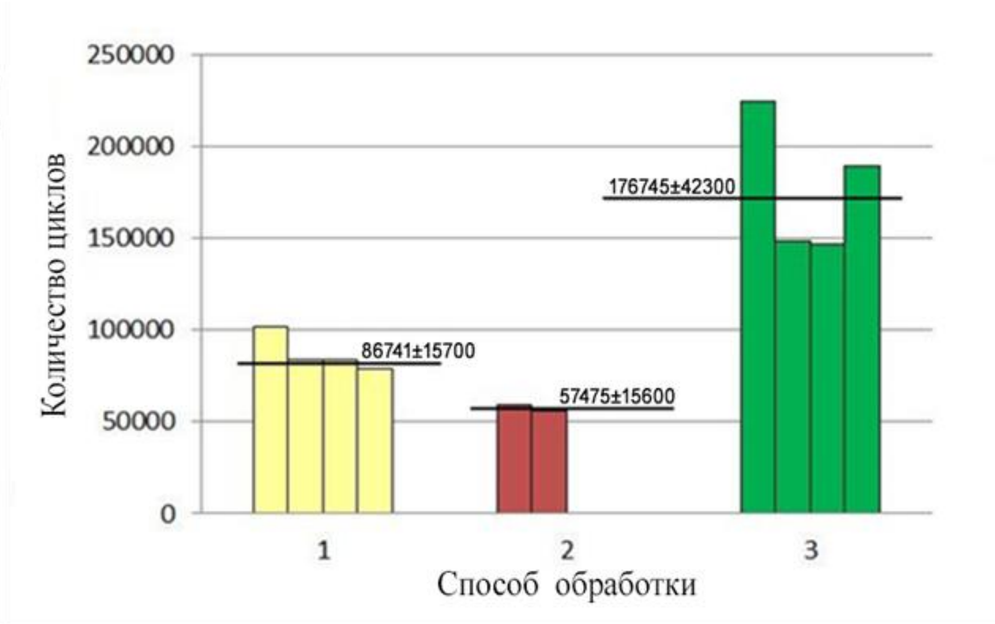


Рисунок 4.5 – Результаты усталостных испытаний образцов из сплава ВТ1-0

Данный вывод подтверждается графиками зависимости длины трещины от времени испытания (рисунок 4.6) и скорости роста трещины от длины трещины (рисунок 4.7). Усталостная долговечность существенно увеличивается при второй схеме обработки, при этом наблюдается как замедление трещины, так и рост времени ее зарождения.

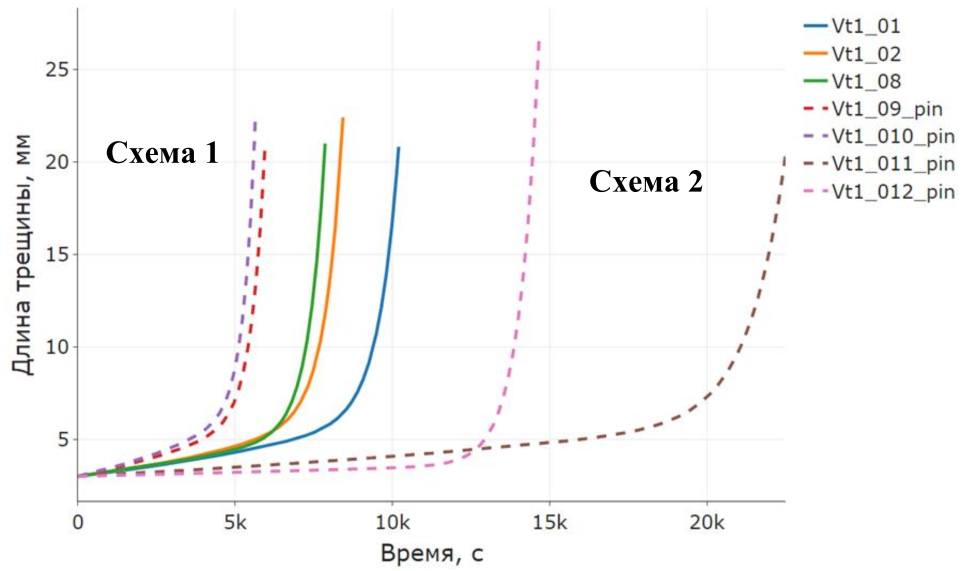


Рисунок 4.6 – График зависимости длины трещины от времени испытания, сплошные линии – материал в исходном состоянии, штриховые – материал после обработки

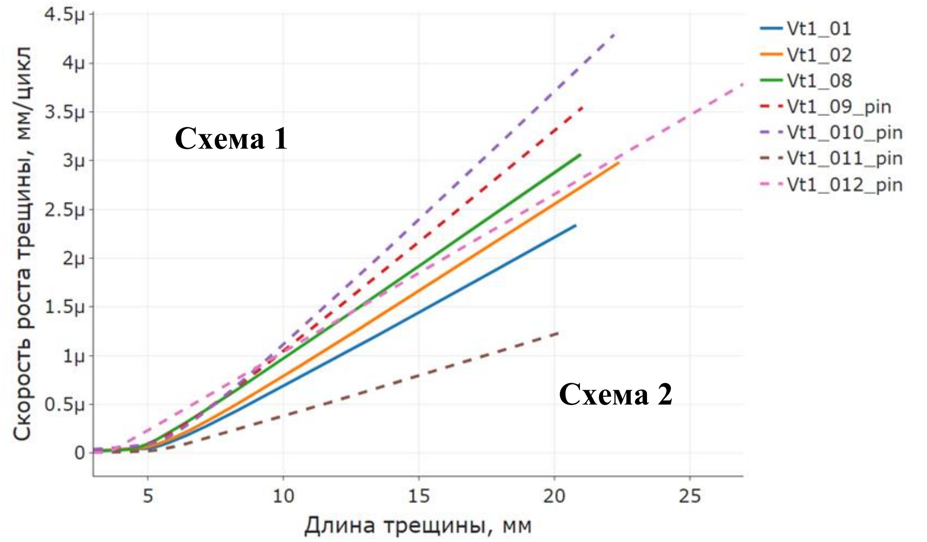


Рисунок 4.7 – График зависимости скорости роста трещины от длины трещины, сплошные линии – материал в исходном состоянии, штриховые – материал после обработки

4.1.4 Материалы и условия эксперимента образцов из ОТ4-0

Схема обработки образцов изготовленных из сплава ОТ4-0 с круглым вырезом была выбрана исходя анализа предыдущих результатов. Схема обработки представлена на рисунке 4.8.

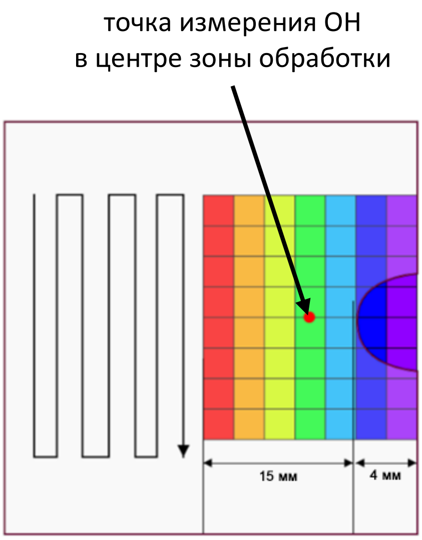


Рисунок 4.8 – Схема обработки образцов с круглым вырезом

Остаточные напряжения, полученные после ЛУО представлены на рисунке 4.9. В результате обработки в образцах созданы сжимающие ОН глубиной до 0,9 мм и с максимальной величиной порядке 400 МПа.

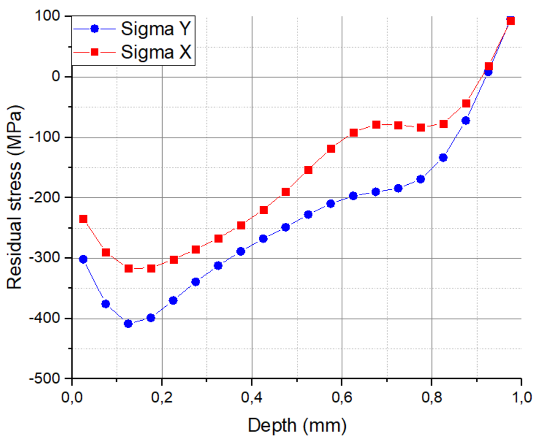


Рисунок 4.9 – Профиль ОН в центре зоны обработки образце, изготовленном из сплава ОТ4-0

Сравнение усталостных характеристик образцов без обработки и после лазерной ударной обработки показывает значительный положительный эффект ЛУО. Для необработанных образцов среднее число циклов до разрушения составляет 101 651 ± 9 400 циклов, тогда как после обработки оно возрастает до 188 169 ± 18 100 циклов. Таким образом, применение ЛУО приводит к увеличению усталостной долговечности примерно 85%. Полученные результаты подтверждают высокую эффективность лазерной ударной обработки как метода повышения усталостной долговечности. (рисунке 4.10).

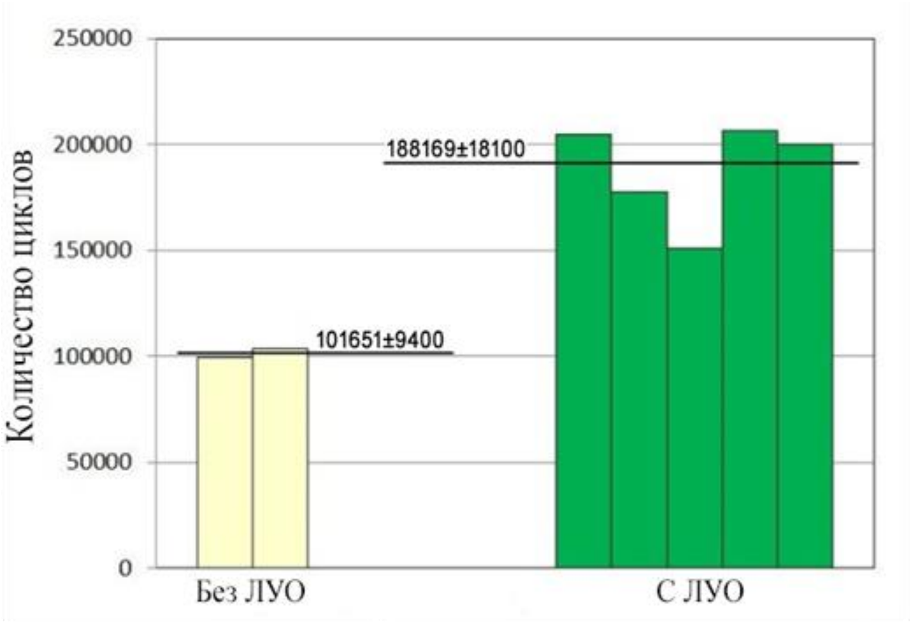


Рисунок 4.10 – Результаты усталостных испытаний образцов с круглым вырезом изготовленных из сплава ОТ4-0

Измерения длины трещины и скорости ее роста также показывают, что ЛУО позволяет увеличить усталостную долговечность образцов (рисунки 4.11 и 4.12).

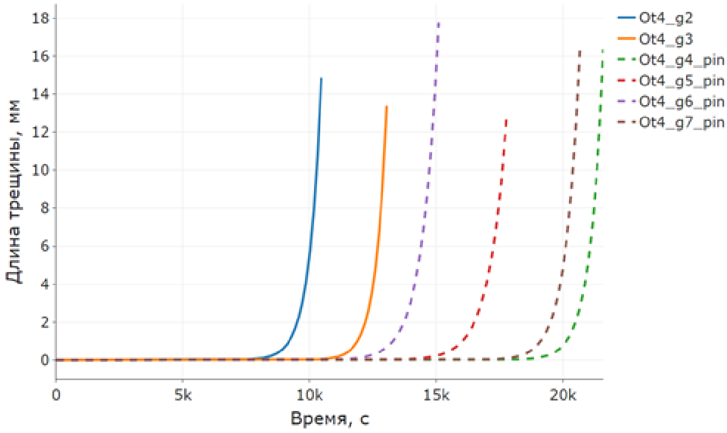


Рисунок 4.11 – График зависимости длины трещины от времени испытания в образцах из ОТ4-0, сплошные линии – материал в исходном состоянии, штриховые – материал после обработки

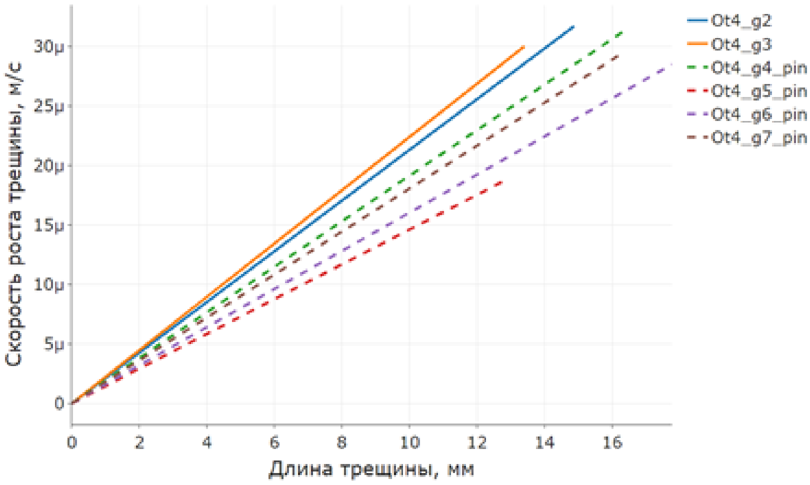


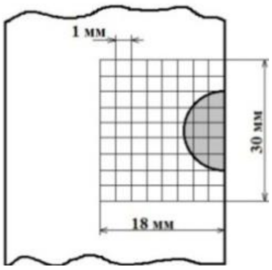
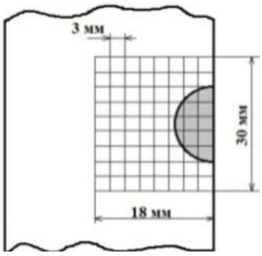
Рисунок 4.12 – График зависимости скорости роста трещины от длины трещины в образцах из ОТ4-0, сплошные линии – материал в исходном состоянии, штриховые – материал после обработки

4.2. Влияние различных схем ЛУО на усталостную долговечность образцов изготовленных из сплава ВТ6 с концентратором напряжений

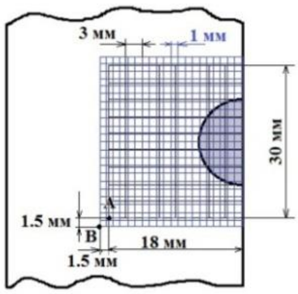
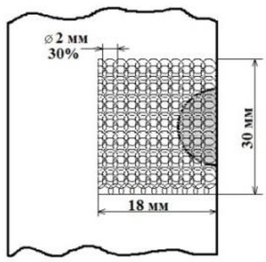
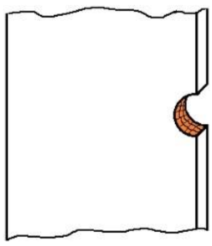
4.2.1. Материалы и методика эксперимента

Пять режимов ЛУО были выбраны для исследования влияния методик обработки на профиль ОН и усталостную долговечность плоских образцов с круглым вырезом изготовленных из титанового сплава ВТ6. В исследуемых режимах ЛУО варьировались следующие характеристики: энергия лазерного луча, форма профиля лазерного луча, перекрытие отпечатков и местоположение области обработки. В таблице 4.2 приведены параметры реализованных режимов ЛУО.

