

Пермский национальный исследовательский политехнический университет

На правах рукописи

Лыкова Анастасия Васильевна

**МАЛОЦИКЛОВАЯ УСТАЛОСТЬ КОНСТРУКЦИОННЫХ СПЛАВОВ ПРИ
СЛОЖНЫХ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ**

1.1.8. Механика деформируемого твердого тела

Диссертация

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:

Вильдеман Валерий Эрвинович

д-р физ.-мат. наук, профессор

Пермь 2022

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1. ВОПРОСЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ КОНСТРУКЦИОННЫХ СПЛАВОВ ПРИ МАЛОЦИКЛОВОМ НАГРУЖЕНИИ	14
1.1. Механическое поведение и усталостная долговечность сплавов при малоцикловом нагружении	14
1.2. Экспериментальное исследование закономерностей поведения материалов в условиях многоосного циклического воздействия.....	19
1.3. Модели прогнозирования долговечности и критерии циклического разрушения при многоосной усталости.....	24
Выводы по главе.....	28
2. МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ	29
2.1. Закономерности малоциклового деформирования и разрушения	29
2.2. Методические особенности проведения экспериментальных исследований деформационных и прочностных свойств конструкционных материалов в условиях малоциклового усталости.....	33
2.3. Методические аспекты проведения циклических испытаний при повышенной температуре.....	48
Выводы по главе.....	54
3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ОДНООСНОМ ЦИКЛИЧЕСКОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ.....	56
3.1. Исследование механического поведения никелевого сплава при малоциклового усталости в условиях одноосного нагружения	56
3.2. Исследование долговечности никелевого сплава при малоциклового усталости и сложной форме цикла	59

3.3. Исследование долговечности алюминиевого сплава в условиях малоциклового усталости при блочном циклическом нагружении.....	63
3.4. Механическое поведение титанового сплава при малоциклового усталости в условиях повышенных температур	69
3.5. Оценки влияния параметров сложных режимов нагружения на циклическую долговечность конструкционных материалов при одноосном нагружении.....	74
Выводы по главе.....	75
4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ДВУХОСНОМ ЦИКЛИЧЕСКОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ	77
4.1. Изучение механического поведения стали ЭП517Ш в условиях двухосной усталости при пропорциональном нагружении.....	77
4.2. Исследование циклической долговечности легированной стали ЭП517Ш в условиях двухосной усталости при блочном нагружении	82
4.3. Исследование циклической долговечности стали ЭП517Ш в условиях двухосного непропорционального нагружения.....	83
4.4. Исследование механического поведения алюминиевого сплава Д16Т в условиях малоциклового нагружения при действии одной составляющей постоянной величины	88
4.5. Исследование долговечности конструкционной стали ЭП517Ш при малоциклового усталости в условиях двухосного нагружения при повышенной температуре.....	95
4.6. Оценки влияния параметров сложных режимов нагружения на циклическую долговечность конструкционных материалов при двухосном нагружении	99
5. ПРОВЕРКА ПРИМЕНИМОСТИ МОДЕЛЕЙ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ УСТАЛОСТНОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ.....	101
5.1. Использование энергетических критериев разрушения	101

5.2. Проверка применимости нелинейной модели суммирования повреждения при одноосном малоцикловом нагружении со сложной формой цикла	108
5.3. Прогнозирование циклической долговечности алюминиевого сплава в условиях многоосного циклического нагружения с использованием модифицированной модели Сайнса	113
Выводы по главе	117
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	119
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	121

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность и степень разработанности темы исследования

Разрушение материалов при повторно-переменных нагрузках является важной технической проблемой, решение которой определяет долговечность и безопасность технических объектов. Именно с усталостными повреждениями связан большой процент отказов деталей и элементов конструкций, которые приводят к опасным последствиям. Принято различать несколько типов усталости, в зависимости от прикладываемого напряжения: малоцикловая, многоцикловая и гигацикловая.

Работа посвящена вопросам малоцикловой усталости. Разрушение от малоцикловой усталости происходит в условиях повторного упругопластического деформирования с условным числом циклов до 10^5 при значениях амплитудных напряжений, превышающих предел текучести. Повреждения от малоцикловой усталости возникают в местах концентраций напряжений различных элементах конструкций, в частности, в дисках турбин высокого давления газотурбинного двигателя, работающих в условиях длительного воздействия предельно высоких циклически изменяющихся нагрузок и температур. Решение проблемы усталости представляет собой одну из важнейших технических задач обеспечения надежности и безопасности силовых установок.

Получение информации об усталостных свойствах конструкционных материалов базируется преимущественно на длительных сложных и дорогостоящих экспериментах. Несмотря на то, что вопросами усталости занимались многие ученые, и за большое количество лет во многих лабораториях накоплен значительный объем данных, большинство результатов получены при одноосных воздействиях с постоянными параметрами режимов нагружения. При этом существует важная техническая проблема, связанная с тем, что при реальных условиях эксплуатации в различных точках конструкции реализуются сложные режимы термомеханических воздействий. Это связано с изменением параметров циклов нагружения в процессе работы, с реализацией объемного

напряженного-деформированного состояния и траекторией сложного нагружения, а также с изменяющейся температурой. Получение экспериментальной информации о циклической долговечности с учетом факторов сложных термомеханических воздействий требует специальной методической проработки и проведения длительных испытаний. Актуальным является получение научно обоснованных оценок степени влияния тех или иных параметров сложных режимов термомеханических воздействий на усталостную долговечность конструкционных материалов, а также проверка применимости моделей прогнозирования ресурса применительно к указанным режимам.

Цель диссертационной работы является получение данных о влиянии параметров сложных режимов циклического термомеханического нагружения на усталостную долговечность конструкционных сталей и сплавов на основе комплексных экспериментальных исследований с оценкой применимости моделей прогнозирования ресурса в условиях малоциклового усталости.

Основные задачи диссертационного исследования:

- изучение методических особенностей использования современных испытательных систем для экспериментальных исследований поведения материалов при одноосном и двухосном малоцикловых нагружениях, включая режимы с переменными параметрами циклических воздействий, и повышенных температурах;
- получение новых экспериментальных данных о закономерностях малоциклового деформирования конструкционных сплавов при пропорциональном и непропорциональном нагружениях в условиях сложного напряженного состояния;
- экспериментальное исследование влияния повышенных температур на усталостную долговечность конструкционных сплавов при одноосных и двухосных циклических нагружениях;
- проверка применимости моделей прогнозирования усталостной долговечности при сложном напряженном состоянии и переменных параметрах цикла.

В качестве объектов исследования рассматриваются следующие конструкционные материалы, применяемые в высоконагруженных элементах конструкций: никелевый сплав, титановый сплав, алюминиевый сплав Д16Т, жаропрочная легированная сталь ЭП517Ш.

Научная новизна работы:

- выявлены зависимости усталостной долговечности титанового сплава от повышенной температуры, никелевого и алюминиевого сплавов от переменных параметров одноосных циклических воздействий;

- получены оценки влияния сложных форм циклов, различных траекторий непропорционального нагружения и повышенной температуры на усталостную долговечность образцов из жаропрочной легированной стали при одновременном действии растяжения-сжатия и кручения;

- получены новые экспериментальные данные, иллюстрирующие влияние постоянной осевой либо сдвиговой составляющей напряжений на долговечность алюминиевого сплава в условиях малоциклового усталости при двухосном нагружении;

- проведена верификация нелинейной модели накопления повреждений Марко-Старки для сложной формы цикла и блочного нагружения, а также модифицированной модели Сайнса в условиях сложного напряженного состояния на новых данных о циклической долговечности при малоциклового усталости.

Достоверность результатов основывается на использовании аттестованного оборудования и поверенных средств измерений в условиях аккредитованной испытательной лаборатории Центр экспериментальной механики ПНИПУ, а также подтверждается соответствием экспериментальных данных результатам, полученными другими авторами.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в возможности использования новых экспериментальных данных о механическом поведении конструкционных сплавов в научно-исследовательских институтах и конструкторских бюро при проектировании конструкций из материалов авиационного назначения.

Материалы диссертационной работы переданы для использования в учебном процессе кафедры «Экспериментальная механика и конструкционное материаловедение» ФГАОУ ВО ПНИПУ в рамках образовательной программы «Экспериментальная механика» по направлению подготовки магистров 22.04.01 «Материаловедение и технологии материалов» по дисциплинам «Усталость и разрушение материалов» и «Экспериментальная механика материалов».

Методология и методы диссертационного исследования

Представленные в работе исследования усталостной долговечности конструкционных материалов выполнены с использованием комплекса современных испытательных систем Центра экспериментальной механики ПНИПУ и применением высокоточных средств измерения. При проведении экспериментальных исследований использовались методики, согласующиеся с российскими и международными стандартами. Обработка экспериментальных данных осуществлялась с использованием методов статистического анализа данных.

Положения, выносимые на защиту:

- совокупность методических рекомендаций по проведению одноосных и двухосных усталостных испытаний, включая режимы с переменными параметрами циклических воздействий при нормальной и повышенной температурах;
- описание полученных экспериментальных данных о влиянии параметров сложных режимов циклического нагружения на усталостную долговечность конструкционных сплавов;
- утверждение о том, что реализация двухосного напряженного состояния может приводить к значительному изменению циклической долговечности даже при малых значениях постоянных составляющих;
- выводы о возможности и эффективности использования нелинейной модели суммирования повреждений Марко-Старки и модифицированной модели Сайнса для прогнозирования циклической долговечности при малоцикловом нагружении;

- оценки влияния параметров сложных режимов нагружения на циклическую долговечность конструкционных материалов;
- выводы о необходимости учета сложного напряженно-деформированного состояния в практике аттестации материалов, ресурсных испытаний и прочностных расчетов ответственных конструкций.

Реализация работы.

Результаты диссертационной работы были использованы при выполнении НИР в рамках проектов Российского фонда фундаментальных исследований (№19-01-00555 А, № 16-41-590392 р_а, № 19-38-90270-Аспиранты), по постановлению Правительства РФ №220 от 9 апреля 2010 г., Государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (№FSNM-2020-0027).

Апробация работы.

Основные результаты, представленные в диссертационной работе, докладывались и обсуждались на 8 всероссийских и 5 международных научных конференциях:

- Всероссийская школа-конференция молодых ученых и студентов «Математическое моделирование в естественных науках» (Пермь, 2016, 2017, 2018);
- Всероссийская конференция «Зимняя школа по механике сплошных сред» (Пермь, 2017);
- Всероссийская научно-техническая конференция «Аэрокосмическая техника, высокие технологии и инновации» (Пермь, 2017, 2018);
- Международная конференция «Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций» (Екатеринбург, 2018, 2022);
- 8 XII Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики (Уфа, 2019);
- Международная инновационная конференция молодых учёных и студентов по современным проблемам машиноведения МИКМУС (Пермь, 2019, 2021);
- XIII Международная конференция по прикладной математике и механике в аэрокосмической отрасли АММАИ'2020 (Алушта, 2020);

– Всероссийская конференция молодых ученых-механиков YSM-2021 (Сочи, 2021).

В полном объеме диссертация обсуждалась на расширенном семинаре кафедры экспериментальной механики и конструкционного материаловедения ПНИПУ, научном семинаре Центра экспериментальной механики ПНИПУ, объединенном семинаре федерального исследовательского центра «Казанский научный центр Российской академии наук» и Центра экспериментальной механики ПНИПУ, Института механики сплошных сред УрО РАН, кафедры математического моделирования систем и процессов ПНИПУ.

Публикации. По результатам исследований опубликовано 16 публикаций, из них – 4 статьи [38, 40, 126, 176] опубликованы в изданиях, включенных в Перечень ведущих рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы результаты диссертационных исследований на соискание ученой степени, и в изданиях, индексируемых в Scopus, 12 публикаций в изданиях, индексируемых в РИНЦ [25, 39, 41-50].

Личный вклад автора. Выбор направления исследований, постановка научной задачи и составление плана работ осуществлены совместно с научным руководителем. Личное участие автора состояло в анализе методических вопросов проведения экспериментальных исследований, непосредственном проведении экспериментальных работ по исследованию характеристик малоциклового усталости конструкционных сталей и сплавов, обработке и обобщении результатов экспериментальных исследований, верификации моделей накопления повреждений и прогнозирования циклического ресурса. Подготовка публикаций по диссертационной работе и опубликование в научных журналах осуществлялось совместно с соавторами.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Материалы диссертации изложены на 140 страниц, включают 67 рисунков и 15 таблиц, 179 библиографических ссылок.

Во введении обоснована актуальность выбранной темы диссертационной работы, изложены цель и основные задачи данного исследования, полученные в ней новые научные результаты, обоснована их достоверность, представлены положения, выносимые на защиту, теоретическая и практическая значимость, представлены сведения об апробации диссертации, дано краткое описание содержания диссертации по главам.

Первая глава посвящена обзору научных работ российских и зарубежных авторов. Внимание уделено научным публикациям, связанным с изучением процессов накопления повреждений конструкционных материалов при малоцикловой усталости в условиях простого и сложного напряженного состояния. Выделены важные направления исследований, включающие исследования закономерностей механического поведения конструкционных сплавов в условиях сложного напряженно-деформированного состояния при различных траекториях пропорционального и непропорционального нагружения, в условиях воздействия нормальных и повышенных температур.

Во второй главе рассмотрены методические вопросы, связанные с проведением испытаний на малоцикловую усталость при одноосном и двухосном нагружении с использованием современного испытательного оборудования, высокоточных осевых и двухосевых экстензометров и специализированного прикладного программного обеспечения. Приведены основные характеристики испытательных систем, средств контроля напряжений и деформаций, программного обеспечения, используемых при проведении экспериментальных исследований. Рассмотрены методические вопросы, связанные с реализацией сложных форм циклов при циклическом деформировании, сложного-напряжённого состояния, проведения экспериментальных исследований при повышенных температурах. Уделено внимание вопросам соосности нагружающей цепи, выбора геометрии образцов, выбору частоты циклических воздействий, контролю температуры на поверхности образца и обеспечению заданных форм циклов.

В третьей главе представлено экспериментальное исследование механического поведения конструкционных сплавов при малоцикловой усталости в условиях одноосного нагружения при сложной форме цикла, блочном нагружении, повышенной температуре. Представлены результаты исследования никелевого сплава в условиях циклического растяжения-сжатия при простых и сложной формах цикла. Получены новые экспериментальные данные о механическом поведении алюминиевого сплава Д16Т при программном циклическом деформировании, состоящем из трех блоков циклов с различными параметрами. Приведены экспериментальные результаты серии циклических испытаний по определению характеристик сопротивления малоцикловой усталости при одноосном нагружении сплошных цилиндрических образцов из титанового сплава с контролем по деформациям и с контролем по напряжениям при нормальной и повышенной температурах. Получены экспериментальные данные о влиянии температуры и коэффициента асимметрии цикла на циклическую долговечность титанового сплава.

