

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«Пермский национальный исследовательский политехнический университет»

Факультет прикладной математики и механики
Кафедра «Динамика и прочность машин»

Направление подготовки: 15.04.03 Прикладная механика

Направленность (профиль) образовательной программы: Динамика и
прочность машин, конструкций и механизмов

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (магистерская диссертация)

На тему Повышение усталостного ресурса титановых сплавов методом
лазерного ударного упрочнения

Студент (Гачегова Елена Алексеевна)

Состав ВКР:

1. Пояснительная записка на 87 стр.
2. Графическая часть на 0 листах

Допускается к защите

Заведующий кафедрой

д-р техн. наук, профессор

_____ В.П. Матвеевко

« _____ » _____ 2020 г.

Регистрационный номер _____

Руководитель ВКР

_____ (Плехов О.А.)

Консультант:

_____ (Кашаев Н.)

Пермь 2020

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«Пермский национальный исследовательский политехнический университет»

Кафедра «Динамика и прочность машин»

УТВЕРЖДАЮ

Зав. кафедрой

_____ В.П. Матвеевко

«___» _____ 2020 г.

ЗАДАНИЕ

на выполнение выпускной квалификационной работы

Фамилия, И.О. Гачегова Елена Алексеевна

Факультет прикладной математики и механики Группа ДПМ-18-1м

Начало выполнения работы 15.01.20

Контрольные сроки просмотра работы кафедрой 18.06.20

Сроки представления на рецензию 18.06.20

Защита работы на заседании ГЭК 25.06.20

1. Наименование темы Повышение усталостного ресурса титановых сплавов
методом лазерного ударного упрочнения

2. Исходные данные к работе Конструкторская документация

3. Содержание пояснительной записки 87 страниц, включая 52 рис., 14 табл., 37 ист.

а) основная часть (конструкторская, технологическая, исследовательская) Литературный
обзор

б) раздел Экспериментальная часть

4. Дополнительные указания

5. Основная литература

1. Schijve J. Fatigue of Structures and Materials. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2003. – 513 с.

2. Остаточные напряжения в металлопродукции : учебное пособие / С. П. Буркин, Г. В. Шимов, Е. А. Андрюкова. — Екатеринбург: Издательство Уральского университета – 2015. – 248 с.

3. Джамай, В.В. Прикладная механика: Учебник для бакалавров / В.В. Джамай, Е.А. Самойлов, А.И. Станкевич. // М.: Юрайт. – 2013. – С. 360.

Руководитель выпускной квалификационной работы магистра

д.ф-м.н., профессор кафедры ДПМ Плехов Олег Анатольевич

(_____)

(должность, Ф.И.О.)

Консультант

руководитель отдела лазерной обработки и оценки структуры Helmholtz-Zentrum Geesthacht Кашаев Николай

(_____)

(должность, Ф.И.О.)

Задание получил Гачегова Елена Алексеевна

(_____)

(дата и подпись студента)

**КАЛЕНДАРНЫЙ ГРАФИК ВЫПОЛНЕНИЯ
ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ**

| №п. п. | | Объем этапа, в % | Сроки выполнения | | Примечание |
|--------|---|------------------|------------------|----------|------------|
| | | | начало | конец | |
| 1 | Разработка основных разделов диссертации | 30 | 15.01.20 | 15.04.20 | |
| 2 | Оформление диссертации | 20 | 16.04.20 | 16.05.20 | |
| 3 | Разработка и оформление иллюстративной материала к защите диссертации | 20 | 17.05.20 | 14.06.20 | |
| 4 | Представление диссертации на проверку и отзыв научного руководителя | 10 | 15.06.20 | 15.06.20 | |
| 5 | Представление работы заведующему кафедрой | 10 | 18.06.20 | 18.06.20 | |
| 6 | Защита на заседании ГЭК | 10 | 25.06.20 | 25.06.20 | |

Научный руководитель работы

()

« ____ » _____ 2020г

РЕФЕРАТ

Расчетно-пояснительная записка 87 с., 52 рис., 14 табл., 37 источников.

ЛАЗЕРНОЕ УДАРНОЕ УПРОЧНЕНИЕ, ПОВЕРХНОСТНАЯ ОБРАБОТКА,
УСТАЛОСТНЫЕ ТРЕЩИНЫ, ТИТАНОВЫЙ СПЛАВ, ПЛАЗМА, ЛАЗЕР

Объектом исследования является процесс лазерного ударного упрочнения.

Цель работы — исследование влияния лазерного ударного упрочнения на остаточные напряжения и их влияние на усталостную прочность образцов, выполненных из титанового сплава.

В работе исследовано влияние различных параметров лазерного упрочнения на величину и распределение остаточных напряжений по глубине. Проведено два этапа усталостных испытаний: первый этап с постоянными напряжениями, для изучения влияния обработки на усталостные свойства образцов в малоцикловой области и второй этап с переменным напряжением, для построения кривой Веллера и анализа усталостного поведения титана на всех этапах жизни образцов. Для обработки результатов эксперимента использовалось распределение Вейбулла. Также для более полной картины влияния ЛСП была проведена микрофрактография.

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|--|----|
| ВВЕДЕНИЕ..... | 8 |
| 1. ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР..... | 11 |
| 1.1. Усталостное разрушение..... | 11 |
| 1.1.1. Различные фазы усталостной жизни..... | 13 |
| 1.1.2. Зарождение трещины..... | 14 |
| 1.1.3. Рост трещины..... | 16 |
| 1.2. Методы создания остаточных напряжений..... | 18 |
| 1.2.1. Введение в теорию остаточных напряжений..... | 18 |
| 1.2.2. Методы создания остаточных напряжений..... | 19 |
| 1.3. Титановые сплавы..... | 25 |
| 1.3.1. Применение в авиастроении..... | 26 |
| 1.3.2. Титановый сплав ОТ4-0..... | 29 |
| 1.4. Концентраторы напряжений..... | 30 |
| 1.5. Современные исследования в области лазерного ударного упрочнения..... | 32 |
| 2. ЭСКПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ..... | 39 |
| 2.1. Теоретические сведения..... | 39 |
| 2.1.1. Параметры цикла..... | 39 |
| 2.1.2. Вероятностный характер явления усталости..... | 41 |
| 2.2. Необходимое оборудование и образцы..... | 46 |
| 2.2.1. Образцы..... | 46 |
| 2.2.2. Лазерная установка..... | 46 |
| 2.2.3. Измерение остаточных напряжений методом сверления отверстий..... | 50 |
| 2.2.4. Усталостные испытания..... | 54 |
| 2.3. Программа испытаний..... | 55 |

| | |
|---|----|
| 2.3.1. Измерение остаточных напряжений | 56 |
| 2.3.2. Лазерная обработка образцов образцов второй партии | 62 |
| 2.3.3. Усталостные испытания образцов второй партии | 64 |
| 2.4. Результаты испытаний | 66 |
| 2.4.1. Результаты усталостных испытаний | 66 |
| 2.4.2. Результаты микрофрактографии | 74 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ | 80 |
| СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ..... | 83 |

ВВЕДЕНИЕ

Усталостное разрушение – это хорошо известная техническая проблема. Уже в 19-м веке было зарегистрировано несколько серьезных усталостных отказов и проведены первые лабораторные исследования. Тогда же Август Вёллер в своих работах доказал, что однократное применение нагрузки, которая в разы меньше статической прочности, не наносит ей никакого ущерба, а вот если эта нагрузка будет прилагаться к объекту многократно, то это легко может привести к разрушению. С тех пор было проведено множество испытаний, написано огромное количество работ по изучению феномена усталости, однако и по сей вопрос усталостного разрушения остается актуальным.

В истории известно множество случаев разрушения конструкций, связанных с усталостью, причем значительная их доля произошла не так давно. Вот наиболее известные:

- 1977 — обрушение пешеходного моста на станции Пушкино;
- 1988 — происшествие с Boeing 737 над Кахулуи;
- 1989 — катастрофа DC-10 в Су-Сити;
- 1992 — авиакатастрофа в Амстердаме;
- 1998 — крушение ICE у Эшеде;
- 2000 — авария на железной дороге в Хэтфилде;
- 2002 — катастрофа рейса 611 China Airlines;
- 2005 — рейс авиакомпании Chalk's Ocean Airways, потеря крыла во время полета;
- 2009 — сход с рельсов поезда в Виареджо;
- 2009 — авария на Саяно-Шушинской ГЭС;
- 2018 — авария на авиалайнере Рейс 1380 Southwest Airlines.

Все эти происшествия доказывают необходимость изучения процесса усталостного разрушения: его этапы, длительность, причины и следствия. Особенно важно изучение этой темы в сфере авиастроения, где сопротивление усталостным разрушениям играет важную роль как для конструкций, так как

разрушение влечет за собой катастрофы с серьезнейшими последствиями. По этой причине в последние годы активно разрабатываются стандарты и нормы для создания надежных летательных аппаратов, а также предотвращения их разрушения. Одними из последних были разработаны и внедрены два метода предотвращения разрушения конструкции самолета из-за усталостных трещин: безопасный ресурс (safe-life) и безопасное разрушение (fail-safe). Первый метод исходит из основного положения, что безопасность самолета определяется отсутствием усталостных трещин в конструкции в течение безопасного ресурса. Метод безопасного разрушения предполагает создание такой конструкции, которая способна выдерживать значительную нормируемую нагрузку после частичного или полного разрушения одного из ее силовых элементов. В этих методах присутствует два очень важных понятия. Безопасность разрушения - свойство конструкции, которое позволяет ей сохранять необходимую остаточную прочность в течение периода эксплуатации без ремонта после разрушения или частичного разрушения основного силового элемента.

Вторым термином является допустимость повреждения (damage tolerance) - свойство конструкции, которое позволяет ей сохранять требуемую остаточную прочность за интервал времени ее применения, в течение которого конструкция подвергается определенной степени усталостного, коррозионного, случайного повреждения или повреждения от дискретного источника [1].

С появлением новых стандартов, стали появляться и методы улучшения свойств материалов, которые позволяли бы им сопротивляться усталостному разрушению. Особое место здесь заняли методы, в основе которых лежит создание остаточных напряжений в поверхностных слоях деталей. К ним относятся дробеструйная обработка, закалка ТВЧ, высокочастотная ударная обработка и др. Последнее время активно развивается такой метод поверхностного упрочнения материалов, как лазерное ударное упрочнение. Одно из главных его преимуществ – это глубина создаваемых остаточных напряжений, которая заметно больше, чем при использовании иных методов. Однако на данный момент этот способ создания остаточных напряжений по

большой части находится на стадии изучения, что мешает его внедрению в производство.

Именно поэтому целями данной работы являются:

- изучение феномена усталости;
- изучение технологии лазерного ударного упрочнения и существующих исследований по данной тематике;
- проведение экспериментов с применением лазерного ударного упрочнения с целью определения влияния лазерного наклепа на усталостную долговечность титановых сплавов;

1. ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

1.1. Усталостное разрушение

Впервые люди стали замечать усталостное разрушение конструкций в конце 18-го века. Тогда английские инженеры отмечали, что у длительно эксплуатируемых дилижансов почтовых карет неожиданно хрупко ломались оси, которые были изготовлены из кованого железа, обладающего высокой прочностью. В то время специалисты объясняли это явление перерождением материала за счет усталости в процессе длительной эксплуатации под действием переменных напряжений, которые возникают по причине неровностей на дороге. С тех пор и появился термин “усталость материалов”.

И в наши дни усталость является одной из главных причин отказа даталей и конструкций, которые подвержены воздействию напряжений, циклически изменяющихся во времени. Известно, что многократные циклические нагрузки приводят к разрушению деталей машин и элементов конструкций при напряжениях, уровень которых значительно меньше напряжений, которые разрушают металл в случае однократного нагружения. Разрушение может наступать при напряжениях ниже предела текучести. Это явление называется усталостным разрушением [2].

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. Усталостные трещины появляются постепенно и распространяются с небольшой скоростью вглубь детали, пока ее сечение не уменьшится до критической величины, после чего наступает хрупкий долом изделия.

Сопrotивление 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, которую строят в координатах $\sigma - N$, где N – это количество циклов (Рисунок 1). При определении предела выносливости ограничиваются 10^7 циклами (это количество циклов называют базой испытаний).

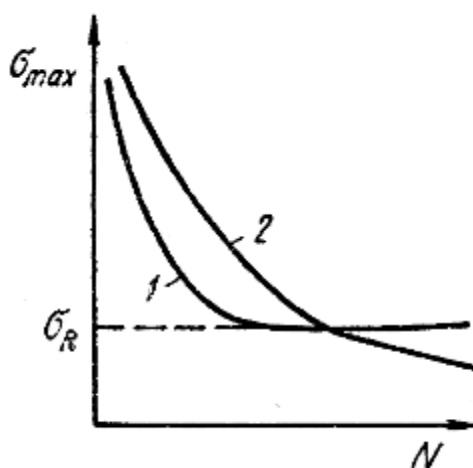


Рисунок 1 – Кривые выносливости: 1 – для сталей (физический предел выносливости), 2 – для цветных металлов

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

Процесс 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 лишь когда напряжения превышают предел выносливости, трещины достигают критической длины, после чего начинается процесс их слияния в магистральную трещину и ее распространение [3].

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 длину 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. Различные фазы «усталостной жизни»

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 «усталостной жизни». 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 усталостной жизни 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. Это начало периода реального роста трещины. Различные этапы усталостной жизни изображены на рисунке 2. Стоит

отметить, что усталостная жизнь состоит из двух периодов: 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. А вот агрессивные среды могут влиять как на период зарождения трещины, так и на период роста трещины, но различными способами.



Рисунок 2 – Различные фазы усталостной жизни

1.1.2. 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. Эта микропластичность намного легче возникает в зернах на поверхности материала, потому что в таком случае материал окружает ее только с одной стороны. С другой же стороны мы имеем газ (воздух, например) или жидкость (воды). Отсюда следует, что 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. В 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. Это значит, что край материала подвергается воздействию окружающей среды. Он будет покрыт оксидным слоем в большинстве окружающих сред, что справедливо для большинства материалов. Такие слои легко прилипают к материалу и от них нелегко избавиться. Еще один существенный аспект состоит в том, что скольжение во время увеличения нагрузки также подразумевает некоторое деформационное упрочнение в полосе скольжения. Следовательно, после разгрузки большее напряжение сдвига будет присутствовать на той же полосе, только в противоположном направлении. Что делает 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 наблюдать формирование постоянных полос скольжения. Эти полосы являются местами, где может образоваться трещина. На рисунке 3 показано, как циклическое скольжение приводит к зарождению трещины.

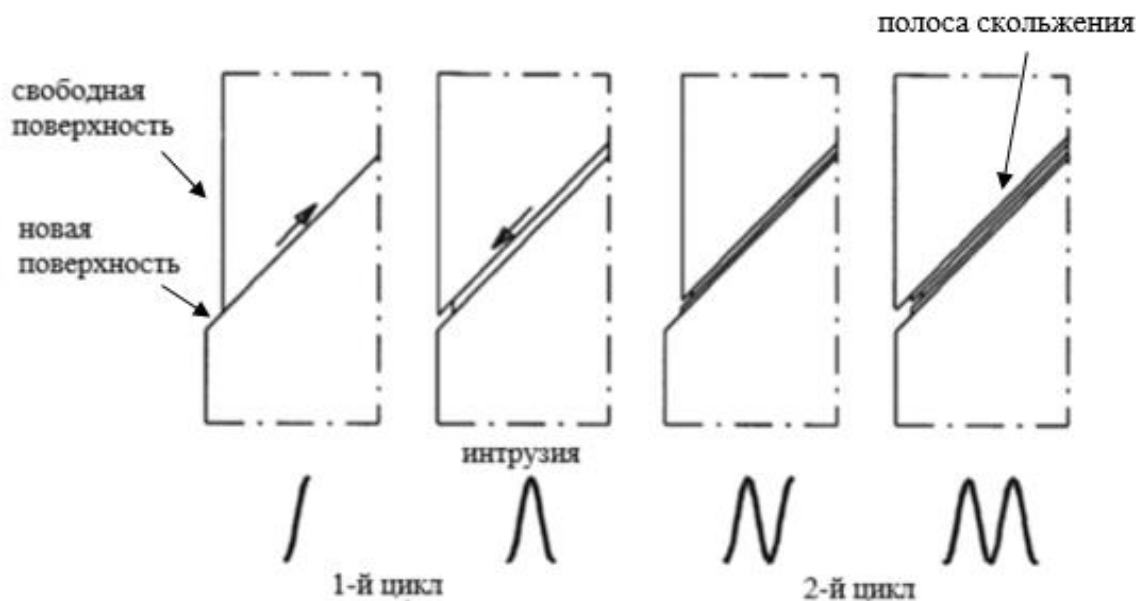


Рисунок 3 – Циклическое скольжение и зарождение трещины [4]

Низкие ограничения на циклическое скольжение на поверхности материала является фактором, который способствует зарождению трещины на свободной поверхности. На практике, причиной этого является неоднородное распределение напряжений из-за концентраторов напряжений в отверстиях или других геометрических неоднородностях. Шероховатость также способствует зарождению трещины на поверхности материала. В итоге можно сказать, что в периоде зарождения трещины усталость является поверхностным явлением.

1.1.3. Рост трещины

Пока размер трещины остается порядка одного зерна, микротрещина присутствует в упруго анизотропном материале с кристаллической структурой и множеством различных систем скольжения. Так как микротрещина способствует неоднородному распределению напряжений на микроуровне с концентрацией на ее конце, может быть активировано более одной системы скольжения. Помимо этого, если трещина растет в нескольких прилегающих зернах, ограничение на смещение скольжения будет увеличиваться из-за присутствия соседних зерен. Таким образом, скольжение будет происходить не только на одной плоскости

скольжения. Направление роста трещины будет отклоняться от начальной ориентации полосы скольжения. Вообще, существует тенденция к росту перпендикулярно направлению нагрузки (рисунок 4).

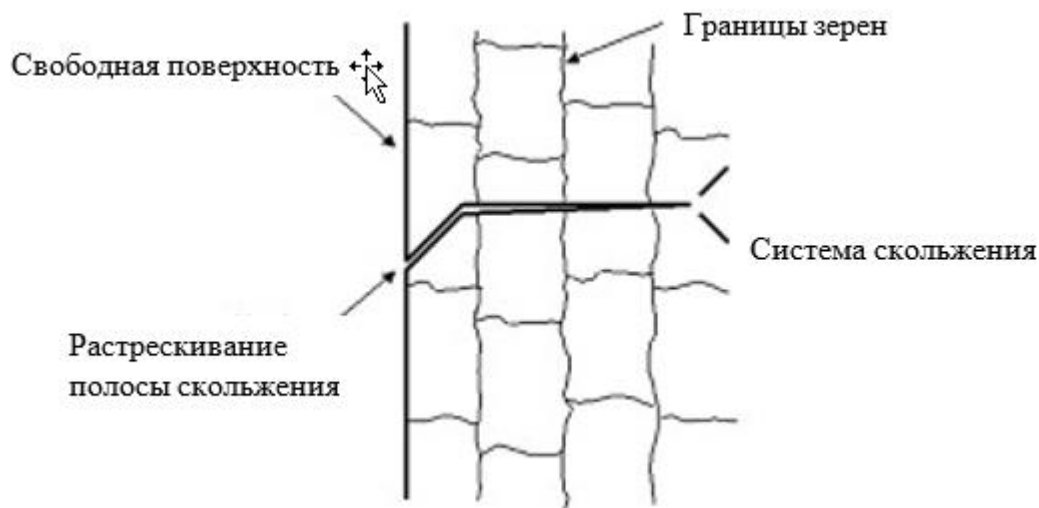


Рисунок 4 – Поперечное сечение микротрещины

Так как рост микротрещин зависит от циклической пластичности, препятствия скольжению могут означать порог для этого роста. Скорость роста трещины, которая измеряется, как приращение длины трещины за один цикл, уменьшается, когда вершина трещины приближается к границе зерна. После проникновения через границу зерна скорость роста трещины увеличивается во время роста в следующее зерно.

Изначально микротрещина может расти неоднородно с достаточно высокой скоростью, затем она может замедлиться или даже остановиться из-за структурных барьеров материала. Однако картина изменится, если фронт трещины после некоторого роста трещины проходит через значительное количество зерен. Трещина не может расти в каждом зерне в произвольном направлении и с любой скоростью, независимой от роста трещины в соседних зернах. Эта непрерывность предотвращает большие градиенты скорости роста трещины вдоль фронта трещины. Как только число зерен вдоль фронта трещины становится большим, рост трещины становится относительно непрерывным процессом. Скорость роста трещины зависит от устойчивости материала к росту

трещин, а поверхностные факторы больше не актуальны. Сопротивление росту трещины, когда трещина проникает в материал, зависит от объемных свойств материала. Следовательно, рост трещины больше не является поверхностным явлением [4].

1.2. Методы создания остаточных напряжений

Остаточные напряжения, возникающие в поверхностном слое, оказывают существенное влияние на сопротивление усталости. Именно поэтому они во многом способны определять качество и эксплуатационные характеристики конструкций.

1.2.1. Введение в теорию остаточных напряжений

Остаточными напряжениями принято называть те напряжения, которые существуют в конструкции или отдельных ее элементах при отсутствии внешних силовых, тепловых или других воздействий. Наличие этих напряжений обусловлено также неравномерностью температуры по объему тела, образованием во время нагрева или охлаждения новых структур с иной плотностью, наличием включений и др. В технике они играют важную роль, в частности тогда дело касается прочностных характеристик материала.

В ряде исследований установлено, что благоприятное распределение остаточных напряжений в изделиях может повысить их вибрационную и усталостную прочность. Поверхность изделий, как правило, является самой слабой зоной, поэтому любая обработка, которая приводит к возникновению и росту поверхностных сжимающих напряжений, будет благоприятно влиять на эксплуатационные свойства изделий [5].

1.2.2. Методы создания остаточных напряжений

Методы создания остаточных напряжений можно разбить на две основные группы:

1. упрочнение изделий без изменения химического состава (поверхностная закалка, поверхностное пластическое деформирования и т.п.);
2. упрочнение изделия с изменением химического состава поверхностного слоя и его структуры (химико-термическая обработка и нанесение защитных слоев).