Таблица 4.2 – Параметры режимов ЛУО плоских образцов с круглым вырезом из титанового сплава ВТ6

Режим ЛУО	**Схема проходов лазерного луча в области круглого выреза**	**Параметры лазерной ударной обработки**
Схема №1		– Энергия в импульсе: 1 Дж; – Форма пятна квадрат со стороной 1 мм; – Плотность мощности энергии: 10 ГВт/см^2; – Перекрытие – 0%; – Защитное покрытие: алюминиевая фольга 80 мкм; – Частота лазерного удара: 5 Гц; – Примерное время обработки одной стороны: 108 с.
Схема №2		– Энергия в импульсе: 5 Дж; – Форма пятна квадрат со стороной 3 мм; – Плотность мощности энергии: 5,56 ГВт/см^2; – Перекрытие – 0%; – Защитное покрытие: алюминиевая фольга 80 мкм; – Частота лазерного удара: 5 Гц; – Примерное время обработки одной стороны: 12 с.

Продолжение таблицы 4.2

Схема №3	 	– Энергия в импульсе: 1-й слой: 2 Дж 2-й слой: 1 Дж – Форма пятна: квадрат со стороной: 1-й слой: 3 мм 2-й слой: 1 мм – Плотность мощности энергии: 1-й слой: 2,22 ГВт/см^2 2-й слой: 10 ГВт/см^2 – Перекрытие – 0% в каждом слое; – Защитное покрытие: алюминиевая фольга 80 мкм; – Частота лазерного удара: 5 Гц; – Примерное время обработки одной стороны: 120 с.
Схема №4	 	– Энергия в импульсе: 2 Дж; – Форма пятна: круг Ø2 мм; – Плотность мощности энергии: 6,37 ГВт/см^2; – Перекрытие: 30%; – Защитное покрытие: алюминиевая фольга 80 мкм; – Частота лазерного удара: 5 Гц; – Примерное время обработки одной стороны: 56 с.
Схема №5		– Энергия в импульсе: 1 Дж; – Форма пятна квадрат со стороной 1 мм; – Плотность мощности энергии: 10 ГВт/см^2; – Перекрытие: 0%; – Защитное покрытие: алюминиевая фольга 80 мкм; – Частота лазерного удара: 1 Гц; – Примерное время обработки: 75 с.

ЛУО по Схемам 1-4 проводилась на плоскостях образцов с обеих сторон. Схема 5 предполагала обработку только в торцевой части круглого выреза (область обработки выделена цветом на Схеме 5 в таблице 4.2).

Перед началом ЛУО по схемам 1-4 в область концентратора напряжений вставлялся специальный вкладыш, который был изготовлен из того же материала, что и образцы (титановый сплав ВТ6), и ответно повторял форму концентратора напряжений по всей длине контакта образца и вкладыша. Область ЛУ воздействия включала зону концентратора напряжений с закрепленным в ней на время обработки вкладышем. Это позволило избежать краевого эффекта, то есть появления поля растягивающих остаточных напряжений с торца заготовки в области вершины концентратора напряжений в результате воздействия расфокусированного лазерного луча у края концентратора напряжений.

Схемы 1 и 2 имели один и тот же геометрический рисунок, за счет размера пятна и энергии лазерного излучения, отличались удельной плотностью энергии ЛУ воздействия. Расположение отпечатков лазерного луча на поверхности образца осуществлялось стык в стык без перекрытий. С геометрической точки зрения схема 3 представляла собой наложенные друг на друга схемы 1 и 2 со сдвигом стартовой точки второго слоя на 1,5 мм по горизонтали и вертикали.

Схема 4 отличалась от схем 1 и 3 формой профиля лазерного луча и наличием перекрытия между отпечатками луча на обрабатываемой поверхности. Перекрытие необходимо при круглой форме профиля луча для того, чтобы избежать появления на материале участков без обработки, в которых могут возникнуть нежелательные растягивающие напряжения.

Максимальное время обработки одной плоскости образца составляла 2 мин (схема 3), минимальное время обработки составило 0,2 мин (схема 2). Схема 5 принципиально отличалась от Схем 1-4 тем, что в качестве области ЛУО были выбраны не плоскости, а криволинейная область торца в круглом вырезе. В связи с особенностями геометрии области обработки при реализации схемы №5 частота лазерного удара была снижена с 5 Гц, как было при схемах №1-4, до 1 Гц, поэтому при меньшей площади обработки время обработки составило 1,25 мин.

4.2.2. Результаты измерения ОН на плоских образцах из титанового сплава ВТ6

Профили остаточных напряжений были получены на образцах после реализации пяти вышеописанных схем ЛУО. Измерения проводились вблизи круглого выреза, на расстоянии 3 мм от его вершины (рисунок 4.13).

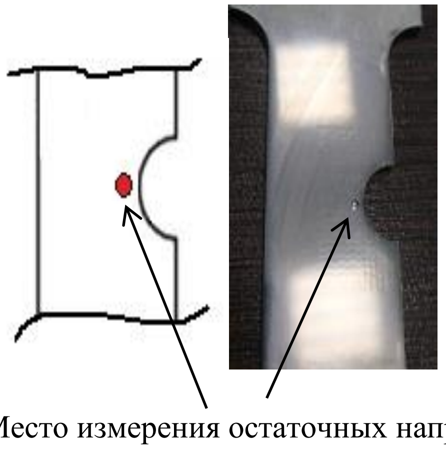


Рисунок 4.13 – Точка измерения ОН по глубине образца

На рисунках 4.14-4.18 приведены измеренные профили ОН на образцах после ЛУО согласно пяти вышеописанным схемам.

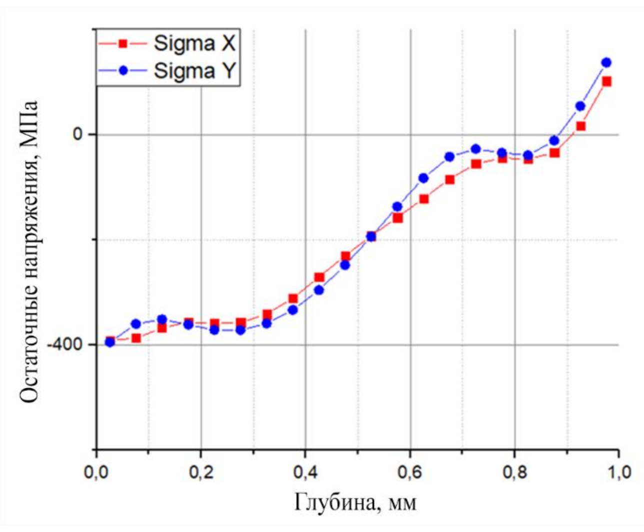


Рисунок 4.14 – Зависимость ОН от глубины на образцах после ЛУО по схеме №1

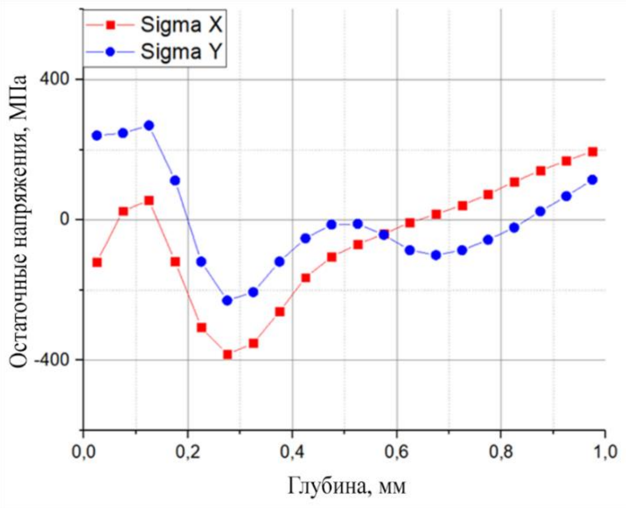


Рисунок 4.15 – Зависимость ОН от глубины на образцах после ЛУО по схеме №2

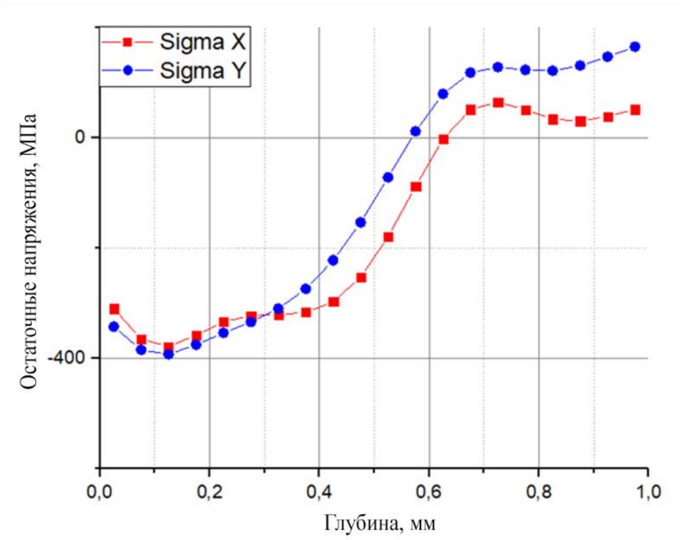


Рисунок 4.16 – Зависимость ОН от глубины на образцах после ЛУО по схеме №3

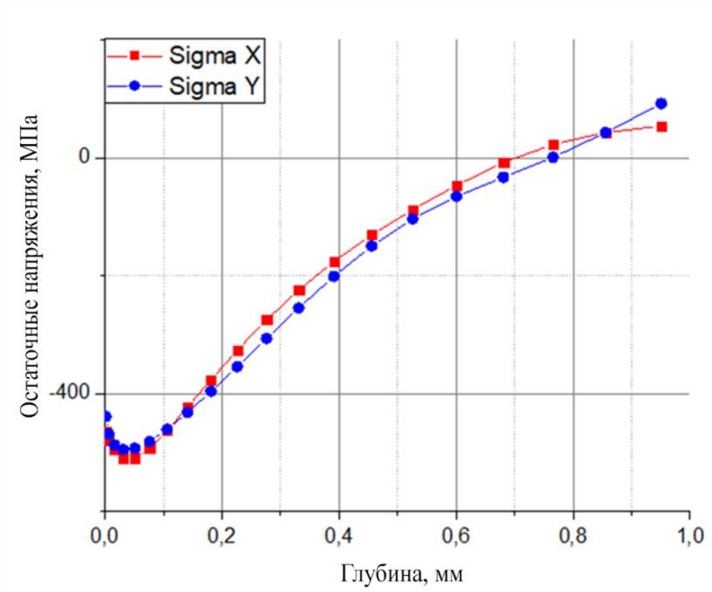


Рисунок 4.17 – Зависимость ОН от глубины на образцах после ЛУО по схеме №4

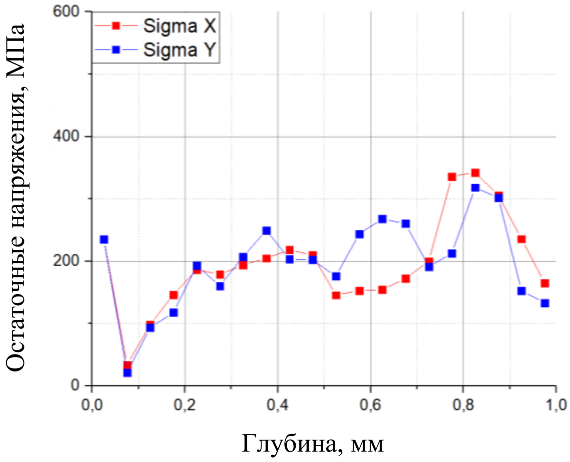


Рисунок 4.18 – Зависимость ОН от глубины на образцах после ЛУО по схеме №5

В результате, показано, что при реализации схемы №1 максимальная величина сжимающих остаточных напряжений наблюдается на поверхности образца и составляет для обеих компоненты 400 МПа, глубина слоя сжимающих остаточных напряжений составляет 0,9 мм. При реализации схеме №2, сформировалось однородное поле ОН (зависимость компонент σ_x и σ_y от глубины слоя различна). Величина компоненты σ_x максимальных сжимающих напряжений составляет 400 МПа, компоненты σ_y – 200 МПа. Максимальные величины компонент сжимающих остаточных напряжений получены на одной и той же глубине в 0,3 мм. После обработки образца согласно схеме №3 в нем сформировалось поле сжимающих остаточных напряжений с максимальной величиной 400 МПа на глубине около 0,1 мм; глубина слоя со сжимающими остаточными напряжениями составила 0,6 мм.