В четвертой главе содержатся результаты исследования жаропрочной легированной стали ЭП517Ш при малоцикловой усталости в условиях одновременного действия растяжения и кручения. Получены оценки влияния сложной формы цикла, блочного нагружения при пропорциональном изменении осевых и сдвиговых деформаций, различных траекторий непропорционального циклического нагружения на усталостную долговечность легированной стали. Проведен анализ влияния повышенной температуры на циклическую долговечность стали ЭП517Ш в условиях двухосного деформирования при простой, сложной форме цикла и сложном нагружении. Представлены результаты исследования долговечности алюминиевого сплава при малоцикловой усталости в условиях двухосного нагружения при действии одной составляющей (нормальной или сдвиговой) постоянной величины, отражающие значительное снижение долговечности при увеличении постоянной составляющей напряжений.

В пятой главе получены новые результаты применения нелинейной модели суммирования повреждений Марко-Старки для прогнозирования циклической

долговечности никелевого сплава в условиях одноосного циклического растяжения-сжатия при простых и сложных формах цикла и алюминиевого сплава в условиях блочного нагружения. Проведена проверка модифицированной модели Сайнса по новым экспериментальным данным алюминиевого сплава Д16Т в условиях сложного напряженного состояния.

В заключении сформулированы и изложены основные результаты диссертационной работы

Благодарность. Автор выражает глубокую благодарность своему научному руководителю доктору физико-математических наук, профессору Вильдеману Валерию Эрвиновичу за научное руководство исследованиями, обсуждение результатов и советы по написанию работы. За постоянную поддержку, ценные советы по написанию работы и помощь в проведении экспериментов автор выражает особую благодарность кандидату технических наук Ильиных Артему Валерьевичу, а также сотрудникам Центра экспериментальной механики ПНИПУ за поддержку и помощь при проведении экспериментов.

1. ВОПРОСЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ КОНСТРУКЦИОННЫХ СПЛАВОВ ПРИ МАЛОЦИКЛОВОМ НАГРУЖЕНИИ

Настоящая глава посвящена обзору литературных источников отечественных и зарубежных авторов, в которых отражены вопросы изучения закономерностей механического поведения конструкционных материалов в условиях малоциклового деформирования при простом и сложном напряженном состоянии. Выделены основные направления исследований в данной области.

1.1. Механическое поведение и усталостная долговечность сплавов при малоцикловом нагружении

Металлы и их сплавы являются одними из главных материалов для изготовления авиационной техники. Ответственные элементы конструкций в условиях эксплуатации длительно функционируют, как правило, при циклических режимах нагружения, которые оказывают существенное влияние на долговечность конструкции, в отдельных случаях существенно снижая срок службы элементов конструкций [121]. Необходимость изучения процессов усталости представляет собой одну из важнейших технических задач обеспечения надежности и безопасности деталей и элементов конструкций авиационного назначения.

Первые сообщения об исследовании усталости принадлежат немецкому горному инженеру Вильгельму Альберту, который испытывал железные цепи при повторном нагружении в 1829 году. В 1839 году французский учёный Ж.-В. Понселе обнаружил снижение прочности стальных конструкций при воздействии циклических напряжений и ввел термин «усталость». В дальнейшем немецким инженером Августом Веллером были проведены натурные испытания осей железнодорожных вагонов, а также испытания при циклическом нагружении образцов нескольких различных материалов на кручение, изгиб и осевое

нагружение. Также Веллер впервые предложил общий вид представления усталостных испытаний – кривые усталости.

Большой вклад в развитие представлений о механике процессов циклического деформирования и усталости материалов и деталей машин внесли ученые Беляев М.С., Бондарь В.С., Дж. Коллинз, Когаев В.П., Махутов Н.А., Наймарк О.Б., Романов А.Н., Серенсен С.В., Степнов М.Н., Трощенко В.Т., Шанявский А.А., Шлянников В.Н. и др. [6, 11, 23, 31, 32, 33, 51, 52, 53, 56, 58, 59, 64].

Работы Серенсена С.В. посвящены вопросам усталости материалов, и в особенности, металлов [58, 59]. В его работах отражено развитие методики расчета запаса прочности при циклическом нагружении, анализ законов накопления усталостного повреждения и расчет усталостной долговечности при нерегулярных нагрузках. Также рассмотрено влияние на циклическую прочность элементов конструкций вида напряженного состояния. В монографии [51] Махутова Н.А. представлены основные закономерности деформирования и разрушения при однократном, мало-, многоцикловом, длительном статическом и длительном циклическом нагружениях. Закономерности накопления усталостных повреждений, происходящие в элементах конструкций, при переменных нагрузках, описываются в работе Гусева А.С. [53]. Особое внимание уделено описанию методов повышения характеристик сопротивления усталости конструкций. В работе Терентьева В.Ф. [62] рассмотрены основные закономерности усталостного разрушения металлических материалов с учетом современных достижений металлофизики и механики разрушения.

Значительный практический интерес представляют вопросы, связанные непосредственно с экспериментальными методиками проведения усталостных испытаний. Методическим аспектам экспериментальной механики посвящены работы [1, 4, 5, 8, 10, 15, 18, 30, 37, 55, 65].

Изучение закономерностей сопротивления усталости конструкционных материалов имеет важное значение при прогнозировании долговечности и остаточного ресурса деталей машин и конструкций. При циклических

воздействиях на характеристики сопротивления усталости конструкционных материалов значительно влияют различные технологические и эксплуатационные факторы, такие как асимметрия цикла, частота нагружения, концентрация напряжений, температура, шероховатость поверхности и т. д. Одновременное взаимодействие этих факторов может существенно сказываться на долговечности материалов, увеличивая, снижая или исключая влияние одного из факторов на процесс повреждений.

Для характеристик малоциклового усталости температура всегда играет важную роль. Закономерности малоциклового деформирования и влияние нагружения на повреждаемость при повышенных температурах на различные виды сталей исследовались в работах [19, 54, 61, 88, 89, 103, 105, 107, 124, 130, 135, 160, 165, 167, 179]. Температурные условия нагружения помимо снижения циклического ресурса, как правило, изменяют характер механического поведения и процессов накопления повреждений материала. Наиболее отчетливо эти изменения отражаются на характеристиках петель гистерезиса и зависимостях максимальных и минимальных напряжений от числа циклов в случае жесткого нагружения. Подобные зависимости механических свойств конструкционных материалов от величины температуры связаны со структурными изменениями: деформационное старение, рекристаллизация и др. Если при циклическом нагружении реализуется сложная комбинация параметров цикла (высокий уровень нагрузок и температуры, большое время цикла, наличие длительных выдержек и др.), то на долговечность металлов и сплавов влияют явления ползучести и релаксации.

В работах [88, 103, 105, 130, 166] уделено внимание влиянию повышенных температур и скорости нагружения и на усталостные свойства материалов. Результаты для большинства металлов и сплавов показывают, что усталостное повреждение увеличивается с повышением температуры и уменьшением скорости деформации. Однако при исследовании долговечности сплава Al-12Si при различных температурах в условиях малоциклового усталости некоторыми авторами [124, 165, 166, 179], наблюдается увеличение усталостной

долговечности с повышением температуры. В работе [166] сплав Al-12Si был исследован при различной температуре и различных скоростях деформации. С увеличением температуры сплав демонстрирует повышенную усталостную долговечность при высокой скорости деформирования. Но при низкой температуре может быть обнаружена отрицательная чувствительность усталостной долговечности к скорости деформации, то есть происходит увеличение усталостной долговечности при уменьшении скорости деформации. Повышенная усталостная стойкость при более высоких температурах может быть связана с улучшением микроструктуры, а также относительно более высокой пластичностью.

Влияние форм и параметров цикла на циклическую долговечность при одноосном нагружении отражены в работах [57, 136]. Накопление усталостных повреждений для ступенчатой последовательности нагружения исследовано

Влияние перегрузки на усталостную долговечность легированной стали исследовано в работе [72]. Остаточное напряжение, которое было создано начальной перегрузкой, не оказало большого влияния на усталостную долговечность стали. Взаимосвязь между неупругим деформированием и усталостным разрушением в связи с влиянием частоты нагружения или скорости деформаций исследовалась в ряде работ [38, 61, 63, 135, 158]. Большое количество публикаций представлено для нагружений при больших частотах, область низких частот изучена значительно меньше. Отмечено, что с увеличением частоты нагружения возрастает скорость деформирования и предельные напряжения одного и того же циклов до разрушения повышаются как в многоцикловой, так и малоцикловой усталости.

Большое влияние на закономерности механического поведения и возникновение повреждений при малоцикловой усталости оказывает состояние поверхностных слоев материала и качество обработки поверхности испытываемых образцов. Наличие на поверхности мелких царапин или следов механической обработки, которые являются концентраторами напряжений, приводит к снижению способности сопротивляться циклическому нагружению.

Были проведены исследования на эту тему [77, 85, 180, 183, 194]. Доказано, что с помощью методов обработки можно увеличить предел усталостной прочности, а также увеличить период развития усталостной трещины [83, 177]. Результаты показывают, что микродефекты, вызванные шероховатостью поверхности, создают напряжения, пластическую деформацию и концентрацию повреждений при усталостной нагрузке, которые вызывают возникновение усталостных трещин. Применяются различные виды дополнительной обработки поверхности, с помощью которых можно добиться увеличения значений усталостной долговечности. К таким методам относятся дробеструйная обработка, токарная обработка, шлифование, шлифование с последующей пескоструйной обработкой и полировкой, азотирование и др.

Вопросами влияния значения средних напряжений для различных материалов занимались О.Г. Басквин, Б.Р. Хейг, Дж. Гудман, Дж. Д. Морроу и др. [71, 98, 173]. С увеличением значения среднего напряжения усталостная долговечность падает. Б.Р. Хейг впервые предложил диаграмму зависимости переменных амплитуд цикла от значений средних напряжений, также известная как диаграмма Хейга. В недавнем исследовании [189] влияния среднего напряжения, амплитуды напряжений и соотношения напряжений на малоцикловую усталостную долговечность и одностороннее накопление деформаций при несимметричном одноосном циклическом нагружении, авторами представлено, что с увеличением среднего напряжения и амплитуды напряжений, усталостная долговечность уменьшается и увеличивается одностороннее накопленная деформация.

При несимметричных мягких режимах циклического нагружения конструкционных сталей и сплавов наблюдается одностороннее накопление деформации (вышагивание петли пластического гистерезиса). Явление ратчетинг проявляется при воздействии, например, дополнительных циклических нагрузок, действующих помимо основной циклической или статической нагрузки. В 1970 году Коффин предположил, что механизм накопления односторонних деформаций может вызвать дополнительные повреждения и может привести к

снижению усталостной долговечности. В экспериментальных работах [112, 113, 121, 153, 173] проведены исследования одноосной малоцикловой усталости на нескольких сталях: нержавеющей стали SS304, стали 42CrMo и углеродистой стали 45. Результаты экспериментов показали, что долговечность и одностороннее накопленная деформация значительно зависят от среднего напряжения, амплитуды напряжений.

Вопросы накопления повреждений и оценки долговечности являются актуальными и активно исследуются в настоящее время [34, 35, 57]. Основные направления построения моделей представлены в работах Ильюшина А.А., Новожилова В.В., Кадашевича Ю.И., В.С. Бондаря [7, 27, 29, 56, 64] и других авторов.

1.2. Экспериментальное исследование закономерностей поведения материалов в условиях многоосного циклического воздействия

В элементах конструкций газотурбинных двигателей практически не реализуется напряженное состояние. Как правило, в процессе эксплуатации конструкций из-за сложной геометрии материал подвергается сложной истории нагружения. Оценка усталостной долговечности конструкционных материалов в таком случае является сложной задачей, поскольку необходимо учитывать множество факторов, в частности, тип напряженного состояния, непропорциональность пути деформации в цикле, неравномерность нагрузки и т.д. Большое количество работ [9, 24, 33, 38, 116, 143, 151, 153, 172 и др.] направлено на изучение сложных процессов усталости и прогнозирование долговечности конструкционных материалов в условиях сложного напряженно-деформированного состояния. Первое систематическое исследование многоосевой усталости было проведено Гофом и Поллардом в 1930-х годах. Данные изгиба-кручения, полученные в результате исследования, послужили основой для моделей, позже предложенных Гофом [98], Сансом [154] и Финдли [92] в 1950-х годах.

Основными условиями нагружения встречающимися в литературе являются двухосное растяжение крестообразных образцов [151], растяжение с кручением, изгиб с кручением цилиндрических образцов [38, 76, 75, 104, 103, 106, 107, 131, 145, 171], а также трехосное растяжение с кручением и внутренним давлением полых образцов [127]. Испытываются трубчатые образцы и в форме песочных часов. В литературе встречаются исследования образцов для сварных соединений [100, 1480, 142, 147, 148], образцов с надрезами и другими концентраторами напряжений [94, 104, 180].

Экспериментальному исследованию поведения конструкционных материалов при совместном действии растяжения и кручения посвящены работы, в которых уделено внимание стадии закритического деформирования [16], численному исследованию процессов упругопластического деформирования [2, 3], остаточным деформациям, различным комбинациям осевых и сдвиговых деформаций при мягком и жестком нагружениях [76, 79, 80, 104, 107, 108, 127, 131, 145, 155 и др.].

К факторам, влияющим на поведение материала при многоосной усталости, можно отнести изменение направлений главных напряжений [78, 125], отношения напряжений [66], среднего напряжения [17, 93, 96, 115, 132, 146, 174], непропорциональности компонентов нагрузки [13, 94, 147, 163], фазовый угол [59, 110, 124, 158, 181, 183, 185, 189, 190, 194], соотношения частот нагружения [146, 163] и т. д. Следует отметить, что для различных материалов могут наблюдаться различные зависимости усталостного поведения от факторов нагружения.

Усталостная долговечность в условиях многоосного нагружения значительно зависит от соотношения мод прилагаемых нагрузок. При пропорциональном нагружении значения прилагаемых нагрузок изменяются пропорционально одному параметру. В других случаях нагружение происходит непропорциональным образом. Работы [12, 13, 82, 87, 95, 106, 109, 128, 144, 149, 160, 169, 170, 181] посвящены многоосным испытаниям на малоцикловую усталость при непропорциональной нагрузке с различными путями деформации,

комбинированными осевыми и сдвигающими нагрузками, и исследованию зависимости долговечности до разрушения от пути деформации и материала. Экспериментальные исследования многоосного усталостного нагружения показали, что поведение конструкционных материалов при многоосном малоцикловом нагружении, особенно непропорциональное нагружение намного сложнее, и накопление усталостных повреждений происходит значительно быстрее при непропорциональной многоосной нагрузке, чем при одноосной и пропорциональной нагрузках. В работах [82, 106, 107, 160] отмечено, что в условиях многоосной малоциклового усталости при непропорциональной нагрузке с контролируемой деформацией усталостная долговечность снижается, что сопровождается дополнительным упрочнением, которое зависит как от путей деформации, так и от материалов. Экспериментальные исследования жаропрочной стали в [138] показывают, что нагрузка при сдвиге по фазе 90° является наиболее разрушительной траекторией нагрузки среди всех непропорциональных нагрузок, исследованными авторами. Исследование титанового сплава [95, 170] показало, что дополнительного упрочнения при непропорциональном циклическом нагружении не наблюдается. При исследовании малоциклового усталости стали 42CrMo с различными путями деформации авторами [82] отмечено, что при круговой траектории долговечность является самой короткой.