Подробнее остановимся на первой группе методов, а именно на тех, в основе которых лежит создание остаточных напряжений на поверхности детали, и рассмотрим несколько из них.

Дробеструйная обработка

Дробеструйная обработка - это холодный рабочий процесс, который используется для чистовой обработки металлических деталей, чтобы предотвратить усталостные и коррозионные разрушения и продлить срок службы изделия путем создания сжимающих остаточных напряжений в поверхностных слоях материала [6]. Оно заключается в ударе дробью (круглые металлические, стеклянные или керамические частицы) по поверхности детали (рисунок 5).



Рисунок 5 – Дробеструйная обработка

В итоге образуется пластически деформированный слой. Также образуется упруго деформированный слой вокруг пластически деформированного слоя. Пластически деформированный слой имеет тенденцию расширяться, и соседний упруго реагирующий материал предотвращает это. В результате в поверхностном слое до определенной глубины создаются остаточные напряжения (рисунок 6).

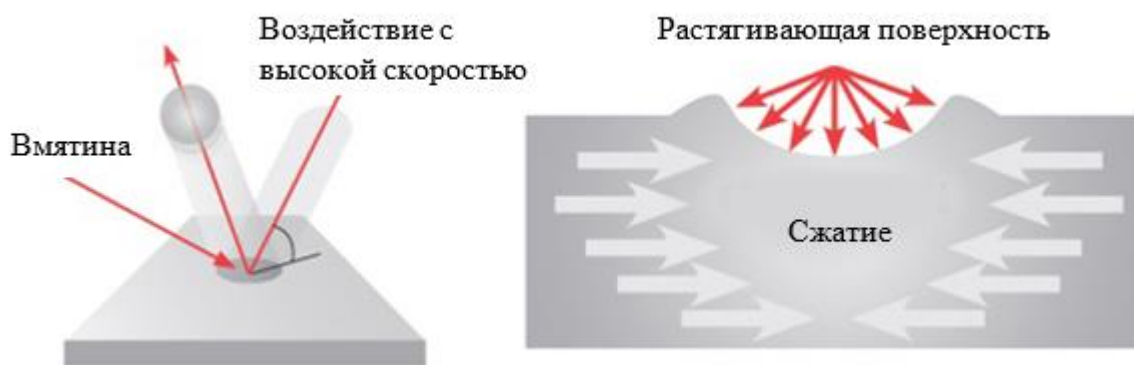


Рисунок 6 – Механизм дробеструйной обработки

У этого метода поверхностной обработки несомненно есть преимущества, такие как низкая стоимость, возможность обработки больших изделий, надежность оборудования. Однако в современных условиях есть и серьезные минусы. Основной минус – это то, что дробеструйная обработка может привести к искажению формы детали, что недопустимо для некоторых элементов конструкций. Более того, глубина упрочненного слоя не велика – примерно 0,25

мм. А учитывая, что данный способ приводит к появлению шероховатости поверхности, которую в промышленных масштабах удаляют, то упрочненный слой может быть удален вместе с ней.

Поверхностная закалка ТВЧ

Закалка металлов токами высокой частоты (ТВЧ) – это один из распространенных методов поверхностной термической обработки, который позволяет повысить твердость поверхности заготовки. Индукционная закалка ТВЧ дает возможность закалить всю поверхность детали или ее отдельные элементы или зоны, которые испытывают основную нагрузку. При этом под закаленной твердой наружной поверхностью остается незакаленные вязкие слои металла. Такая структура уменьшает хрупкость, повышает стойкость и надежность всего изделия, а также снижает энергозатраты на нагрев всей детали.

Суть метода состоит в том, чтобы быстро нагреть поверхностный слой материала до температуры, значительно выше критической, и после этого быстро охладить деталь (рисунок 7).



Рисунок 7 – Поверхностная закалка ТВЧ

Основными достоинствами этого метода являются: возможность точно рассчитать глубину закаленного слоя, малое время обработки, можно использовать оборудование малой мощности.

Однако с экономической точки зрения, индукционные установки целесообразно использовать только при серийном производстве, для единичного производства покупка и изготовление индуктора невыгодно. Для некоторых деталей сложной формы производство индукционной установки очень сложно, из-за чего затруднительно получить равномерность закалённого слоя.

Лазерное ударное упрочнение

ЛСП (от англ. «Laser Shock Peening» - лазерное ударное упрочнение) – это обработка поверхности, которая используется для создания сжимающих остаточных напряжений в поверхностном слое материала. Кратковременные высокоэнергетические импульсы используются для создания на поверхности материала плазмы, которая очень быстро расширяется. Тем самым она вызывает поверхностное давление на поверхности материала, которое создает ударную волну вглубь материала, которая пластически деформирует его. Эта волна и создает остаточные напряжения, которые остаются в образце после достижения системой равновесия. ЛСП 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.

Данный процесс осуществляется следующим образом: обрабатываемую поверхность покрывают непрозрачным для лазерного излучения слоем с низкой температурой испарения (черной краской, металлической фольгой или лентой). Поверх него находится прозрачный слой, роль которого часто выполняет вода. Энергия лазерного импульса поглощается непрозрачным слоем, что приводит к

его нагреву, испарению и формированию высокотемпературной плазмы, ограниченной с одной стороны поверхностью материала, а с другой – прозрачным слоем, сдерживающим распространение плазмы. Вследствие ограниченного объема, давление газа резко возрастает до высоких значений и проходит в материал, создавая в нем ударную волну, которая приводит к появлению в материале сжимающих напряжений. Если эти напряжения превосходят упругий предел Гюгонио, то материал пластически деформируется. Непрозрачный слой служит защитой от прямого контакта поверхности образца с лазерно-индуцированной плазмой, а также помогает согласовать свойства поверхности для взаимодействия с лазерным излучением, вне зависимости от фактических свойств образца. Схематично этот процесс изображен на рисунке 8.

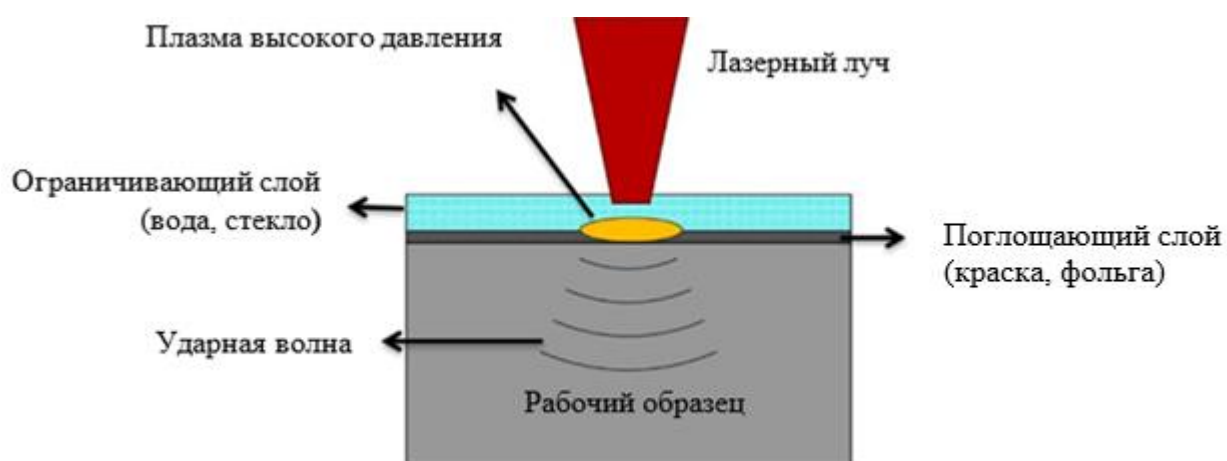


Рисунок 8 - Лазерной ударное упрочнение

Основными достоинствами лазерного упрочнения являются:

- повышение предела выносливости и увеличение износостойкости обработанных деталей;
- увеличение срока службы изделия;
- сохранение свойств после нагрева в процессе эксплуатации;
- повышение микротвердости поверхности;

- экологическая чистота, отсутствие рабочих газов.

Начиная с первых исследований, процесс лазерного упрочнения показал большой потенциал и применимость на промышленном уровне, особенно для критически важных компонентов. Благодаря созданию сжимающих остаточных напряжений большей глубины и возможности тонкой настройки параметров процесса, эта технология значительно улучшила механические свойства и рабочие характеристики многих материалов, используемых в промышленности.

Только за период с 1996 по 2001 было выпущено более 25 патентов на использование лазерного упрочнения, и с каждым годом их количество растет. Развитие лазерной промышленности позволило расширить область применения данной технологии. Например, такие устройства, как сканирующий луч и волоконные лазеры, позволяют обрабатывать детали, размер которых может варьироваться от нескольких сантиметров (форсунки) до нескольких метров (панели крыла).

Особый интерес к технологии лазерного наклепа проявляют аэрокосмические компании. ЛСП применяют при производстве двигателей для уменьшения усталостных отказов различных компонентов.

Общепринятой практикой стало применение лазерного упрочнения к лопаткам газовых турбин.

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

Также ведутся разработки применения упрочнения для биомедицинских имплантатов из сплавов Mg-Ca [7]. Однако, не до конца исследовано влияние остаточных напряжений на совместимость имплантата и тканей тела.

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 применению лазерного упрочнения вдоль сварного шва, для увеличения резистивности к распространению трещины в этой области [8].

1.3. Титановые сплавы

Легкость, высокие удельная прочность, виброустойчивость и сопротивление разрушению, стойкость против ползучести и высокая коррозионная стойкость сделали титан и его сплавы незаменимыми материалами в строительстве самолетов, ракет, космических аппаратов и морских судов, в химическом и энергетическом машиностроении, а также во многих других сферах.

Применение титана как конструкционного материала обусловлено благоприятным сочетанием его высокой механической прочности, антикоррозионных свойств, жаропрочности и малой плотности. Помимо всего прочего, его механические и коррозионные свойства активно улучшаются легированием марганцем, хромом, алюминием, молибденом, кремнием и бором.

Удельная прочность (отношение прочности и плотности) лучших титановых сплавов достигает 30-35 кН·м²/кг и более, что почти вдвое превышает удельную прочность большинства легированных сталей. Именно эти свойства конструкционного материала представляют особый интерес для самолето- и ракетостроения. При повышенных же температурах титановые сплавы по прочности превосходят высокопрочные сплавы алюминия и магния.

1.3.1. Применение в авиастроении

Авиационная промышленность является основным потребителем титановой продукции. Именно активный рост в области авиационной техники дал толчок титановому производству. По своим физико-механическим свойствам титановые сплавы являются универсальным конструкционным материалом.

Вплоть до конца 60-х годов 20 века титан применялся в основном для изготовления газовых турбин двигателей самолетов. В 70-х – 80-х годах его сплавы начали широко применяться для изготовления различных деталей планерной части самолетов [9].

В настоящее время из титана делают обшивку самолета, детали, подверженные воздействию высоких температур, силовые элементы, детали шасси. В авиационных двигателях жаропрочные титановые сплавы используются для изготовления лопаток, дисков и других элементов вентиляторов и компрессоров двигателей.

В конструкции современного самолета может присутствовать более 20 тонн титана. Например, в самолете Боинг-787 устанавливают около 2,5 миллиона титановых заклепок, что облегчает вес самолета на несколько тонн (по сравнению с заклепками, сделанными из стали).

Ниже представлены основные направления использования титана в авиационной технике:

1. Для изготовления изделий сложной пространственной формы:
 - окантовка люков и дверей, где возможно скопление влаги (используется высокая коррозионная стойкость титана);
 - обшивка, на которую действует струя продуктов сгорания двигателя, противопожарные перегородки (используется высокая температура плавления);

- тонкостенные трубопроводы воздушной системы (титан меньше всех других металлов расширяется под воздействием температуры);
 - настил пола грузовой кабины (используется высокая прочность и твердость).
2. Для изготовления узлов и агрегатов, испытывающих сильные нагрузки:
- стойки шасси;
 - силовые элементы (кронштейны) крыла;
 - гидроцилиндры.
3. Изготовление частей двигателя:
- диски и лопатки (рисунок 9);
 - корпуса двигателей.



Рисунок 9 – Титановые лопатки двигателя

В России и большинстве других стран, активно развивающих авиационную промышленность, нет ни одного авиационного двигателя самолета или вертолета, где бы не применялись титан и его сплавы: истребители МиГ-29,

Су-35, Су-30, Су-27 (Рисунок 10), Ту-204, Ту-214, АН-148, SSJ-100, МС-21, транспортные самолеты Ил-76 и Ил-76Т.



Рисунок 10 – Истребитель Су-35

Однако авиация это далеко не единственная область применения титана. Помимо нее титановые сплавы применяются в судостроении, ракетостроении, химической и нефтехимической промышленности.

В судостроении титан используется благодаря способности металла противостоять коррозии в морской воде и выдерживать значительные механические нагрузки. Из него изготавливают гребные винты, валы, обшивку корпусов, теплообменники, глушители для двигателей подводных лодок, дисков измерительных приборов. Малый удельный вес титанового сплава позволяет сделать корабли максимально маневренными, а стойкость материала к соленой воде дает возможность в разы сократить периодичность обслуживания подводных частей судна.

Помимо судостроения, титановые сплавы применяются в химической и нефтехимической промышленности. Ценности этого конструкционного материала в этих отраслях заключается не только в снижении эксплуатационных затрат и безаварийности работы, но и в противостоянии агрессивным и ядовитым средам. Изделия из этого металла устойчивы к высоким давлениям и

температурам. Из титана делают насосы, компрессоры, фильтры и трубопроводы для фармацевтических средств.

1.3.2. Титановый сплав ОТ4-0

Титановый сплав ОТ4-0 отличается высокой технологичностью и коррозионной стойкостью. Основными легирующими элементами являются алюминий, марганец, железо и цирконий. Из других примесей следует отметить кремний, кислород, углерод, азот и водород. Химический состав регламентируется ГОСТ 19807-91. Кристаллическая решетка сплава ОТ4-0 имеет класс по структуре псевдо α . Материал термически не упрочняется, хорошо деформируется в горячем и холодном состояниях, свариваемость без ограничений. Титан ОТ4-0 используется для изготовления деталей сложной формы, работающих при средних и высоких температурах. Он широко востребован в различных отраслях современного машиностроения.

Химический состав марки ОТ4-0 в % согласно ГОСТ 19807-91 отображен в таблице 1.

Таблица 1 – Химический состав титанового сплава ОТ4-0

| Химический элемент | Содержание в сплаве, % |
|---------------------------|-------------------------------|
| Титан | 96.13 - 98.8 |
| Железо | до 0.3 |
| Углерод | до 0.1 |
| Кремний | до 0.12 |
| Марганец | до 0.5-1.3 |
| Азот | до 0.05 |
| Алюминий | до 0.4-1.4 |
| Цирконий | до 0.3 |
| Кислород | до 0.15 |
| Водород | до 0.012 |

Основные механические свойства титанового сплава ОТ4-0 указаны в таблице 2.

Таблица 2 – Механические свойства титанового сплава ОТ4-0

| | |
|------------------|------------------------|
| Плотность | 4457 кг/м ³ |
| Предел прочности | 650 МПа |
| Предел текучести | 550 МПа |
| Модуль Юнга | 0,32 |

1.4. Концентраторы напряжений

Концентрация напряжений – это местное повышение напряжений в элементах конструкций, обусловленное резкими переходами в поперечных сечениях, связанными с наличием отверстий, выточек, выкружек, канавок и тп., называемых концентраторами. Концентраторы напряжений можно разделить на две группы наружные и внутренние.

Наружными концентраторами напряжений являются чаще всего конструктивные элементы:

- отверстия;
- канавки;
- наружные элементы сварных швов;
- переходы разнотолщинных элементов и др.

Внутренними концентраторами напряжений являются чаще всего различные дефекты внутреннего строения металлов и сварных швов:

- структурная неоднородность;
- неметаллические включения;
- трещины внутренние и наружные.

На рисунке 11 показаны графики распределения напряжений в сечении растягиваемой полосы, ослабленной круглым отверстием (рисунок 11, а) и полукруглыми выкружками или галтелями (рисунок 11, б).

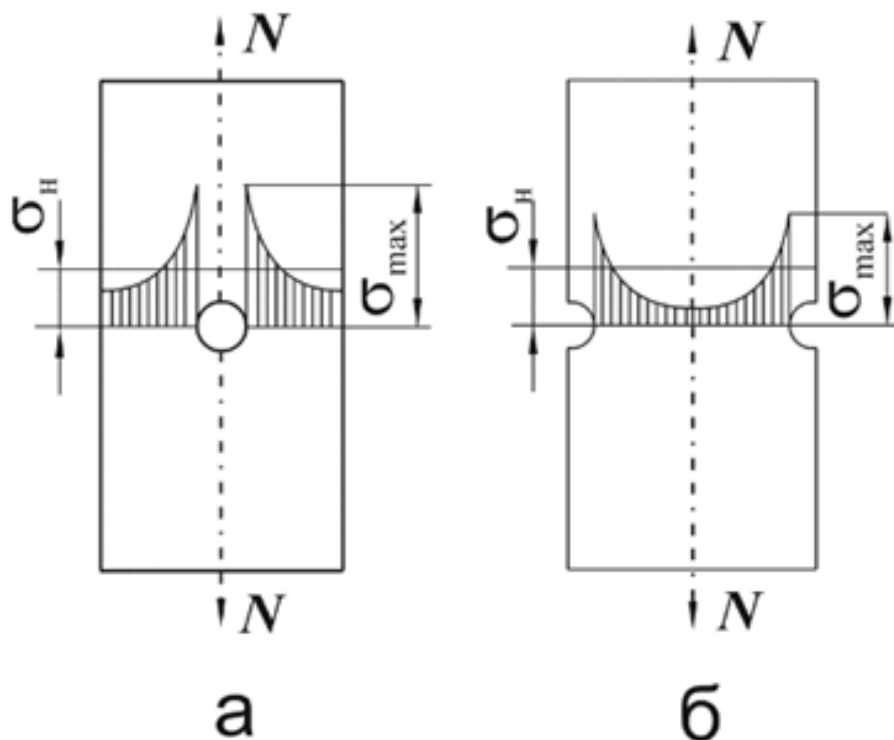


Рисунок 11 – Характерные концентраторы напряжений

Максимального значения напряжения достигают в непосредственной близости от концентратора (например у края отверстия) и ограничиваются весьма небольшой частью площади поперечного сечения, т.е. имеют местный характер. Поэтому напряжения у мест концентрации называют местными напряжениями [10].

С концентрацией напряжений приходится считаться при конструировании и расчете на прочность деталей машин. Следует избегать глубоких выточек, выкружек, резких переходов сечений, около которых возникает концентрация напряжений, способствующая преждевременному разрушению материала. Нужно также стремиться к тщательной обработке поверхностей деталей. Даже мелкие следы от шлифовального круга могут снизить предел прочности материала при растяжении на 15-20%.

1.5. Современные исследования в области лазерного ударного упрочнения

Поверхностное упрочнение стало неотъемлемой частью промышленных операций. Этот процесс должен улучшить механические и металлургические свойства изделий, такие как усталостная долговечность, коррозионная стойкость, износостойкость и эрозионная стойкость [11]. Именно поэтому в последние годы все больше исследований проводится в области поверхностного упрочнения образцов путем создания остаточных напряжений [12].

Одним из наиболее перспективных методов является лазерное ударное упрочнение. Применение ЛСП позволяет повысить усталостную долговечность и износостойкость. ЛСП также показало пригодность обработки сложных геометрий за счет технологических особенностей, в то время как при использовании аналогичных методов это может быть труднодостижимо [13].

Во многих работах проводится сравнение ЛСП с дробеструйной обработкой (ДО), так как она является наиболее широко используемым методом поверхностного упрочнения в производстве. Например, в работе [14] было показано, что лазерное упрочнение имеет значительные преимущества, связанные с глубиной и величиной остаточных сжимающих напряжений. Для иллюстрации этого явления были измерены остаточные напряжения в образцах, выполненных из материала Инконель 718, после лазерной и дробеструйной обработок. Результаты представлены на рисунке 11. Данный график наглядно демонстрирует преимущества ЛСП перед ДО.

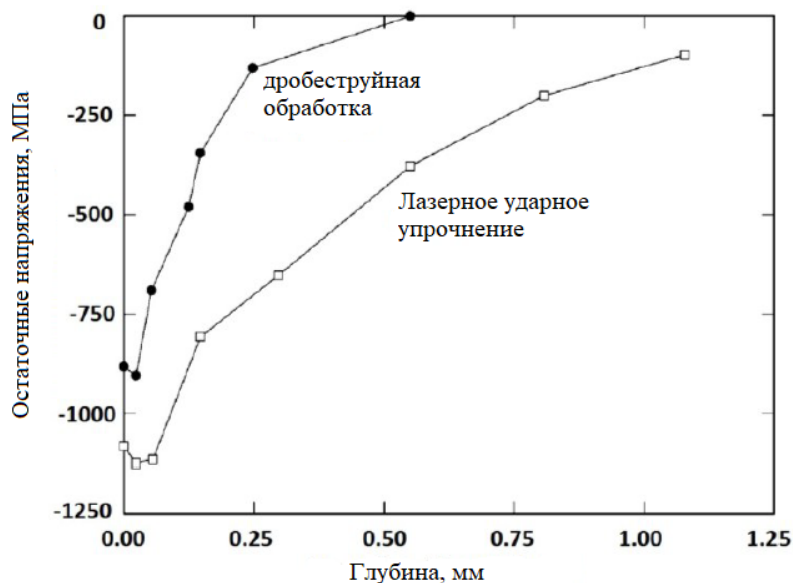


Рисунок 11 – Профиль остаточных напряжений в Инконель 718 до и после ЛСП

Еще одно преимущество ЛСП в сравнении с дробеструйной обработкой было представлено в статье [15]. Metal Improvement Company (MIC) изучала влияние разных методов создания остаточных напряжений на усталостные свойства образцов с отверстиями в центре, выполненных из алюминиевого сплава Al 6061-T6. Усталостная долговечность образцов, обработанных лазером, превышает долговечность образцов, обработанных дробью, примерно в 10 раз, как проиллюстрировано на рисунке 12. Это различие обусловлено величиной и глубиной остаточных напряжений.