Оптимальной с точки зрения величины сжимающих ОН и глубине слоя обработки является схема №4. В результате ее применения удалось сформировать слой сжимающих остаточных напряжений глубиной 0,8 мм, при этом максимальное значение обеих компонент сжимающих ОН составило 500 МПа вблизи поверхности образца. При Схеме обработки №5 лазерный удар приходился на торцевую часть области выреза, где невозможно использовать метод сверления отверстий ввиду его ограничений. Данные, полученные в точке, указанной на рисунке 4.18 не дают верного представления о сформированном при схеме обработки №5 поле остаточных напряжений в концентраторе.

Таким образом, согласно полученным профилям остаточных напряжений, наиболее эффективной является схема обработки №4 при условии того, что профиль остаточных напряжений, полученный в результате ЛУО образца согласно схеме №5, получен не корректно.

4.2.3. Усталостные испытания плоских образцов из титанового сплава ВТ6 после ЛУО

Исследование усталостных свойств плоских образцов из титанового сплава ВТ6 без лазерной ударной обработки и после нее проводилось на сервогидравлической испытательной машине Biss Bi-00-100 в условиях одноосного циклического деформирования с коэффициентом асимметрии цикла R=0,1 при максимальной нагрузке в цикле 10 кН.

Длина трещины измерялась методом падения электрического потенциала. В результате исследований были получены зависимости длины трещины от времени, теплового потока от времени и диаграммы, отражающие долговечность испытанных образцов в зависимости от режима лазерной ударной обработки.

Для оценки количества циклов до разрушения всего был исследован 21 образец. Из них 4 шт. – без ЛУО, 2 шт. – обработанные по схеме №1, 2 шт. – в модифицированной схеме №1, 3 шт. – по схеме №2, 3 шт. – по схеме №3, 3 шт. – по схеме №4 и 4 шт. – по схеме №5. На рисунках 4.19-4.23 представлены характерные зависимости длины трещины и теплового потока в процессе усталостного испытания образцов без обработки и после ЛУО по схемам №1-4 от времени. Для схемы ЛУО №5 эти зависимости не представлены, поскольку из четырех испытанных образцов, обработанных по схеме №5, два не были доведены до разрушения, на них трещины к концу усталостного испытания не образовались; два других образца разрушились не в зоне концентратора напряжений, а в области захватов, что не позволило корректно использовать данные метода падения электрического потенциала, которым измерялась текущая длина трещины.

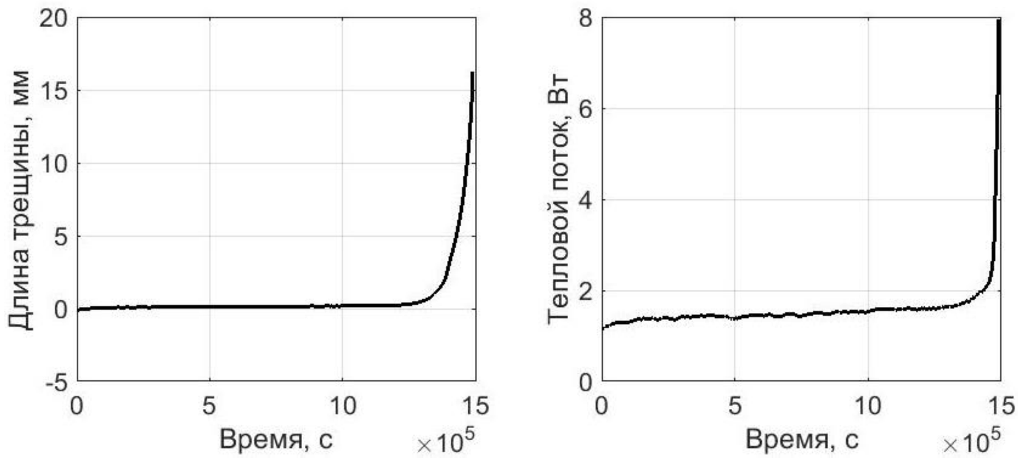


Рисунок 4.19 – Характерный графики зависимости длины трещины (а) и теплового потока (б) от времени в процессе усталостных испытаний образцов из титанового сплава ВТ6 с круглым вырезом без обработки

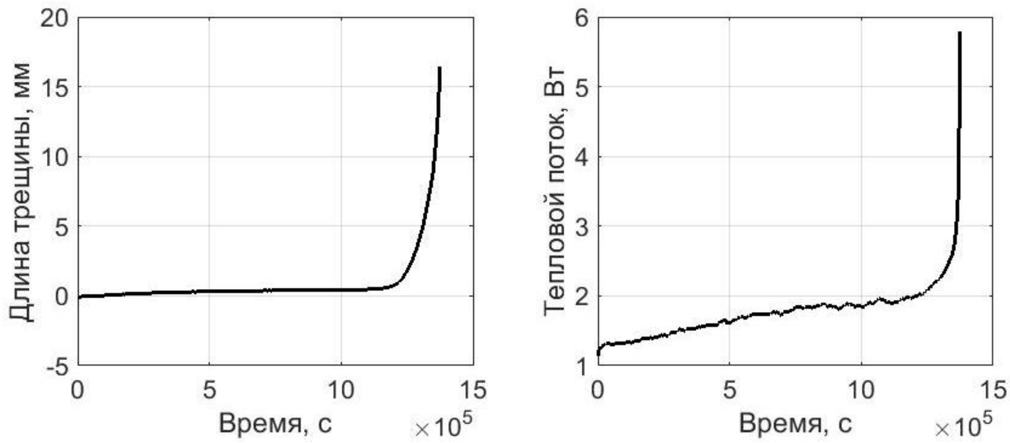


Рисунок 4.20– Характерный графики зависимости длины трещины (а) и теплового потока (б) от времени в процессе усталостных испытаний образцов из титанового сплава ВТ6 с круглым вырезом после ЛУО по схеме №1

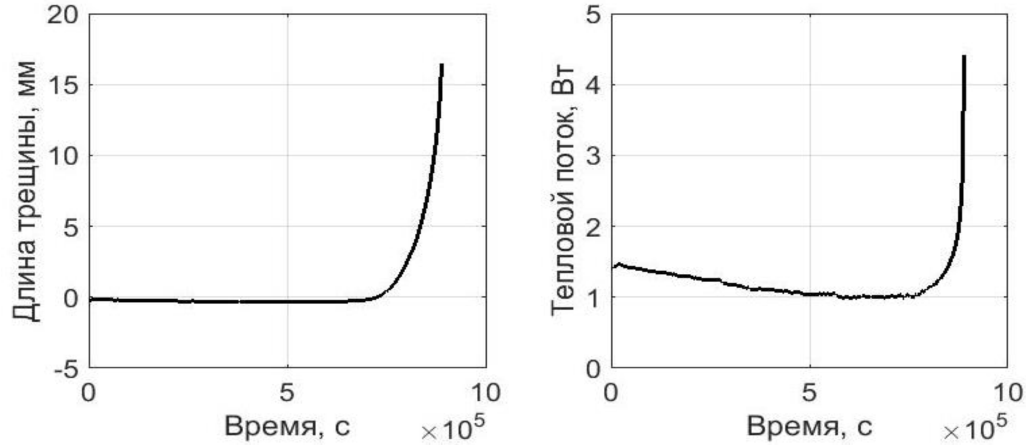


Рисунок 4.21 – Характерный графики зависимости длины трещины (а) и теплового потока (б) от времени в процессе усталостных испытаний образцов из титанового сплава ВТ6 с круглым вырезом после ЛУ обработке по схеме №2

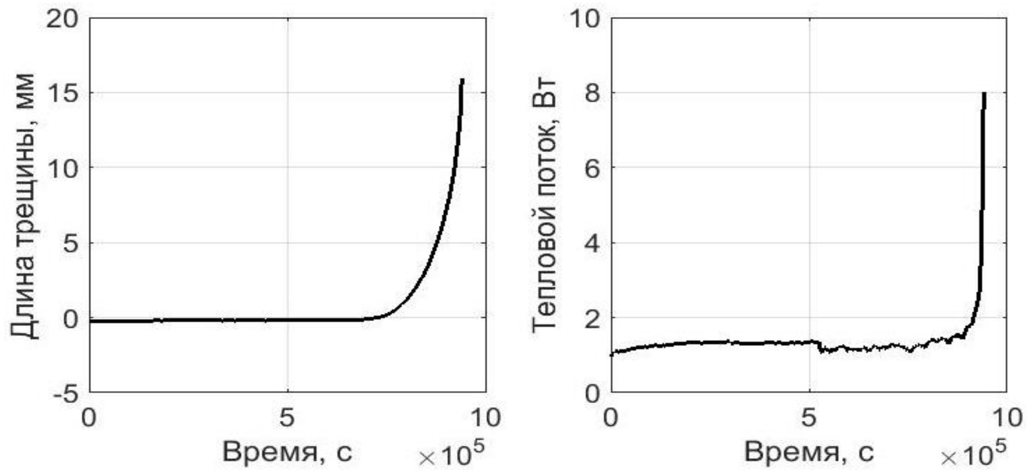


Рисунок 4.22 – Характерный графики зависимости длины трещины (а) и теплового потока (б) от времени в процессе усталостных испытаний образцов из титанового сплава ВТ6 с круглым вырезом после ЛУО по схеме №3

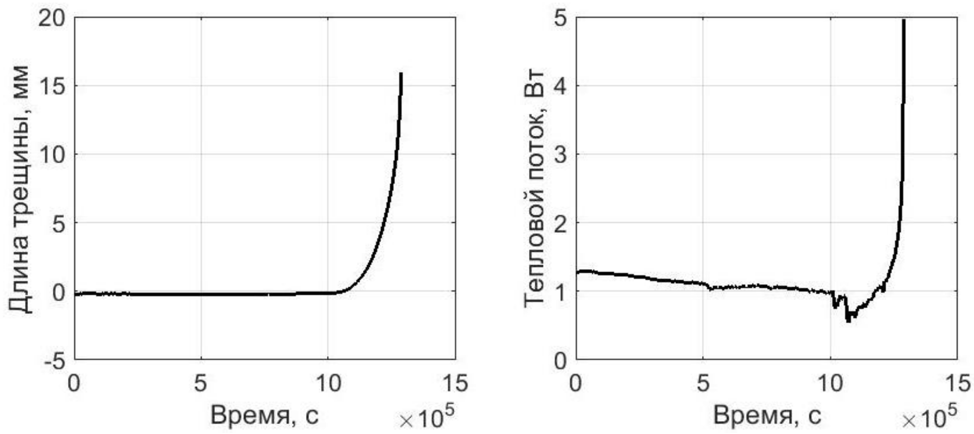


Рисунок 4.23 – Характерный графики зависимости длины трещины (а) и теплового потока (б) от времени в процессе усталостных испытаний образцов из титанового сплава ВТ6 с круглым вырезом после ЛУО по схеме №4

Диаграмма, отражающая зависимость усталостного ресурса от способа лазерной ударной обработки, представлены на рисунке 4.24. Одна из модификации схемы №1 заключалась в дополнении места ЛУО – помимо плоскостей образца обрабатывался еще торец в вырезе. Она обозначена на рисунке 4.24 как “Схема 1 + Торец”. Вторая модификация схемы №1 заключалась в изменении энергии лазерного луча с 1 Дж (в исходном варианте схемы №1) на 3 Дж (в модифицированном варианте). Она обозначена на рисунке 4.24 как “Схема 1 (3 Дж)”.

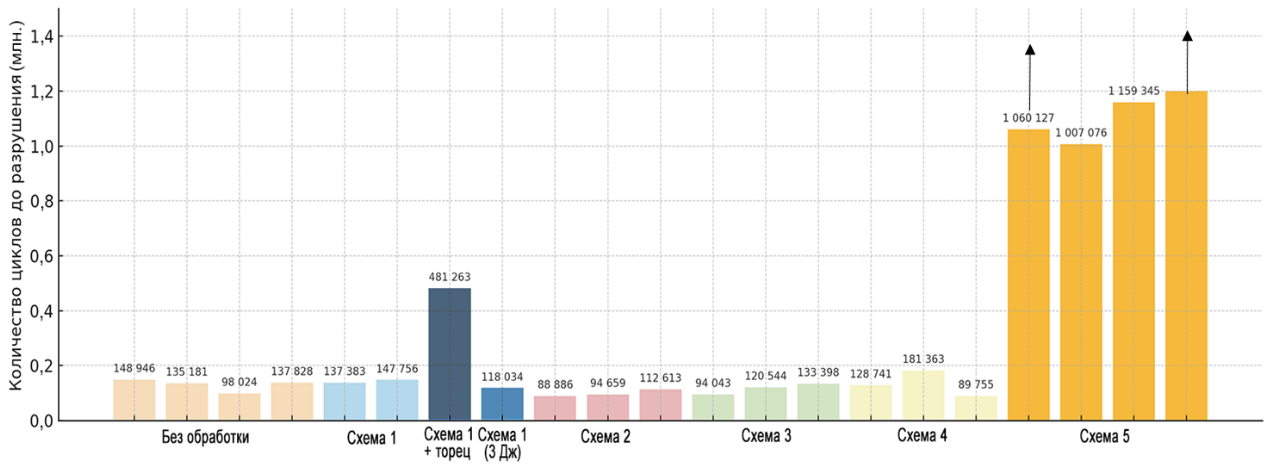


Рисунок 4.24 – Результаты усталостных испытаний образцов из титанового сплава ВТ6 без обработки и после ЛУ воздействия по схемам №1-5

Среднее количество циклов до разрушения и доверительные интервалы с вероятностью 0,9 образцов без обработки составило 129995±26042, после схемы обработки №1 – 142570±32747, после схемы №2 – 98719±20860, после схемы №3 – 115995±33832, после схемы №4 – 133286±77503. Из четырех испытанных образцов, обработанных по схеме №5, два не были доведены до разрушения с числом циклов наработки 1060127 и 3108610, два других образца разрушились не в зоне концентратора напряжений, а в области захвата с числом циклов наработки 1007076 и 1159345.