Исследование влияния постоянных составляющих многоосного нагружения на усталостную долговечность отражено в [17, 74, 132, 154, 178]. В работе Дж. Сайнса [154] получен вывод о том, что значение первоначального постоянного статического напряжения при кручении не оказывает влияние на усталостную долговечность металлов. При исследовании влияния статического осевого напряжения на усталостную долговечность магниевого сплава при циклическом кручении [178], отмечается, что растягивающее статическое осевое напряжение снижает усталостную долговечность, в то время как сжимающее статическое осевое напряжение значительно увеличивает долговечность. В работе [17] отмечено, что постоянное статическое напряжение приводит к уменьшению

ресурса материала в области многоциклового усталости. Следует отметить, что в литературе встречается существенно меньше исследований о влиянии постоянных статических составляющих на усталостное поведение материалов при многоосных нагружениях чем при одноосных. А также большее количество исследований приведено для области многоциклового усталости и в относительно небольшое количество экспериментальных исследований в области малоциклового усталости. Особый интерес представляет исследование малоциклового усталости при наличии второй компоненты малой величины, которая может возникать в условиях сложной эксплуатации.

Влияние среднего напряжения на усталостное поведение для различных сталей рассмотрено в работах авторов [75, 115, 116, 141]. Отмечен незначительный эффект среднего напряжения при наличии пластической деформации в режиме малоциклового и больший эффект среднего напряжения в режиме многоциклового усталости. Растягивающее нормальное напряжение снижает усталость снижает сопротивление усталости, а отрицательное сжимающее среднее напряжение приводит к повышению усталостной долговечности.

Из-за высокой температуры процесса сварки химический состав и микроструктура свариваемых металлов сильно меняются, что приводит к сложным механическим свойствам и механизмам разрушения при многоосной нагрузке. Исследования сталей в условиях многосной нагрузки при повышенных температурах приведены в работах [137, 160]. Отмечается относительно небольшое количество работ в области малоциклового усталости при сложном напряженном состоянии при повышенных температурах.

При многоосной усталости направление роста трещины зависит типа материалов, вырезов и предварительного растрескивания, анизотропии материала, и т.д. Влияние морфологии поверхности на усталостную долговечность при малоциклового усталости рассматривается в работах [84, 97, 101, 102, 107, 144, 167, 168]. По результатам измерения шероховатости поверхности отмечается [84], что шероховатость увеличивается путем предварительного нагружения в условиях

малоцикловой усталости. Исследования инициирования и распространения усталостной трещины на трубчатом образце, подвергнутом многоосным смешанным режимам нагружения, описаны в работе [101]. Отмечается, что многоосных испытаниях на малоцикловую усталость на растяжение-кручение трещины распространяются в направлении максимального сдвига или в основном направлении, в зависимости от комбинации сдвига и нормальных деформаций. В работе [144] исследованы разные типы конструкционных сталей: среднеуглеродистая сталь, низколегированная сталь и нержавеющая сталь. Показано, что данные стали имеют различную ориентацию трещин при одной и той же траектории нагружения из-за их разного поведения циклической пластичности и разной чувствительности к непропорциональной нагрузке.

Некоторые материалы демонстрируют дополнительное циклическое упрочнение в условиях непропорционального нагружения. Это упрочнение объясняется изменением кристаллографических плоскостей скольжения из-за вращения и пересечения максимальных плоскостей сдвига. Уровень непропорционального упрочнения зависит от формы, последовательности и амплитуды пути нагружения, а также от микроструктуры материала. Чувствительность материала к непропорциональному циклическому нагружению обычно определяется коэффициентом непропорционального циклического твердения [95].

Поскольку за редким исключением материал в конструкции работает в условиях сложного напряженного состояния, то учет этого фактора представляется крайне важным. Обобщение на случай сложного напряженного состояния моделей, построенных по результатам одноосных испытаний, является недостаточным. Поэтому актуальным является проведение комплексных экспериментальных исследований механического поведения конструкционных материалов при многоосной усталости.

1.3. Модели прогнозирования долговечности и критерии циклического разрушения при многоосной усталости

Важным направлением научных исследований является прогнозирование циклической долговечности при сложном напряженном состоянии. Критерии многоосной усталости чрезвычайно важны в области усталости, и их цель – снизить сложную многоосную нагрузку до эквивалентной одноосной нагрузки. Предложено множество критериев и моделей многоосной усталости, подходящих для различных материалов и различных условий нагружения. Но, несмотря на большое их количество, пока нет единогласно принятой модели. Как правило, критерии и модели можно разделить на методы, основанные на напряжении, методы на основе деформации, критерии, основанные на комбинации напряжения и деформации, и критерии, основанные на энергии. Критерии, основанные на напряжениях, используются при многоцикловой усталости, поскольку пластическая деформация мала (Basquin, Gough, Findley Sines, и др.) [71, 77, 92, 96, 98, 154]. Критерии деформации обычно используются при малоцикловой усталости, например, при пластической деформации (эти критерии также могут использоваться при многоцикловой усталости) (Fatemi, Socie, Brown, Chu, Wang) [77, 85, 89, 91, 111, 157, 164]. В режиме малоцикловой усталости данные о долговечности связаны с амплитудой пластической деформации, а связь между пластической деформацией и усталостной долговечностью описывается уравнением Коффина – Мэнсона [129]. Некоторые исследователи утверждают, что использование только компонентов напряжения или деформации недостаточно для улавливания затвердевания материала. По этой причине также были предложены критерии, основанные на сочетании компонентов напряжения и деформации или энергетических величин. Подходы, основанные на энергии, имеют и другие преимущества при работе с нагрузками переменной амплитуды. Критерий Смита-Ватсона-Топпера учитывает только энергию осевого деформирования. Критерии Лю, Глинки представляют собой линейную комбинацию нормальных и сдвиговых энергетических параметров.

Многие современные критерии основаны на концепции критической площадки. Понятие было введено Финдли в 1959 году. Основная идея критериев, основанных на концепции критической площадки – сведение сложного напряженного состояния к одноосному напряженному состоянию, действующему на критической площадке. Ориентация критической площадки выбирается в зависимости от преобладающего механизма разрушения материала. В данном направлении работали такие зарубежные исследователи, как Сайнс, Финдли, Данг-Ван, Кроссланд, Матаке, Браун, Миллер, Маха, Мак Дермид, Пападопулос и др. Постановка критериев разрушения многоосного усталостного нагружения требовала получения большего количества экспериментальных данных, что спровоцировало активные исследования в данной области.

Модель Фатеми-Соси [91] включает в себя нормальное напряжение вместе с компонентами деформации сдвига, действующими на критическую плоскость, чтобы еще больше расширить возможности модели для областей как малоциклового, так и многоциклового усталости. Данный критерий встречается в таких работах как [9, 24, 67, 68, 141]. В данных работах испытывались гладкие цилиндрические и трубчатые образцы из латуни CuZn37, магниевого сплава AZ61A, титанового сплава TC4, BT9, нержавеющей стали 1Cr-18Ni-9Ti, и других сплавов. А в качестве условий нагружения выступали: одноосное нагружение, пропорциональное нагружение, непропорциональное синфазное нагружение, непропорциональное нагружение с треугольной формой волны. На основании данных публикаций можно сделать вывод о том, экспериментальные данные хорошо согласуются с прогнозируемыми значениями долговечности при одноосных нагружениях, пропорциональных и непропорциональных со сдвигом по фазе на 45° и 90° .

Пластическая работа, рассеиваемая в материале во время цикла нагружения, соответствующая площади циклической петли гистерезиса напряжения-деформации, используется в качестве параметра усталостного повреждения для корреляции с усталостной долговечностью в модели прогнозирования долговечности на основе энергии. В работах использован критерий повреждения

на основе плотности энергии деформации [82, 96, 114, 115, 117, 122, 123, 121, 128, 163]. При таком подходе оценка усталостного повреждения включала компоненты напряжения и деформации в критической плоскости.

Лю [120] предложил модель виртуальной энергии деформации, основанную на компонентах упругой и пластической работы с учетом влияния среднего напряжения.

Критерий Смита – Ватсона – Топпера (SWT) [156], первоначально сформулированный для учета эффекта среднего напряжения, использовался многими исследователями для анализа многоосной усталости в качестве подхода критической плоскости на основе деформации. Данный критерий проверялся в работах [9, 67, 68, 89, 135, 159]. Рассматривались цилиндрические, трубчатые и тонкостенные образцы из таких материалов как Inconel 718, Ti-6Al-4V, сплав FGH96, спеченный порошок чистого железа, холоднокатаная латунь CuZn37, титановый сплав TC4. Исходя из выводов в данных публикациях, можно сказать, что критерий Смита-Ватсона-Топпера применим только для одноосных и пропорциональных нагружений.

Глинка и др. [96] использовали максимальное нормальное напряжение и напряжение сдвига для учета влияния среднего напряжения на рост трещины. Нормальное напряжение в критической плоскости отвечало за раскрытие трещины, а максимальное напряжение сдвига - за преодоление любого трения скольжения, возникающего между поверхностями трещины.

T. Lagoda и E. Macha [117] разработали обобщенный критерий максимального сдвига и параметра плотности энергии нормальной деформации на критической плоскости. Для циклов многоосных напряжений эквивалентная история напряжений используется для оценки усталостных повреждений в области многоциклового усталости. Позднее они рассчитали данные о усталостной долговечности стальных сплавов в условиях одноосного и многоосного случайного нагружения с использованием энергетической модели [114, 163].

Модель повреждений Варвани-Фарахани [162], объединяющая диапазоны нормальной энергии и энергии сдвига деформации, определенные по компонентам напряжения и деформации, действующим на критическую плоскость. Модель использовалась для оценки срока службы различных материалов при одноосном и многоосном нагружении несколькими исследователями. Хан и его соавторы [99, 100] использовали модель Варвани-Фарахани для оценки усталостной долговечности стального сплава SNCM630 в условиях пропорционального и непропорционального нагружения. Чен [81] использовал модель повреждений Варвани-Фарахани для оценки усталостной долговечности стальных сплавов Al 7050-T7451 и En15R при комбинированных историях нагружения с переменным напряжением-кручением.

В результате за прошедшие годы было предложено большое количество критических параметров повреждения, которые рассчитывают усталостное повреждение на основе различных комбинаций компонентов осевого и касательного напряжений и деформаций [80, 85, 90, 91, 111, 102, 112, 113, 156]. Однако было показано, что лишь немногие из них обеспечивают стабильно точные прогнозы усталостной долговечности для широкого спектра материалов и условий нагрузки.

Хотя в настоящее время доступно множество критериев прогнозирования многоосного ресурса, все эти подходы более или менее точны для разных материалов при разных траекториях нагрузки, поэтому важно проверять модели многоосной усталости в конкретных случаях. Анализ теоретических и экспериментальных данных работ в области усталостной долговечности свидетельствует об актуальности изучения процессов накопления повреждений при циклически изменяющихся нагрузках и экспериментального исследования механического поведения конструкционных материалов для точного прогнозирования усталостной долговечности.

Выводы по главе

Анализ публикаций отечественных и зарубежных авторов свидетельствует об актуальности экспериментальных исследований малоциклового усталости в условиях многоосного нагружения для различных конструкционных сталей и сплавов, в том числе авиационного назначения.

На основании анализа теоретических и экспериментальных работ в области исследования усталостного поведения материалов выделены основные направления исследований: изучение механического поведения материалов в условиях малоциклового нагружения при повышенной температуре, изучение закономерностей накопления повреждений конструкционных сплавов в условиях сложного-напряженного состояния, прогнозирования прочности ответственных элементов конструкций на основе изучения процессов накопления повреждений при циклически изменяющихся нагрузках.

2. МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

В данной главе рассмотрены методические особенности проведения испытаний на малоцикловую усталость в условиях одноосного и двухосного нагружения при нормальной и повышенной температурах. Отражены основные закономерности малоциклового деформирования. Приведены основные характеристики испытательных систем, средств контроля нагрузок и перемещений, прикладного программного обеспечения, систем сбора и обработки данных, используемых для проведения экспериментальных исследований. Рассмотрены методические вопросы, связанные с реализацией сложных форм циклов при малоцикловом деформировании, реализацией сложного напряженного-деформированного состояния. Уделено внимание соосности нагружающей цепи, выбору геометрии образцов, выбору частоты нагружения, контролю температуры на поверхности образца, повышению точности исполнения задаваемого сигнала.

2.1. Закономерности малоциклового деформирования и разрушения

Элементы конструкций авиационного двигателя в процессе эксплуатации испытывают циклические нагружения с различными амплитудами напряжений. В зависимости от величины возникающих переменных нагрузок материал выдерживает разное количество циклов до разрушения. В случае циклического нагружения выделяют несколько типов усталостного разрушения. Систематические исследования усталостных разрушений приведены в работах [31, 32, 50, 51, 52, 53, 54].

Процесс разрушения, возникающий при большом количестве циклов (10^4 – 10^7 циклов) и происходящий в основном при упругом деформировании,

называется разрушением от многоциклового усталости. Такой процесс накопления повреждений характерен для многих деталей газотурбинного двигателя (лопатки компрессора, корпуса, валы, шестерни) и происходит при нагружении с амплитудой напряжений, ниже предела текучести или близкой к нему. Другой тип разрушения – это разрушение от малоциклового усталости, который характеризуется появлением макроскопических пластических деформаций в каждом цикле и вызывается напряжениями, превышающим предел текучести материала. При этом разрушение обычно происходит в диапазоне от 10^1 до $5 \cdot 10^4$ циклов. Граница между малоцикловым и многоцикловым разрушением является условной и сдвигается для высокопрочных сплавов в сторону большей долговечности, а для хрупких – в сторону меньшей долговечности.

Изучение процесса накопления повреждений от малоциклового усталости происходит при жестком или мягком режиме нагружения. «Мягкий» режим в процессе нагружения задается поддержанием постоянной амплитуды напряжения, а при «жестком» режиме нагружения задается постоянная амплитуда деформации.

При циклическом нагружении в упругопластической области происходит образование петель механического гистерезиса (рисунок 2.1), которая характеризуется следующими параметрами:

- $\sigma_a(\epsilon_a)$ – амплитуда напряжений (деформаций) в цикле. $\sigma_a = 0,5(\sigma_{\max} - \sigma_{\min})$;
- $\sigma_{\max}, \sigma_{\min}$ ($\epsilon_{\max}, \epsilon_{\min}$) – максимальное, минимальное значения напряжений (деформаций) в цикле;
- σ_r (ϵ_r) – размах напряжений (деформаций) в цикле;
- ϵ_p – ширина петли гистерезиса (максимальная пластическая деформация в цикле);
- S – площадь петли механического гистерезиса (энергия пластического деформирования в цикле);
- R_σ (R_ϵ) – коэффициент асимметрии в цикле $R = \sigma_{\max} / \sigma_{\min}$.