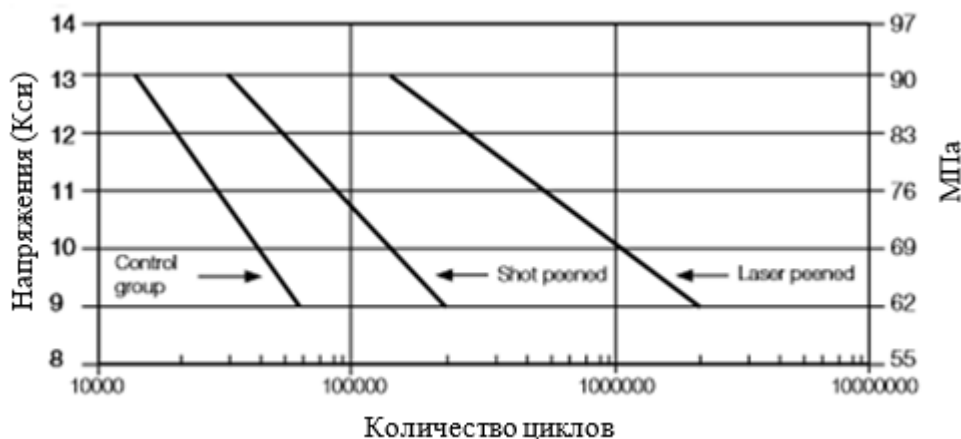


Рисунок 12 - Испытания на усталость алюминиевых образцов [16]

Как и у любого другого технологического процесса, у лазерного упрочнения есть набор параметров, влияющих на качество обработки и итоговые свойства материала.

В работе [17] исследовалось влияние плотности мощности лазера на распределение остаточных напряжений по толщине образца и усталостную долговечность образцов. Геометрия испытываемых образцов показана на рисунке 13.

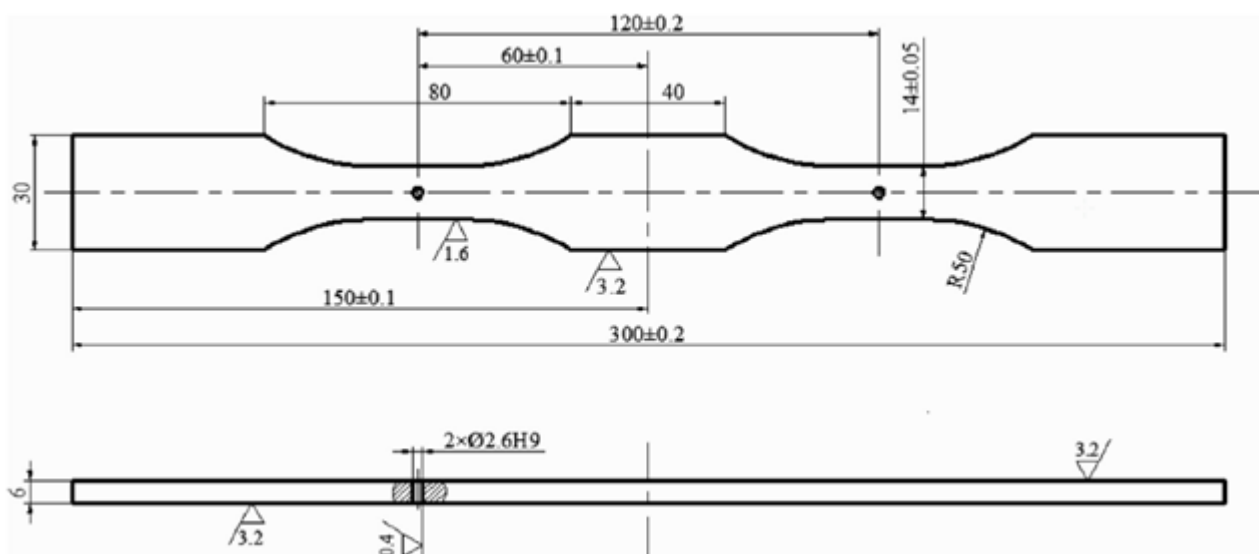


Рисунок 13 – Геометрия испытываемых образцов из Al 7050-T7451 [17]

Исследуемый материал - сплав Al 7050-T7451. Для поверхностного упрочнения был использован Q-switched лазер с длиной импульса 20 нс, длиной волны 1064 нм, диаметром пятна 2,6 мм, перекрытие было выбрано 50 %. Энергия лазерного импульса была 3 Дж, 4 Дж, 5 Дж, 6 Дж, 11,3 Дж. Соответствующие плотности мощности были равны 2,83 ГВт/см², 3,77 ГВт/см², 4,71 ГВт/см², 5,65 ГВт/см² и 10,62 ГВт/см². Усталостные испытания проводились с помощью приложения ассиметричного цикла с максимальным напряжением 195 Мпа и коэффициентом асимметрии цикла 0,1. В результате испытаний было выявлено, что увеличение плотности мощности лазера сначала приводит к увеличению усталостной долговечности, затем к снижению, а после этого снова к увеличению. Количество циклов и улучшение от ЛСП для разных плотностей мощности можно увидеть на рисунке 14. При разных плотностях

мощности мы имеем различные распределения остаточных напряжений, места зарождений трещин тоже будут отличаться. Скорость роста трещины также зависит от плотности мощности импульса. Таким образом, данное исследование говорит о том, что ключом к улучшению усталостной долговечности крепежных отверстий является подбор правильных параметров лазера.

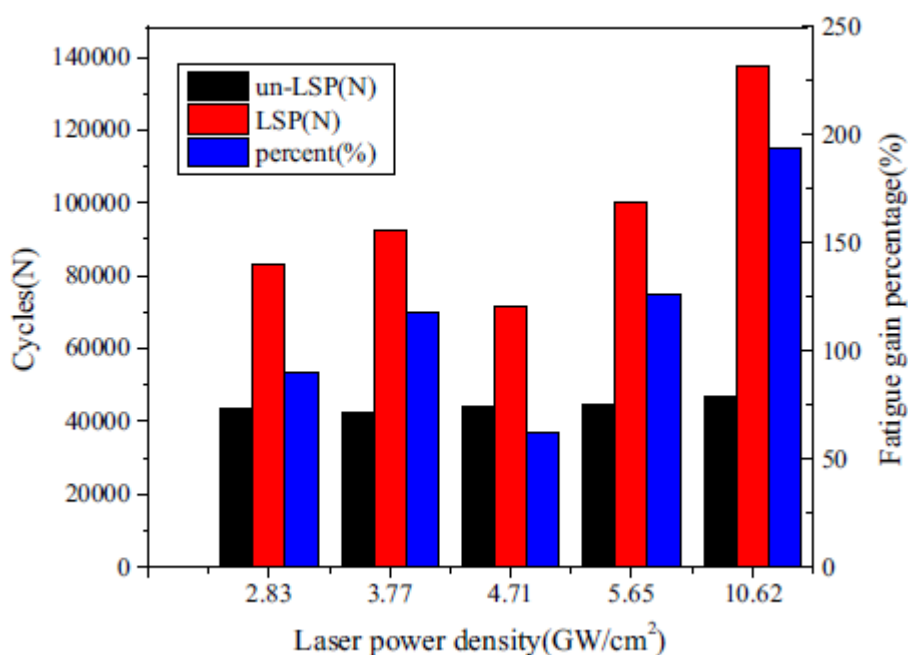


Рисунок 14 – Экспериментальная зависимость количества циклов от плотности мощности лазера [17]

В исследовании [18] изучается влияние на усталостную долговечность таких факторов, как количество перекрытий лазерного пятна и энергия лазерного импульса. Образцы для испытаний изготавливались из алюминиевого сплава AA2024-T3, их геометрия представлена на рисунке 15, ширина равна 50 мм.

Лазерное упрочнение проводилось при помощи Nd:YAG лазера с длиной импульса 10 нс, длиной волны 1064 нм и с частотой 10 Гц. Бралось два значения энергии лазера 3 Дж и 1,3, а также два размера лазерного пятна: 1×1 мм и 3×3 мм. Количество перекрытий – 1, 2, 3 и 5.

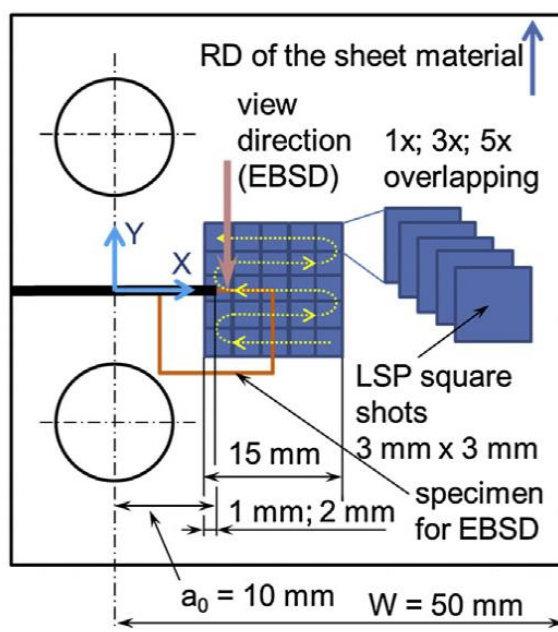


Рисунок 15 – Геометрия образцов из AA2024 для усталостных испытаний [18]

Испытания на распространение усталостной трещины (РУТ) проводились на сервогидравлической машине. Каждый набор образцов исследовался в одних и тех же условиях испытаний – максимальная нагрузка 25 кН , амплитуда цикла $11,25 \text{ кН}$, среднее напряжение цикла $13,75 \text{ кН}$, $R=0.1$, частота 10 Гц и комнатная температура.

На рисунке 16 представлены результаты исследования влияния лазерной обработки на усталостную прочность образцов. Критерием окончания эксперимента являлась величина, равная отношению длины трещины к ширине отверстий под штифт. Ее предельным значением было значение $0,6$. Рисунок 16 (а) демонстрирует результаты испытаний обработанных образцов, для упрочнения которых использовалась оптика $1 \times 1 \text{ мм}$. Из графика видно, что ЛСП с энергией $1,3 \text{ Дж}$ увеличило ресурс почти в два раза. Увеличение же одного из параметров ЛСП (количество перекрытий или величины энергии), увеличивает усталостную долговечность в 10 раз.

На рисунке 16 (б) отображены аналогичные результаты для образцов с ЛСП, значение оптики которой было $3 \times 3 \text{ мм}$. Наглядно можно увидеть, что

увеличение количества перекрытий дает значительный прирост усталостной долговечности в сравнении с БМ.

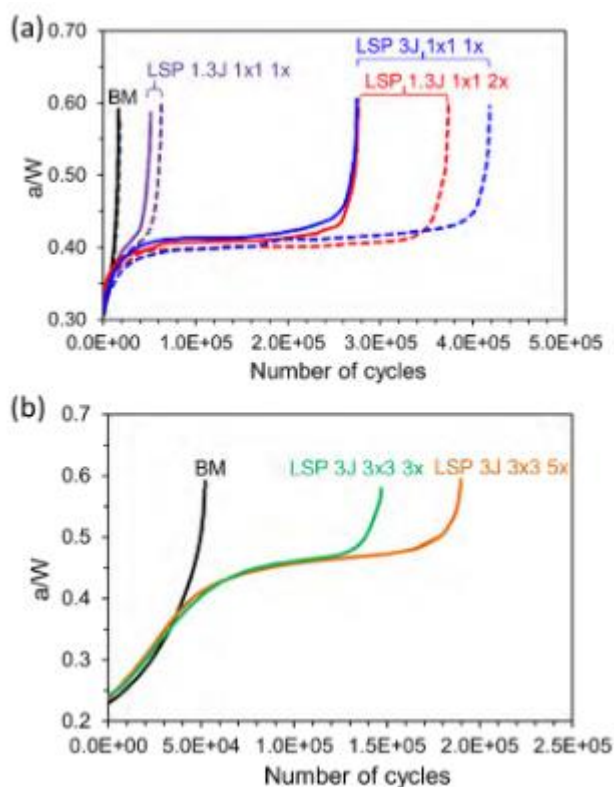


Рисунок 16 – Результаты испытаний на распространение трещины при различных параметрах лазерного упрочнения [18]

В статье [19] рассматривалось влияние на усталостный ресурс такого фактора как направление лазерного упрочнения относительно направления проката. В эксперименте использовались образцы из нержавеющей стали Duplex 2205, геометрия которых представлена на рисунке 17.

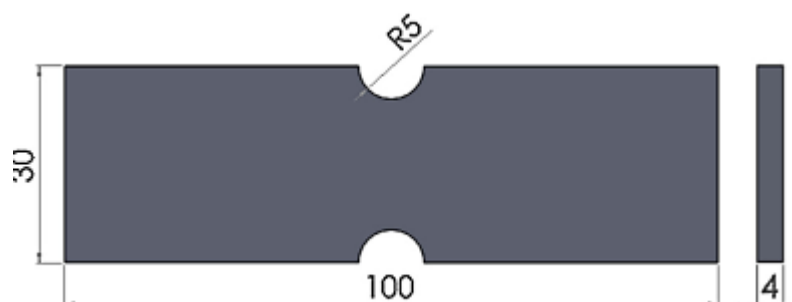


Рисунок 17 – Геометрия образцов из нержавеющей стали Duplex 2205 [19]

В испытаниях на усталость соответственно исследовались три типа образцов: без обработки, обработка параллельно прокату и перпендикулярно прокату. Максимальная амплитуда напряжений – 300 МПа, а коэффициент

асимметрии цикла – 0.1. Результаты усталостных испытаний отображены на рисунке 18.

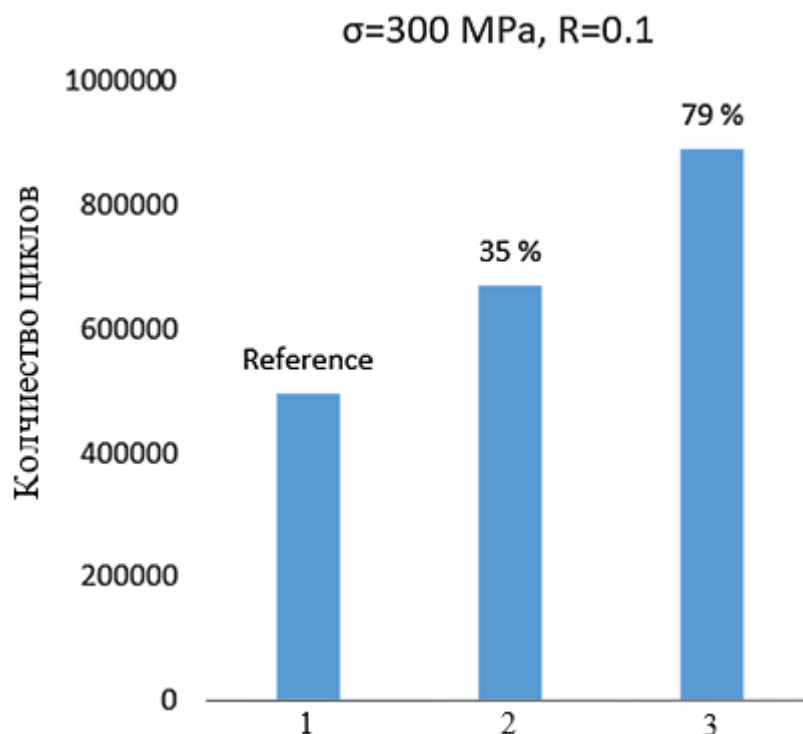


Рисунок 18 – Сравнение усталостных свойств образцов с различными направлениями лазерной обработки: 1 – без ЛСП, 2 – с ЛСП параллельно прокату, 3 – с ЛСП перпендикулярно прокату [19]

Экспериментально показано, что обработка ЛСП в обоих направлениях (параллельном и перпендикулярном направлению проката) устраняет растягивающее остаточное напряжение из-за производственного процесса и создает высокие сжимающие остаточные напряжения с различным распределением для каждого направления в соответствии с анизотропией, наблюдаемой в используемой нержавеющей стали. Было продемонстрировано, что ЛСП является эффективным методом для повышения усталостной долговечности в образцах. Посредством задания направления упрочнения, перпендикулярного направлению проката, увеличение усталостного ресурса достигает значения 79% при 275 МПа амплитуды напряжения, тогда как при направлении обработки параллельном направлению проката увеличивает усталостный ресурс всего на 35% при том же уровне напряжений.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

2.1. Теоретические сведения

2.1.1. Параметры цикла

Так как в усталостных испытаниях напряжения, испытываемые образцом, постоянно меняется по величине и знаку, имеет смысл говорить о цикле. В данном случае цикл – это однократное смена напряжений, то есть совокупность последовательных значений напряжений за один период. Также стоит отметить, что здесь будет рассмотрено только одноосное нагружение.

В зависимости от характера повторно-переменных нагрузок, циклы напряжений делят на знакопеременный симметричный, знакопеременный асимметричный, пульсирующий и знакопостоянный (Рисунок 19).

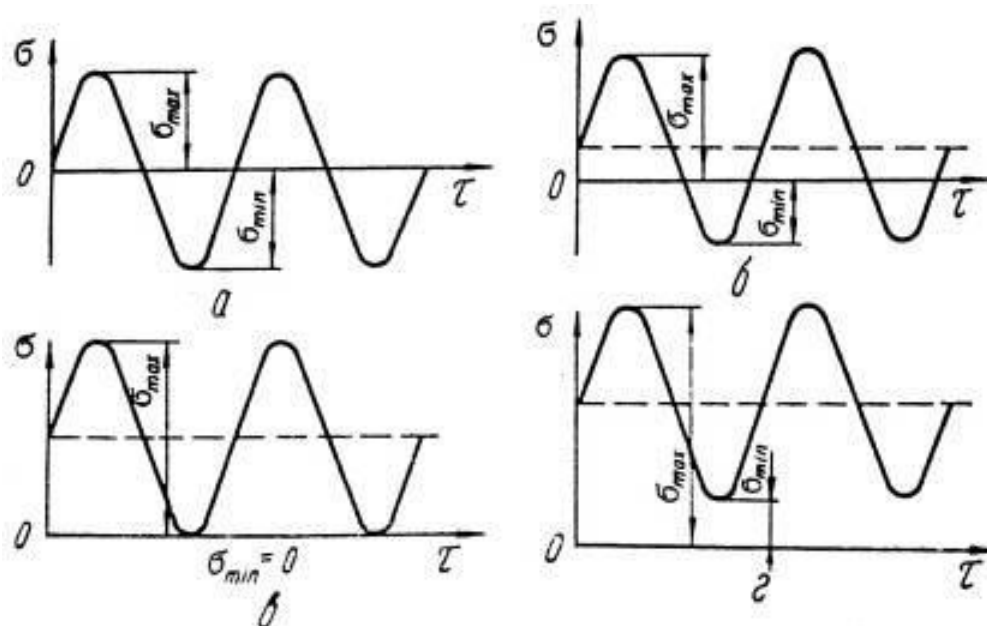


Рисунок 19 – Характер повторно-переменных нагрузок при испытании на усталость: а – знакопеременный симметричный, б – знакопеременный асимметричный, в – пульсирующий, г – знакопостоянный

Цикл характеризуется несколькими основными величинами:

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} \text{ – амплитудой,} \quad (1)$$

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} \text{ – средним напряжением,} \quad (2)$$

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} \text{ – коэффициентом асимметрии цикла,} \quad (3)$$

где σ_{min} – минимальное напряжение цикла, σ_{max} – максимальное напряжение цикла.

Если максимальное значение напряжений и минимальное значение напряжений численно равны между собой, но противоположны по знаку, то цикл называется симметричным. Если же максимальные и минимальные напряжения не равны между собой, то цикл называется асимметричным [20].

Всякий асимметричный цикл можно представить как результат наложения симметричного цикла на постоянное среднее напряжение. Опыт показывает, что разрушение материала при переменных напряжениях наступает не сразу, а после многократного изменения нагрузки, причем число циклов, при котором происходит разрушение, оказывается тем меньше, чем выше максимальное напряжение цикла.

Экспериментально установлено, что число циклов, при котором происходит разрушение, зависит не только от величины максимального (по абсолютному значению) напряжения, но и от амплитуды колебания напряжений. Чем больше σ_a при одном и том же σ_{max} , тем меньше перемен нагрузки выдержит материал. Поэтому из всех циклов наиболее опасным является симметричный.

Экспериментальным путем также установлено, что для многих материалов существует такое значение максимального напряжения, зависящее от степени асимметрии цикла, при котором материал выдерживает неограниченное число перемен нагрузки (циклов).

2.1.2. Вероятностный характер явления усталости

Усталостное разрушение и особенно его первая стадия носит ярко выраженный статистический характер, так как зависит от индивидуальных особенностей поликристаллического строения каждого образца. Так, даже при самом строгом соблюдении однородности условий испытаний образцы из одного и того же материала при одинаковых максимальных напряжениях разрушаются при существенно различных количествах циклов. Разброс разрушающих величин циклов может достигать при этом двух и более порядков. Величина разброса увеличивается с уменьшением уровня максимальных напряжений и соответствующим увеличением количества циклов, необходимых для разрушения образца.

В последние годы интенсивно развиваются вероятностные методы расчета на прочность при напряжениях переменных во времени. Эти методы основываются на вероятностной оценке рассеяния усталостных характеристик материала, определяемых путем испытаний достаточно большой партии образцов, имеющих одинаковый состав и геометрию, на различных уровнях максимальных напряжений цикла [21].

Статистический анализ проблем усталости требует статистической функции распределения соответствующих переменных. К сожалению, статистические распределения для усталостных проблем не могут быть выведены из физического описания явления усталости. Как следствие, должна быть принята статистическая функция распределения. Наиболее известной такой функцией является функция нормального распределения (иначе называется функцией Гауссова распределения). Уравнение для вероятности значений $v \leq x$ имеет следующий вид:

$$P(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{v-\mu}{\sigma}\right)^2} dv \quad (4)$$

В этом уравнении μ - среднее значение, σ - среднеквадратическое отклонение, и v - переменная интегрирования. Линейная зависимость между

функцией $P(x)$ и переменной x (здесь количество циклов нагружения) показана на рисунке 20. Наклон прямой линии зависит от σ . Обычно в качестве переменной x принимается $\log(N)$ для оценки результатов аналогичных усталостных испытаний [22].