Таким образом, режимы 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 Режима №1 “Схема 1 + Торец” позволила повысить ресурс примерно в 4 раза, но при этом увеличилась площадь обработки образца и, соответственно, затрачиваемое на обработку время.

ЛУО только торца образца в области круглого выреза (схема №5) усталостная долговечность может быть оценена снизу величиной 10^7 циклов демонстрирует как минимум семикратное увеличение по сравнению с базовыми образцами без обработки. С точки зрения повешения усталостного ресурса плоских образцов из титанового сплава ВТ6, схема ЛУО №5 является наиболее эффективной.

4.2.4. Численное моделирование лазерной ударной обработки с различными зонами лазерного воздействия

Численное моделирование процесса лазерной ударной обработки выполнялось в программном комплексе ANSYS LS-Dyna, предназначенном для решения задач нестационарной динамики. В модели процесс ЛУО рассматривался как чисто механическое явление, то есть без учета тепловых эффектов, связанных с абляцией материала и образованием плазмы [160].

Воздействие лазерного импульса моделировалось с помощью механической функции давления, приложенной к обработанной поверхности, что позволяло воспроизвести распространение ударной волны в материале.

Давление, создаваемое лазером, измерялось методом фотонной допплеровской интерферометрии (Photonic Doppler Velocimetry, PDV). Этот метод использует аппаратно-программный комплекс для проведения Фурье-анализа гетеродинных интерферометрических сигналов. Измеренный импульс давления хорошо описывался трапецеидальной аппроксимацией (рис. 4.25), включающей три стадии:

1. Рост давления в течение 12 нс, связанный с нагревом плазмы;
2. Около 6 нс плато почти постоянного давления, соответствующее начальному этапу расширения;
3. Спад давления в течение примерно 50 нс, вызванный гидродинамическим расширением плазмы [161].

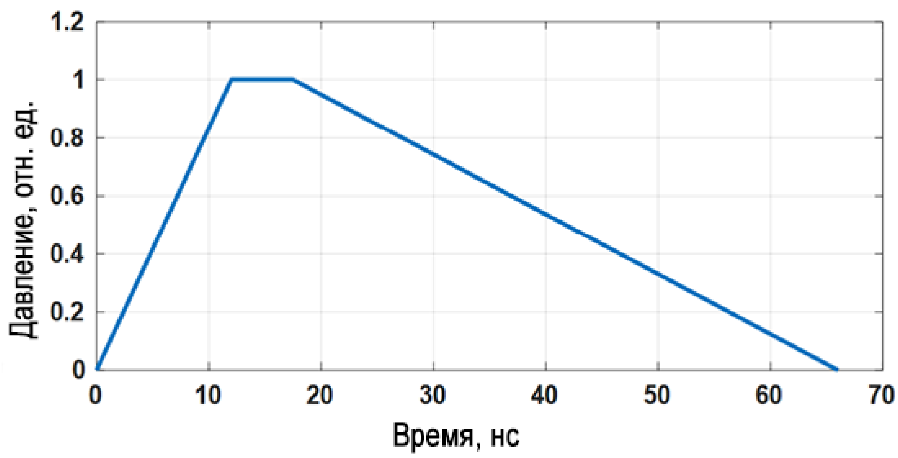
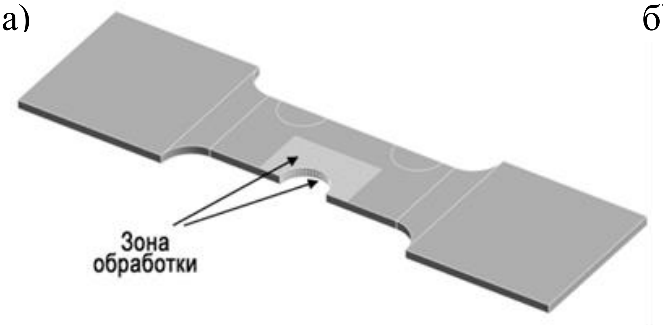


Рисунок 4.25 – Длительность и форма импульса давления для сплава TC4.

Расчетная область, показанная на рисунке 4, воспроизводила геометрию экспериментальных образцов. Граничные условия задавались таким образом, чтобы имитировать зажим образца в захвате роботизированного манипулятора во время ЛУО. В частности, модель фиксировалась в полукруглых зонах на концах образца – на лицевой стороне и противоположной (рис. 4.26а).

а)



б)

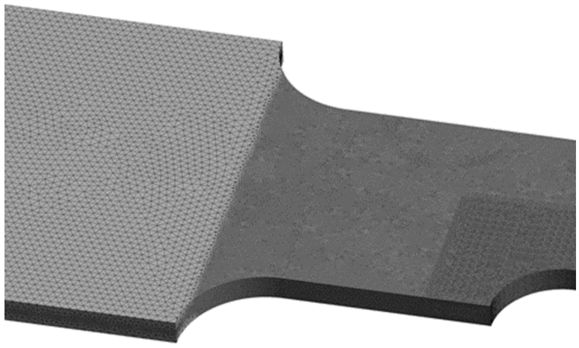


Рисунок 4.26 – Фиксированные граничные условия (а), дискретизация методом конечных элементов (б)

Модель была дискретизирована с использованием четырехузловых линейных гексаэдрических элементов. В зоне обработки применялась более плотная сетка; исследование сходимости показало, что оптимальный размер элемента в этой области составляет 0,1 мм. В остальных областях размер ячейки постепенно увеличивался, но не превышал 1 мм (рис. 4.26б).

Для описания динамической деформации материала использовалась модель Джонсона-Кука, так как она сочетает простоту идентификации параметров с высокой точностью описания распространения упругопластических волн в металле [162]. Аналитическая форма модели записывается следующим образом:

$$\sigma_y = [A + B(\dot{\varepsilon}_{eq}^{pl})^n][1 + C\ln\frac{\dot{\varepsilon}_{eq}^{pl}}{\dot{\varepsilon}_{eq,o}^{pl}}][1 - \left(\frac{T - T_o}{T_m - T_o}\right)^m], \qquad (4.1)$$

где:

σ_γ – интенсивность напряжений на поверхности текучести;

$\dot{\varepsilon}_{eq}^{pl}$ – интенсивность скорости пластической деформации;

$\dot{\varepsilon}_{eq,o}^{pl}$ – эталонная скорость пластической деформации;

A, B, C, n – параметры, характеризующие пластическое поведение материала;

T – температура материала при испытании;

T_r – комнатная температура;

T_m – температура плавления;

m – параметр, описывающий влияние термического разрушения.

С учетом того, что при лазерной ударной обработке термическое разрушение отсутствует, а локальный нагрев кратковременен, температурные параметры не учитывались. Постоянные модели и механические свойства материала приведены в таблицах 4.3 и 4.4.

Таблица 4.3 – Константы Джонсона-Кука для ВТ6

A, MPa	B, MPa	C	n	$\dot{\varepsilon}$
978	826	0,639	0,034	0,005

Таблица 4.4 – Механические константы ВТ6

ρ, kg/m^3	E, GPa	N
4424	113	0,324

Для верификации разработанной модели численные профили остаточных напряжений сравнивались с экспериментальными данными, полученными методом сверления отверстий в соответствия.

Экспериментальные и рассчитанные профили остаточных напряжений после ЛУО показаны на рисунке 4.27. Хорошее совпадение (в пределах 10%) между экспериментальными и численно полученными профилями по глубине подтверждает корректность модели и ее способность адекватно описывать поле остаточных напряжений, формируемое при обработке образцов толщиной 3 мм.

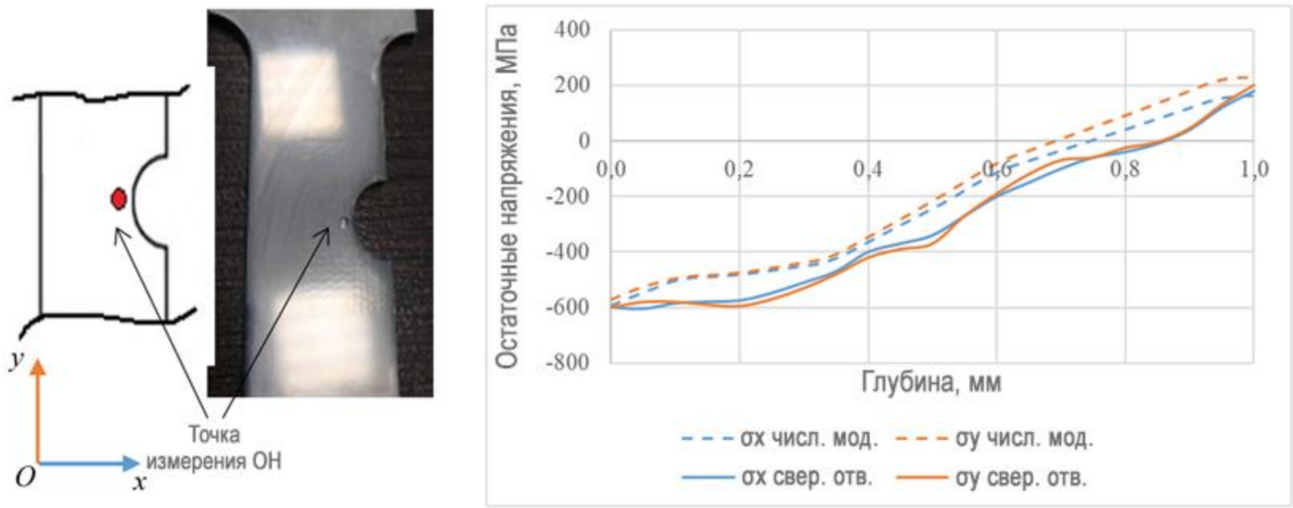


Рисунок 4.27 – Сравнение профилей ОН, полученных методом сверления отверстий и численным моделированием

На рисунке 4.28 представлены изополя остаточных напряжений, сформированные в результате численного моделирования лазерной ударной обработки для различных схем обработки.

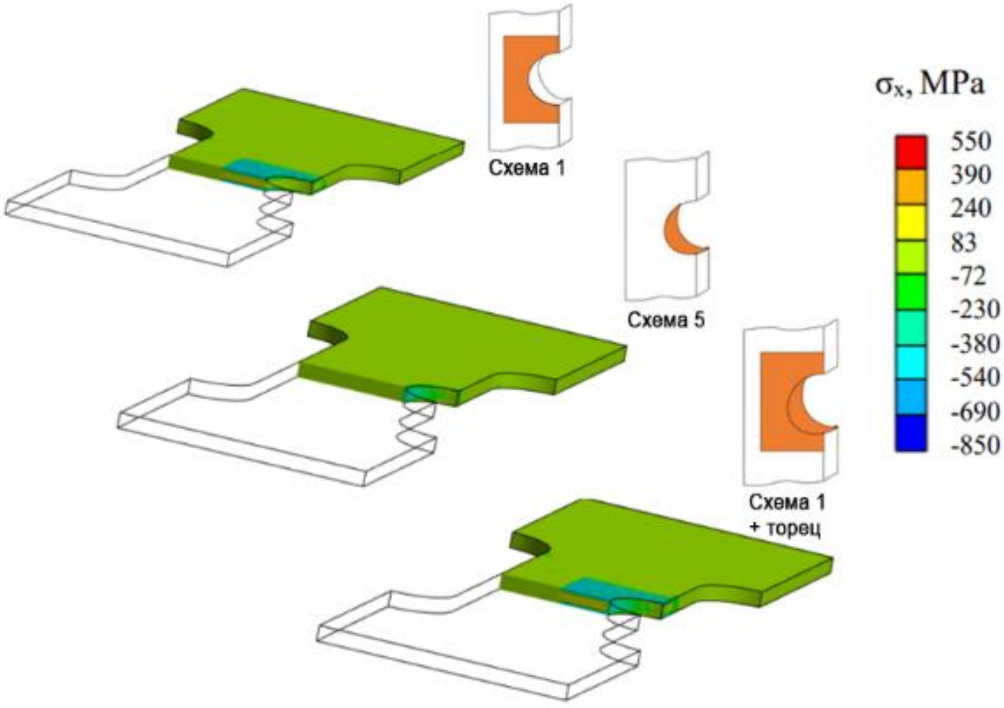


Рисунок 4.28 – Распределение остаточных напряжений при различных схемах обработки

Для схемы 1 в области концентратора напряжений наблюдается формирование растягивающих напряжений, что потенциально снижает усталостную прочность образца, поскольку такие напряжения способствуют зарождению и росту усталостной трещины.

Введение дополнительной обработки (схема 1 + торец) позволило создать в зоне концентратора сжимающие напряжения в торцевой части надреза, тем самым вытеснив растягивающие напряжения вглубь материала. Такое перераспределение напряженного состояния является благоприятным, поскольку смещает максимум растягивающих напряжений за пределы зоны зарождения трещины, тем самым повышая сопротивляемость образца усталостному разрушению.

Наиболее эффективной оказалась схема 5, при которой воздействие лазерных импульсов было направлено непосредственно на область концентратора напряжений. Именно такая конфигурация обеспечила наиболее глубокое и равномерное поле сжимающих остаточных напряжений, полностью исключающее локальные растягивающие зоны на поверхности надреза. С научной точки зрения, это свидетельствует о максимальной эффективности передачи энергии ударной волны в критическую область детали и о наиболее благоприятном распределении тензора остаточных напряжений с точки зрения противодействия раскрытию трещины.

4.3. Усталостные испытаний образцов с концентратором напряжений, упрочненных ЛУО с оптимальными параметрами

4.3.1. Материалы и методика эксперимента

Эксперименты проводились на плоских образцах толщиной 3 мм из титанового сплава ВТ6 с круглым вырезом (рисунок 4.29).