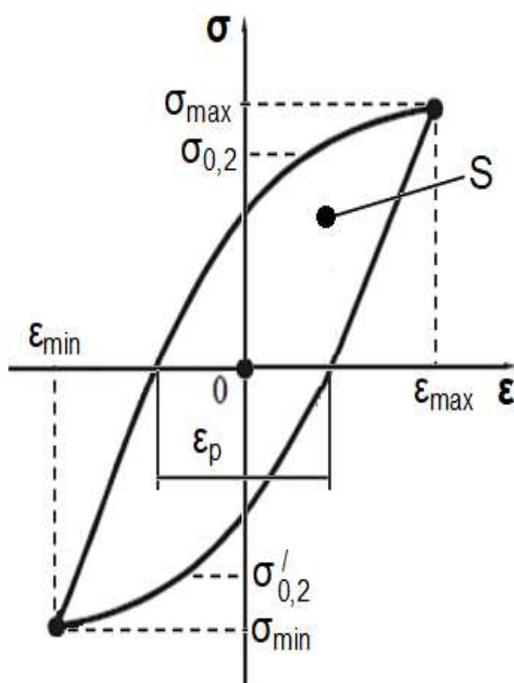


Рисунок 2.1 – Петля механического гистерезиса в координатах напряжение – деформация

По характеру изменения неупругих деформаций и напряжений в процессе циклического нагружения металлы и сплавы делятся на циклически упрочняющиеся, циклически разупрочняющиеся и циклически стабильные.

Циклически упрочняющиеся материалы – материалы, у которых ширина петли гистерезиса при мягком нагружении уменьшается, а максимальные напряжения цикла при жестком нагружении увеличиваются (рисунок 2.2).

В условиях мягкого нагружения для разупрочняющегося материала петля гистерезиса, наоборот, расширяется, а максимальные напряжения цикла при жестком нагружении уменьшаются (рисунок 2.3).

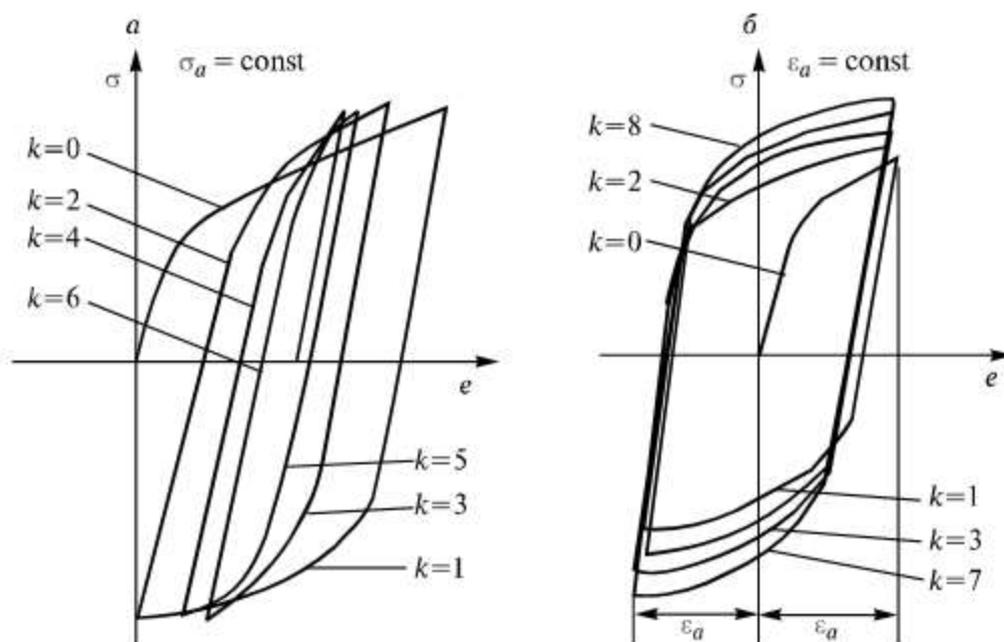


Рисунок 2.2 – Диаграммы деформирования циклически упрочняющегося материала при нагружении: а) мягком; б) жестком

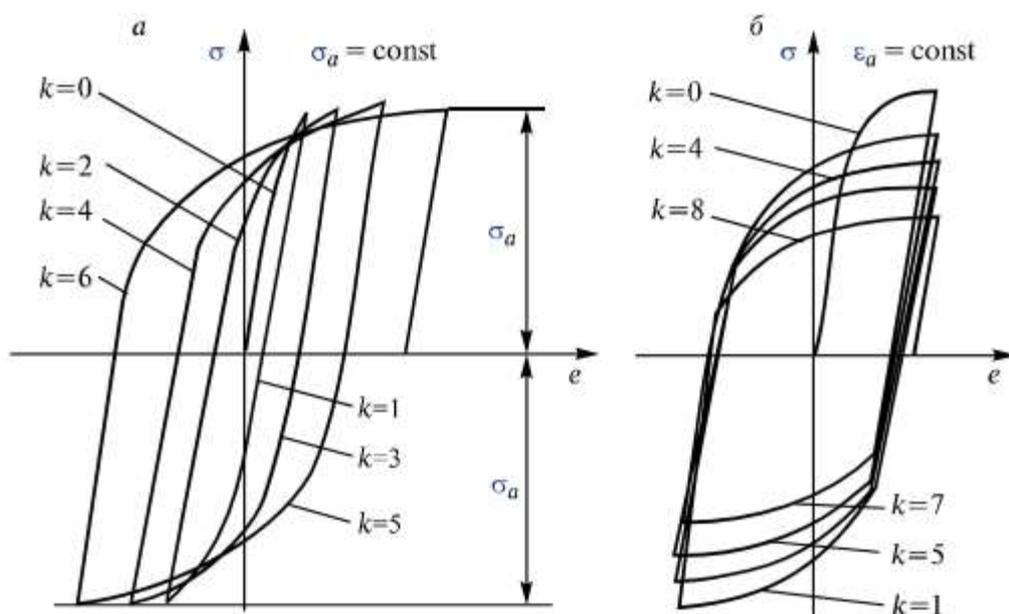


Рисунок 2.3 – Диаграммы деформирования циклически разупрочняющегося материала при нагружении: а) мягком; б) жестком

Существуют также циклически стабильные материалы, когда напряжение и пластические деформации в процессе нагружения остаются неизменными.

Для упрочняющегося материала режим жесткого нагружения приводит к разрушению быстрее, чем режим мягкого нагружения, в то время как для разупрочняющегося материала режим жесткого нагружения приводит к обратным результатам.

2.2. Методические особенности проведения экспериментальных исследований деформационных и прочностных свойств конструкционных материалов в условиях малоциклового усталости

Целью проведения усталостных испытаний является определение основных характеристик сопротивления усталости конструкционных материалов. Существуют различные методы определения усталостной долговечности, которые проводятся по различным схемам нагружения и при различных температурах.

В России порядок проведения усталостных испытаний регламентируется стандартом ГОСТ 25.502-79 «Методы механических испытаний металлов. Методы испытаний на усталость» [20]. Данный стандарт объединяет в себе испытания металлических материалов при циклическом нагружении в областях многоциклового и малоциклового усталости. Основным зарубежным стандартом в области проведения усталостных испытаний металлических материалов при одноосном нагружении является ASTM E 606-04 «Practice for strain-controlled fatigue test» [69].

Современные испытательные системы, высокоточные измерительные средства контроля напряжений и деформаций, современные программные обеспечения позволяют получать информацию об усталостных свойствах различных конструкционных материалов в условиях реализации сложных режимов термомеханических воздействий [15, 20].

Использование современного испытательного оборудования позволяет получать дополнительную информацию об испытаниях, а именно:

- непрерывную регистрацию в процессе нагружения диаграмм статического и циклического упругопластического деформирования;
- количество циклов нагружения в реальном времени;
- сохранение пиков и трендов цикла, что упрощает дальнейшую обработку данных.

Экспериментальные исследования конструкционных материалов в условиях малоциклового усталости при одноосном растяжении-сжатии, результаты которых представлены в настоящей работе, проводились на сервогидравлической испытательной системе Instron 8801 (рисунок 2.4). Данная система предназначена для статических испытаний на растяжение, сжатие и изгиб, а также позволяет проводить циклические испытания с различной формой волны и частотой до 20 Гц при комнатных и повышенных температурах до 1000°С.



Рисунок 2.4 – Фотография сервогидравлической испытательной системы Instron 8801

В состав испытательной системы входит двухколонная высокоточная рама со встроенными гидравлическими подъемниками верхней траверсы, захваты для удержания образцов, контролер Fast Track 8800, датчик нагрузки Dynacell, а

также основными компонентами являются программные обеспечения «Console» и «WaveMatrix». Испытательная машина управляется при помощи контроллера Fast Track 8800, предназначенного для сбора и обработки экспериментальных данных испытаний. Контроллер имеет автоматическую электронную систему защиты образца и оператора, возможность управления формой волны циклического нагружения, обеспечивает калибровку датчиков и контроль за параметрами испытания.

Передача усилия на образец передается при помощи захватов. Для минимизации изгибных деформаций необходимо обеспечивать соосность захватов. Сносность захватов обеспечивается с помощью юстировочного устройства Alignment Cell, представленного на рисунке 2.5, и программного обеспечения AlignPRO, представленного на рисунке 2.6. Устройство Alignment Cell обладает 8 тензодатчиками расположенными по два с разных сторон, что позволяет определять степень несоосности в горизонтальном направлении, а также определять угловое отклонение осей захватов испытательной машины. При помощи приспособления для выравнивания (рисунок 2.7) отклонение в горизонтальном направлении и по углу, указываемых в программе AlignPRO, позволяет достичь менее 2-3%.



Рисунок 2.5 – Юстировочное устройство Alignment Cell



Рисунок 2.6 – Основной вид окна программного обеспечения AlignPRO



Рисунок 2.7 – Устройство центрирования

В состав установки Instron 8801 входят специализированные датчики для регистрации усилий и перемещений. В процессе усталостных испытаний на сервогидравлических машинах подвижные элементы системы испытывают ускорение, из-за чего в дополнение к силе, прикладываемой к образцу, датчик нагрузки также регистрирует силу, возникшую при движении захватов и установленных приспособлений. Используемый датчик нагрузки Dynacell, представленный на рисунке 2.8, работает в диапазоне нагрузок ± 100 кН. Точность измерения датчика составляет 0,5% от измеряемой величины для нагрузок больших 0,2% от диапазона измерения (более ± 200 Н). Датчик имеет встроенный

акселерометр, установленный непосредственно на оси нагружения, который необходим для компенсации инерционных сил от движущихся масс.



Рисунок 2.8 – Фотография датчика нагрузки Dynacell

Для измерения перемещений с высокой точностью в рабочей зоне образца применяются датчики перемещений – экстензометры. Во время испытаний осевые перемещения регистрировались динамическим датчиком Instron 2620-603, приведенным на рисунке 2.9. Используемый датчик имеет базу измерения 10,0 мм, диапазон измерений ± 1 мм или $\pm 10\%$, линейность $\leq \pm 0,15\%$ от полной измерительной шкалы.



Рисунок 2.9 – Динамический экстензометр Instron 2620-603 для испытаний в условиях одноосного циклического деформирования

Для испытаний на малоцикловую усталость в условиях одноосного растяжения-сжатия рекомендуется использовать гладкие сплошные

цилиндрические образцы с диаметром рабочей части 10-12 мм. Для получения характеристик при статическом нагружении рекомендуется также использовать сплошные цилиндрические образцы. Концевые части образцов должны обеспечивать точность осевой центровки образца в захватах машины и могут быть выполнены в виде резьбовых головок.

Проведение двухосных усталостных испытаний регламентируется стандартом ГОСТ 25.502-79 «Методы механических испытаний металлов. Методы испытаний на усталость» [20], а также зарубежным стандартом в области проведения двухосных усталостных испытаний металлических материалов ASTM E 2207-02 «Practice for strain controlled axial-torsional fatigue test with thin-walled tubular specimens» [70].

Исследования при циклическом нагружении в условиях сложного напряженного состояния в настоящей работе реализованы на универсальной двухосевой сервогидравлической испытательной системе Instron 8850 (рисунок 2.10), предназначенной для испытания на растяжение-сжатие с частотой до 30 Гц, максимальной осевой нагрузкой 100 кН и кручение с максимальным крутящим моментом 1000 Нм.

Управление испытательной машиной осуществляется при помощи контроллера, содержащего платы управления для осей, модули регистрации и модули обработки данных для каждого датчика испытательной системы. Во время испытаний совместно осевое усилие и крутящий момент позволяет отслеживать датчик силы, расположенный в нижней части силовой рамы. Максимальная осевая нагрузка датчика составляет 160 кН и максимальный крутящий момент 1000 Нм.



Рисунок 2.10 – Фотография универсальной двухосевой сервогидравлической испытательной системы Instron 8850

Для регистрации осевых и сдвиговых деформаций в испытаниях на двухосную усталость использовался двухосевой экстензометр Epsilon 3550-010M, представленный на рисунке 2.11. Двухосевые экстензометры позволяют проводить циклические испытания с контролем деформационных параметров цикла и реализовать различные траектории жесткого нагружения при пропорциональном и непропорциональном изменении осевых и сдвиговых деформаций. Измерительная база экстензометра составляет 10 мм с полным диапазоном $\pm 5,0$ мм для осевого перемещения и $\pm 3^\circ$ для угла сдвига. Их уникальная конструкция напрямую измеряет угол поверхностной деформации

сдвига, что позволяет работать с образцами широкого диапазона диаметров без изменения калибровки. На основе показаний двухосевого датчика деформаций для каждого цикла записываются диаграммы деформирования, анализ которых позволяет определять комплекс параметров петель гистерезиса, характерных для режима малоциклового усталости, изучать закономерности механического поведения конструкционных сталей и сплавов. Для испытаний на малоцикловую усталость металлов рекомендуется использовать датчики перемещений с диапазоном измерений до 5%.

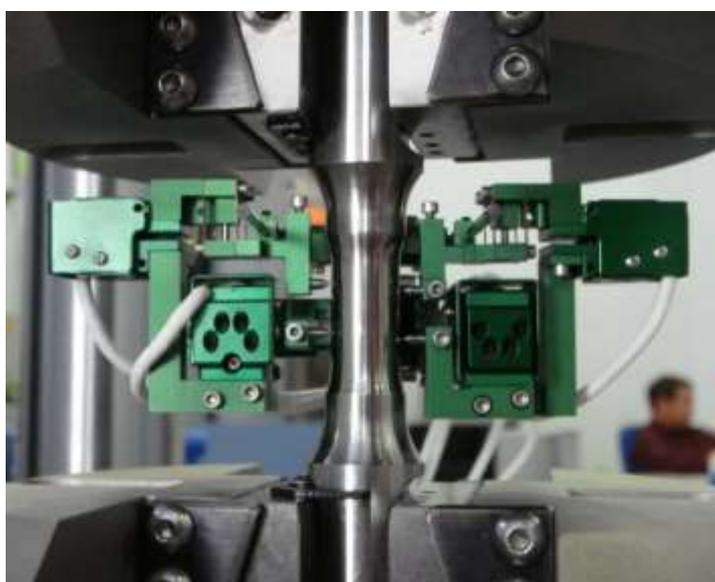


Рисунок 2.11 – Фотография экстензометра Epsilon 3550-010M, установленного на рабочей части образца

Непосредственно перед испытаниями на двухосную усталость проводится процедура калибровки экстензометра на поверенном двухосевом калибровочном стенде. Для проверки правильности установки экстензометра проводится предварительное циклирование с малой амплитудой деформации в пределах зоны упругости, определение значений модуля Юнга и модуля сдвига при статическом нагружении, а также оценивается линейность показаний экстензометра.