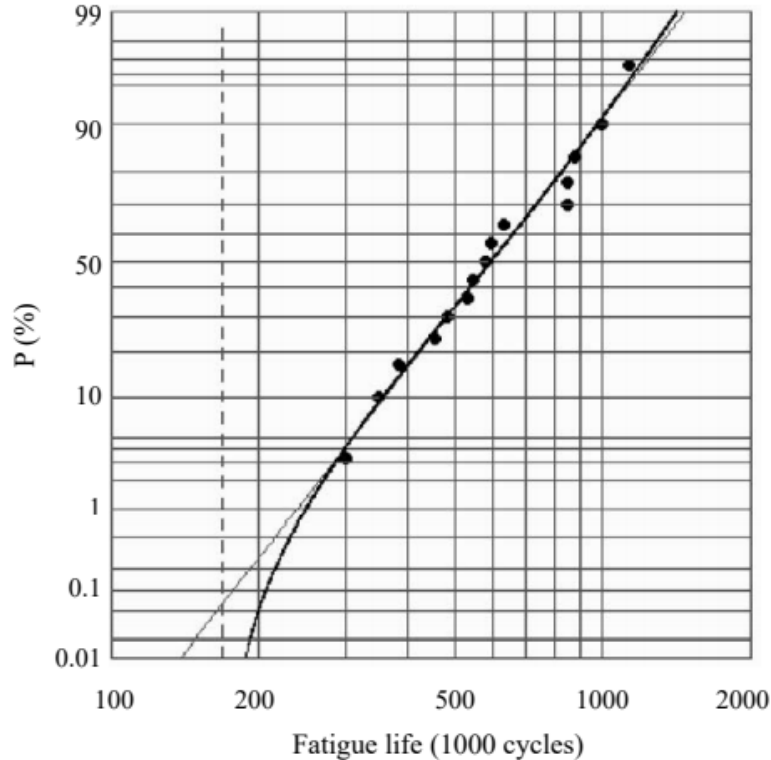


Рисунок 20 – Зависимость вероятности разрушения образцов от количества циклов нагружения: прямая линия – это нормальное распределение, кривая – распределение Вейбулла [22]

Другой популярной функцией распределения является трехпараметрическая функция распределения Вейбулла, описываемая следующим выражением:

$$P(x) = 1 - e^{-\left(\frac{x-x_0}{a}\right)^b} \quad (5)$$

В этом уравнении три параметра. Функция имеет нижний предел x_0 , для которого $P(x)=0$. Это означает, что долговечность не может опуститься ниже значения N_0 , где $x_0 = \log(N_0)$. Это делает данную функцию распределения более реалистичной. Параметр a называется параметром масштаба, а b - параметром формы с учетом их влияния на кривую плотности вероятности. В некоторых

публикациях x_0 принимается равным нулю, делая таким образом функцию распределения Вейбулла двухпараметрической.

Третья применяемая функция также является трехпараметрической с нижним пределом усталостной долговечности. В ней применяется все также функция вероятности (4), однако x находится из следующего уравнения:

$$x = \log(N - N_0) \quad (6)$$

По сути это функция распределения все также описывает нормальное распределение, однако в ней имеется третий параметр – параметр местоположения, роль которого играет нижний предел долговечности N_0 . Для подобных испытаний вероятность отказа определяется следующей формулой:

$$P = \frac{i - 0,4}{n + 0,2}, \quad (7)$$

где n – число результатов испытаний;

i – ранговое число для данных усталостной долговечности в порядке возрастания (ранг 1 имеет образец с наименьшей долговечностью).

В данной работе будет использоваться двухпараметрическое распределение Вейбулла. Оно позволяет оценить разброс нагрузки и долговечности, которые можно сравнить с экспериментальными данными. Функция двухпараметрического распределения Вейбулла приведена в следующем уравнении [23]:

$$P(x) = 1 - e^{-\left(\frac{x}{T}\right)^b} \quad (8)$$

Функция имеет два параметра: b – параметр формы распределения, и T – параметр масштаба. Параметр формы также известен как наклон Вейбулла. Это связано с тем, что значение равно наклону линии на графике вероятности. Различные значения параметра формы могут оказывать заметное влияние на поведение распределения. На практике, некоторые значения параметра формы могут привести к тому, что уравнения распределения Вейбулла будет сведено к

уравнениям других распределений. Так, например, экспоненциальное распределение является частным случаем распределения Вейбулла, в котором $b=1$ [24]. Параметр b является безразмерным числом.

График на рисунке 21 прекрасно иллюстрирует наклон графика вероятности меняется в зависимости от значения параметра формы. С $b < 1$ имеют частоту отказов, которая уменьшается со временем (ранние отказы). Распределения Вейбулла с b , близким или равным 1, имеют постоянную частоту отказов. Распределения Вейбулла с $b > 1$ имеют частоту отказов, которая увеличивается со временем (отказы при износе). Стоит отметить, что все прямые представленные на графике имеют одинаковый параметр масштаба.

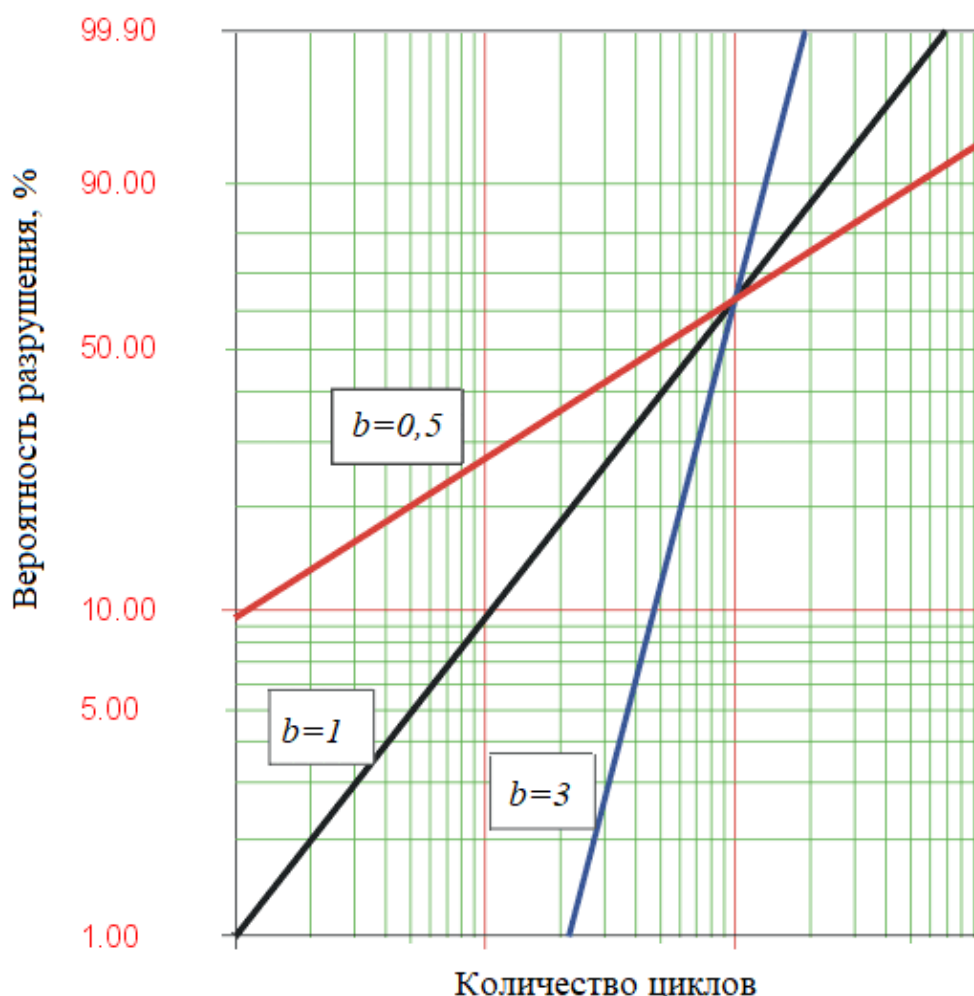


Рисунок 21 – Влияние параметра формы на наклон вероятностного графика

Помимо того, что по параметру формы можно судить о наклоне вероятностного графика, у этого параметра также есть и прикладной смысл. Если

его значение меньше единицы (этот период называют периодом ранних отказов), это может указывать на:

- недостаток адекватного контроля процесса;
- неудовлетворительная разбраковка по принудительному отказу или по нагрузке;
- проблемы производства, неправильная сборка, плохой контроль качества;
- приработка или износ.

Когда параметр формы равен единице, это считается периодом случайных отказов, так как отказы во времени происходят случайно.

Поэтому можно предположить любую из следующих ситуаций:

- наличие случайных ошибок технического обслуживания, ошибки персонала;
- наличие случайных перегрузок;
- отказы, связанные с особенностями объекта, естественные повреждения, вызванные внешними объектами, удары молнии;
- смешивание данных о наработках по трем и более режимам отказов.

В том случае, когда параметр b больше единицы говорят об износе. некоторыми типичными примерами данного случая являются:

- износ;
- коррозия;
- множественные трещины;
- усталость;
- поглощение влаги;
- диффузия;
- испарение (потеря веса);
- накопление повреждений.

Значение параметра масштаба T представляет собой наработку, в течение которой в среднем разрушаются 63,2 % наблюдаемых объектов [25]. Значение, равное 63,2 %, получено при подстановке $N=T$ в формулу (3).

2.2. Необходимое оборудование и образцы

2.2.1. Образцы

В ходе эксперимента использовались две партии образцов: для измерения остаточных напряжений и для испытаний на усталость. Обе партии были изготовлены из одного материала – титановый сплав ОТ4-0. Геометрия образцов представлена на рисунках 20 и 21.

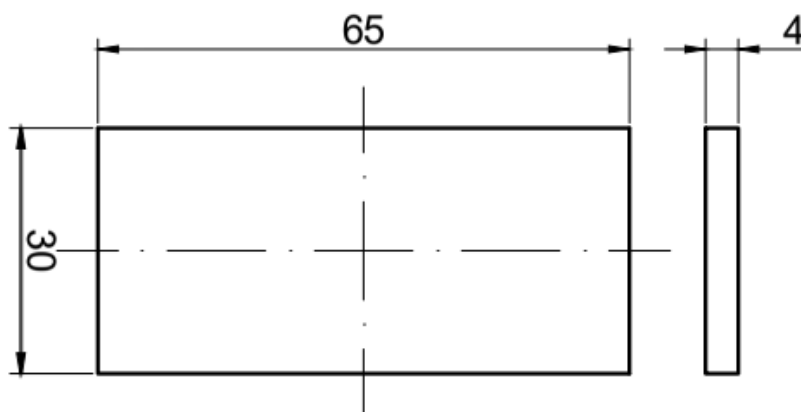


Рисунок 20 – Геометрия образцов для измерения остаточных напряжений

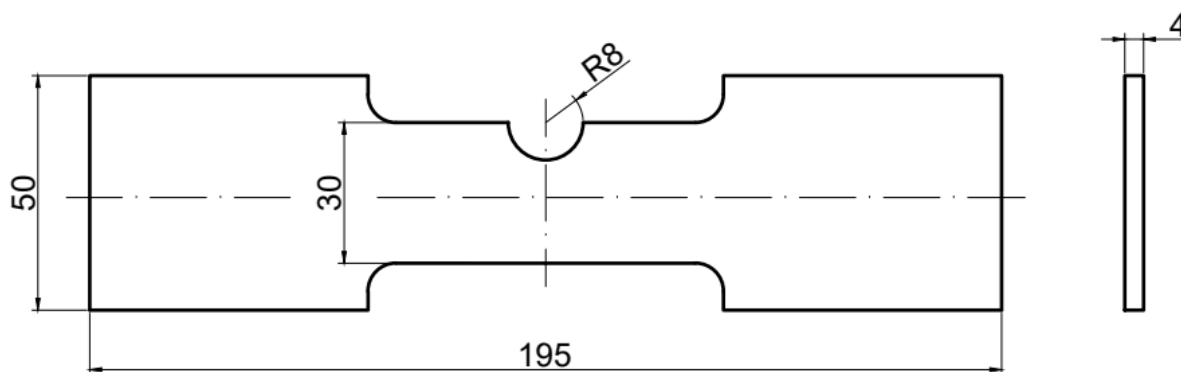


Рисунок 21 – Геометрия образцов для усталостных испытаний

2.2.2. Лазерная установка

Остаточные напряжения создавались при помощи импульсного лазерного излучения лазера Nd:YAG. Внешний вид установки лазерного упрочнения во

время работы представлен на рисунке 22. Параметры установки сведены в таблицу 2. Основные элементы установки: Nd:YAG лазер (рисунок 23), шестикоординатный робот-манипулятор KUKA (рисунок 24), обрабатываемый образец, система подачи воды, система подачи воздуха.

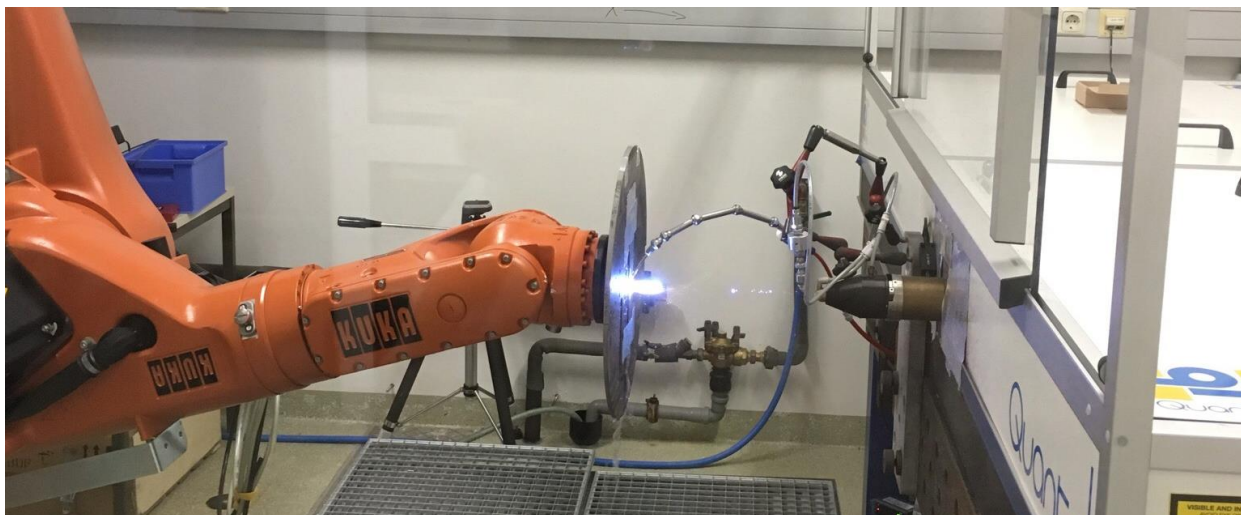


Рисунок 22 – Установка лазерного ударного упрочнения во время работы



Рисунок 23 – Nd:YAG лазер

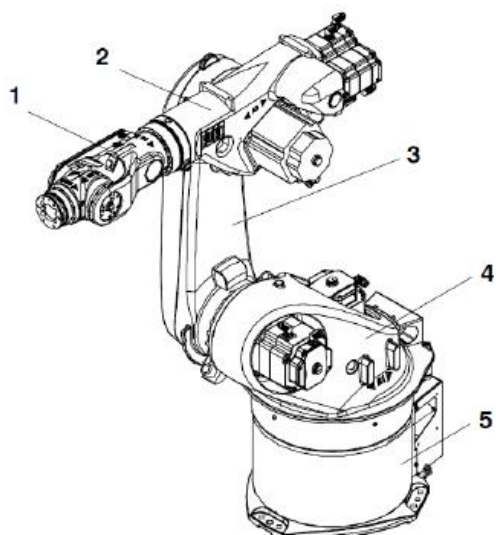


Рисунок 24 – Робот-манипулятор KUKA 30 НА [26]

1 – запястье; 2 – рука; 3 – звено руки; 4 – вращающаяся колонна; 5 – опора

Таблица 3 – Характеристики лазерной установки

| Параметр | Величина |
|-----------------------------------|----------|
| Длина волны, нм | 1064 |
| Максимальная энергия импульса, Дж | 5 |
| Длительность импульса, нс | 10, 20 |
| Частота импульсов, Гц | 10 |

Рассмотрим более подробно лазерную систему [27]. Для настройки системы применяется гелий-неоновый лазер. Для транспортировки излучения используются поворотные зеркала из оптического стекла. Поскольку на выходе требуется получить высокие значения энергии и короткие длительности импульса, то применяется усилительный режим генерации, т.е. система: задающий генератор – усилитель. В такой системе осциллятор формирует первичный лазерный импульс с требуемыми оптическими характеристиками, а

затем с помощью каскадов усиления осуществляется преобразование до требуемого уровня энергии.

Длительность импульса первого осциллятора – 10 нс (рисунок 25), второго – 20 нс. Выбор осциллятора осуществляется с помощью блока управления. Каждый осциллятор состоит из задающего генератора (цилиндр Nd:YAG диаметром 6 мм), накачка которого происходит с помощью двух импульсных ксеноновых ламп.

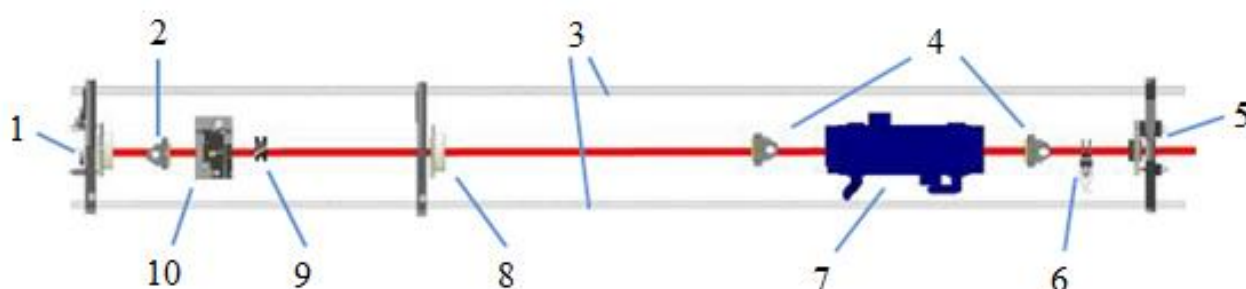


Рисунок 25 – Схема осциллятора

- 1 – глухое зеркало резонатора; 2 – четвертьволновая пластинка;
- 3 – углепластиковые стенки; 4 – апертуры 5 мм; 5 – выходное зеркало резонатора; 6 – электромеханический затвор; 7 – модуль накачки; 8 – линза;
- 9 – поляризатор; 10 – ячейка Поккельса

Полная схема оптического блока представлена на рисунке 26. Он состоит из:

- Двух осцилляторов, обеспечивающих импульсы с частотой повторения 10 Гц и гауссовой формой импульса по времени. Длительность импульса первого осциллятора 10 нс, второго – 20 нс.
- Первой ступени усиления, которая в свою очередь состоит из двух лазерных головок с активной средой (Nd:YAG) диаметром 9 мм, работающих на частоте 10 Гц. На этой стадии усиление происходит от 300 мДж до 2 Дж.
- Второй ступени, состоящей из двух головок диаметром 16 мм. Усиление происходит от 2 Дж до 5 Дж.

- Дифракционных оптических элементов, которые гомогенизируют пространственное распределение интенсивности лазерного излучения на расстоянии 300 мм от выходного окна. Энергия излучения в плоскости фокусировки 5 Дж. Доступны 3 оптических системы для различных размеров пятна: 1x1 мм, 3x3 мм, 5x5 мм.

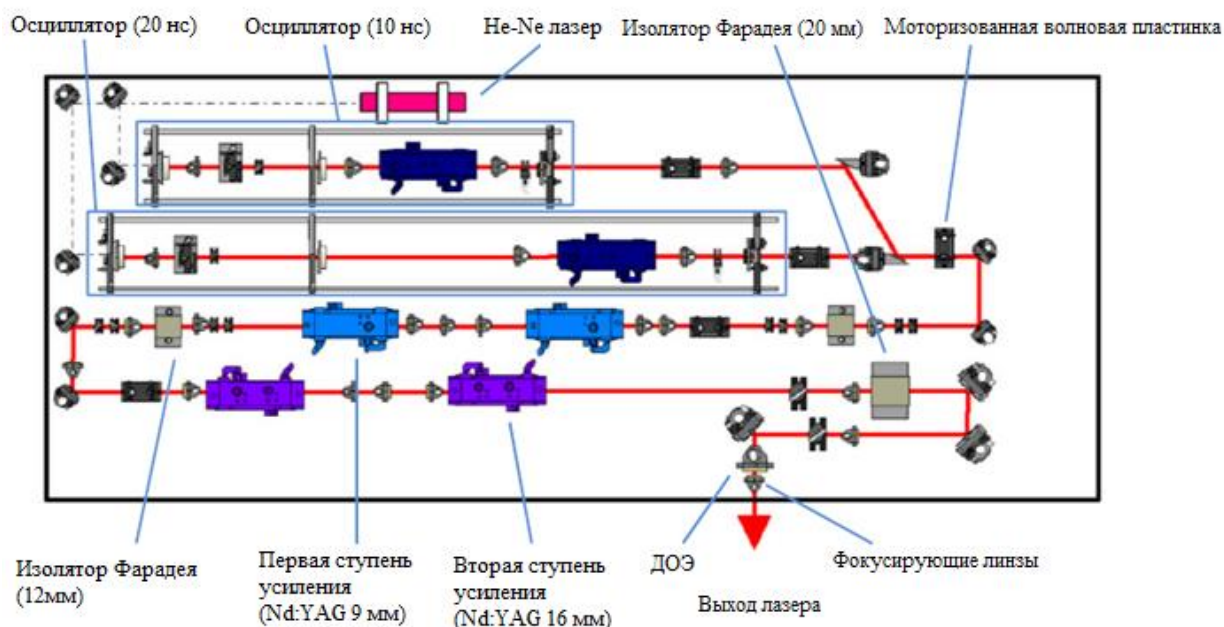


Рисунок 26 – Схема оптического блока

2.2.3. Измерение остаточных напряжений методом сверления отверстий

Современные методы измерения распределения остаточных напряжений по толщине в материалах обычно включают пошаговые измерения деформации поверхности по мере постепенного удаления напряженного материала. Примерами таких методов являются сверление отверстий или кольцевых проточек, нарезка канавок и послойное удаление материала. В данной работе для измерения остаточных напряжений использовался метод сверления отверстий в сочетании с электронной спекл-интерферометрией.