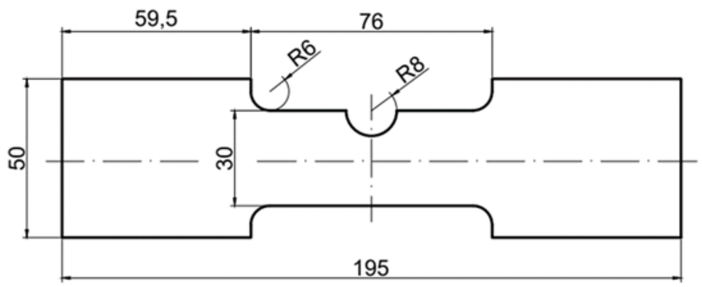


Рисунок 4.29 – Геометрия образцов из титанового сплава

Режим обработки, выбранный исходя из результатов предыдущих глав, представлен в таблице 4.5.

Таблица 4.5 – Режим обработки образцов из ВТ6

Плотность мощности энергии	10 ГВт/см^2
Геометрия пятна лазерного луча	Квадрат со стороной 1 мм
Перекрытие	0 %

Частота импульсов	1 Гц (для торца), 5 Гц (для поверхностей)
Защитное покрытие	Алюминиевая фольга

Схема ЛУО представляет собой схему №1 + обработка торца (рисунок 4.30). Образцы упрочнялись с двух сторон вокруг круглого выреза, дополнительно была добавлена обработка непосредственно в полукруглом вырезе по криволинейной траектории. После ЛУО образцы испытывались в условиях циклического деформирования на 100 кН сервогидравлической испытательной машине Bi-00-100 с максимальной силой нагружения в цикле F_{max}=10кН, коэффициентом асимметрии цикла R=0,1 и частотой нагружения 10 Гц. Длина трещины определялась в процессе усталостного испытания с помощью метода падения электрического потенциала. Образец электрически изолировался от испытательной машины с помощью прокладок из плотного картона и абразивной бумаги между губками захватов и образцом.

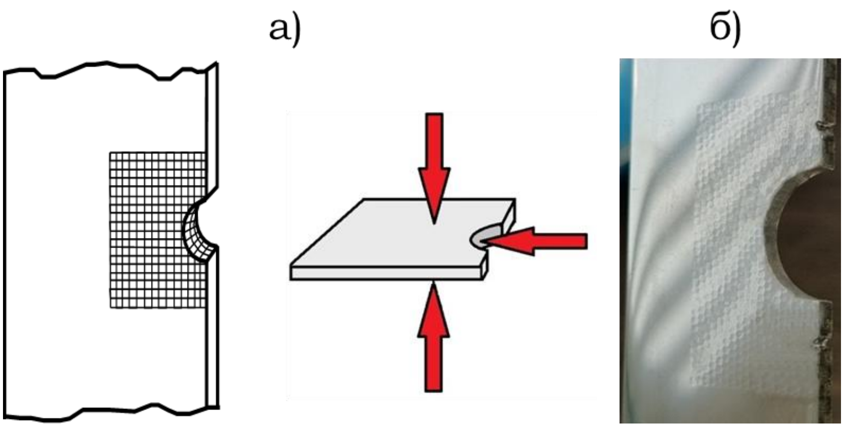


Рисунок 4.30 – Схематичное изображение области и направления обработки (а) и фото обработанного образца (б)

4.3.2. Результаты усталостных испытаний образцов из ОТ4-0

Распределение ОН представлены на рисунке 4.27. Величина максимальных сжимающих напряжений находится в районе 400 МПа, глубина их слоя достигает отметки в 0,9 мм.

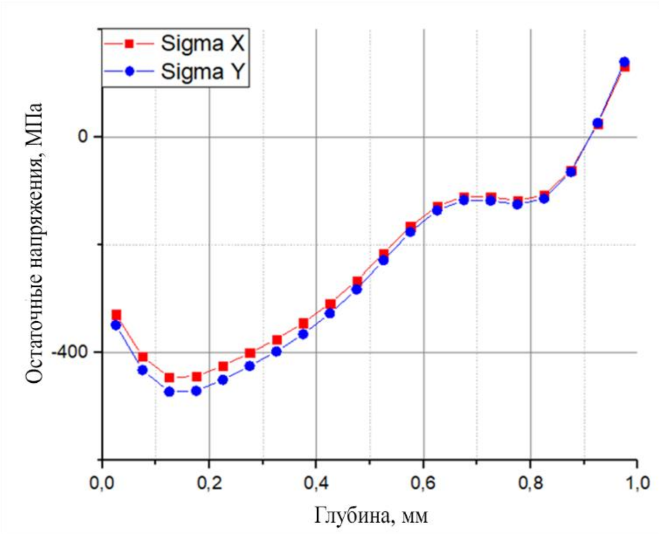


Рисунок 4.31 – Профили ОН для образца из ВТ6

В таблице 4.6 представлены данные о проведенных экспериментах с максимальной силой 10 кН.

Таблица 4.6 – Данные проведенных экспериментов при максимальной прикладываемой нагрузке в цикле 10 кН

№	Имя	Вид	Кол-во циклов	Прим
1	Sp1	Без ЛУО	128 552	Разрушился в надрезе
2	Sp2	Без ЛУО	232 292	Разрушился в надрезе
3	Sp3	Без ЛУО	139 058	Разрушился в надрезе
4	Sp6	Без ЛУО	182 809	Разрушился в надрезе
5	Sp8	Без ЛУО	201 901	Разрушился в надрезе
6	Sp10	Без ЛУО	105 119	Разрушился в надрезе
7	Sp4	После ЛУО	607 470	Разрушился в надрезе

8	Sp5	После ЛУО	1 633 186	Разрушился в захвате
9	Sp7	После ЛУО	3 493 291 ↑	НЕ разрушился
10	Sp9	После ЛУО	2 586 059 ↑	НЕ разрушился

Анализ результатов проведенной серии испытаний показал, что при модифицированном режиме ЛУО процесс зарождения трещины занимает длительное время, что приводит к значительному увеличению объема регистрируемых данных.

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 4.32).

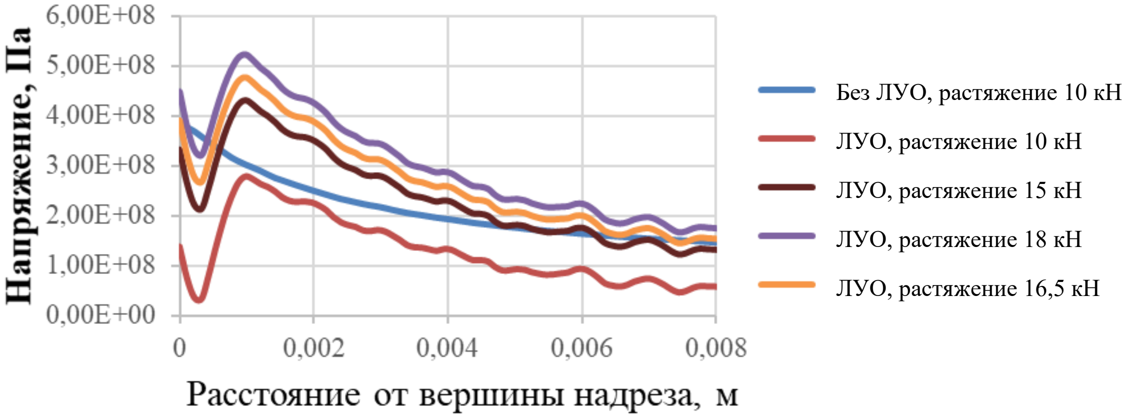


Рисунок 4.32 – График зависимости напряжения *Sx* вдоль оси нагружения от расстояния от вершины выреза к кромке образца

Поскольку в условиях многоцикловой усталости зарождение трещины в основном происходит на поверхности материала, то с помощью численного моделирования необходимо было подобрать такую нагрузку для растяжения образца после ЛУО, при которой напряжения в вершине надреза (начало координат на рисунке 4.33) соответствовали бы напряжениям на образце без ЛУО при его растяжении с силой 10 кН. Анализ полученных численных результатов (график на рисунке 4.33) показывает, что наибольшее соответствие величины напряжений в вершине надреза наблюдается при растяжении образца после ЛУО с силой 16,5 кН. Результаты численного моделирования поля напряжений S_x в направлении нагружающей силы на образце без ЛУО после растяжения с силой 10 кН и на образце с начальным полем остаточных напряжений, созданных ЛУО, и после растяжения с силой 16,5 кН представлены на рисунке 4.33а и 4.33б соответственно.

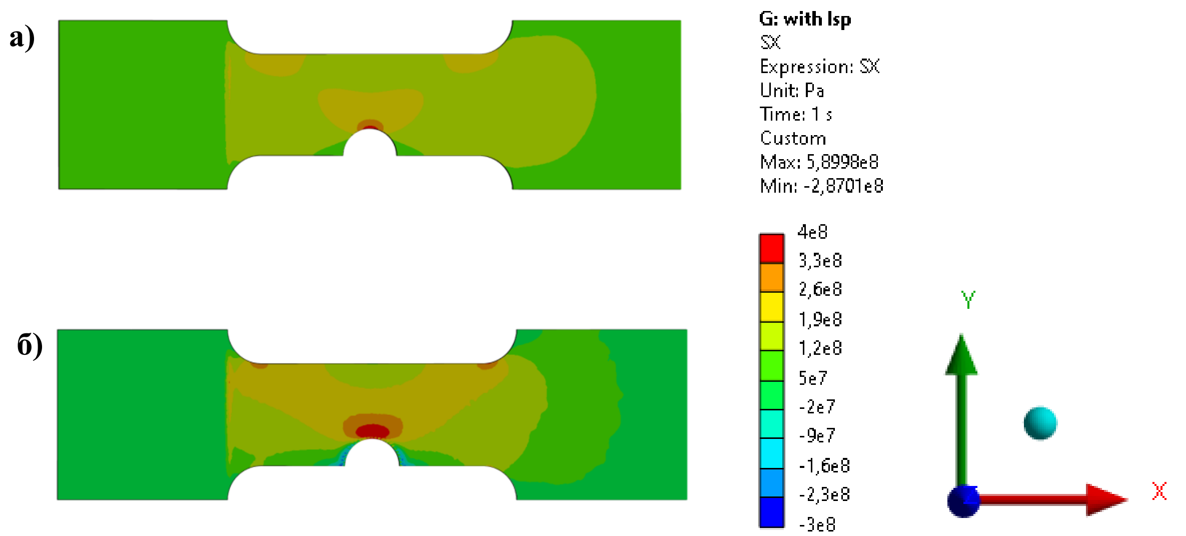


Рисунок 4.33 – Поле напряжений в рабочей части образца без ЛУО после его растяжения с силой 10 кН (б) и образца после ЛУО при его растяжении с силой 16,5 кН

Таким образом, численное моделирование позволило оценить значение величины максимальной силы в цикле нагружения образцов после ЛУО, при котором напряжения в боковом надрезе были бы эквивалентны напряжениям на образце без ЛУО при максимальной силе в цикле нагружения 10 кН.

Данные дополнительных испытаний представлены в таблице 4.7.

Таблица 4.7 – Данные о проведенных экспериментах при максимальной прикладываемой нагрузке 16,5 кН

№	**Имя**	**Вид**	**Кол-во циклов**	**Прим**
1	Sp18	Без ЛУО	21 185	Разрушился в надрезе
2	Sp11	После ЛУО	147 587	Разрушился в надрезе
3	Sp12	После ЛУО	142 344	Разрушился в надрезе
4	Sp14	После ЛУО	102 387	Разрушился в надрезе
5	Sp15	После ЛУО	229 058	Разрушился в захвате
6	Sp16	После ЛУО	105 258	Разрушился в захвате

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). На рисунке 4.34 представлена диаграмма, отражающая результаты механических испытаний обработанных и необработанных образцов из титанового сплава ВТ6 при максимальной силе в цикле 10 кН и 16,5 кН.

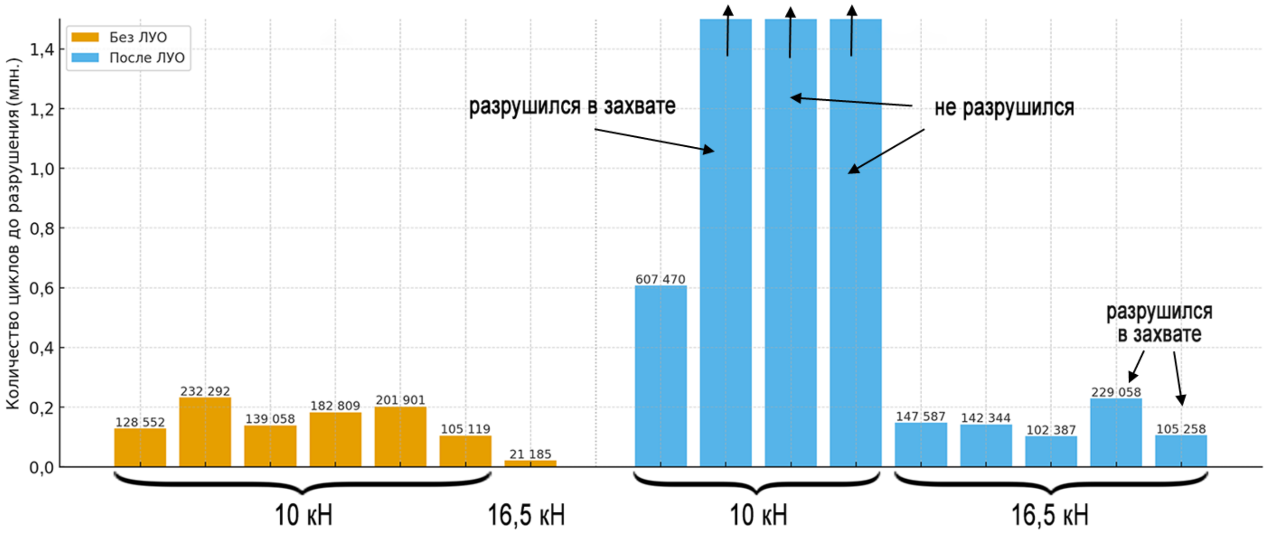


Рисунок 4.34 – Диаграмма результатов усталостных испытаний базовых и обработанных образцов

Среднее количество циклов до разрушения и доверительные интервалы с вероятностью 0,9 образцов без обработки, испытанных при 10 кН составило 164955±39954, после обработки при тех же условиях испытаний 2080002±1460456, без обработки, испытанных при 16,5 кН составило 21185, после обработки при тех же условиях испытаний 145327±48787. Данные экспериментов показывают хорошее совпадение усталостной долговечности необработанных образцов, испытанными на усталость при максимальной нагрузке в цикле 10 кН, и образцов после ЛУО, которые испытывались при 16,5 кН, что подтверждает корректности численных результатов.