Для проведения испытания на кручение или одновременное действие растяжения-сжатия и кручения могут использоваться сплошные и трубчатые

образцы. Преимуществом использования тонкостенных трубчатых образцов является близкое к однородному напряженно-деформированное состояние, которое реализуется в кольцевом поперечном сечении рабочей части образца, что удобно для последующей интерпретации результатов испытаний. В отличие от трубчатых в сплошных образцах в поперечном сечении реализуется неоднородное напряженное состояние из-за зависимости величины касательных напряжений от расстояния между центром и рассматриваемой точкой сечения. Форму образцов рекомендуется разрабатывать с учетом требований стандартов ГОСТ 25.505–85 [21], ГОСТ 25.502–79 [20], а также учитывать особенности испытательного оборудования, а в частности, геометрию клиновидных захватов, базу измерения двухосевых экстензометров, и размеры высокотемпературной печи. Важным в изготовлении образцов является реализация равномерности толщины стенки рабочей части образца в окружном направлении, обеспечивающей близкое к однородному плоское напряженное состояние в поперечном сечении. Минимальная толщина стенки рабочей части образца не должна превышать 0,8 мм. А также важной особенностью является обеспечение хорошего качества внешней и внутренней поверхностей образца, на которых должны отсутствовать концентраторы напряжений в виде рисок от обрабатывающего инструмента, так как это может привести к существенному снижению долговечности.

В экспериментах на малоцикловую усталость в условиях совместного действия растяжения с кручением существует проблема изменения измерительной базы датчика. В процессе испытания на кручение меняется расстояние между точками крепления экстензомера на образце, вследствие чего изменяется база датчика на растяжение (рисунок 2.12).

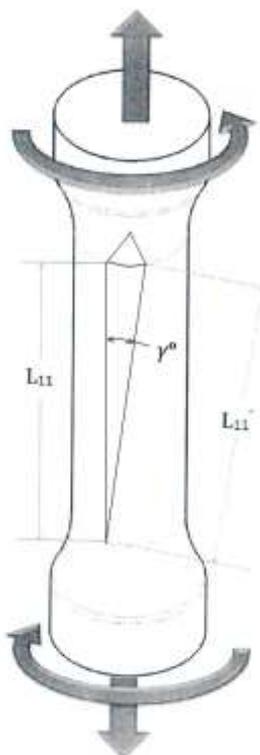


Рисунок 2.12 – Изменение базы датчика на растяжение при закручивании образца

База датчика пересчитывается по формуле:

$$l'_{11} = l_{11} \left(1 + \frac{\gamma^2}{2} \right), \quad (2.1)$$

где l'_{11} - база, считываемая датчиком в испытании, l_{11} – реальная база датчика на растяжение, γ – угол сдвига в rad.

Таким образом, реальная линейная деформация ε необходимо пересчитывать по следующей формуле:

$$\varepsilon = \varepsilon' - \frac{\gamma^2}{2}, \quad (2.2)$$

где ε' – деформация с датчика.

Для проведения испытаний применяются современные программные обеспечения, которые позволяют автоматизировать процесс малоциклового

нагружения образцов, проводить испытания с различными формами цикла, нагружения (мягкого, жёсткого) с требуемой асимметрией, останавливать машину при перегрузке или разрушении образца.

Интерактивная среда Console, представленная на рисунке 2.13, позволяет выполнять калибровку, настройку PID-параметров, производить установку образцов в режиме защиты образца, устанавливать ограничители и отслеживать показания датчиков во время проведения испытаний.

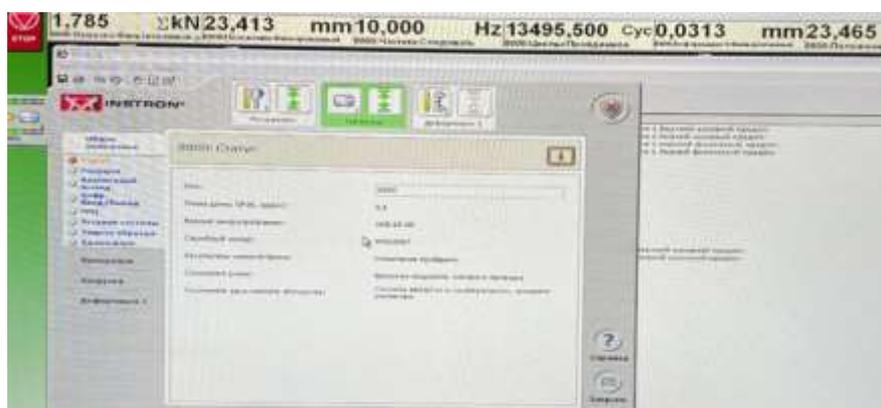


Рисунок 2.13 – Программное приложение «Console»

Для создания метода и непосредственного проведения испытаний в условиях одноосного малоциклового деформирования использовалась программа «Low-Cycle Fatigue 3» (рисунок 2.14), которая позволяет в автоматическом режиме вычислять значения модуля Юнга на участках нагрузки и разгрузки и отслеживать петли гистерезиса. Методы испытания содержат все параметры, необходимые для проведения испытания.

Для проведения испытаний с помощью данного программного обеспечения рекомендуется предварительная настройка PID-параметров канала нагрузки или деформации в зависимости от использования мягкого или жесткого нагружения.

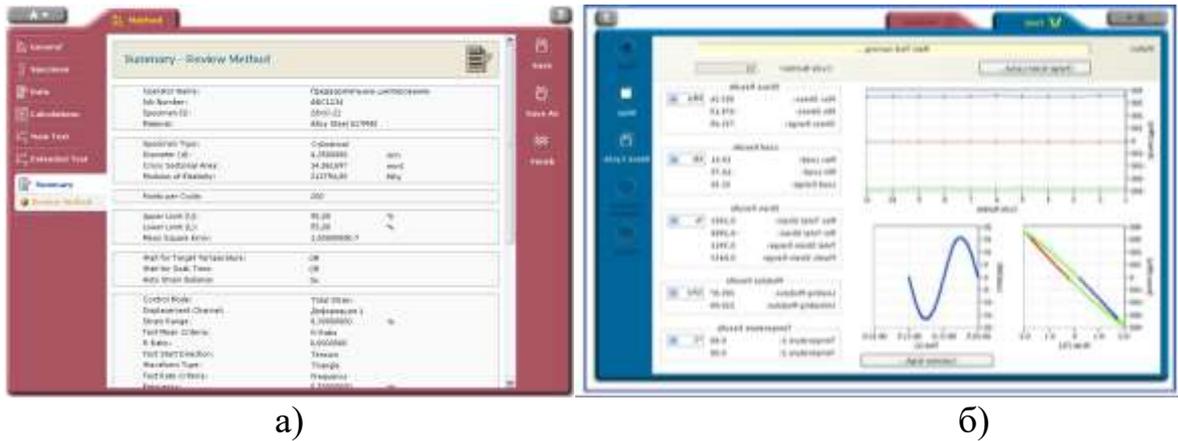


Рисунок 2.14 – Программа LCF3 для проведения испытаний на малоцикловую усталость: а) экран настройки метода испытаний; б) экран испытания

Настройка PID-параметров испытательной системы производится с целью обеспечения точной реализации параметров цикла. На рисунке 2.15 изображено окно настройки PID-параметров, где красной линией обозначена задаваемая форма волны, а зеленой линией – обрабатываемая.

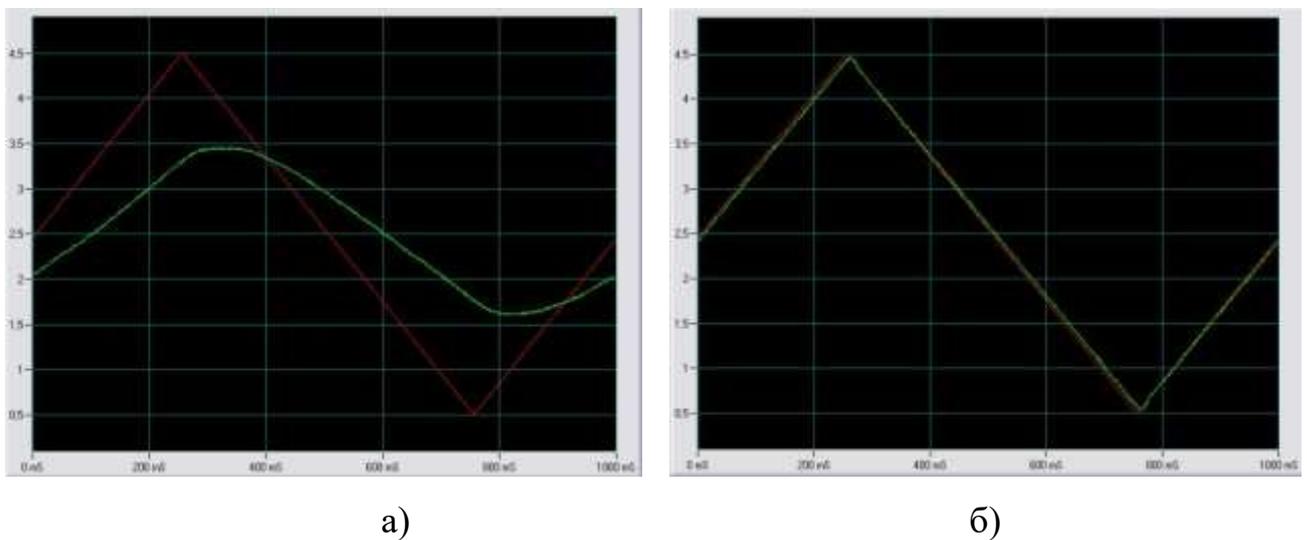


Рисунок 2.15 – Подбор PID параметров:
а) до подбора PID параметров, б) после подбора PID параметров
(красная линия – задаваемая форма волны, зеленая – обрабатываемая форма волны)

Подбор PID-параметров осуществлялся при проведении пробных циклических испытаний в упругой зоне с формой волны в виде треугольника и частотой нагружения, заданной в испытании. С помощью постепенного изменения PID-параметров обеспечивается практически полное совпадение задаваемой и обрабатываемой формы волны. Важно отметить, что амплитуда обрабатываемой волны не должна превышать задаваемую, так как это приводит к неконтролируемому росту амплитуды.

При более сложных испытаниях на малоцикловую усталость с переменными параметрами цикла или в условиях сложного напряженного состояния используется прикладное программное обеспечение WaveMatrix (рисунок 2.16). Приложение обладает возможностью пользовательской настройки и пошагового программирования, позволяя на каждом шаге для каждой оси задавать индивидуальную форму волны с контролем по нагрузке или перемещению, обеспечивая полный контроль над формой волны.

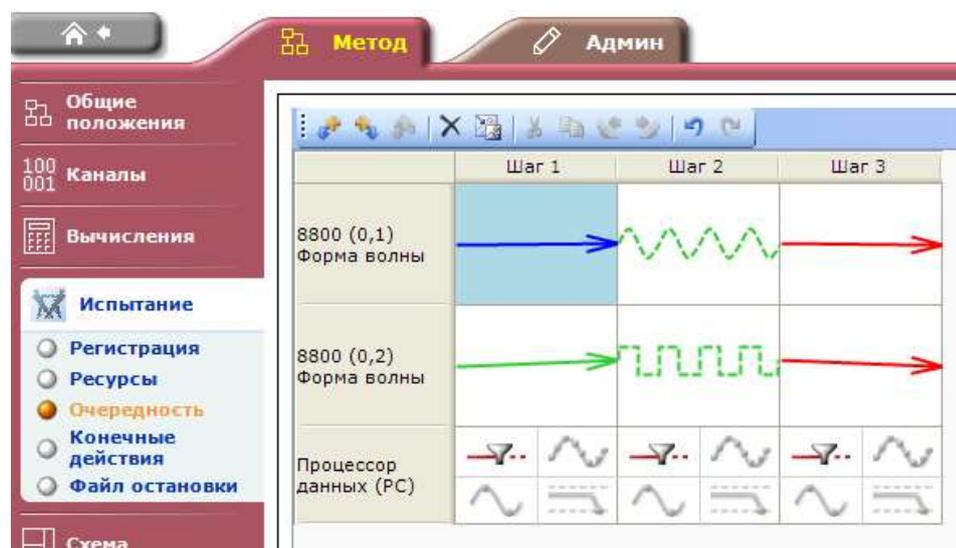


Рисунок 2.16 – Пошаговое задание метода испытания в прикладном программном обеспечении WaveMatrix

Для проведения испытаний со сложной формой цикла используются настройки с пользовательским заданием формы волны по точкам. Загружается текстовый файл, в котором по точкам задается любая форма волны (рисунок 2.17).

В файле прописывается время и амплитуда деформации/напряжений в условных единицах, где значение равное 1 – это заданный максимальный размах деформации/напряжений в испытании. Задавая, таким образом, форму волны по двум осям, возможно реализовать непропорциональное нагружение.

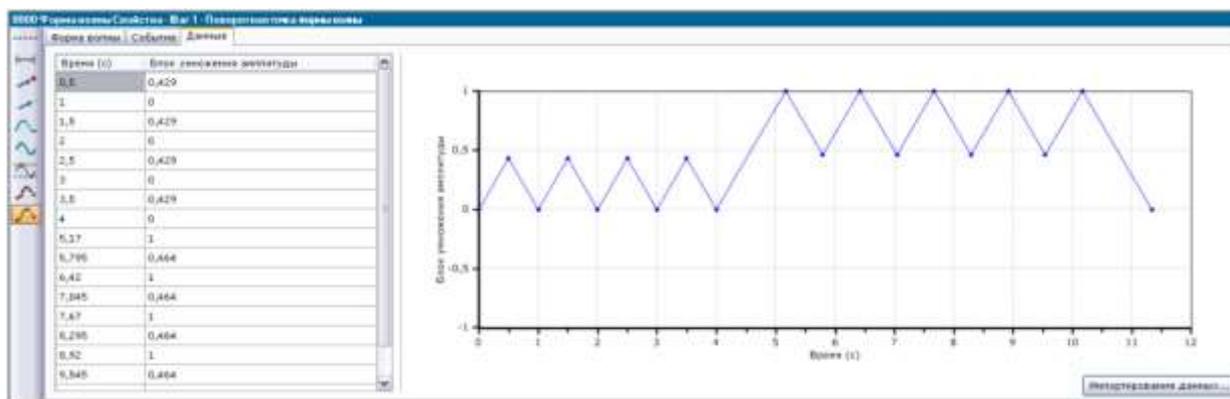


Рисунок 2.17 – Создание формы волны

Для испытаний на усталость подбор частоты является важным параметром. В испытаниях на малоцикловую усталость наблюдается пластическое деформирование материала, а предел текучести имеет ярко выраженную зависимость от скорости нагружения. При увеличении скорости нагружения предел текучести увеличивается, что влечет уменьшение вклада пластических деформаций в цикле, увеличивая долговечность. Поэтому для проведения испытаний металлов на малоцикловую усталость согласно ASTM E 606-04 рекомендуется использовать частоту нагружения 0,5-1 Гц. Для упрочняющихся материалов со временем в процессе испытания происходит вырождение петли гистерезиса. В связи с этим при достижении вырождения петли в испытании рекомендуется повышать частоту, так как влиянием пластических деформаций в дальнейших циклах можно пренебречь, что позволяет значительно сократить время испытания.