Метод сверления отверстий основан на бурении небольшого отверстия в исследуемом материале. Это приводит к перераспределению остаточных напряжений вокруг него (рисунок 27), после чего проводят замер деформаций

релаксации и на основе этих измерений оценивают остаточные напряжения в слое [28].

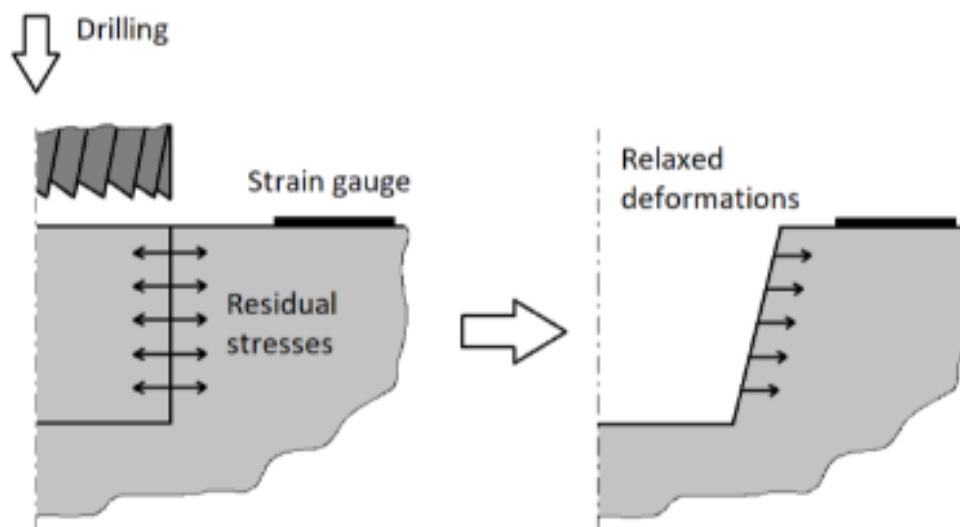


Рисунок 27 – Метод сверления отверстий [28]

Стандартная система для проведения подобных измерений Prism (рисунок 28) включает в себя следующие элементы: блок подсветки, источник лазерного излучения, видео блок с системой оптического увеличения, оптоволоконные кабели; оптический стол, установка высокоскоростного сверления, контроллер перемещений и компьютер.

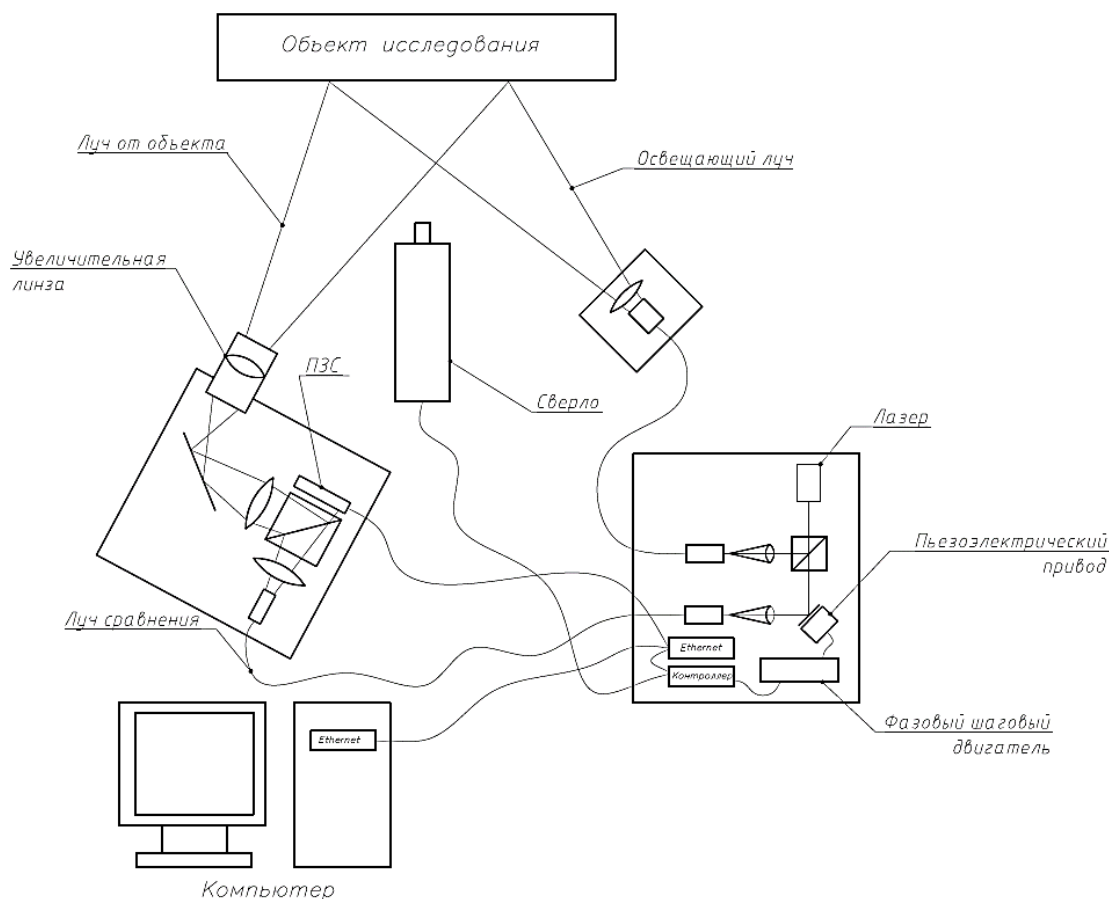


Рисунок 28 – Схема установки Prism для измерения остаточных напряжений

Спеклинтерферометрия – это один из методов пространственной интерферометрии, основанный на анализе зернистой структуры изображения объекта [29]. Основные характеристики установки для измерения остаточных напряжений приведены в таблице 3.

Таблица 4 – Основные характеристики установки Prism

| Параметр | Значение |
|----------------------------------|-------------------------|
| Длина волны, нм | 532 |
| Мощность излучения, мВт | 5 |
| Диаметр сверла, мм | 0.6; 0.8; 1.0; 1.2; 2.0 |
| Скорость вращения сверла, об/мин | 5000-30000 |
| Скорость подачи сверла, мм/с | 0.4; 0.05; 0.01 |

Принцип работы установки заключается в следующем: излучение лазерного источника разделяется на предметный и опорный пучок. Предметный пучок освещает поверхность образца, изображения которого формируются в

ПЗС-матрице. А опорный пучок проходит через пьезоэлектрический фазовращатель и далее по оптоволоконному кабелю попадает непосредственно на поверхность ПЗС-матрицы. Эти два пучка совмещаются на данной поверхности для формирования электронной спекл-структуры. Локальная фаза этой структуры определяется в каждой точке поверхности набором из четырех сдвинутых по фазе электронных спекл-структур. Деформация измеряемой поверхности оценивается посредством создания последовательного набора спекл-структур, сдвинутых по фазе, вычисления локальных фазовых углов и вычитания первоначальных измерений фазового угла. Такие наборы для спекл-структур получаются для каждой глубины сверления, которую мы выбираем при начале работы.

Основные преимущества метода:

- легкость подготовки образцов (у них должна быть чистая поверхность с низким коэффициентом отражения);
- высокая скорость анализа (5-30 минут);
- простота работы с устройством (автоматическое сверление, которое контролируется компьютером) ;
- высокое разрешение (измерение остаточных напряжений с точностью 7 МПа);
- возможность измерения напряжений на одной определенной глубине или получения всего профиля распределения напряжений;
- получение полного анализа, корректировка результатов которого не требуется;
- минимальный контакт с поверхностью материала, тензометрические датчики не требуются;
- возможность измерения напряжений в любом материале.

Поскольку для измерения остаточных напряжений разрушения осуществляются только на небольшом участке детали, данный метод рассматривается как испытание с частичным разрушением образца.

Программное обеспечение имеет различные методы измерения остаточных напряжений. Результаты предоставляются в виде графиков и таблиц. Prism сохраняет данные на компьютере. Программа рассчитывает горизонтальные и вертикальные составляющие напряжений.

2.2.4. Усталостные испытания

Для проведения усталостных испытаний применялась серво-гидравлическая машина Schenck (рисунок 29). Данная система разделена на статическую и динамическую части и позволяет выполнять динамические испытания при любой выбранной степени асимметрии цикла R. Большой стол машины с T-образными пазами и регулируемое вертикальное пространство для испытаний позволяют проводить испытания широкого диапазона деталей с различными размерами. Рабочая частота не превышает 20 Гц.



Рисунок 29 – Сервогидравлическая машина Schenck

Машина состоит из силовой рамы, силового гидравлического привода, датчика силы, датчика перемещений, вспомогательных устройств для поддержки, фиксации или захвата испытуемых образцов, комплекса измерительно-вычислительного и управляющего (далее контроллер), гидравлической станции.

Силовая рама состоит из неподвижного основания с закрепленными на нем двумя или четырьмя стальными направляющими колоннами и поперечины. Поперечина может перемещаться на колоннах для изменения рабочего пространства между основанием и поперечиной с фиксацией в требуемом положении стопорами. Силовой гидравлический привод монтируется на раме, и приводится в действие давлением, создаваемым гидравлической станцией.

Испытываемый образец устанавливается между подвижным элементом силового привода и неподвижными элементами рамы при помощи вспомогательных устройств. Сила, создаваемая силовым приводом и прикладываемая к испытуемому образцу, измеряется датчиком силы. Датчик перемещения, расположенный внутри привода, измеряет линейное перемещение подвижного элемента силового гидравлического привода. Сигналы от датчиков силы и перемещения поступают в контроллер.

2.3. Программа испытаний

Основной задачей эксперимента было определение влияния лазерного ударного упрочнения на усталостную долговечность титановых образцов.

На первом этапе проводилась лазерное упрочнение и измерение остаточных напряжений образцов первой партии, их геометрия была приведена в пункте 2.2.1. Всего испытывалось пять образцов. Они подвергались лазерной обработке с целью нахождения оптимальных параметров ЛСП для второго этапа испытаний. Измерение остаточных напряжений проводилось с использованием метода сверления отверстий.

После этого начинался второй этап экспериментов. Для него использовались образцы второй партии, которая состояла из 20 штук. Половина из них подвергалась ЛСП, вторая – нет (базовый материал).

Сначала пять необработанных образцов испытывались на малоцикловую усталость с фиксированным напряжением в 500 МПа. Затем те же тесты проводились с обработанными образцами. Это делалось для того, чтобы для малоцикловой усталости была возможность построить распределение Вейбулла.

Оставшиеся образцы испытывались при различных напряжениях, величина которой была равна 375, 250, 150, 100, 90 и 80 МПа. Различные величины были взяты для того, чтобы образцы вышли из малоцикловой зоны и перешли в переходную и зону многоцикловой усталости. На основе полученных результатов строилась кривая Вёллера.

2.3.1. Измерение остаточных напряжений

Лазерная обработка образцов первой партии производилась при помощи лазера, устройство которого было описано в пункте 2.2.2.

Исходя из обзора литературы были выбраны следующие параметры обработки, которые представлены в таблице 5. Было решено сделать несколько тестов для сравнения их влияния на качество обработки и величину остаточных напряжений.

Таблица 5 – Параметры ЛСП образцов первой партии

| Образец | Энергия, Дж | Длительность импульса, нс | Количество перекрытий |
|---------|-------------|---------------------------|-----------------------|
| 1 | 5 | 20 | 1 |
| 2 | 5 | 20 | 2 |
| 3 | 3 | 10 | 1 |
| 4 | 3 | 10 | 2 |
| 5 | 3 | 10 | 3 |

Зона обработки также была подобрана исходя из аналогичных исследований. Например, в работе [30] было показано, что обработка конкретной ограниченной области гораздо более эффективна, чем обработка образца по всей его ширине. Исходя из этого, а также размеров имеющихся образцов была выбрана зона ЛСП, показанная на рисунке 30.

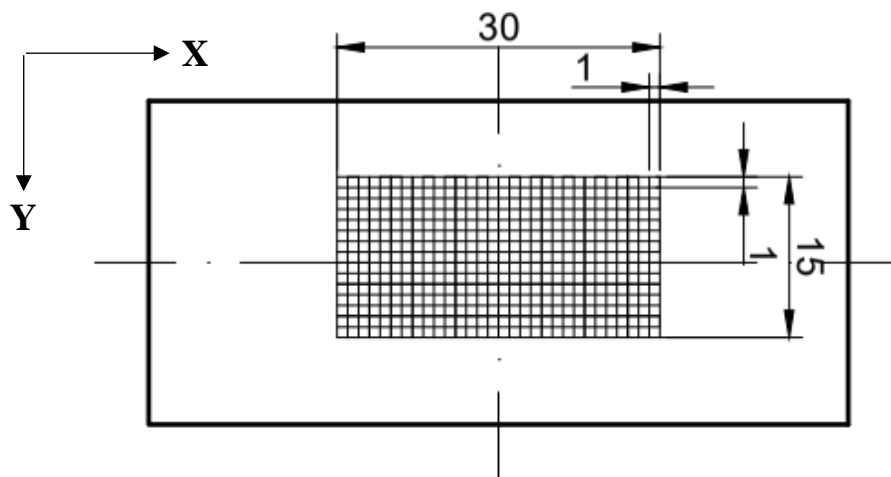


Рисунок 30 – Зона ЛСП для образцов из первой партии

Перед измерением остаточных напряжений на все образцы была нанесена белая краска для увеличения коэффициента отражения. Измерение остаточных напряжений проводились в трех точках с двух сторон образца (рисунок 31). Для измерения использовалась система PRISM, описанная в пункте 2.2.3. Использовалось сверло диаметром 2 мм, глубина отверстия 1 мм.



Рисунок 31 – Измерение остаточных напряжений

В результате были получены значения напряжений вдоль осей X и Y. На основе этих данных были вычислены средние значения и отклонения остаточных напряжений и построены графики этих напряжений по глубине образцов, которые показаны на рисунках 32, 33, 34, 35.

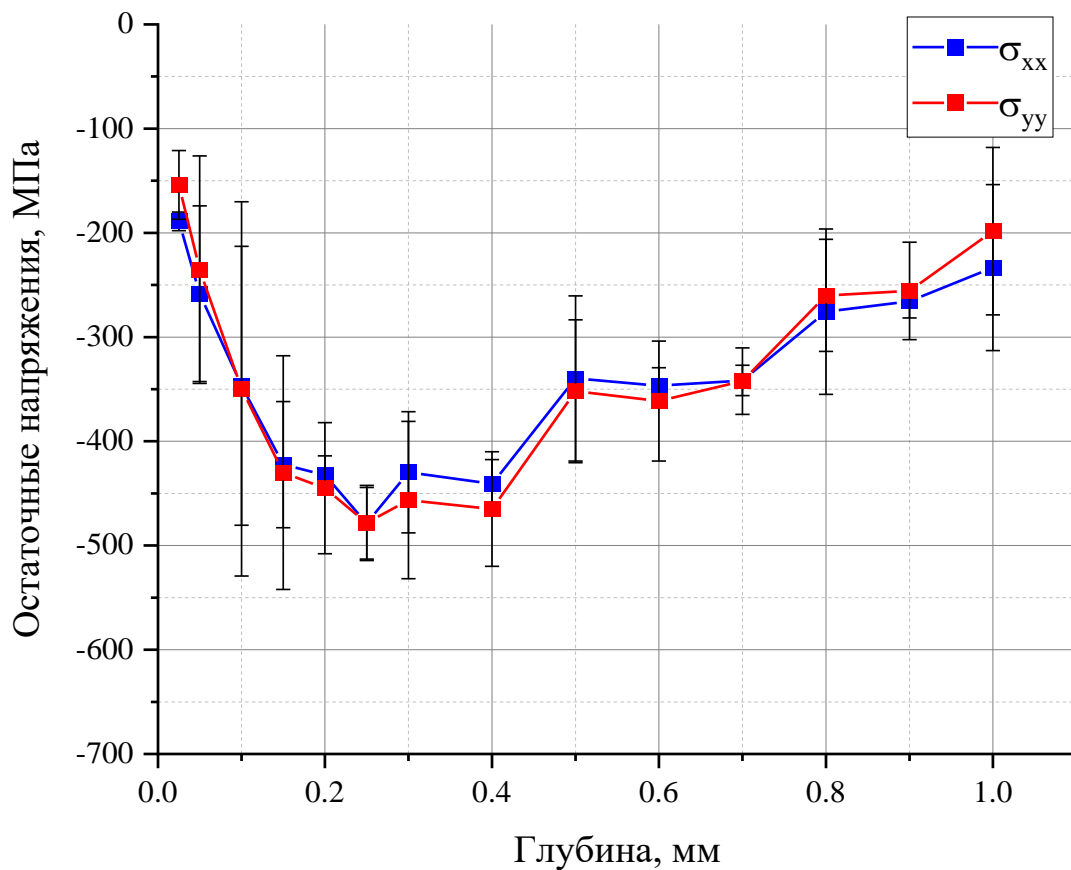


Рисунок 32 – Остаточные напряжения в образце, обработанном при 5 Дж и 20 нс с однократным перекрытием

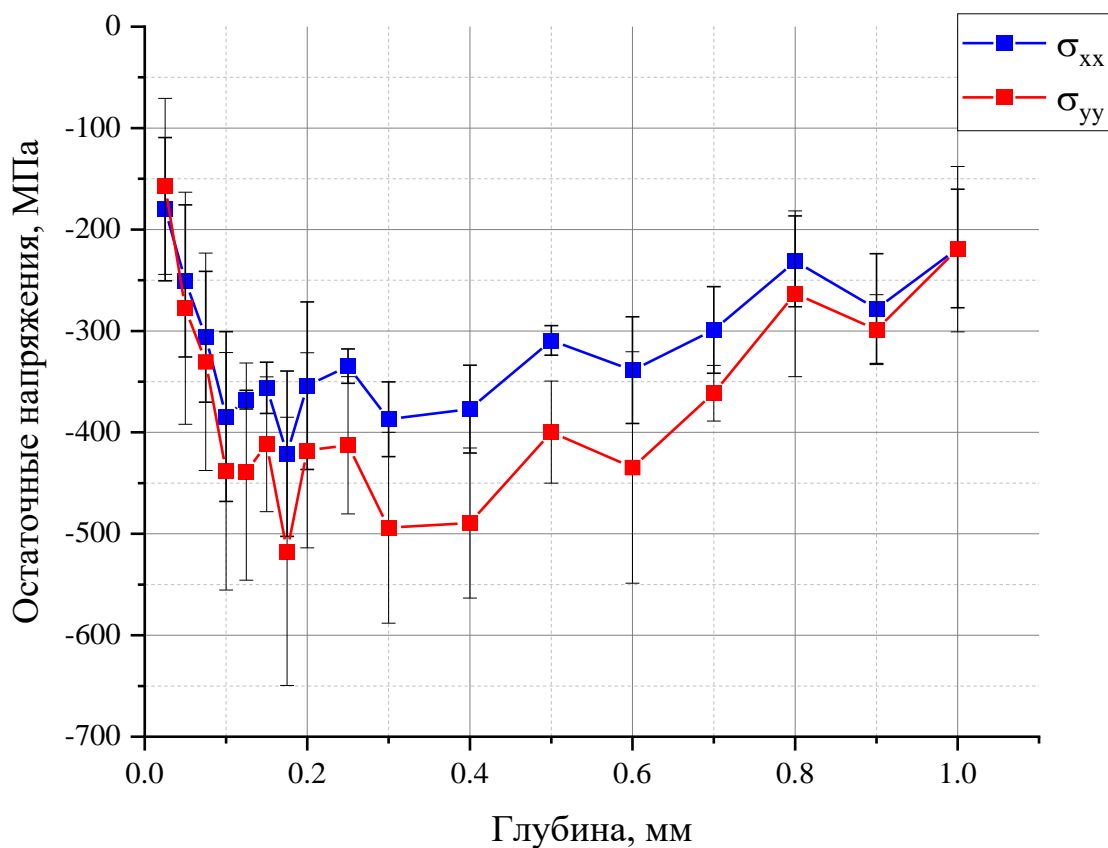


Рисунок 33 - Остаточные напряжения в образце, обработанном при 3 Дж и 10 нс с двукратным перекрытием

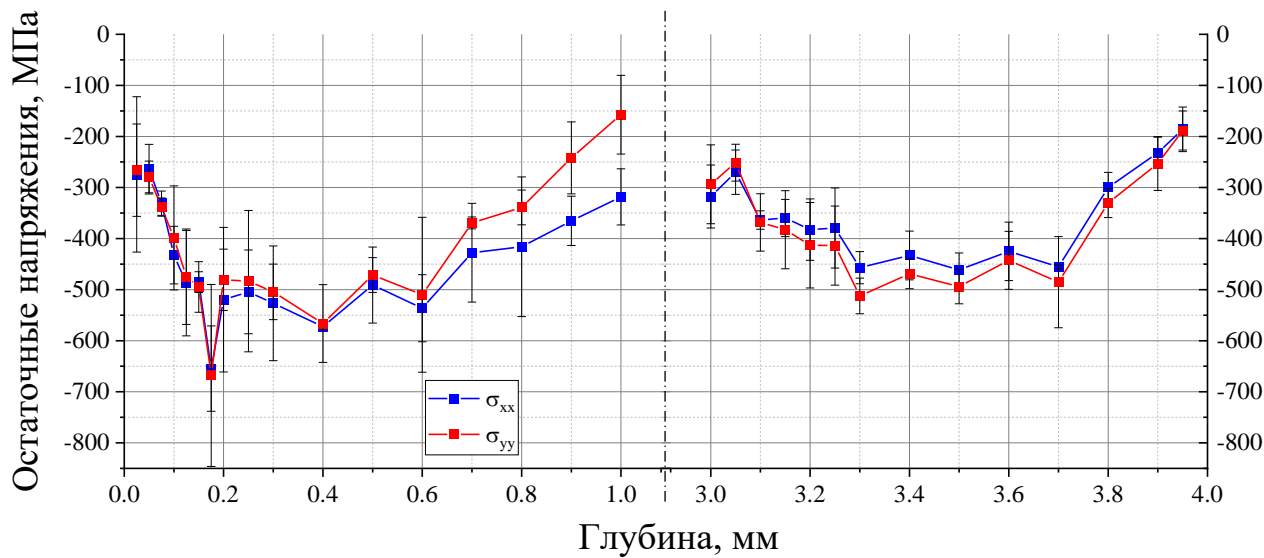


Рисунок 34 – Остаточные напряжения в образце, обработанном при 3 Дж и 10 нс с однократным перекрытием