Все образцы, подвергавшиеся ЛУО в выбранном режиме, показали значительное увеличение ресурса. Численное моделирование, а затем и экспериментальное исследование показали, что эквивалентная максимальная нагрузка в цикле (нагрузка, при которой образцы с ЛУО и без ЛУО выдерживают примерно одинаковое количество циклов до разрушения) составляет 16,5 кН, что более чем в 1,5 раза больше максимальной нагрузки в цикле для образцов без ЛУО. Однако, при явном увеличении долговечности образцов после ЛУО, наблюдается непостоянство получаемых результатов. Анализ диаграммы на рисунке 4.35 показывает, что зарождение и развитие трещины на образцах после ЛУО может происходить как в боковом надрезе, так и в зоне перехода от рабочей части к захватам, либо вообще не происходит на базе 10^6 циклов, когда объем всех регистрируемых данных становится значительным.

4.3.3. Исследование кинетических особенностей распространения трещины в материале после ЛУО

В процессе усталостных испытаний одновременно регистрировались поле температур и тепловой поток в области распространения трещины, длина трещины и сигналы акустической эмиссии. Ниже представлены результаты для тех образцов, которые разрушились в области бокового надреза. Согласно таблицам 4.6 и 4.7 это образцы Sp1, Sp2, Sp3, Sp6, Sp8, Sp10, Sp4 (при F_{max}=10 кН) и образцы Sp18, Sp11, Sp12, Sp14 (при F_{max}=16,5 кН). Зависимость длины трещины от времени эксперимента при различной величине максимальной нагрузки в цикле показаны на рисунке 4.35.

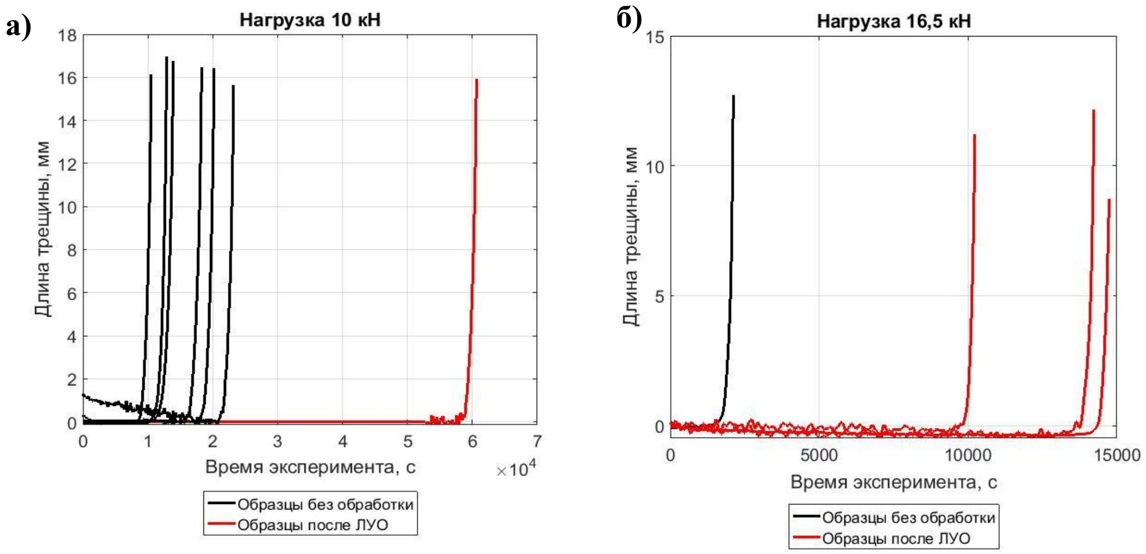


Рисунок 4.35 – Экспериментально полученная зависимость длины трещины от времени при максимальной нагрузке в цикле нагружения 10 кН (а) и 16,5 кН (б) для образцов без ЛУО и после нее

На начальном участке, когда трещина еще не зародилась, наблюдаются колебания данных, в том числе отрицательные значения, связанные с погрешностями метода падения электрического потенциала и электрическими наводками в сети. Экспериментальные данные скорости роста трещины в зависимости от ее длины представлены на рисунке 4.36.

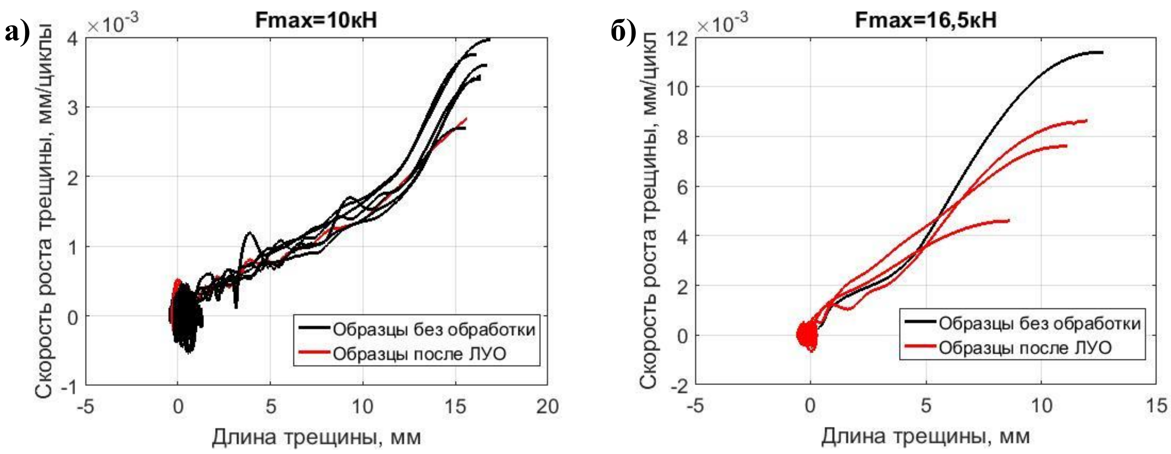


Рисунок 4.36 – Зависимость скорости роста трещины от ее длины при максимальной нагрузке в цикле нагружения 10 кН (а) и 16,5 кН (б) для образцов без ЛУО и после нее

Сопоставление данных показывает корреляцию между скоростью роста трещины при одной и той же длине трещины на образцах без ЛУО и после нее. Вместе с этим, при максимальной нагрузке в цикле 16,5 кН (рисунок 4.37б), начиная с длины трещины около 5 мм, скорость роста трещины на образце без обработки возрастает по сравнению с данными образцов после ЛУО. Это связано с тем, что остаточные напряжения в области обработки складываясь с приложенными напряжениям уменьшают значение коэффициента интенсивности в вершине трещины.

Анализ результатов показывает, что выбранный режим ЛУО позволяет увеличить ресурс образца за счет увеличения периода зарождения трещины. После того, как трещина зародилась, скорость ее роста сопоставима со скоростью роста трещины в образце без обработки.

Выводы

Установлено, что для образцов с концентраторами напряжений размещение зоны лазерной ударной обработки непосредственно вокруг концентратора вне зависимости от его геометрии обеспечивает значительное повышение усталостной долговечности. В среднем долговечность увеличивается на 80% по сравнению с необработанными образцами. При этом обработка на расстоянии от концентратора не только не улучшает усталостные характеристики материала, но и снижает его ресурс относительно исходного состояния. Данный результат подтверждает важность роли локализации зоны ЛУО в формировании благоприятного напряженного состояния в области зарождения усталостной трещины.

Для плоских образцов из титанового сплава ВТ6 с круглыми вырезами наиболее эффективным оказалось проведение ЛУО внутреннего торца бокового отверстия. Данная схема обработки позволила достичь увеличения усталостного ресурса не менее чем в 8 раз по сравнению с необработанными образцами. Это связано с совпадением ориентации главных осей тензора остаточных напряжений и моды раскрытия трещины. В результате коэффициент концентрации напряжений в вершине выреза существенно снижается.

Выбранные технологические режимы, сформированные на основе результатов предыдущих глав, обеспечивают оптимальные профили остаточных напряжений как по величине, так и по глубине их проникновения. Это подтверждает возможность целенаправленного управления характеристиками напряженного состояния для повышения усталостной долговечности титановых сплавов с концентраторами напряжений.

Анализ результатов усталостных экспериментов позволил предположить, что основным механизмом повышения усталостной долговечности образцов после ЛУО является увеличение периода зарождения усталостной трещины за счет созданных остаточных напряжений. После возникновения трещины ее рост протекает с характерными скоростями, сопоставимыми с образцами без обработки. Следовательно, в исследованном диапазоне нагрузок и номенклатуры образцов ключевая роль ЛУО заключается в смещении момента зарождения трещин на более поздние стадии нагружения.

Обобщение полученных данных позволяет заключить, что решающим фактором эффективности лазерной ударной обработки при наличии концентраторов напряжений является не столько уровень прикладываемой энергии, сколько корректный выбор места приложения воздействия. Именно пространственная локализация зоны обработки обеспечивает максимальный прирост усталостной долговечности, что необходимо учитывать при разработке технологических схем ЛУО для реальных конструкций.

Результаты решения поставленной задачи опубликованы в работах [163-169].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итоги выполненного исследования

В ходе работы был создан программно-аппаратный комплекс, обеспечивающий проведение лазерной ударной обработки в широком диапазоне интенсивностей лазерного воздействия и позволяющий оценивать создаваемые в процессе обработки остаточные напряжения. Данный комплекс может применяться как для проведения фундаментальных исследований в области формирования напряженного состояния при ЛУО, так и для мелкосерийной обработки деталей, что подтверждает его универсальность и прикладную ценность.

Сравнительный анализ методик измерения остаточных напряжений показал, что оптимальным подходом при использовании метода сверления отверстий является стандартизированная методика с кубическим распределением глубины измерений, обеспечивающая согласованность измеренных значений с данными рентгеноструктурного анализа. Данный метод позволяет с высокой точностью оценивать остаточные напряжения не только вблизи поверхности, но и на глубине до 1 мм.

Экспериментальные исследования показали, что формирование остаточных напряжений при ЛУО определяется, прежде всего, интенсивностью лазерного воздействия и свойствами защитного покрытия. Существенное влияние на глубину залегания сжимающих напряжений оказывает количество проходов обработки, тогда как перекрытие импульсов играет менее значимую роль. Геометрия лазерного пятна на распределение остаточных напряжений влияния не оказывает.

Усталостные испытания продемонстрировали, что решающим фактором повышения долговечности образцов с концентраторами напряжений из титановых сплавов ВТ6, ВТ1-0 и ОТ4-0 является корректный выбор места приложения лазерного воздействия. Обработка зоны концентратора обеспечивает многократное увеличение усталостного ресурса, в то время как смещение зоны ЛУО на расстояние от концентратора снижает эффективность метода. Установлено, что основной механизм улучшения усталостных свойств связан с увеличением периода зарождения трещины, тогда как скорость ее последующего роста практически не меняется по сравнению с необработанными образцами.

Таким образом, проведенные исследования позволили обосновать эффективные режимы лазерной ударной обработки и выявить ключевые факторы, определяющие ее результативность, что создает основу для практического применения метода при проектировании и упрочнении ответственных элементов из титановых сплавов.

Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы

Полученные результаты дают возможность дальнейшего развития технологии лазерной ударной обработки и методов ее контроля. Перспективным направлением является оптимизация параметров лазерного воздействия с учетом свойств различных материалов и геометрии обрабатываемых деталей. Для этого полезной будет разработка численных моделей, основанных на сопряженных задачах термомеханики и динамики плазмы, может позволить прогнозировать распределение остаточных напряжений и сократить объем экспериментальных исследований. Дальнейшее развитие темы связано с исследованиями влияния остаточных напряжений, создаваемых при ЛУО, на долговечность и надежность реальных конструкций, например, в авиационной и аэрокосмической отраслей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Нестеренко Б.Г. Требования по усталости и живучести конструкций гражданских самолетов // Научный вестник МГТУ ГА. – 2011. – №163. – Р. 49-59.

2. Wang C. H. Introduction to fracture mechanics. – Melbourne, Australia: DSTO Aeronautical and Maritime Research Laboratory, 1996. – P. 0082.

3. Findlay S. J., Harrison N. D. Why aircraft fail //Materials today. – 2002. – Vol. 5, № 11. – P. 18-25.

4. Orabi H. A. Aircraft accident reports: A corpus-based genre analysis //Discourse & Communication. – 2024. – Vol. 18, № 2. – P. 290-313.

5. Nelson D. V. Effects of residual stress on fatigue crack propagation //Residual stress effects in fatigue. – ASTM International, 1982.

6. Clauer A. H. Laser shock peening for fatigue resistance //Surface performance of titanium. – 1996. – Vol. 217. – P. 230.

7. Nie X. et al. Effect study and application to improve high cycle fatigue resistance of TC11 titanium alloy by laser shock peening with multiple impacts //Surface and Coatings Technology. – 2014. – Vol. 253. – P. 68-75.