В процессе испытаний регистрируются осевое и касательное напряжения, осевая и сдвиговая деформация. Испытание проводится до полного разрушения образца или появления макротрещины. На основе регистрируемых опытных

данных проводится построение петель гистерезиса в координатах «осевое напряжение – осевая деформация» и «касательное напряжение – угол сдвига», а также изменение трендовых значений осевых и касательных напряжений с увеличением числа пройденных циклов.

Для определения циклической долговечности и оценки процесса накопления повреждений при малоцикловой усталости используется, полученная на основе аппроксимации экспериментальных данных, кривая малоцикловой усталости, которая описывается уравнением Басквина, связывающего число циклов до разрушения N с амплитудой деформации ε_a :

$$N_f = f(\varepsilon_a). \quad (2.3)$$

Пример кривой малоцикловой усталости гранулируемого никелевого сплава, полученной в условиях жёсткого нагружения при температуре 20°C, в двойных логарифмических координатах представлен на рисунке 2.18.

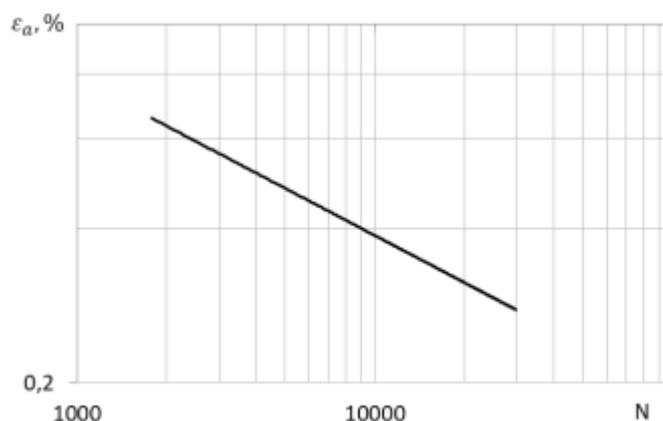


Рисунок 2.18 – Пример кривой малоцикловой усталости сплава на никелевой основе в двойных логарифмических координатах при жестком нагружении

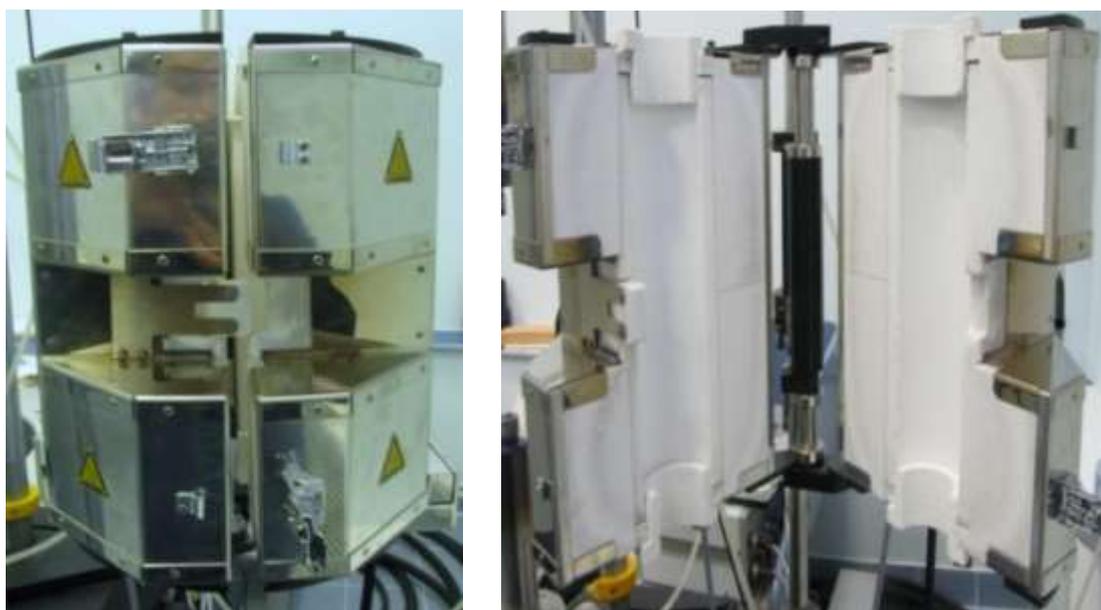
Таким образом, представленные в данном разделе современные системы для испытаний материалов, средства контроля нагрузок и перемещений, программные

средства управления, система сбора и обработки данных позволяют проводить испытания при различных условиях нагружения.

2.3. Методические аспекты проведения циклических испытаний при повышенной температуре

Проведение экспериментальных исследований малоциклового усталости при повышенной температуре имеют некоторые сходства проведением экспериментальных исследований при комнатной температуре. Применяются методики согласующиеся с российскими [20, 21, 22] и международными стандартами [69], которые определяют параметры одноосного циклического нагружения, форму и размеры образцов, режим контроля температуры в зоне испытания, а также необходимость использования динамических датчиков деформаций для построения диаграмм деформирования в каждом цикле испытаний.

Экспериментальное исследование малоциклового усталости при повышенной температуре в условиях одноосного нагружения проводились с использованием высокотемпературной трехзонной муфельной печи SF 1770, которая позволяет проводить испытания с максимальной температурой на образце до 1000°C. Размеры рабочей зоны печи составляют 90x358 мм. Внутри стенок печи установлены термопары, создающие выходной сигнал. Нагрев в печи регулируется при помощи трехзонного контроллера Instron SFL. Внешний вид печи и контроллера представлены на рисунках 2.19 и 2.20. Применяемые устройств нагрева позволяют обеспечивать стабильную температуру образца по всей длине в процессе испытания с точностью $\pm 1\%$.



а)

б)

Рисунок 2.19 – Фотография высокотемпературной печи SF 1770 в открытом (а) и закрытом (б) положениях



Рисунок 2.20 – Фотография трехзонного контроллера печи SFL

Для регистраций деформаций в условиях повышенных температур использовался специализированный высокотемпературный экстензометр фирмы Epsilon, представленный на рисунке 2.21, который имеет следующие характеристики: база измерения 10,0 мм, диапазон измерений $\pm 0,25$ мм или $\pm 2,5\%$, линейность $\leq \pm 0,1\%$ от полной измерительной шкалы.



Рисунок 2.21 – Фотография высокотемпературного датчика

Экспериментальные исследования малоциклового усталости конструкционных сплавов в условиях двухосного нагружения при повышенных температурах проводились с использованием высокотемпературной двухзонной печи Instron CP100409, предназначенной для проведения испытаний с максимальной рабочей температурой 1600°C. Внешний вид печи представлен на рисунке 2.22.



Рисунок 2.22 – Высокотемпературная печь Instron CP100409

В процессе испытаний перемещения регистрируются при помощи двухосевого высокотемпературного экстензометра Epsilon 3550HT-025M (база измерения 25 мм, диапазон измерений $\pm 10\%$, $\pm 2,5^\circ$). Высокотемпературный датчик устанавливается на поверхность образца через отверстия в керамической обкладке печи (рисунок 2.23).



Рисунок 2.23 – Установленный двухосевой экстензометр Epsilon 3550HT-025M

Перед испытаниями проводится проверка экстензометра на поверенном калибровочном стенде. На рисунке 2.24 показано тестирование высокотемпературного экстензометра на двухосевом калибраторе Epsilon Calibrator Stand.



Рисунок 2.24 – Тестирование высокотемпературного экстензометра перед испытанием на двухосевом калибраторе Epsilon Calibrator Stand

Для проведения испытаний на двухосную усталость при повышенной температуре рекомендуется использовать удлиненные трубчатые образцы, позволяющие разместить высокотемпературную печь между захватными частями испытательной машины. По сравнению с более короткими образцами у удлиненных образцов больше длина рабочей части на 14 мм, что необходимо для установки высокотемпературного датчика деформаций с базой 25 мм.

Контроль температуры на поверхности образца обеспечивался при помощи термопар, которые закреплялись к рабочей поверхности образца с разных сторон (рисунок 2.25). Рекомендуется использовать минимум две термопары для обеспечения равномерного нагрева образца по высоте рабочей части. По показаниям термопар определялся режим нагрева высокотемпературной печи. Показания с термопар выводились на автономный монитор для контроля температур Omega MDSi8A (рисунок 2.26)



Рисунок 2.25 – Термопары, закрепленные к образцу в рабочей части

Для минимизации движения потоков нагретого воздуха заглушивалось внутреннее отверстие образца, и укладывалась теплоизоляция из минеральной ваты по нижней и верхней поверхностям обкладки высокотемпературной печи.



Рисунок 2.26 – Автономный монитор контроля температуры Omega MDSi8A

Для стабильности работы испытательной системы при повышенных температурах необходимо исключить нагрев захватов машины и частей экстензометра в процессе испытания. С этой целью использовались два независимых чиллера (PolySciense и Caron) для охлаждения и поддержания постоянной температуры захватов и высокотемпературного экстензометра.

Перед началом эксперимента проводился предварительный нагрев образца до заданной температуры. Для режима нагрева обеспечивалось удержание около нулевого значения нагрузки, и снимались показания по каналу перемещения актуатора (рисунок 2.27).

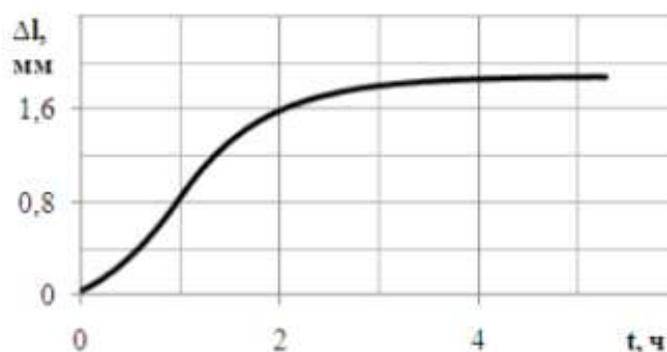


Рисунок 2.27 – Процесс расширения оснастки и образца при нагреве до заданной температуры и последующей выдержке (Δl – изменение положения актуатора при нулевой выдержке)

Выравнивание температуры по длине образца осуществлялось с помощью установки различных температур нагрева для каждой зоны печи. После выхода на рабочую температуру проводился режим выдержки для стабилизации температурных удлинений оснастки и образца. Выдержка прекращалась тогда, когда положение актуатора испытательной машины практически не изменялось во времени. По истечении времени удержания заданной температуры в термопечи практически прекращается процесс термического расширения оснастки и образца. Таким образом, обеспечивается компенсация температурных деформаций.

Продолжительность нагрева образца до температуры испытания составляет около 1 ч, время выдержки – от 2 до 5 часов.

Допустимые предельные отклонения от установленной температуры:

- ± 3 °С при температуре испытания до 600 °С;
- ± 4 °С при температуре испытания от 600 °С до 800 °С;
- ± 5 °С при температуре испытания от 800 °С до 1000 °С.

Представленное оборудование, диапазоны температурно-силового нагружения позволяют реализовывать испытания при высоких температурах, обеспечивая равномерный прогрев во всей рабочей зоне образца.

Выводы по главе

1. Рассмотрены параметры и особенности применения испытательного оборудования и программного обеспечения для экспериментального исследования в области малоциклового нагружения.

2. Рассмотрены методические вопросы проведения испытаний на малоцикловую усталость, связанные, в частности, с реализацией сложных циклов нагружения с использованием прикладного программного приложения, сложного напряженного состояния, реализуемого с помощью двухосевой испытательной

машины, а также с реализацией испытаний при повышенных температурах с использованием муфельных печей и высокотемпературных датчиков деформаций.

3. Даны рекомендации по проведению испытаний материалов при сложных режимах термомеханических воздействий, касающиеся выбора геометрии образцов, частоты нагружения, обеспечения контроля температуры на образце.

Основные результаты, содержащиеся в главе, отражены в публикациях автора [38, 40, 126, 176].

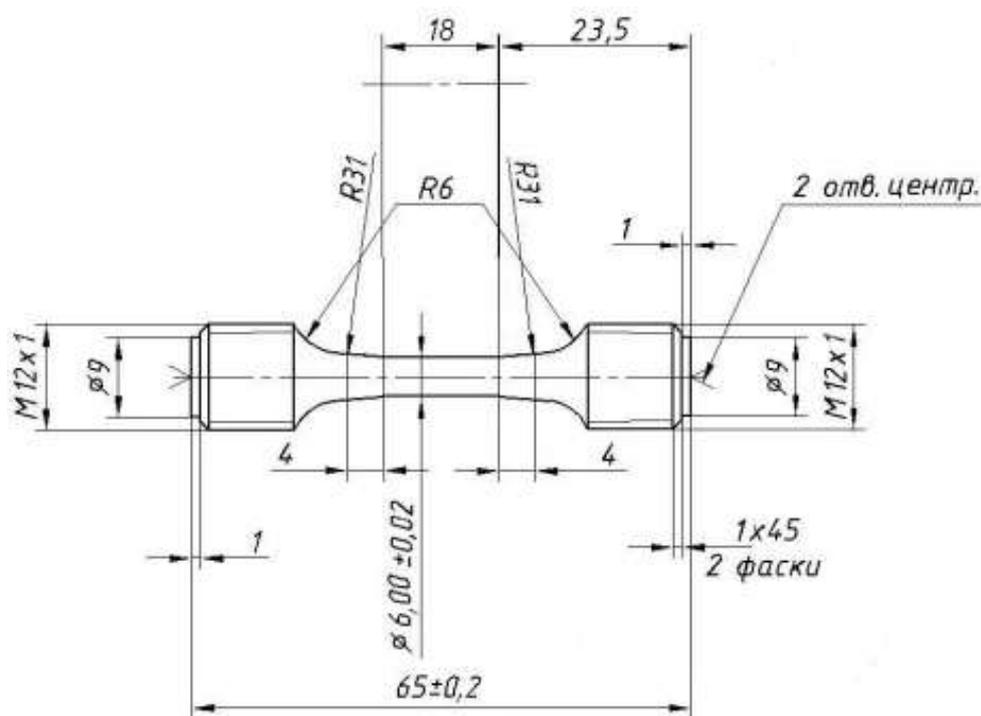
3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ОДНООСНОМ ЦИКЛИЧЕСКОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ

Малоцикловое усталостное разрушение является основным видом отказа турбинных лопаток из-за повторяющихся пусков и остановок во время эксплуатации. Данная глава содержит результаты исследования механического поведения малоциклового усталости конструкционных сплавов в условиях одноосного нагружения. Исследовано влияние сложной формы цикла нагружения на циклическую долговечность и механическое поведение никелевого сплава. Проведено экспериментальное исследование оценки долговечности алюминиевого сплава Д16Т в условиях малоциклового усталости при одноосном нагружении с переменными параметрами цикла. Проведен анализ влияния повышенных температур (до 400°С) на долговечность титанового сплава.