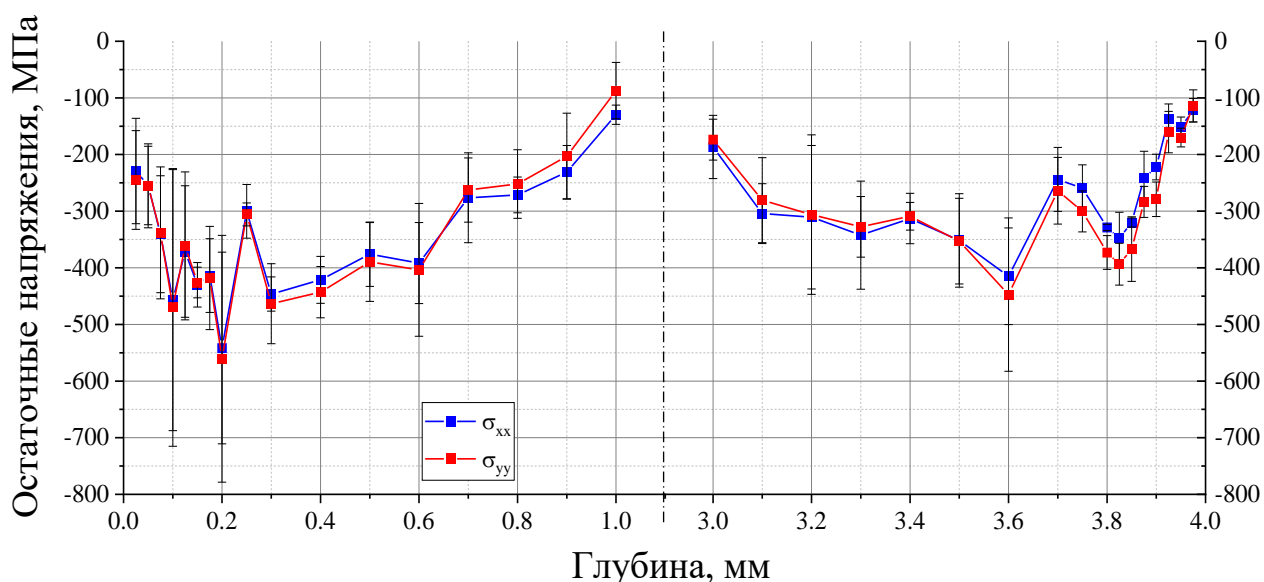


Рисунок 35 – Остаточные напряжения в образце, обработанном при 3 Дж и 10 нс с трёхкратным перекрытием

Из графиков видно, что при трехкратном перекрытии поверхностные остаточные напряжения получаются глубже, чем при однократном. Однако, величины остаточных напряжений отличаются несущественно. В свою очередь, сложность и время обработки увеличивается. Также стоит отметить, что в случае, когда остаточные напряжения превышают 80 процентов от предела текучести, как в случае, с трехкратным перекрытием, то результаты содержат ошибку и требуют корректировки, что подробно описано в [31].

Также отдельно стоит отметить, что ЛСП со значением энергии в 5 Дж проходило с осложнениями, связанными с разрывом металлической фольги, использованной в качестве поглощающего слоя. Это приводило к деформированию поверхности, что можно увидеть на рисунке 36. Полученный результат можно связать с несколькими факторами: поверхностные дефекты образцов, неплотное прилегание фольги, качество самой фольги.



Рисунок 36– Результат лазерной обработки образца при 5 Дж

Также данная проблема может встречаться при повторной обработке образцов. Исходя из этого и факторов, описанных выше (примерно одинаковые напряжения, ошибка в измерениях остаточных напряжений) для второго этапа испытаний выбрали 3 Дж и 10 нс, так как этого достаточно для внедрения в материал глубоких остаточных напряжений, и данный процесс легко воспроизводим и не требует больших временных затрат.

2.3.2. Лазерная обработка образцов второй партии

Геометрия области лазерной обработки представлена на рисунке 37.

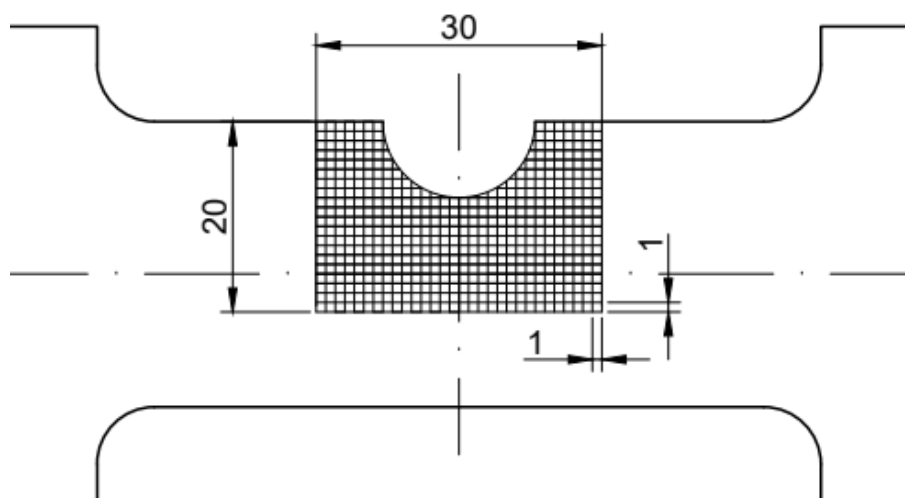


Рисунок 37 – Зона лазерной обработки

Параметры обработки второй партии образцов были выбраны в пункте 2.3.2. Обработка производилась с двух сторон. Обработанный образец, закрепленный на подложке можно увидеть на рисунке 38. Также для сохранения целостности фольги в процессе обработки были изготовлены круглые детали, которые помещались в полукруглое отверстие образцов.



Рисунок 38 – Образец после ЛСП

В связи со сложной геометрией, а именно - наличием у образцов выкружек, при обработке возникала проблема – на границе между отверстием и круглой деталью рвалась фольга, что приводило к небольшим дефектам на обработанной поверхности. Наглядно это показано на рисунке 39 и 40.



Рисунок 39 – Деформация фольги после ЛСП

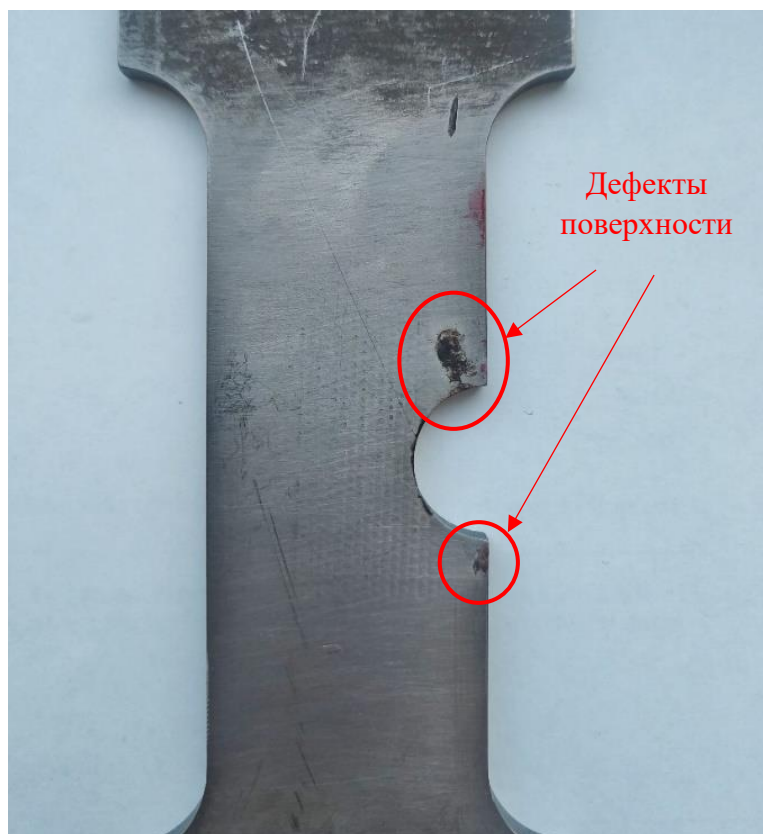


Рисунок 40 – Дефект поверхности после ЛСП

По этому поводу изначально было сделано предположение, что данный дефект не скажется на дальнейших результатах. Подобное предположение обусловлено тем, что дефект поверхности происходило в отдаленных от зоны концентратора напряжений областях. А именно в этой зоне должна расти трещина, так как титан крайне уязвим к концентраторам напряжений. Также, забегая вперед, следует отметить, что образцы, в которых присутствовало искажение поверхности, показали хорошие результаты в процессе усталостных испытаний, что делает наше исходной предположение верным, и данные поверхностные дефекты на краях зоны обработки не оказывают существенного влияния на усталостные свойства образцов.

2.3.3. Усталостные испытания образцов второй партии

Установка для проведения усталостных испытаний была описана в пункте 2.2.4.

Все испытания можно условно разделить на две группы. Первая – это испытания в зоне малоциклового усталости. Исходя из научной работы по исследованию малоциклового усталости титана [32], а также опираясь на величину предела текучести были выбраны значения максимального напряжения в 500 МПа, частоты 15 Гц, а коэффициент асимметрии цикла – 0,1. Для экспериментов использовались 5 образцов без ЛСП и 4 с ЛСП. Забегая вперед нужно отметить, что с ЛСП было взято образцов меньше, так как положительный эффект от обработки четко просматривался после четырех испытаний. Именно поэтому было принято решение оставить пятый образец для экспериментов в зоне многоциклового усталости, чтобы получить больше точек для σ - N кривой. Параметры цикла для испытаний в зоне малоциклового усталости приведены в таблице 6.

Таблица 6 – Параметры цикла для испытаний в зоне малоциклового усталости

| | |
|---|---------|
| Максимальное напряжение σ_{\max} | 500 МПа |
| Минимальное напряжение σ_{\min} | 50 МПа |
| Степень асимметрии R | 0,1 |
| Амплитуда цикла σ_a | 225 МПа |
| Среднее напряжение σ_m | 275 МПа |

Вторая группа испытаний – это испытания с разным уровнем нагрузки с целью построения кривой Вёллера, они проводились в переходной зоне и зоне многоциклового усталости. Испытывалось 5 необработанных образцов и 6 обработанных. Параметры циклов представлены в таблице 7. Частота в этом эксперименте была взята 10 Гц.

Таблица 7 – Параметры цикла для испытаний с изменяющимся напряжением

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 5* |
|---|--------|-------|------|-----|------|-------|-----|
| Максимальное напряжение σ_{\max} , МПа | 375 | 250 | 150 | 100 | 90 | 85 | 80 |
| Минимальное напряжение σ_{\min} , МПа | 37,5 | 25 | 15 | 10 | 9 | 8,5 | 8 |
| Степень асимметрии R | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 |
| Амплитуда цикла σ_a , МПа | 168,75 | 112,5 | 67,5 | 45 | 40,5 | 38,25 | 36 |
| Среднее напряжение σ_m , МПа | 206,25 | 137,5 | 82,5 | 55 | 49,5 | 46,75 | 44 |

Пятый образец испытывался дважды. Сначала при 80 МПа, и при этом напряжении он вышел на предел усталости, выдержав 10 миллионов циклов. А затем, так как разрушения и каких-либо деформаций не произошло, он испытывался при напряжении 90 МПа.

2.4. Результаты испытаний

2.4.1. Результаты усталостных испытаний

Результаты первого этапа усталостных испытаний для базовых образцов приведены в таблице 8. Результаты представлены по возрастанию усталостной долговечности, а вероятность отказа рассчитывалась по формуле (7). Далее по полученным экспериментальным данным с помощью пакета Origin строилось распределение Вейбулла, описанное формулой (8). Оно приведено на рисунке 41. Параметр формы в данном распределении равен 11,35; параметр масштаба – 1038.

Таблица 8 – Результаты усталостных испытаний для базового материала

| Образец | Количество циклов | Вероятность разрушения, % |
|---------|-------------------|---------------------------|
| 1 | 901 | 11,91 |
| 2 | 945 | 30,95 |
| 3 | 973 | 50 |
| 4 | 1013 | 69,05 |
| 5 | 1150 | 88,1 |

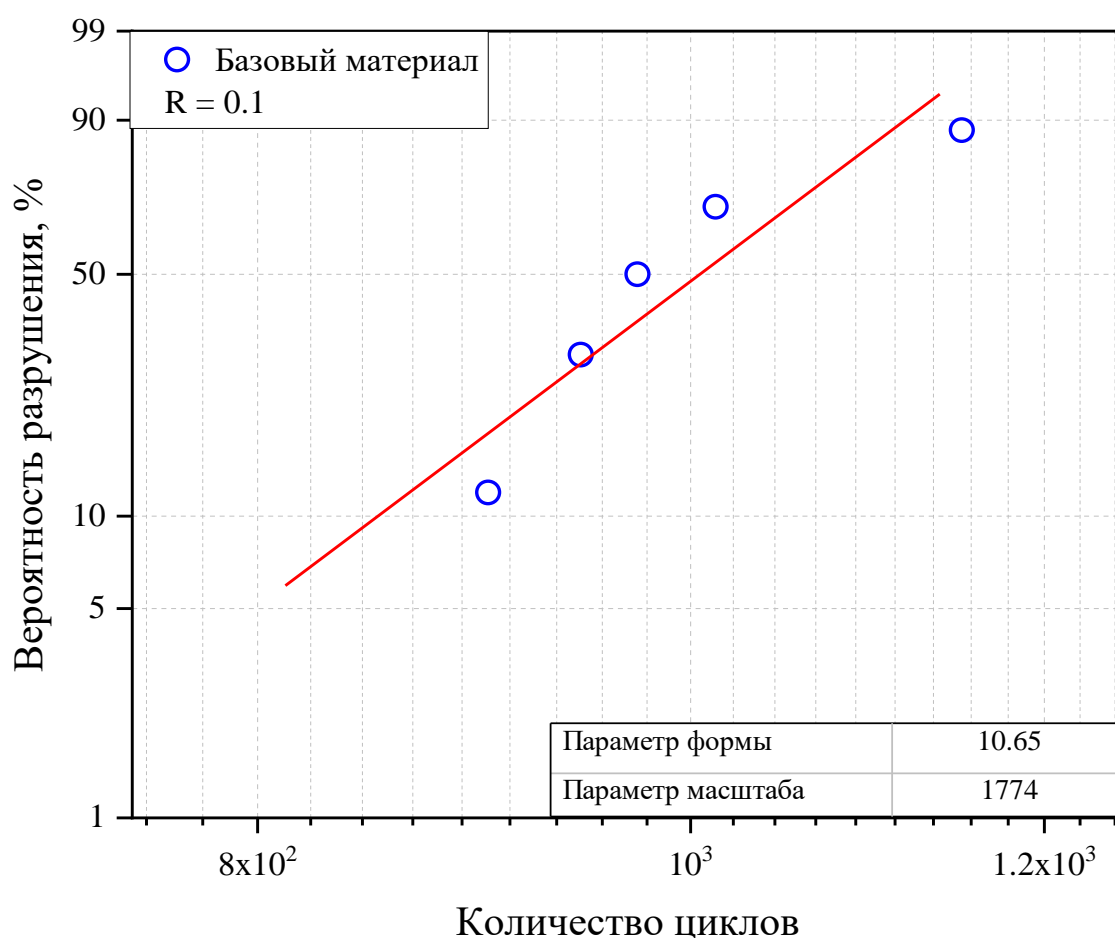


Рисунок 41 – Распределение Вейбулла для базового материала

Далее в таблице 9 приведены результаты усталостных испытаний для обработанных лазером образцов. Распределение Вейбулла для них представлено на рисунке 42. Параметр формы в данном распределении равен 10,65; параметр масштаба – 1774.

Таблица 9 – Результаты малоцикловых усталостных испытаний обработанных образцов

| Образец | Количество циклов | Вероятность разрушения, % |
|---------|-------------------|---------------------------|
| 1 | 1491 | 14,71 |
| 2 | 1559 | 38,24 |
| 3 | 1786 | 61,77 |
| 4 | 1935 | 85,29 |

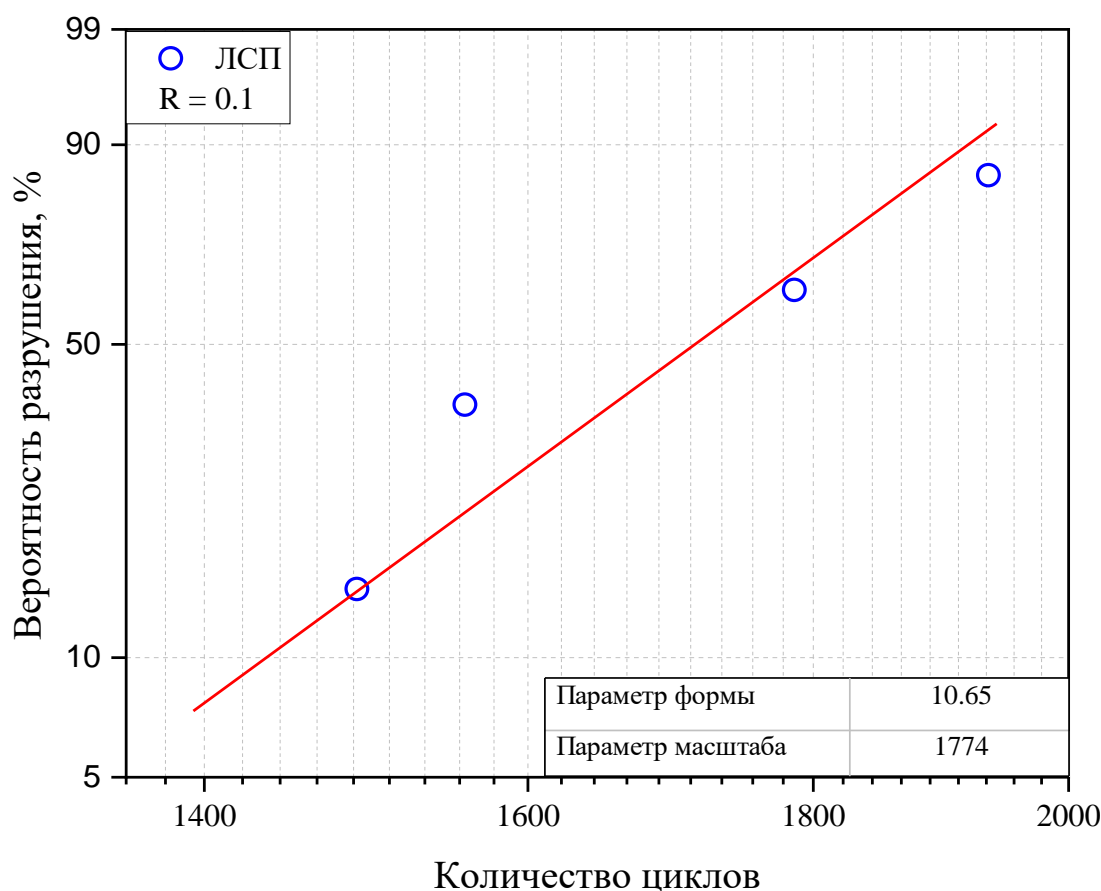


Рисунок 42 – Распределение Вейбулла для обработанных образцов

Распределения на одном графике представлены на рисунке 43. Из полученных результатов можно сделать вывод о том, что лазерное ударное упрочнение значительно увеличивает усталостную долговечность. Параметр масштаба использовался как характерное число, описывающее усталостную жизнь группы образцов. А параметр формы отражает разброс в значениях - чем больше параметр формы, тем меньше разброс значений в распределении. В итоге, рассмотрев параметры масштаба базового материала и упрочненных

образцов, можно сделать вывод о том, что применение ЛСП увеличивает их усталостную долговечность примерно на 70 процентов. Параметр формы в свою очередь незначительно уменьшается, но говорить о том, что ЛСП увеличивает разброс значений и делает процесс менее предсказуемым неправильно, так как было проанализировано лишь небольшое количество образцов, что недостаточно для получения полной статистической картины.