8. Griffith A. A. The phenomena of rupture and flow in solids // Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A. – 1921. – Vol. 221. – P. 163-198.

9. Irwin G.R. Analysis of stresses and strains near the end of a crack traversing a plate // Journal of Applied Mechanics. – 1957. – Vol. 24. – P. 361–364.

10. Леонов М. Я., Панасюк В. В. Развитие мельчайших трещин в твердом теле //Прикл. механика. – 1959. – Т. 5, № 4. – С. 391-401.

11. Келдыш М. В. Избранные труды. Механика / отв. ред. К. И. Бабенко, Г. П. Свищев, Н. Н. Ченцов. – М.: Наука, 1985. – 568 с.

12. Морозов Е. М. Энергетическое условие роста трещин в упруго-пластических телах //Доклады Академии наук. – Российская академия наук, 1969. – Т. 187, № 1. – С. 57-60.

13. Р.П. Тимошенко, Дж. Гудьер. Теория упругости. – М.: Наука, 1975. – 560 с.

14. Механика разрушения. Черепанов Г.П., Ершов Л.В. – М.: Машиностроение, 1977. – 224 с.

15. Писаренко Г.Р., Лебедев А.А. Деформирование и прочность материалов при сложном напряженном состоянии. – Киев: Наукова думка, 1976. – 416 с.

16. Mikhailov S. E. A functional approach to non-local strength conditions and fracture criteria. Body and point fracture //Engineering fracture mechanics. – 1995. – Vol. 52. – № 4. – P. 731-743.

17. Indenbom V. L., Orlov A. N. Physical theory of plasticity and strength // Soviet Physics Uspekhi. – 1962. – Vol. 5. – № 2. – P. 272-291.

18. Сосновский, Л. А. Статистическая механика усталостного разрушения / Л. А. Сосновский. – Минск: Наука и техника, 1987. – 288 с.

19. Панин В. Е., Егорушкин В. Е. Основы физической мезомеханики пластической деформации и разрушения твердых тел как нелинейных иерархически организованных систем //Физическая мезомеханика. – 2015. – Т. 18, № 5. – С. 100-113.

20. Работнов Ю.Н. Механика деформируемого твердого тела. – М.: Наука, 1979. – 744 с.

21. Кудрявцев П.И. Остаточные сварочные напряжения и прочность соединений. – М.: Машиностроение. –1964. – 96 с.

22. Колачев Б. А., Елагин В. И., Ливанов В. А. Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов: Учебник для вузов. – М.: МИСИР. – 2005. – 432 с.

23. Нестеренко Г. И. Ресурс и живучесть самолетных конструкций //Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2005. – № 1. – С. 106-118.

24. Daeubler M. A., Thompson A. W., Bernstein I. M. Influence of microstructure on fatigue behavior and surface fatigue crack growth of fully pearlitic steels //Metallurgical Transactions A. – 1990. – Vol. 21, № 3. – P. 925-933.

25. Терентьев В. Циклическая прочность металлических материалов: Учеб. пособие. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2001. – 61 с.

26. Наймарк О. Б. Коллективные свойства ансамблей дефектов и некоторые нелинейные проблемы пластичности и разрушения //Физическая мезомеханика. – 2003. – Т. 6, № 4. – С. 45-72.

27. Матвиенко Ю. Г., Елеонский Р. И., Писарев В. Р. Накопление повреждений в зоне концентрации напряжений по данным неразрушающего и разрушающего метода //Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2024. – № 5. – Р. 52-68.

28. Shlyannikov V. N. Elastic-plastic mixed-mode fracture criteria and parameters. – Springer Science & Business Media – 2013. – 246 с.

29. Paris P., Erdogan F. A critical analysis of crack propagation laws //Journal of basic engineering. – 1963. – Vol. 85, № 4. – P. 528-533.

30. Schijve J. Fatigue of Structures and Materials. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers. – 2001. – 634 с.

31. Шанявский А.А. Безопасное усталостное разрушение элементов авиаконструкций. Синергетика в инженерных приложениях. – Уфа: Монография, 2003. – 803 с.

32. Вильдеман В. Э. Экспериментальные методы исследований механического поведения конструкционных материалов при сложных термомеханических воздействиях //Аэрокосмическая техника, высокие технологии и инновации. – 2017. –Т. 1. – С. 51-59.

33. Давиденков Н. Н. Усталость металлов. – Киев: изд-во АН УССР АН УССР, Совет научно-техн. пропаганды, 1949. – 63 с.

34. Поздеев А. А., Няшин Ю. И., Трусов П. В. Остаточные напряжения: теория и приложения. – М.: Наука, 1982. – 112 с.

35. Korsunsky A. M., Sebastiani M., Bemporad E. Focused ion beam ring drilling for residual stress evaluation //Materials Letters. – 2009. – Vol. 63, № 22. – P. 1961-1963.

36. Nelson D. V., Makino A., Fuchs E. A. The holographic-hole drilling method for residual stress determination //Optics and lasers in engineering. – 1997. – Vol. 27, № 1. – P. 3-23.

37. Hutchings M. T. et al. Introduction to the characterization of residual stress by neutron diffraction. – CRC press, 2005. – 434 с.

38. Clauer A. H., Holbrook J. H., Fairand B. P. Effects of laser induced shock waves on metals //Shock waves and high-strain-rate phenomena in metals: concepts and applications. – 1981. – P. 675-702.

39. Fabbro R. et al. Physical study of laser-produced plasma in confined geometry //Journal of applied physics. – 1990. – Vol. 68, № 2. – P. 775-784.

40. Peyre P. et al. Surface modifications induced in 316L steel by laser peening and shot-peening. Influence on pitting corrosion resistance //Materials Science and Engineering: A. – 2000. – Vol. 280, № 2. – P. 294-302.

41. Berthe L. et al. Wavelength dependent of laser shock-wave generation in the water-confinement regime //Journal of applied physics. – 1999. – Vol. 85, № 11. – P. 7552-7555.

42. Prevéy P. S. et al. Current applications of X-ray diffraction residual stress measurement //Developments in Materials Characterization Technologies. – 1996. – Vol. 103. – C. 103-110.

43. Sano Y. et al. Process and application of shock compression by nanosecond pulses of frequency-doubled Nd: YAG laser //High-Power Lasers in Manufacturing. – SPIE, 2000. – Vol. 3888. – P. 294-306.

44. Wang J. T. et al. Effect of laser shock peening on the high-temperature fatigue performance of 7075 aluminum alloy //Materials Science and Engineering: A. – 2017. – Vol. 704. – P. 459-468.

45. Zhang Y. K., Zhang S. Y. Study of visual inspection and control methods of effectiveness of laser shock-processing //Applied Physics A: Materials Science & Processing. – 1997. – Vol. 65. – P. 419-423.

46. Liu Q. et al. Laser shock processing of titanium alloys: A critical review on the microstructure evolution and enhanced engineering performance //Journal of Materials Science & Technology. – 2025. – Vol. 209. – P. 262-291.

47. Qin J. et al. Laser Shock Peening Improves the Corrosion Resistance of an E690 High-Strength Steel Cladding Layer //Materials. – 2023. – Vol. 16. – № 16. – P. 5566.

48. Ballard P. et al. Residual stresses induced by laser-shocks //Le Journal de Physique IV. – 1991. – Vol. 1, № C3. – P. C3-487-C3-494.

49. Li X. et al. Gradient microstructures and mechanical properties of WAAMed and aged Al–Cu alloy after laser shock peening //Journal of Manufacturing Processes. – 2024. – Vol. 126. – P. 74-91.

50. Kashaev N. et al. Effects of laser shock peening on the microstructure and fatigue crack propagation behaviour of thin AA2024 specimens //International Journal of Fatigue. – 2017. – Vol. 98. – P. 223-233.

51.Plekhov O. et al. Laser Shock Peening of Titanium Alloy for Improved Fatigue Resistance //Procedia Structural Integrity. – 2025. – Vol. 71. – P. 10-17.

52.Janssen M., Zuidema J., Wanhill R. Fracture mechanics: fundamentals and applications. – Boca Raton : CRC Press, 2004. – 378 p.

53.Терентьев В. Ф., Кораблева Р. А. Усталость металлов. – Москва : Наука, 2015. – 500 с.

54.Klesnil M., Lukác P. Fatigue of metallic materials. – Amsterdam : Elsevier, 1992. – 239 p.

55.Иванова В. П., Терентьев В. Ф. Природа усталости металлов. – Москва : Металлургия, 1975. – 456 с.

56.Поздеев А. А., Няшин Ю. И., Трусов П. В. Остаточные напряжения: теория и приложения. – Москва : Наука, 1982. – 112 с.

57.Богатов А. А. Остаточные напряжения и разрушение металла //Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2007. – № 10. – С. 27-34.

58.Давиденков Н.Н. Об остаточных напряжениях // Заводская лаборатория. – 1935. – Т. 4, №6. – С. 688-698.

59.Фридман Я. Б. Механические свойства металлов : в 2 ч. – Москва : Машиностроение, 1974. – 472 с.

60.Feidenhans R. Surface structure determination by X-ray diffraction //Surface Science Reports. – 1989. – Vol. 10. – № 3. – P. 105-188.

61.Holden T. M. Neutron diffraction //Practical residual stress measurement methods. – 2013. – P. 195-223.

62.ASTM E837-13. Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gage Method. – West Conshohocken : ASTM International, 2013. – 16 p.

63. Li Y. et al. Measurements of residual stresses in a welded orthotropic steel deck by the hole-drilling method considering stress biaxiality //Engineering Structures. – 2021. – Vol. 230. – P. 111690

64. Timoshenko S. P., Goodier J. N. Theory of elasticity. – New York : McGraw-Hill, 1970. – 567 p.

65. Sasaki K., Kishida M., Itoh T. The accuracy of residual stress measurement by the hole-drilling method //Experimental mechanics. – 1997. – Vol. 37. – P. 250-257.

66. Ghaedamini R., Ghassemi A., Atrian A. Ring-core method in determining the amount of non-uniform residual stress in laminated composites: experimental, finite element and theoretical evaluation //Archive of Applied Mechanics. – 2018. – Vol. 88. – P. 755-767.

67. Fauster E., Schalk P., Tratnig M. Calibration method for light sectioning measurement systems //Proceedings of the WSEAS international conference. – 2002. – P. 1891-1898.

68. Валетов В. А. и др. Методика исследования характеристик поверхностного слоя деталей приборов. – Санкт-Петербург : НИУ ИТМО, 2010. – 180 с.

69. Korsunsky A. M. A teaching essay on residual stresses and eigenstrains. – Oxford : Oxford University Centre for Advanced Materials, 2010. – 53 p.

70. Jun T. S., Korsunsky A. M. Evaluation of residual stresses and strains using the Eigenstrain Reconstruction Method. // International Journal of Solids and Structures. – 2010. – Vol. 47, No. 13. – P. 1678–1686.

71. Baragetti S. et al. Shot Peening: Methods of Application of the Treatment and Induced Effects //MATERIAL SCIENCE RESEARCH INDIA. – 2023. – Vol. 19. – № 3. – P. 1-8.

72. Almen J. O., Black P. H. Residual stresses and fatigue in metals. – New York : McGraw-Hill, 1963. – 242 p.

73. Nachman G. Shot Peening-Past, Present, and Future //Proc. 7th Int. Conf. on Shot Peening. – 1999. – P. 1-4.

74. Inoue A. et al. Enhanced shot peening effect for steels by using Fe-based glassy alloy shots //Materials Transactions. – 2003. – Vol. 44. – № 11. – P. 2391-2395.

75. Zhang Q. et al. A review of low-plasticity burnishing and its applications //Advanced Engineering Materials. – 2022. – Vol. 24. – № 11. – P. 2200365.

76. Priyadarsini C. et al. A review on ball, roller, low plasticity burnishing process //Materials Today: Proceedings. – 2019. – Vol. 18. – P. 5087-5099.

77. Altenberger I. et al. An in situ transmission electron microscope study of the thermal stability of near-surface microstructures induced by deep rolling and laser-shock peening //Scripta Materialia. – 2003. – Vol. 48. – № 12. – P. 1593-1598.

78. Majzoobi G. H., Azadikhah K., Nemati J. The effects of deep rolling and shot peening on fretting fatigue resistance of Aluminum-7075-T6 //Materials Science and Engineering: A. – 2009. – Vol. 516. – № 1-2. – P. 235-247.

79. Brockman R. A. et al. Prediction and characterization of residual stresses from laser shock peening //International Journal of Fatigue. – 2012. – Vol. 36. – № 1. – P. 96-108.

80. Xu Y. et al. Research status and development of laser shock peening //Journal of Laser Applications. – 2016. – Vol. 28. – № 2.

81. Attolico M. A. et al. Effects of laser shock peening on surface roughness and residual stress of AA 7050-T7451 //Journal of Materials Engineering and Performance. – 2022. – Vol. 31. – № 10. – P. 7973-7988.

82. Mordyuk B. N. et al. Ultrafine-grained textured surface layer on Zr–1% Nb alloy produced by ultrasonic impact peening for enhanced corrosion resistance //Surface and Coatings Technology. – 2012. – Vol. 210. – P. 54-61.

83. Inoue A., Sekigawa T., Oguri K. Fatigue property enhancement by fine particle shot peening for aircraft aluminum parts // Proceedings of the 10th International Conference on Shot Peening (ICSP-10), Tokyo, Japan. – Tokyo, 2008. – P. 325–330.

84. Marsh K. J. Shot peening: techniques and applications //(No Title). – 1993.

85. Cary P. E. History of shot peening //1st international conference on shot peening, Paris, France. – 1981. – P. 23-28.

86. Hammersley G., Hackel L. A., Harris F. Surface prestressing to improve fatigue strength of components by laser shot peening //Optics and Lasers in Engineering. – 2000. – Vol. 34. – № 4-6. – P. 327-337.