3.1. Исследование механического поведения никелевого сплава при малоциклового усталости в условиях одноосного нагружения

Исследован жаропрочный никелевый сплав, обладающий высокой прочностью. Данные сплавы используются в авиационной и ракетной технике в качестве материалов лопаток и дисков в горячей части газотурбинного и ракетного двигателей, предназначенных для эксплуатации при больших нагрузках и температурах.

В Центре экспериментальной механики ПНИПУ проведены испытания на малоцикловую усталость в условиях одноосного нагружения на сплошных цилиндрических образцах из никелевого сплава. На рисунке 3.1 представлен эскиз и внешний вид образцов, используемых для проведения испытаний на малоцикловую усталость. Размеры приведены в миллиметрах.



а)



б)

Рисунок 3.1 – Эскиз (а) и внешний вид (б) сплошного цилиндрического образца

Схемы жесткого нагружения представлены на рисунке 3.2. Использовался положительный цикл деформаций с коэффициентом асимметрии $R=0$ и $R=0,35$. При этом размах деформации $\varepsilon_p = 2 \cdot \varepsilon_a$ выбирался из диаграмм деформирования, полученных из проведённых до этого экспериментов на одноосное растяжение. Частота циклирования поддерживалась постоянной в продолжение каждого испытания и равнялась 0,5 Гц. Для проведения испытаний при нормальной температуре на МЦУ гранулируемого никелевого сплава были использованы две партии по 13 образцов.

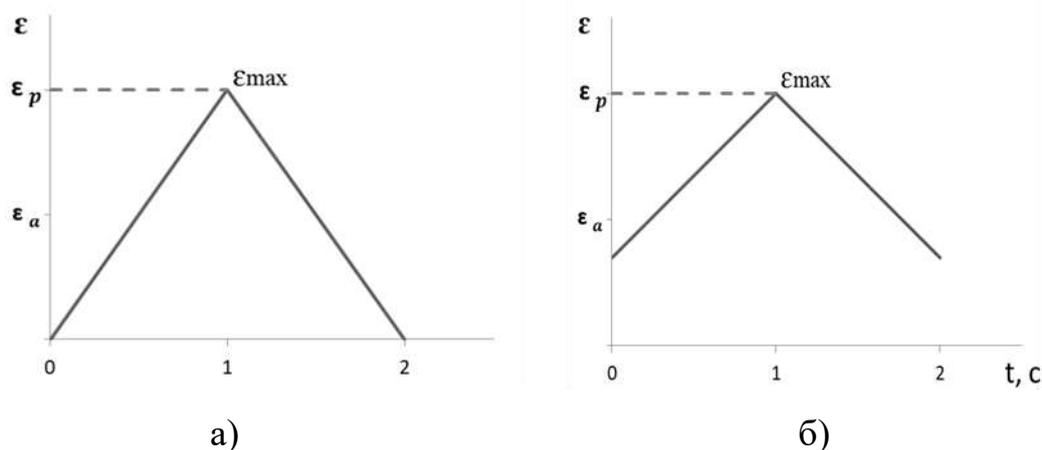


Рисунок 3.2 – Схемы нагружения:

а) простой цикл, $R=0$; б) асимметричный цикл, $R=0,35$

По результатам экспериментальных данных были построены кривые малоциклового усталости, зависимости амплитуды задаваемой деформации ε_a от числа циклов в испытании N . На рисунке 3.3 представлены совмещенные кривые в виде эмпирических линий регрессии для двух форм циклов, построенные в логарифмических координатах.

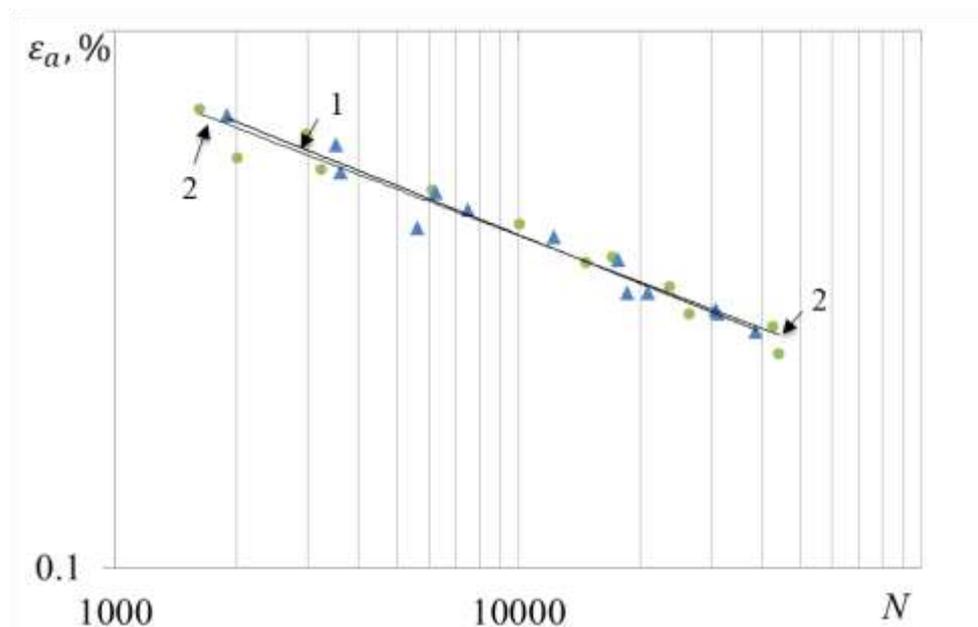


Рисунок 3.3 – Совмещённые кривые малоциклового усталости в логарифмических координатах с коэффициентом асимметрии: 1) $R=0$ (\blacktriangle); 2) $R=0,35$ (\bullet)

Отмечается, что при одинаковом максимальном значении деформаций коэффициент асимметрии не влияет на усталостную долговечность никелевого сплава в диапазоне амплитуд деформаций от 0,30% до 0,70%. Полученные результаты испытаний далее будут применяться для проверки применения нелинейной модели накопления повреждений Марко-Старки.

3.2. Исследование долговечности никелевого сплава при малоцикловой усталости и сложной форме цикла

Важное значение имеет форма цикла, которая связана с условиями эксплуатации. Усложненный цикл М-образной формы, представленный на рисунке 3.4, представляет упрощенный типовой полетный цикл двигателя магистрального самолета. Проведена обработка полученных ранее в Центре экспериментальной механики ПНИПУ опытных данных усталостного поведения никелевого сплава [29]. Испытания на малоцикловую усталость осуществились в условиях растяжения-сжатия в режиме жёсткого нагружения. Использовалась партия из 13 образцов. В экспериментах использовался отнулевой положительный цикл деформаций с коэффициентом асимметрии $R=0$. Скорость и частота циклирования поддерживалась постоянной в продолжение каждого испытания.

Проведено сопоставление экспериментальных данных усложненной М-образной формы цикла с экспериментальными данными в виде одного цикла простой треугольной формы с коэффициентом асимметрии $R=0$, которые представлены в разделе 3.1 (рисунок 3.2 а).

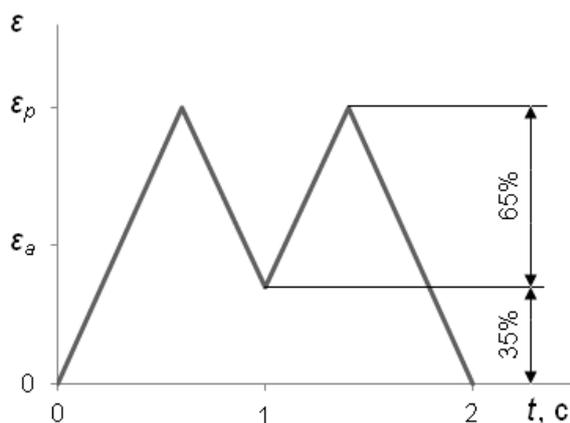


Рисунок 3.4 – Сложный (М-образный) цикл,
где ε_a – амплитуда деформации, ε_p – размах деформации

На рисунке 3.5 приведены совмещенные кривые малоциклового усталости в логарифмических координатах при простой треугольной (1) и усложненной (2) формах цикла. Наблюдается снижение циклической долговечности никелевого сплава по усложненной форме цикла по сравнению с циклами треугольной формы на 10–25 % в зависимости от уровня амплитуды осевых деформаций. Например, при осевой деформации равной 0,30% снижение долговечности сплава происходит на 25 %.

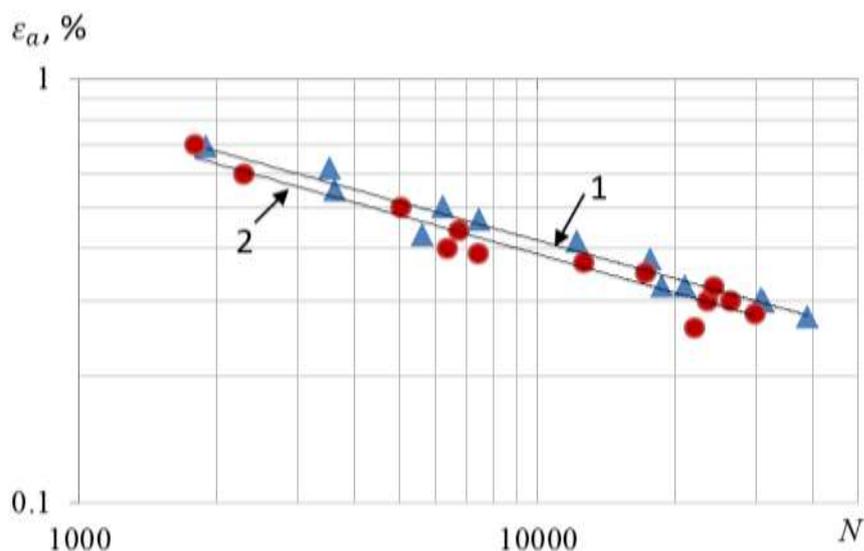


Рисунок 3.5 – Совмещённые кривые малоциклового усталости в логарифмических координатах: 1) треугольная форма цикла (▲),
2) М-образная форма цикла (●)

На рисунке 3.6 представлены экспериментальные данные в виде эмпирических линий регрессии с границами 95%-ной доверительной области, построенные в логарифмических координатах. Построение доверительных областей производилось при помощи линейного регрессионного анализа результатов испытаний [60].

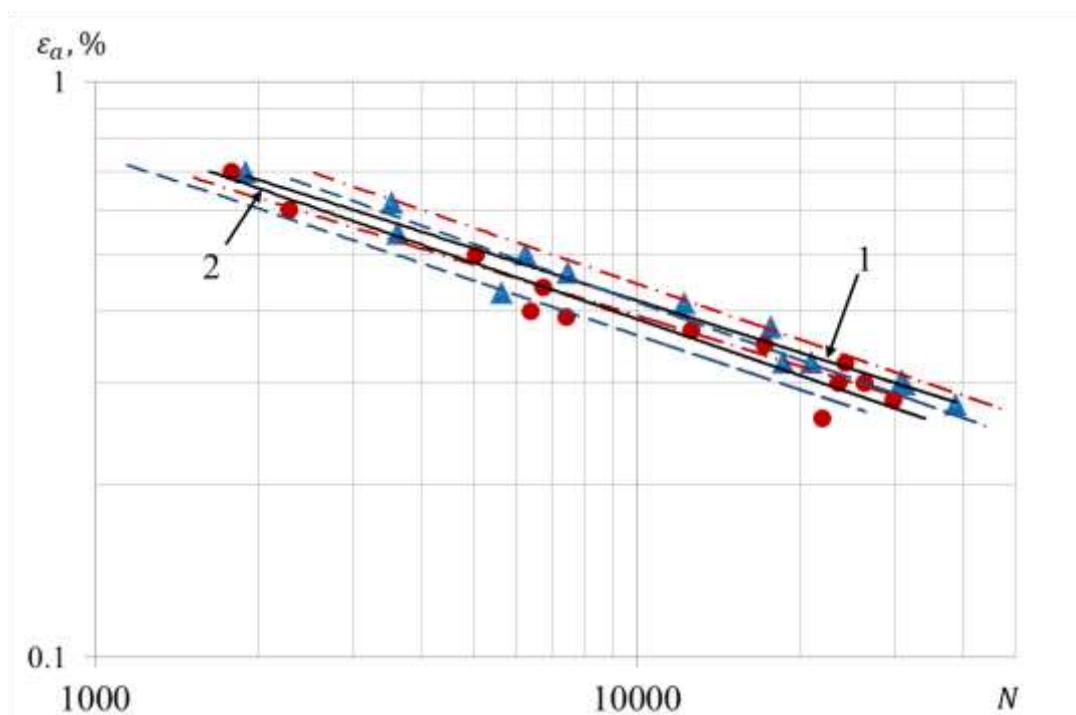


Рисунок 3.6 – Совмещённые кривые малоциклового усталости в логарифмических координатах с доверительными областями при простой (кривая 1) и сложной (кривая 2) формах цикла

Для исследования закономерностей механического поведения никелевого сплава проведен анализ петель механического гистерезиса. Построены зависимости пластической деформации, коэффициента асимметрии от амплитуды деформации с постоянными и переменными параметрами цикла. Зависимости представлены на рисунках 3.7 и 3.8. Наблюдается рост пластической деформации и сжимающих напряжений с увеличением полной амплитуды осевой деформации.