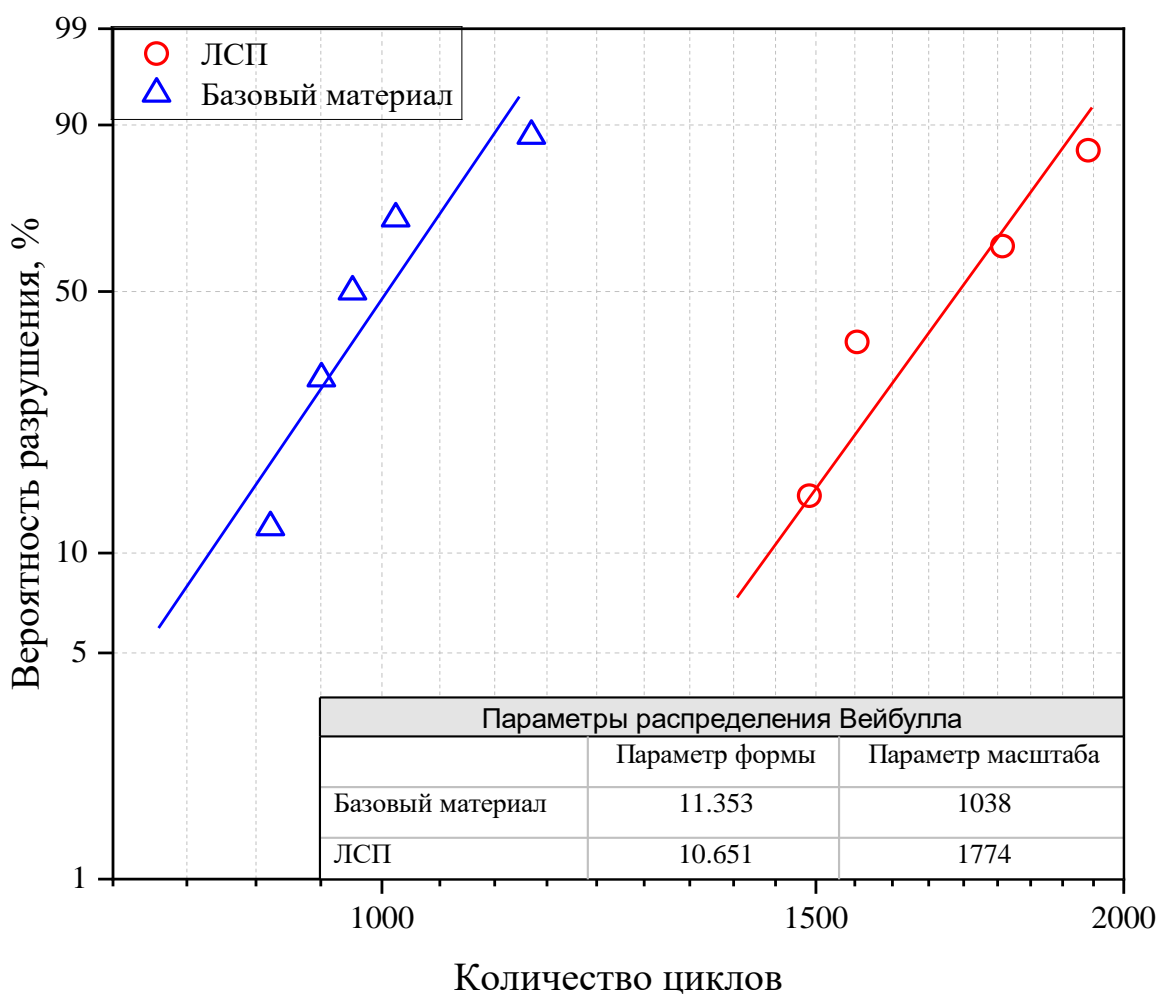


Рисунок 43 – Распределение Вейбулла для всех образцов

Результаты усталостных испытаний второй группы для необработанных образцов приведены в таблице 10.

Таблица 10 – Результаты усталостных тестов для базовых образцов

| Образец | Количество циклов | Напряжения, МПа |
|---------|-------------------|-----------------|
| 1 | 4221 | 375 |
| 2 | 11120 | 250 |
| 3 | 44193 | 150 |
| 4 | 242731 | 100 |
| 5 | 511086 | 90 |
| 5* | 10000000 | 80 |

При проведении усталостных испытаний неизбежны случайные ошибки, вызванные изменением свойств материала, ошибками в испытательных машинах и оборудовании для обработки данных. Коэффициент $1/T\sigma$ (иначе индекс рассеяния σ - N кривых) – это параметр, который может количественно определить степень корреляции между данными об усталости и дисперсией аппроксимирующей кривой [33]. На рисунке 44 представлен анализ σ - N кривой для базового материала. Непрерывной красной линией обозначено среднее значение, пунктиром – среднее значение ± 2 стандартных отклонения

соответственно. Точки на графике – это экспериментальные данные. Обратный наклон кривой – 3.57, а индекс рассеяния -2.99.

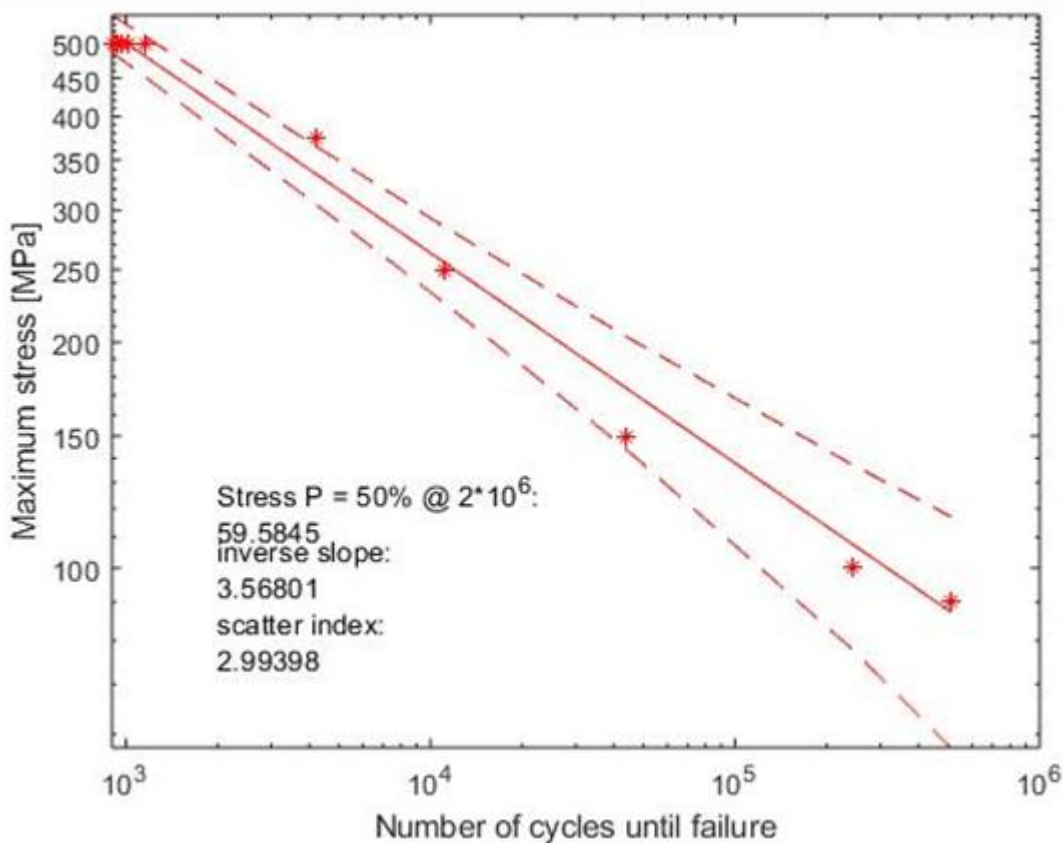


Рисунок 44 – σ - N кривая для базовых образцов

Аналогично в таблице 11 представлены результаты усталостных испытаний для упрочненных образцов, а на рисунке 45 изображен анализ σ - N кривой для них. Обратный наклон кривой – 3.6, а индекс рассеяния -1.64.

Таблица 11 – Результаты усталостных тестов для базовых образцов

| Образец | Количество циклов | Напряжения, МПа |
|---------|-------------------|-----------------|
| 1 | 4612 | 375 |
| 2 | 19345 | 250 |
| 3 | 104793 | 150 |
| 4 | 613436 | 100 |
| 5 | 831228 | 90 |
| 6 | 1208018 | 85 |

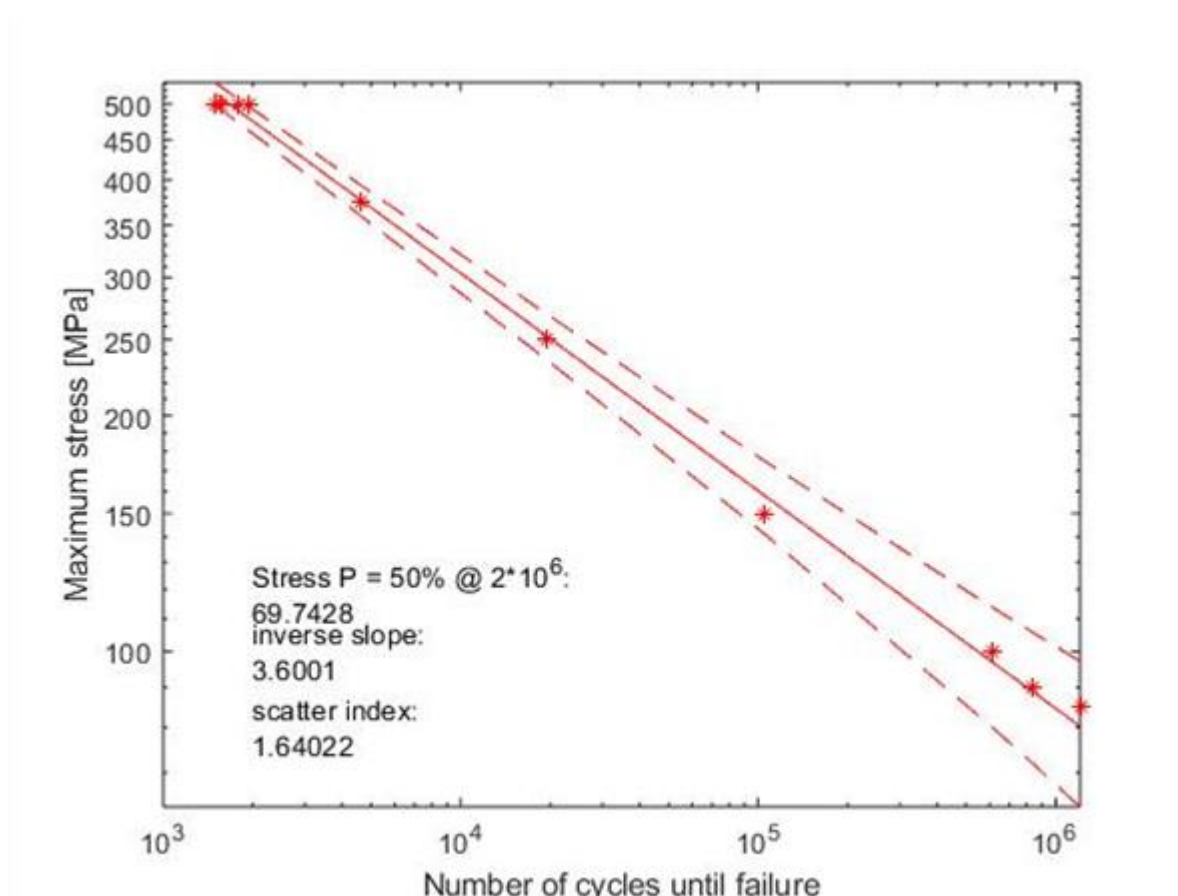


Рисунок 45 – σ - N кривая для упрочненных образцов

Анализируя полученные данные, можно отметить, что характер усталостной кривой образцов с ЛСП почти не изменился, о чем говорит обратный наклон, указанный ранее. А вот разброс данных стал значительно меньше, это можно заметить из полученных значений индекса рассеяния.

Итоговые результаты экспериментов сведены в таблицу 12, в которой в процентах указано положительное влияние лазерной обработки на усталостную долговечность образцов.

Таблица 12 – Сравнение результатов усталостных испытаний образцов с ЛСП и без ЛСП

| Напряжение, МПа \ Циклы | БМ | ЛСП | Улучшение, % |
|-------------------------|--------|---------|--------------|
| 500 | 996 | 1693 | 70 |
| 375 | 4221 | 4612 | 9,3 |
| 250 | 11120 | 19345 | 74 |
| 150 | 44193 | 104793 | 137,1 |
| 100 | 242731 | 613436 | 152,7 |
| 90 | 511086 | 831228 | 62,6 |
| 85 | - | 1208018 | - |

На рисунке 46 изображены обе σ - N кривые в логарифмическом виде.

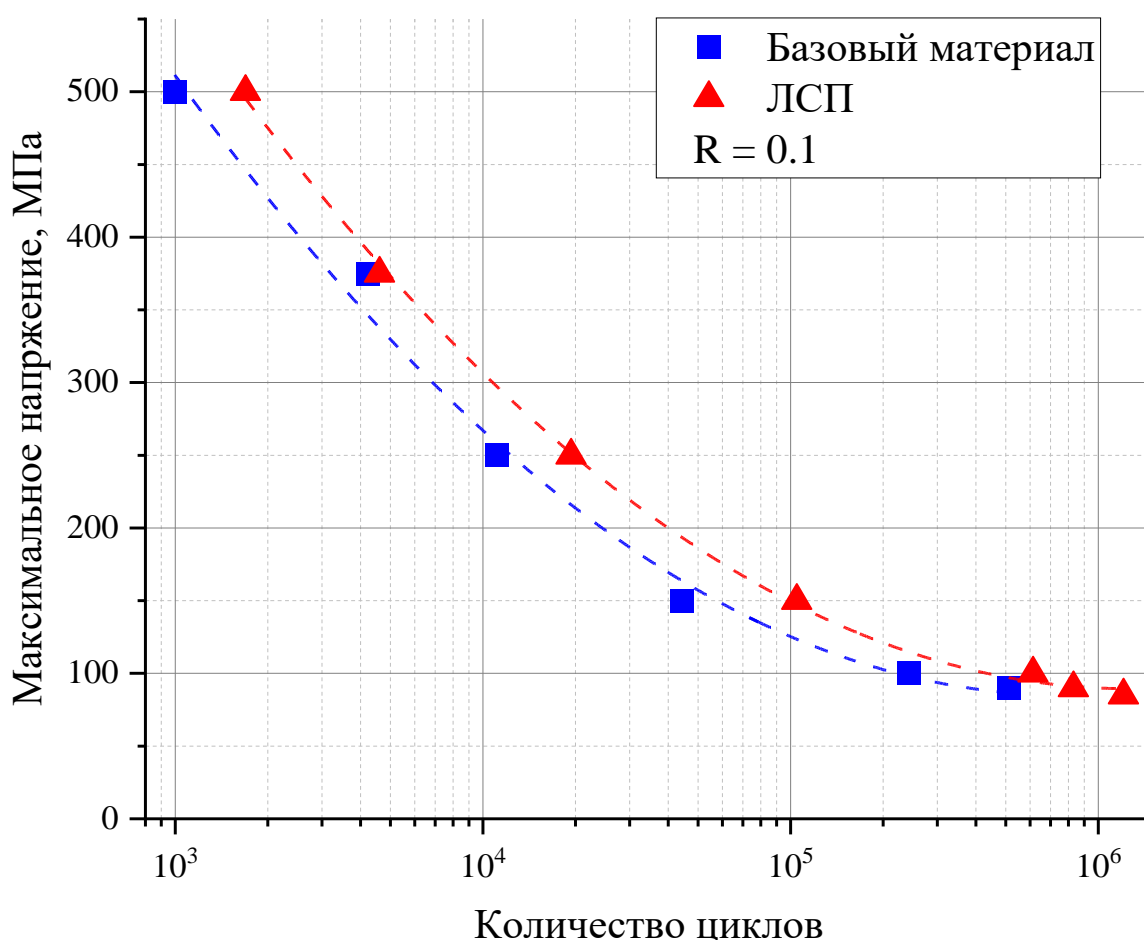


Рисунок 46 – Сравнение σ - N кривых обработанных и необработанных образцов

Что касается точки 80 МПа, то было принято решение не включать ее в итоговый график и анализ, так как имеется большая статистическая погрешность и это точка не вписывается в полученные в ходе эксперимента результаты. Говоря о результатах, полученных при 500 МПа, в таблице указаны средние значения, для наглядного сравнения улучшения в процентном соотношении.

2.4.2. Результаты микрофрактографии

Для лучшего понимания влияния ЛСП на усталостную долговечность, поверхности разрушения испытанных образцов наблюдались под микроскопом. Для исследования микроструктуры после проведения усталостных испытаний

было взято четыре образца. Первая пара образцов – базовый материал и образец с ЛСП, которые испытывались при 500 МПа, а вторая - при 100 МПа. Исследование структуры проходило на сканирующем электронном микроскопе JEOL JSM-6490LV (рисунок 47), основные параметры которого представлены в таблице 14.



Рисунок 47 – сканирующий электронный микроскоп JEOL JSM-6490LV

Таблица 14 – основные характеристики микроскопа JEOL JSM-6490LV

| | |
|----------------------|-----------|
| Нить накала | Вольфрам |
| Напряжение | 25 кВт |
| Ток излучения | 75 мкА |
| Угол наклона образца | 0° |
| Рабочее расстояние | 10 мм |
| Диафрагма | 30 мкм |
| Увеличение | 35х-3000х |

На рисунке 48 можно увидеть поверхности разрушения образцов базового материала (рисунок 48 а, в) и с ЛСП (рисунок 48 б, г) первой пары вблизи отверстия. Сравнивая фотографии с увеличением в 150, можно увидеть, что у базового образца (рисунок 48 а) имеется явно выраженная гладкая поверхность, а у образца с ЛСП (рисунок 48 б) ее нет. Из этого можно сделать вывод о том, что трещина в обработанном образце росла гораздо медленнее, чем в том, что не подвергался лазерному упрочнению. На фотографиях с большим увеличением в 800 (рисунок 48 в, г) видно, что перепады высот траекторий трещин у необработанного образца выражены заметнее, нежели у образца с ЛСП.

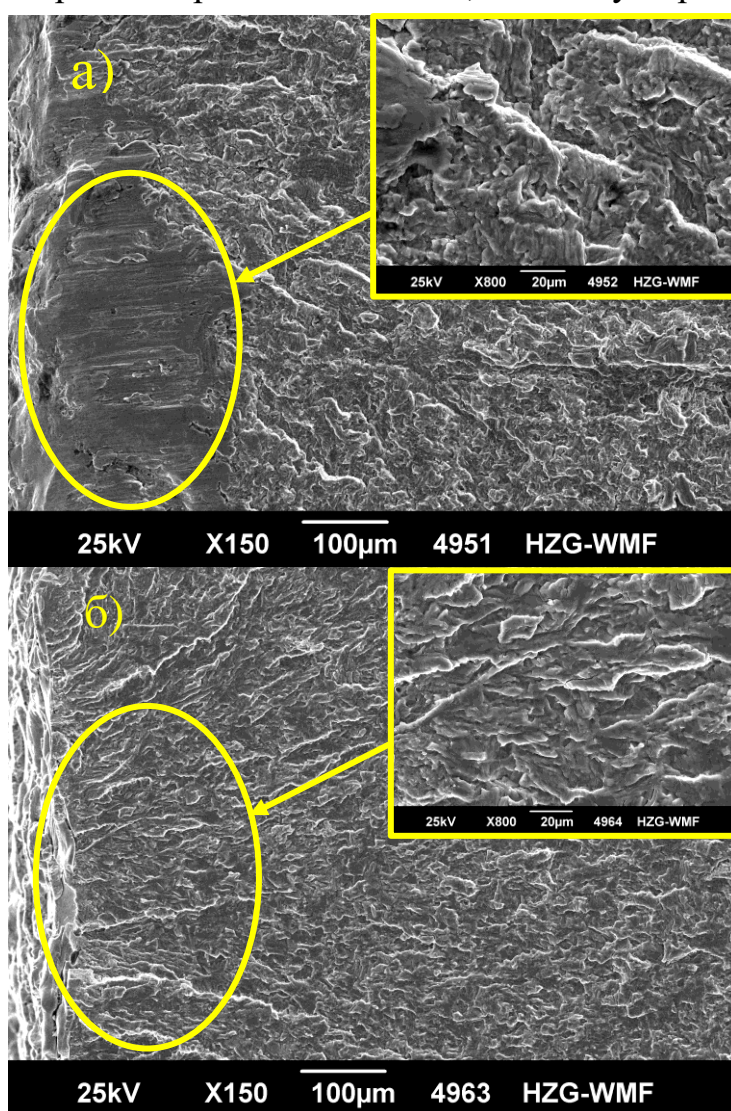


Рисунок 48 – Поверхности разрушения образцов: а – БМ с увеличением x150,
б – ЛСП с увеличением x150

Подобную картину можно увидеть у базового образца, испытанного при 100 МПа (рисунок 49 а), где поверхность траектории разрушения выглядят гладкой, в то время, как у обработанного образца она более шероховатая (рисунок 49 б).

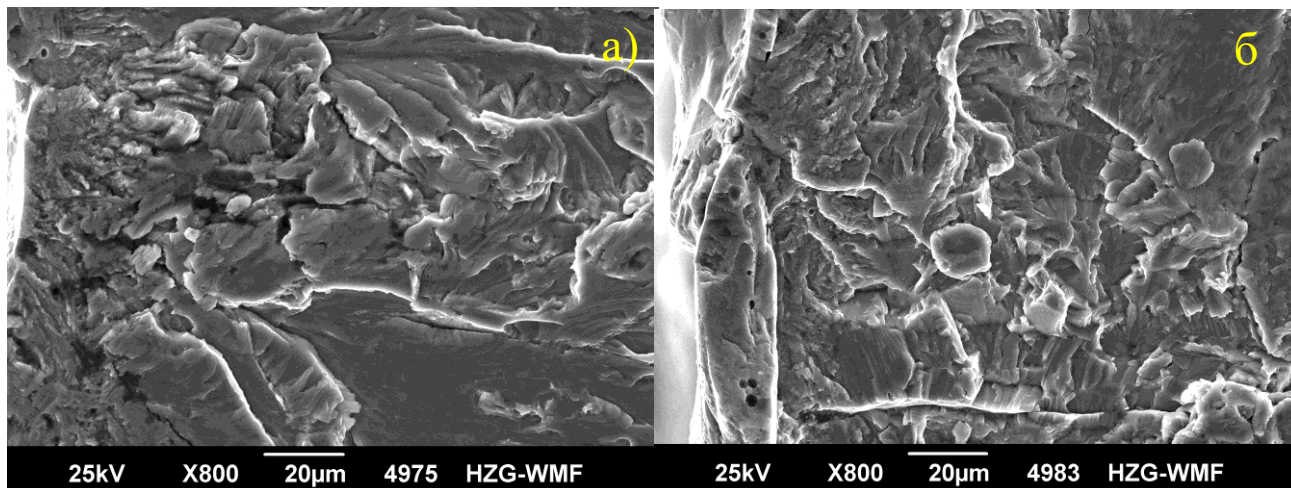


Рисунок 49 – Поверхности траекторий разрушения образцов, испытанных при 100 МПа: а – БМ, б – с ЛСП

На рисунке 50 представлена морфология переходной зоны для обоих образцов первой группы. Она характеризуется наличием пустот и впадин. По сравнению с БМ, в образце с ЛСП количество впадин небольшого размера заметно увеличилось, также они стали располагаться плотнее друг к другу. Это говорит о том, что ЛСП может улучшить пластичность переходной зоны и распространения трещины, тем самым улучшая усталостные характеристики.