87. Wang C. et al. Dislocation-based study on the influences of shot peening on fatigue resistance //Surface and Coatings Technology. – 2020. – Vol. 383. – P. 125247.

88. Prevéy P. S., Cammett J. T. The influence of surface enhancement by low plasticity burnishing on the corrosion fatigue performance of AA7075-T6 //International Journal of Fatigue. – 2004. – Vol. 26. – № 9. – P. 975-982.

89. Zhuang W. Z., Halford G. R. Investigation of residual stress relaxation under cyclic load //International journal of fatigue. – 2001. – Vol. 23. – P. 31-37.

90. Statnikov E. S., Muktepavel V. O., Blomqvist A. Comparison of ultrasonic impact treatment (UIT) and other fatigue life improvement methods //Welding in the World. – 2002. – Vol. 46. – № 3. – P. 20-32.

91. Masse J. E., Barreau G. Laser generation of stress waves in metal //Surface and Coatings Technology. – 1995. – Vol. 70. – № 2-3. – P. 231-234.

92. Praveenkumar K. et al. Laser shock peening: a promising tool for enhancing the aeroengine materials' surface properties //Surface Engineering. – 2023. – Vol. 39. – № 3. – P. 245-274.

93. Prabhakaran S. et al. Laser shock peening without coating induced residual stress distribution, wettability characteristics and enhanced pitting corrosion resistance of austenitic stainless steel //Applied Surface Science. – 2018. – Vol. 428. – P. 17-30.

94. Wang H. et al. Effect of laser shock peening without protective coating on the surface mechanical properties of NiTi alloy //Journal of Alloys and Compounds. – 2022. – Vol. 896. – P. 163011.

95. Gill A. S., Telang A., Vasudevan V. K. Characteristics of surface layers formed on inconel 718 by laser shock peening with and without a protective coating //Journal of Materials Processing Technology. – 2015. – Vol. 225. – P. 463-472.

96. Qin Z. et al. The effect of laser shock peening on surface integrity and high and very high cycle fatigue properties of 2024-T351 aluminum alloy //Optics & Laser Technology. – 2022. – Vol. 149. – P. 107897.

97. Wang J. T. et al. Effects of laser shock peening on stress corrosion behavior of 7075 aluminum alloy laser welded joints //Materials Science and Engineering: A. – 2015. – Vol. 647. – P. 7-14.

98. Gurusami K. et al. Strengthening mechanism of Nd: Yag laser shock peening for commercially pure titanium (CP-TI) on surface integrity and residual stresses //Materials Today: Proceedings. – 2020. – Vol. 21. – P. 981-987.

99. Salimianrizi A. et al. Effect of laser shock peening on surface properties and residual stress of Al6061-T6 //Optics and Lasers in Engineering. – 2016. – Vol. 77. – P. 112-117.

100. Metal Improvement Company: Shot Peening [Электронный ресурс**].** — Режим доступа: https://cwst.com (дата обращения: 10.06.2024).

101. Zhuang W., Wicks B. Mechanical surface treatment technologies for gas turbine engine components //J. Eng. Gas Turbines Power. – 2003. – Vol. 125. – № 4. – P. 1021-1025.

102. Zhang Y. K. et al. Effect of laser shock processing on the mechanical properties and fatigue lives of the turbojet engine blades manufactured by LY2 aluminum alloy //Materials & design. – 2009. – Vol. 30. – № 5. – P. 1697-1703.

103. Sano Y. et al. Development and applications of laser peening without coating as a surface enhancement technology //Photonics North 2006. – SPIE, 2006. – Vol. 6343. – P. 652-663.

104. Abdullahi K. Gujba. Laser Peening Process and Its Impact on Materials Properties in Comparison with Shot Peening and Ultrasonic Impact Peening / Abdullahi K. Gujba, Mamoun Medraj // Materials. – 2014. - № 7. – P. 7295-7974.

105. Fomin F. Surface modification methods for fatigue properties improvement of laser-beam-welded Ti-6Al-4V butt joints. / Fomin, F., Klusemann, B., Kashaev, N. // Procedia Structural Integrity. – 2018. – Vol. 13. – P. 273–278.

106. Guo Y. B., Caslaru R. Fabrication and characterization of micro dent arrays produced by laser shock peening on titanium Ti–6Al–4V surfaces //Journal of Materials Processing Technology. – 2011. – Vol. 211. – № 4. – P. 729-736.

107. Peyre P., Fabbro R., Berthe L. Laser shock processing to improve mechanical properties of metallic materials //WIT Transactions on Engineering Sciences. – 1997. – Vol. 17.

108. Berthe L. et al. Shock waves from a water-confined laser-generated plasma //Journal of Applied Physics. – 1997. – Vol. 82. – № 6. – P. 2826-2832.

109. Montross C. S. et al. Laser shock processing and its effects on microstructure and properties of metal alloys: a review //International journal of fatigue. – 2002. – Vol. 24. – № 10. – P. 1021-1036.

110. Peyre P. et al. Laser shock processing of aluminium alloys. Application to high cycle fatigue behaviour //Materials Science and Engineering: A. – 1996. – Vol. 210. – № 1-2. – P. 102-113.

111. Zhang Y. K. et al. Investigation of the stress intensity factor changing on the hole crack subject to laser shock processing //Materials & Design. – 2009. – Vol. 30. – № 7. – P. 2769-2773.

112. Clauer A. H., Walters C. T., Ford S. C. The effects of laser shock processing on the fatigue properties of 2024-T3 aluminum //Lasers in materials processing. – 1983. – P. 7-22.

113. Fabbro R. et al. Physics and applications of laser-shock processing //Journal of laser applications. – 1998. – Vol. 10. – № 6. – P. 265-279.

114. Kennedy P. K., Hammer D. X., Rockwell B. A. Laser-induced breakdown in aqueous media //Progress in quantum electronics. – 1997. – Vol. 21. – № 3. – P. 155-248.

115. Peyre P., Fabbro R. Laser shock processing: a review of the physics and applications //Optical and quantum electronics. – 1995. – Vol. 27. – P. 1213-1229.

116. Fournier J. et al. Mechanical effects induced by shock waves generated by high energy laser pulses //Journal de Physique III. – 1991. – Vol. 1. – № 9. – P. 1467-1480.

117. Devaux D. et al. Generation of shock waves by laser-induced plasma in confined geometry //Journal of Applied Physics. – 1993. – Vol. 74. – № 4. – P. 2268-2273.

118. Hu Y. et al. Investigation on the non-homogeneity of residual stress field induced by laser shock peening //Surface and Coatings Technology. – 2009. – Vol. 203. – № 23. – P. 3503-3508.

119. Hu Y. X., Yao Z. Q. FEM simulation of residual stresses induced by laser shock with overlapping laser spots //Acta Metallurgica Sinica (English Letters). – 2008. – Vol. 21. – № 2. – P. 125-132.

120. Li X. et al. Simulation and experimental study on residual stress distribution in titanium alloy treated by laser shock peening with flat-top and Gaussian laser beams //Materials. – 2019. – Vol. 12. – № 8. – P. 1343.

121. Le Bras C. et al. Laser shock peening: Toward the use of pliable solid polymers for confinement //Metals. – 2019. – Vol. 9. – № 7. – P. 793.

122. Masse J. E., Barreau G. Surface modification by laser induced shock waves //Surface Engineering. – 1995. – Vol. 11, № 2. – P. 131-132.

123. Langer K., Spradlin T. J., Fitzpatrick M. E. Finite element analysis of laser peening of thin aluminum structures //Metals. – 2020. – Vol. 10, № 1. – P. 93.

124. Clauer A. H. Laser shock peening, the path to production //Metals. – 2019. – Vol. 9. – № 6. – P. 626.

125. Sano Y. et al. Development of fiber-delivered laser peening system to prevent stress corrosion cracking of reactor components. – 2001.

126. Peyre P. et al. Influence of thermal and mechanical surface modifications induced by laser shock processing on the initiation of corrosion pits in 316L stainless steel //Journal of materials science. – 2007. – Vol. 42. – P. 6866-6877.

127. Trdan U. et al. Laser shock peening without absorbent coating (LSPwC) effect on 3D surface topography and mechanical properties of 6082-T651 Al alloy //Surface and Coatings Technology. – 2012. – Vol. 208. – P. 109-116.

128. Davis B. et al. Performance of Gen IV LSP for thick section airfoil damage tolerance //45th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics & Materials Conference. – 2004. – P. 2062.

129. Laser Shock Peening | LSP [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.hilase.cz/en/produkty/laser-shock-peening-lsp/ (дата обращения: 12.06.2024).

130. Ge M. Z., Xiang J. Y. Effect of laser shock peening on microstructure and fatigue crack growth rate of AZ31B magnesium alloy //Journal of Alloys and Compounds. – 2016. – Vol. 680. – P. 544-552.

131. Zhelnin M. et al. Fatigue life investigation of notched TC4 specimens subjected to different patterns of laser shock peening //Frattura e Integrita Strutturale. – 2023. – Vol. 17, № 65. – P. 100-111.

132. Sun R. et al. Experimental-numerical study of laser-shock-peening-induced retardation of fatigue crack propagation in Ti-17 titanium alloy //International Journal of Fatigue. – 2021. – Vol. 145. – P. 106081.

133. Elango K. et al. Studies on ultra-short pulsed laser shock peening of stainless-steel in different confinement media //Surface and Coatings Technology. – 2020. – Vol. 397. – P. 125988.

134. Lim H. et al. Improvement of surface hardness of duplex stainless steel by laser shock hardening for the application to seawater desalination pump //Desalination and Water Treatment. – 2010. – Vol. 15, № 1-3. – Vol. 43-47.

135. Yella P. et al. Laser shock peening studies on SS316LN plate with various sacrificial layers //Applied Surface Science. – 2018. – Vol. 435. – P. 271-280.

136. Sundar R. et al. Studies on laser peening using different sacrificial coatings //Surface engineering. – 2012. – Vol. 28, №. 8. – P. 564-568.

137. Schwarz T., Kockelmann H. The hole-drilling method-the best technique for the experimental determination of residual stresses in many fields of application //MTB. – 1993. – Vol. 29, № 2. – P. 33-38.

138. Bowler N. Theory of four-point direct-current potential drop measurements on a metal plate //Research in Nondestructive Evaluation. – 2006. – Vol. 17, № 1. – P. 29-48.

139. Lan L. et al. Effects of laser shock peening on microstructure and properties of Ti–6Al–4V titanium alloy fabricated via selective laser melting //Materials. – 2020. – Vol. 13, № 15. – P. 3261.

140. Pan X. et al. Plastic deformation behavior of titanium alloy by warm laser shock peening: Microstructure evolution and mechanical properties //Surface and Coatings Technology. – 2021. – Vol. 405. – P. 126670.

141. Zhang X. C. et al. Improvement of fatigue life of Ti–6Al–4V alloy by laser shock peening //Materials Science and Engineering: A. – 2010. – Vol. 527, № 15. – P. 3411-3415.

142. Lu H. et al. Effects of laser shock peening on the hot corrosion behaviour of the selective laser melted Ti6Al4V titanium alloy //Corrosion Science. – 2021. – Vol. 188. – P. 109558.

143. Ren X. D. et al. Microstructure evolution and grain refinement of Ti-6Al-4V alloy by laser shock processing //Applied surface science. – 2016. – Vol. 363. – P. 44-49.

144. Altenberger I. et al. On the effect of deep-rolling and laser-peening on the stress-controlled low-and high-cycle fatigue behavior of Ti–6Al–4V at elevated temperatures up to 550 C //International Journal of Fatigue. – 2012. – Vol. 44. – P. 292-302.

145. Humphreys F. J. Review grain and subgrain characterisation by electron backscatter diffraction //Journal of materials science. – 2001. – Vol. 36, № 16. – P. 3833-3854.

146. Carneiro Í., Simões S. Recent advances in EBSD characterization of metals //Metals. – 2020. – Vol. 10, № 8. – P. 1097.

147. Schwartz A. J. et al. (ed.). Electron backscatter diffraction in materials science. – New York : Springer. – 2009. – Vol. 2. – P. 35-52.

148. 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. – Vol. 16, № 61. – P. 419-436.

149. Gachegova E. A., Vinogradov I. M., Iziumova 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.

150. Gachegova E., Davydov D., Mironov S., Kalinenko A., Ozerov M., Zherebtsov S., Plekhov O.. The Influence of Absorbing Coating Material on the Efficiency of Laser Shock Peening //Metals. – 2024. – Vol. 14, № 9. – P. 1045.

151. 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.

152. Бартоломей М.Л., Изюмова А.Ю., Гачегова Е.А., Вшивков А.Н., Плехов О.А., S. Swaroop. Численный анализ остаточных напряжений при двухстороннем симметричном лазерном ударном упрочнении тонких пластин из титанового сплава ВТ6 //Вычислительная механика сплошных сред. – 2024. – Vol. 17. – № 4. – P. 411-421.

153. 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. – P. 16-28.

154. 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.

155. 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.

156. 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.

157. 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.

158. 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.

159. Vshivkov A. et al. Approximation of Heat Dissipation-Crack Rate Curve for Fatigue Crack in Stainless Steel //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2021. – Vol. 1945, № 1. – P. 012063.

160. Braisted W., Brockman R. Finite element simulation of laser shock peening //International journal of fatigue. – 1999. – Vol. 21, № 7. – P. 719-724.

161. Kim R. et al. FE analysis of laser shock peening on STS304 and the effect of static damping on the solution //Metals. – 2021. – Vol. 11, № 10. – P. 1516.

162. Langer K. et al. High Strain-Rate Material Model Validation for Laser Peening Simulation //The Journal of Engineering. – 2015. – Vol. 2015, № 13. – P. 150-157.

163. Iziumova 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.

164. Iziumova 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.

165. Vshivkov A.N., Iziumova 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.

166. Vshivkov A.N., Iziumova 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.

167. Гачегова Е.А., Сихамов Р., Ф. Фенцке, 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.

168. 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.

169. Bartolomei M., Iziumova 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.