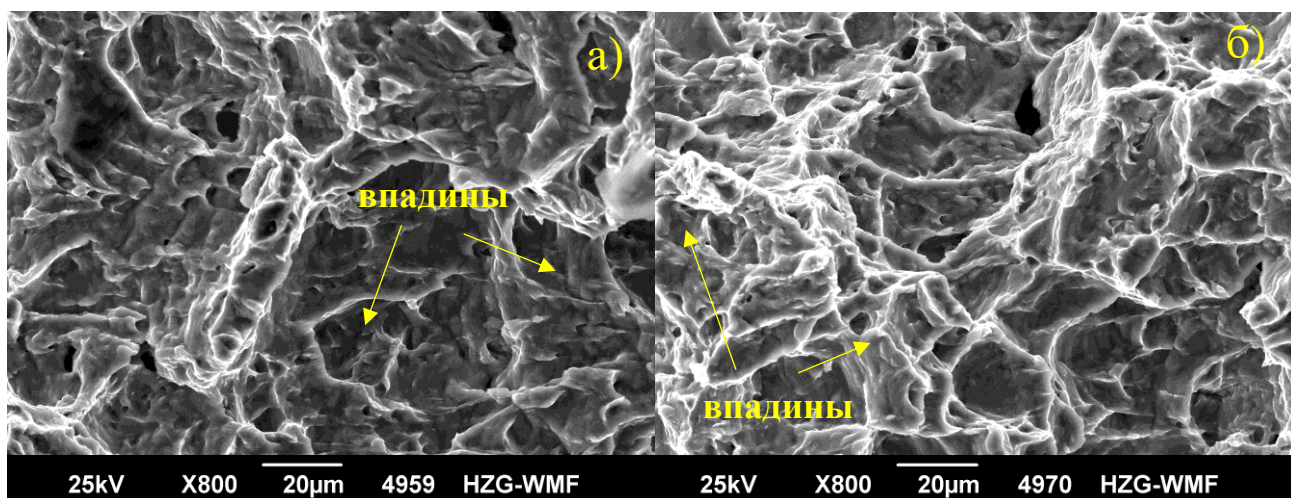


Рисунок 50 – Переходная зона образцов первой группы: а – БМ, б – с ЛСП

Подобные результаты были получены для другого титанового сплава в работе [34], где также наблюдалось увеличение плотности впадин и уменьшение их размера после лазерного упрочнения.

Что касается области образования усталостной трещины, то смену ее положения можно отчетливо увидеть на образцах второй группы (рисунок 51). У необработанного образца возникновение трещины происходит в углу отверстия (рисунок 51 а), в месте наибольшей концентрации напряжений. После обработки образцов с двух сторон область образования трещину сместилось дальше от края (рисунок 51 б). Это обусловлено тем, что созданные ЛСП сжимающие остаточные напряжения уменьшают растягивающие напряжения, сосредоточенные на краю отверстия, где их концентрация максимальна. Тем самым суммарные напряжения на поверхностном слое становятся меньше усталостного предела упрочненного слоя, а область образования трещины сместилась с поверхности на предповерхностный слой, где остаточное напряжение не столь велико.

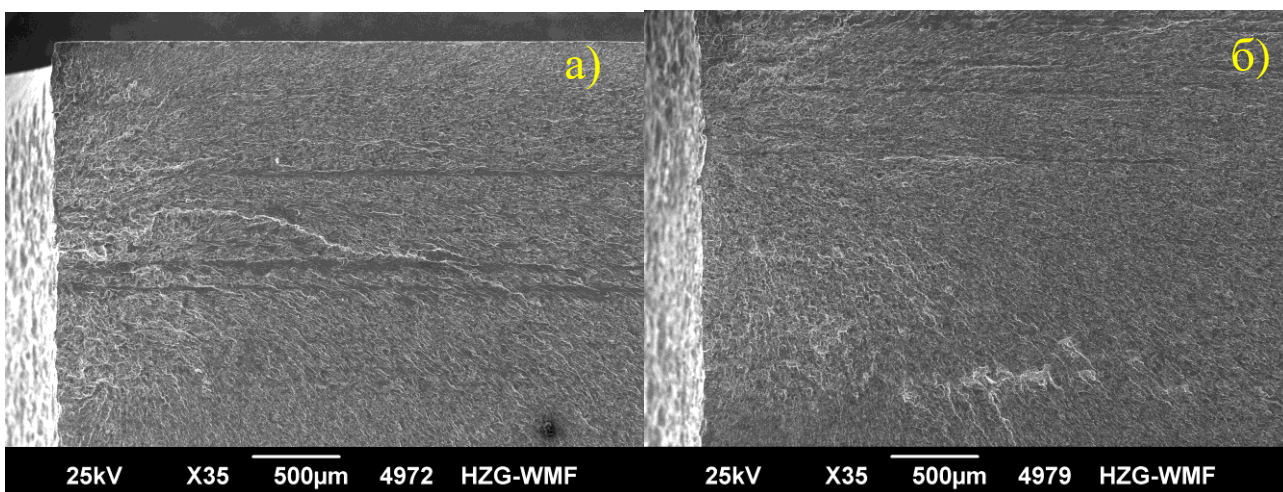


Рисунок 51 – Поверхность излома вблизи отверстия: а – БМ, б – с ЛСП

Подобные результаты согласуются с теми, что были получены в работе [35], где исследовалось влияние лазерного ударного упрочнения на усталостный ресурс алюминиевого сплава АА2024.

Также на фотографиях образцов первой группы (рисунок 52) можно заметить усталостные бороздки. Каждая такая бороздка представляет собой

приложенную к образцу нагрузку. Они параллельны друг другу и перпендекулярны росту трещины. Расстояние между этими бороздками тесно связано со скоростью распространения усталостной трещины – чем меньше расстояние, тем меньше скорость роста трещины. У обработанного образца наблюдается более высокая плотность усталостных бороздок, нежели у базового материала, что указывает на более медленный рост усталостной трещины. В среднем расстояние между бороздками уменьшилось на 0,39 мкм.

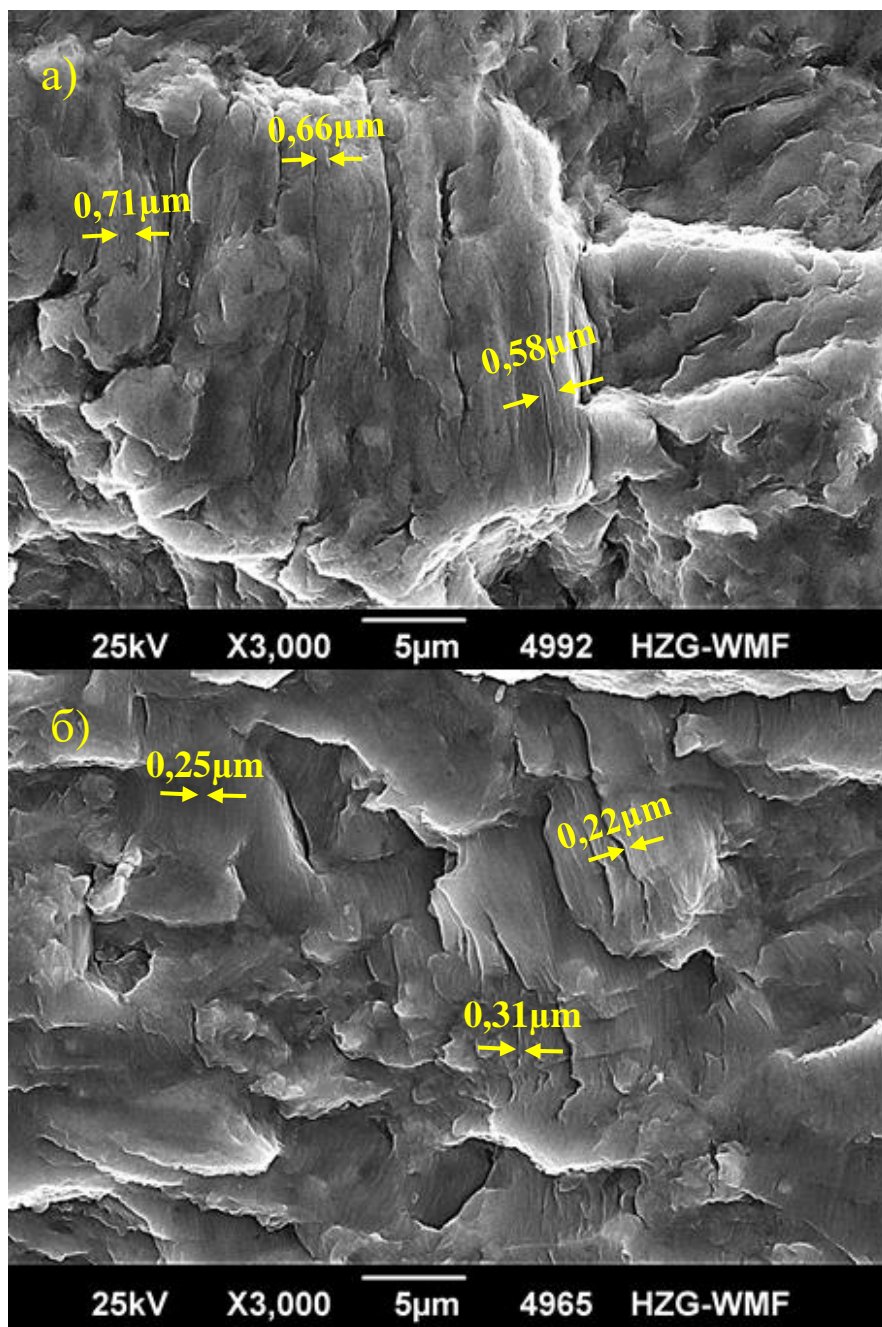


Рисунок 52 – Усталостные бороздки: а – БМ, б – с ЛСП

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе проводилось изучение влияния лазерного ударного упрочнения на усталостную долговечность образцов, содержащих концентратор напряжений в виде открытого отверстия. Материал образцов – титановый сплав ОТ4-0. Лазерный наклеп осуществлялся с помощью импульсного Nd:YAG лазера с модулятором добротности. После обработки образцов лазером методом сверления отверстий были измерены остаточные напряжения и проведен анализ и выбор оптимальных параметров лазерного наклепа. Усталостные испытания были проведены в два этапа. Первый этап проводился с постоянным максимальным напряжением 500 МПа и степенью асимметрии цикла 0,1 для изучения влияния ЛСП на усталостные характеристики в условиях малоциклового усталости. Второй этап проходил с различными уровнями максимального напряжения – начиная с 375 МПа и заканчивая 80 МПа, для анализа всех этапов усталостной жизни образцов. Степень асимметрии цикла также составляла 0,1. Анализ результатов первого этапа экспериментов проводился с помощью распределения Вейбулла.

По итогу экспериментов можно сделать вывод о том, что процесс ЛСП оказывает значительное влияние на усталостную долговечность титанового сплава ОТ4-0. Заметный эффект наблюдается в явной малоциклового зоне при 500 МПа, где улучшение долговечности составляет порядка 70 %. Схожие результаты видны в переходной зоне, где улучшение составляет примерно 74%. В зоне близкой к переходной замечается незначительное изменение в 9,3 %, подобные результаты можно объяснить большим разбросом экспериментальных данных, связанном с вероятностным характером усталости, описанном в пункте 2.1.2. Подобные значения были зафиксированы в той же области (6 тысяч циклов) с магниевым сплавом в работе [36], где улучшение составило 11,4 %.

Заметный эффект наблюдается в области многоциклового усталости при напряжениях 150 МПа и 100 МПа. Усталостная долговечность в этой зоне

увеличивается на 137 и 152 % соответственно. Эти результаты сопоставимы с результатами, полученными при испытании стальных образцов в статье [37], где в той же многоцикловой области улучшение достигло 93 %.

Также при анализе усталостных кривых было замечено, что результаты образцов с ЛСП имеют меньший разброс, нежели у базового материала.

Результаты микрофрактографии также подтверждают положительное влияние лазерного наклепа на усталостные характеристики. При анализе микроструктуры было выявлено, что после обработки рост усталостной трещины значительно замедлялся. Также было установлено, что после обработки область зарождения трещины смещается с поверхности на предповерхностный слой.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что ЛСП оказывает заметное влияние на долговечность титановых образцов во всех зонах усталостной кривой. В итоге анализа полученных экспериментальных данных был проведен именно качественный анализ влияния лазерного ударного упрочнения на усталостную долговечность образцов. Для количественной оценки необходимо большее количество образцов, а также статистический анализ, чтобы с необходимой точностью определить статистическую ошибку.

Что касается практического применения, то с уверенностью можно сказать, что лазерное ударное упрочнение является крайне перспективной технологией поверхностной обработки, которая может применяться в различных отраслях науки и техники. Данная работа продемонстрировала возможность применения лазерного наклепа при различных параметрах процесса. Основываясь на полученных результатах, можно предположить, что ЛСП может стать прекрасным инструментом для увеличения усталостного ресурса машин и агрегатов, детали которых изготовлены из титана или его сплавов. Отдельно стоит отметить положительное влияние лазерного наклепа во всех зонах усталостной кривой, что говорит о возможности применения данного вида

обработки к совершенно разным деталям, работающим при различных режимах эксплуатации. Например, двигатели летательных аппаратов работают в условиях малоциклового усталости, а фюзеляжи – многоциклового, а повысить долговечность этих, столь непохожих друг на друга деталей можно одним способом. Таким образом, за счет этой универсальности ЛСП можно сократить расходы на всевозможное оборудование для упрочнения деталей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Нестеренко Б.Г. Требования по усталости и живучести конструкций гражданских самолетов // Научный вестник МГТУ ГА. – 2011. – №163.
2. Spanrad S. Fatigue crack growth in laser shock peened Ti-6Al-4V aerofoils subjected to foreign object damage. / Spanrad S., Tong J. // 53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference
20th AIAA/ASME/AHS Adaptive Structures Conference 14th AIAA. – 2012. Doi:10.2514/6.2012-1734.
3. Бохоева Л.А., Курохтин В.Ю., Рогов В.Е. Исследование роста трещин в изделиях авиатехники на основе натуральных испытаний // Вестник БГУ. Химия. Физика – 2016. – №2-3.
4. Schijve J. Fatigue of Structures and Materials. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2003. – 513 с.
5. Остаточные напряжения в металлопродукции : учебное пособие / С. П. Буркин, Г. В. Шимов, Е. А. Андрюкова. — Екатеринбург: Издательство Уральского университета – 2015. – 248 с.
6. Gopi, R. Investigation of shot peening process on stainless steel and its effects for tribological applications./ Gopi R., Saravanan I., Devaraju A., Ganesh babu loganathan // Materials Today: Proceedings. – 2019. – Vol. 22. – P. 580-584. Doi:10.1016/j.matpr.2019.08.215.
7. 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. Doi:10.3390/ma7127925.
8. 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. Doi:10.1016/j.prostr.2018.12.046.

9. Глазунов С.Г., Титановые сплавы для авиационной техники и других отраслей промышленности / Глазунов С.Г., Ясинский К.К. // *ТЛС*. – 1993. – № 7-8. – С.47-54.

10. Дарков А.В., Шапиро Г.С. Сопротивление материалов. - М.: Высшая школа, 1975. – 654 с.

11. Gujba A. Laser Peening Process and Its Impact on Materials Properties in Comparison with Shot Peening and Ultrasonic Impact Peening. / Gujba A., Medraj M. // *Materials*. – 2014. – Vol. 7(12) – P. 7925–7974. Doi:10.3390/ma7127925.

12. Chupakhin S. Application of design of experiments for laser shock peening process optimization. / Chupakhin S., Klusemann B., Huber N., Kashaev, N. // *The International Journal of Advanced Manufacturing*. – 2019. Doi:10.1007/s00170-018-3034-2.

13. Luo K. Y. Effects of laser shock peening and groove spacing on the wear behavior of non-smooth surface fabricated by laser surface texturing. / Luo K. Y., Wang C. Y., L, Y. M [and other] // *Applied Surface Science*. – 2014. – Vol. 313, – P. 600–606. Doi:10.1016/j.apsusc.2014.06.029.

14. Dane C. Shot peening with laser. / Dane C. Hackel L., Daly J. // *Adv. Mater. Process*. – 1998. – Vol. 153, – P. 37–48.

15. Hatamleh, O. A comprehensive investigation on the effects of laser and shot peening on fatigue crack growth in friction stir welded AA 2195 joints. // *International Journal of Fatigue*. – 2009. – Vol. 31(5), – P. 974–988. Doi:10.1016/j.ijfatigue.2008.03.029.

16. Metal Improvement Company: Shot peening. Available online <https://cwst.com/> (accessed on 27 February 2020).

17. Y.F. Jiang. Study on the effect of laser peening with different power densities on fatigue life of fastener hole / Y.F. Jiang, B. Ji, X.D. Gan, Ch. Hua, X. Li, H. Zhu // Optics and Laser Technology. – 2018. – № 106. – P. 311-320. Doi:10.1016/j.optlastec.2018.04.025.
18. Kashaev N. Fatigue Life Extension of AA2024 Specimens and Integral Structures by Laser Shock Peening. / Kashaev N., Chupakhin S., Ventzke V // MATEC Web of Conferences. – 2018. – Vol. 165(8). Doi:10.1051/matecconf/201816518001.
19. Vázquez Jiménez C. A. Effect of laser shock processing on fatigue life of 2205 duplex stainless steel notched specimens. / Vázquez Jiménez C. A., Gómez Rosas G., Rubio González C., Granados Alejo V., Hereñú, S. // Optics & Laser Technology. – 2017. – Vol. 97, – P. 308–315. Doi:10.1016/j.optlastec.2017.07.020.
20. Джамай, В.В. Прикладная механика: Учебник для бакалавров / В.В. Джамай, Е.А. Самойлов, А.И. Станкевич. // М.: Юрайт. – 2013. – С. 360.
21. Заславский Б.В. Краткий курс сопротивления материалов. // М.: Машиностроение. – 1986. – С. 328.
22. J. Schijve. Statistical distribution functions and fatigue of structures // International Journal of Fatigue. – 2005. – № 27. – P. 1031-1039. Doi:10.1016/j.ijfatigue.2005.03.001.
23. Djeghader D. Weibull analysis of fatigue test in jute reinforced polyester composite material. / Djeghader D., Redjel B. // Composites Communications. – 2019. – Vol. 17, – P. 123-128. Doi:10.1016/j.coco.2019.11.016.

24. Ji W. Time-aware conversion prediction. / Ji W., Wang X., Zhu F. // *Frontiers of Computer Science*. – 2016– Vol. 11(4), – P. 702–716. Doi:10.1007/s11704-016-5546-y.
25. ГОСТ Р 50779.27-2017 (МЭК 61649:2008) Статистические методы. Распределение Вейбулла. Анализ данных. – Взамен ГОСТ Р 50779.27-207 (МЭК 61649:1997); введ. 2018-12-01. – Москва: Стандартинформ, 2018. – 57 с.
26. KUKA KR 30 HA Specification. 2005.
27. Quantel Nd:YAG laser system. User's manual. Version A. 2012.
28. Steinzig M., Ponslet E. Residual Stress Measurement using the hole drilling method and laser speckle interferometry, Parts I-IV / Steinzig M. // *Experimental Techniques*. – 2003. – № 27. – P. 25-45.
29. Токовинин А.А. Проблема достижения высокого разрешения в наземной оптической астрономии. / Токовинин А.А., Щеглов П.В // *УФН*. – 1979. – Т. 129, – С. 645-70.
30. M. Achintha. Fatigue behavior of geometric features subjected to laser shock peening: Experiments and modeling / M. Achintha D., Nowell D., Fufari E.E., Sackett M.R. // *International Journal of Fatigue*. – 2014. – № 62. – P. 171-179. Doi: 10.1016/j.ijfatigue.2013.04.016.
31. Chupakhin S. Artificial neural network for correction of effects of plasticity in equibiaxial residual stress profiles measured by hole drilling. / Chupakhin S., Kashaev N., Klusemann B., Huber N. // *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*. – 2017. – Vol. 52(3), – P. 137–151. Doi:10.1177/0309324717696400.
32. Zhou J. Z., Meng X. K., Huang S. Effects of warm laser peening at elevated temperature on the low-cycle fatigue behavior of Ti6Al4V alloy. / Zhou

J. Z., Meng X. K., Huang S. [and other] // *Materials Science and Engineering: A*, – 2015. – Vol. 643, – P. 86–95. Doi:10.1016/j.msea.2015.07.017.

33. Yang Peng. Experimental Data Assessment and Fatigue Design Recommendation for Stainless-Steel Welded Joints. / Yang Peng, Jie Chen and Jun Dong // *Metals*. – 2019. – Vol. 9(7), – P. 723. doi:10.3390/met9070723.

34. Sun R. Fatigue behavior of Ti-17 titanium alloy subjected to different laser shock peened regions and its microstructural response. / Sun R., Che Z., Cao Z., Zou S [and other] // *Surface and Coatings Technology*. – 2019. – Vol. 383. Doi:10.1016/j.surfcoat.2019.125284.

35. Adu-Gyamfi S. The effects of laser shock peening scanning patterns on residual stress distribution and fatigue life of AA2024 aluminium alloy. / Adu-Gyamfi S., Ren X. D., Larson E. A. [and other] // *Optics & Laser Technology*. – 2018. – Vol. 108, – P. 177–185. Doi:10.1016/j.optlastec.2018.06.036.

36. Zhang Qinglai. Warm Laser Shock Peening and Low Cycle Fatigue Behavior of Extruded AZ80-T6 Magnesium Alloy / Zhang Qinglai, Liu Hui, Zhang Bingxin [and other] // *Chinese Journal of Lasers*. – 2015. – №42(11). Doi: 10.3788/CJL201542.1103004.

37. Enoch Asuako Larson. Effects of scanning path gradient on the residual stress distribution and fatigue life of AA2024-T351 aluminium alloy induced by LSP / Enoch Asuako Larson, Xudong Ren, Samuel Adu-Gyamfi [and other] // *Results in Physics*, – 2019. – Vol. 13. Doi: 10.1016/j.rinp.2019.02.059.