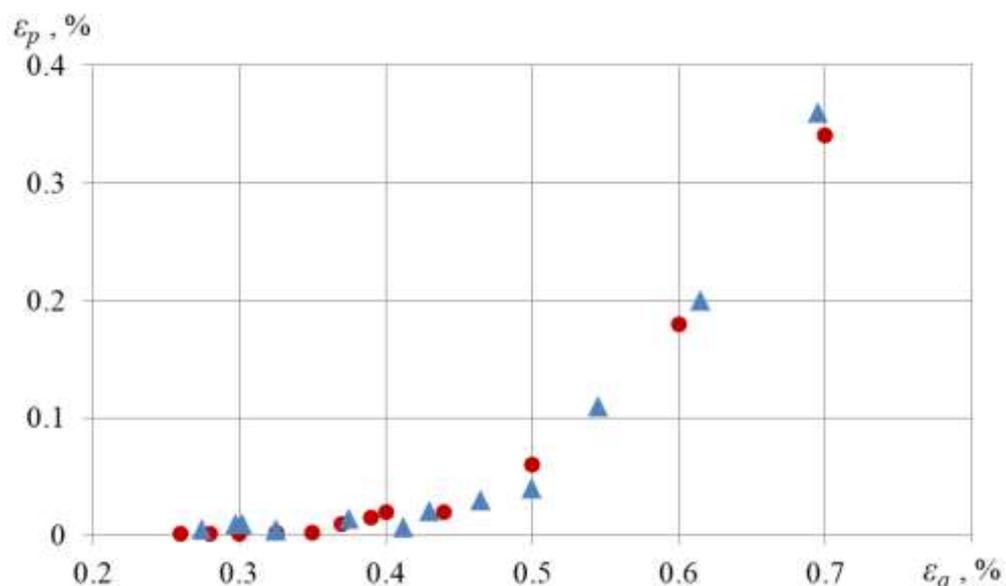


Рисунок 3.7 – Зависимость пластической деформации от амплитуды деформации при простой (▲) и сложной (●) формах цикла

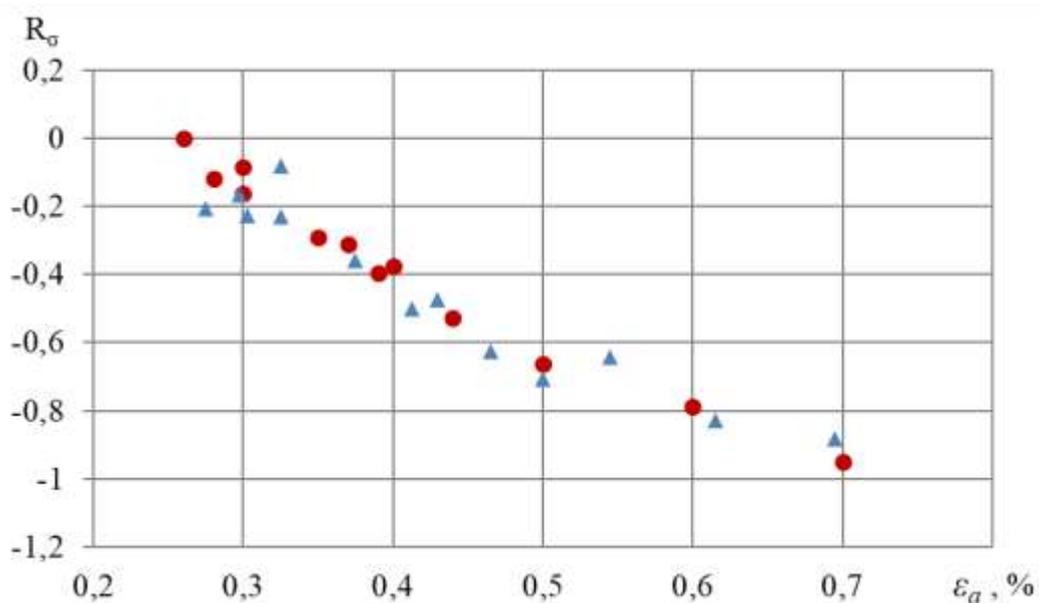


Рисунок 3.8 – Зависимость коэффициента напряжений от амплитуды деформации при простой (▲) и сложной (●) формах цикла

Представленные результаты экспериментальных исследований никелевого сплава далее будут использоваться как основа для проверки адекватности модели суммирования повреждений.

3.3. Исследование долговечности алюминиевого сплава в условиях малоциклового усталости при блочном циклическом нагружении

В условиях эксплуатации конструкции могут работать в условиях нестационарных режимов. В настоящее время распространены испытания со ступенчато изменяющейся нагрузкой, когда некоторое время параметры цикла не меняются, а затем меняются скачкообразно.

Экспериментальное исследование оценки циклической долговечности при малоциклового усталости в условиях одноосного блочного нагружения, а также оценка влияния дополнительных подциклов на суммарную повреждаемость проводились на образцах из алюминиевого сплава Д16Т. Химический состав сплава: Fe, Si<0.5, Mn 0.3-0.9, Cr<0.1, Ti<0.15, Al 90.9-94.7, Cu 3.8-4.9, Mg 1.2-1.8, Zn<0.25, Ti+Zr<0.2. Алюминиевый сплав Д16Т широко применяется для изготовления деталей авиационной промышленности. Благодаря высокой прочности по отношению к массе, сплав используется в компонентах, подвергающихся высоким нагрузкам.

Программа экспериментальных исследований сплава Д16Т включала комплексы циклических испытаний при простых формах цикла с постоянными параметрами и различных блоков, представляющих собой циклы сложной формы, состоящие из комбинаций циклов простой формы с различными параметрами.

Для проведения комплекса испытаний на малоцикловую усталость с постоянными параметрами цикла было выбрано несколько уровней нагружения с различными амплитудами и коэффициентами асимметрии. Испытания проводились с контролем по осевой деформации с формами цикла в виде треугольника (рисунок 3.9). Заданные параметры циклов простой формы, количество испытанных образцов и полученные средние значения долговечности приведены в таблице 3.1.

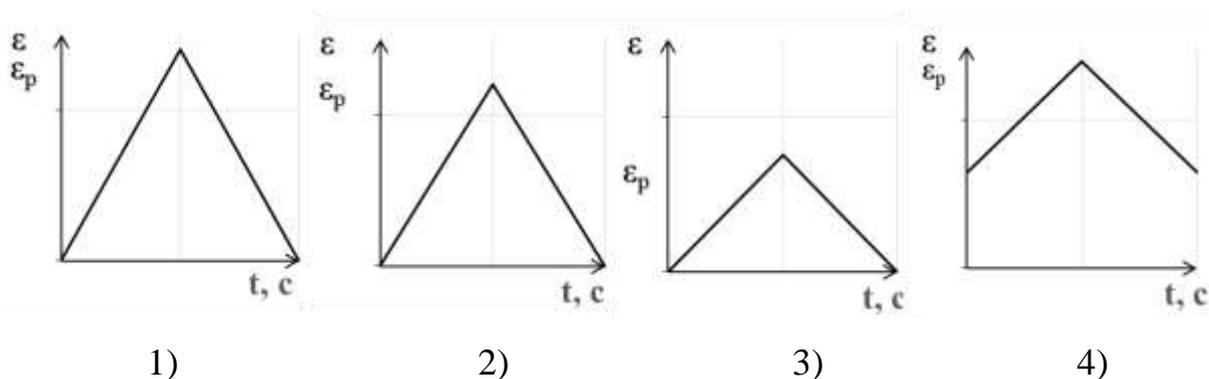


Рисунок 3.9 – Схемы нагружения для испытаний с постоянными параметрами

Таблица 3.1 – Результаты испытаний алюминиевого сплава Д16Т на малоцикловую усталость с постоянными параметрами цикла

№ схемы нагружения	Количество образцов	Амплитуда деформаций в цикле, ε_a , %	Размах деформации в цикле, ε_p , %	Коэффициент асимметрии, R	Среднее число циклов в группе, N
1	3	0,70	1,40	0,00	522
2	3	0,60	1,20		3360
3	5	0,38	0,76		37973
4	5	0,38	0,76	0,46	19016

По полученным экспериментальным данным испытаний на малоцикловую усталость с постоянными параметрами цикла и коэффициентом асимметрии $R=0$ построена кривая усталости в логарифмических координатах, представленная на рисунке 3.10.

Получена эмпирическая формула линии регрессии, которая описывается степенной функцией:

$$\varepsilon_a = 1.902 \cdot N^{-0.153}. \quad (3.1)$$

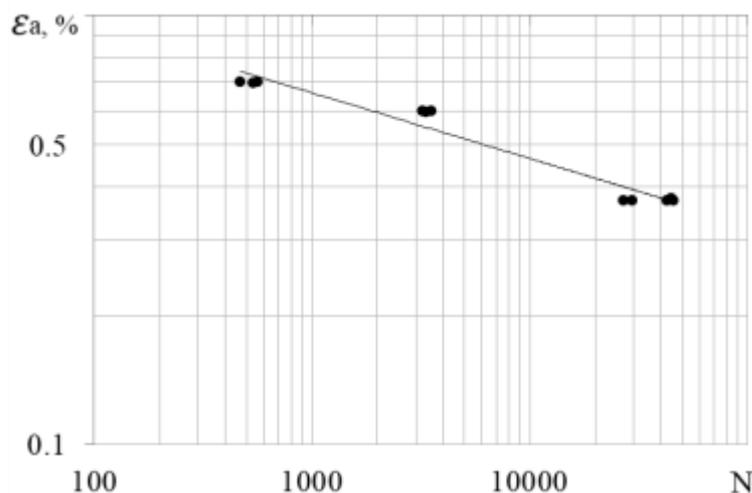


Рисунок 3.10 – Кривая малоциклового усталости сплава Д16Т при коэффициенте асимметрии $R=0$

По кривой малоциклового усталости заново определены значения циклической долговечности для нескольких уровней деформаций. Полученные значения представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2. Долговечность алюминиевого сплава Д16Т, определенная по кривой малоциклового усталости с коэффициентом асимметрии $R=0$

№ группы	Амплитуда деформаций в цикле, ϵ_a , %	Количество циклов, N
1	0,70	688
2	0,38	40660
3	0,40	26667
4	0,50	6203

Для исследования циклической долговечности алюминиевого сплава при переменных параметрах цикла, были проведены испытания по нескольким блокам нагружения. Сложные формы циклов в виде блоков состояли из различных комбинаций групп циклов простой формы с различной амплитудой деформации и коэффициентами асимметрии.

Параметры групп подциклов, из которых составлялись блоки, соответствуют параметрам циклов, приведенным в таблице 3.2 с коэффициентом асимметрии 0

(1-4 группы) и в таблице 3.1 с коэффициентом асимметрии 0,46 (5 группа). Используемые схемы циклического блочного нагружения, состоящие из различных комбинаций подциклов, представлены на рисунке 3.11.

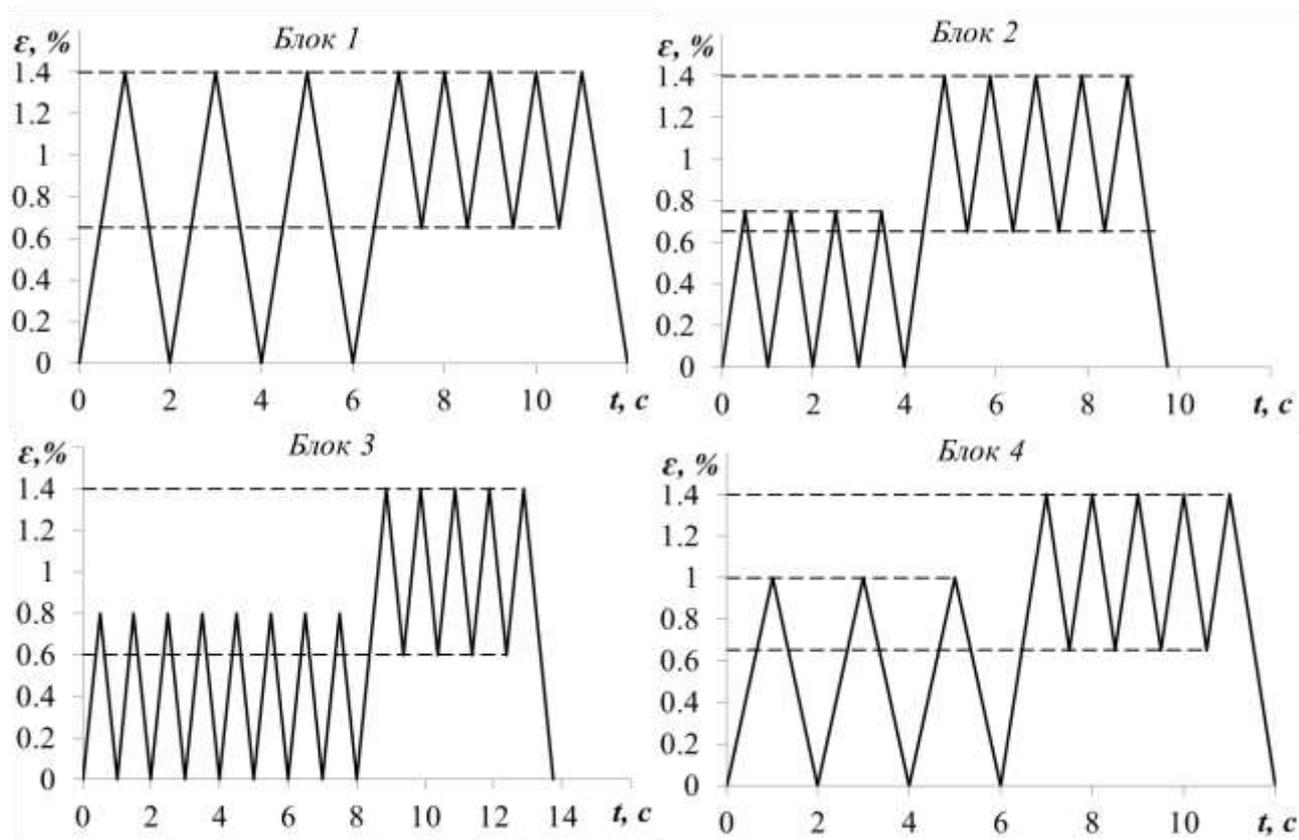


Рисунок 3.11 – Схемы изменения осевой деформации при блочном циклическом деформировании

До разрушения считалось общее количество блоков. Состав блоков по числу циклов включенных групп и результаты испытаний на малоцикловую усталость при блочном циклическом деформировании представлены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Состав блоков из циклов с постоянными параметрами и результаты испытаний при блочном нагружении

№ блока	Количество испытанных образцов	Число блоков до разрушения, N
1 блок: 4 цикла из 1 группы, 4 цикла из 5 группы	5	131
		135
		95
		261
		281
Среднее число циклов, $N_{1Б}$		181
Среднеквадратическое отклонение, S		38
Доверительный интервал, Δx		±104
2 блок: 4 цикла из 2 группы, 1 цикл из 1 группы, 4 цикла из 5 группы	6	610
		556
		723
		462
		508
		416
Среднее число циклов, $N_{2Б}$		546
Среднеквадратическое отклонение, S		45
Доверительный интервал, Δx		±116
3 блок: 8 циклов из 3 группы, 1 цикл из 1 группы, 4 цикла из 5 группы	3	379
		388
		368
Среднее число циклов, $N_{3Б}$		378
Среднеквадратическое отклонение, S		2,3
Доверительный интервал, Δx		±10
4 блок: 3 цикла из 4 группы, 1 цикл из 1 группы, 4 цикла из 5 группы	3	437
		372
		407
Среднее число циклов, $N_{4Б}$		405
Среднеквадратическое отклонение, S		19
Доверительный интервал, Δx		±80

Проведена статистическая обработка результатов испытаний по методу коэффициентов Стьюдента с доверительной вероятностью 0,95 по следующим формулам:

$$\bar{x} = \frac{1}{N} (\sum_{i=1}^n x_i), \quad (3.2)$$

$$S = \sqrt{\frac{(\sum_{i=1}^N (\bar{x} - x_i)^2)}{N(N-1)}}, \quad (3.3)$$

$$\Delta x = S * t_{\alpha}, \quad (3.4)$$

где x_i – полученные значения долговечностей, \bar{x} – средние значения, S – среднеквадратическое отклонение, N – количество испытаний, Δx – доверительный интервал, t_{α} – коэффициент Стьюдента. Результаты статистической обработки представлены в таблице 3.3.

Таким образом, получены новые экспериментальные данные о механическом поведении алюминиевого сплава Д16Т при программном циклическом деформировании, состоящем из четырех блоков циклов с различными параметрами. Полученные экспериментальные данные сравнивались с результатами испытаний 1 группы (простой треугольный цикл), долговечность которого по кривой малоциклового усталости составила 688 циклов. Так как в блок 1, состоящий из двух групп циклов, входит четыре цикла 1 группы с максимальным размахом деформаций, долговечность при нагружении по данному блоку составила 722 цикла. Таким образом, данный блок по долговечности эквивалентен обычному треугольному циклу и не оказывает существенного влияния на долговечность алюминиевого сплава Д16Т. По блокам 2, 3 и 4, состоящих из трех групп циклов, отмечено снижение циклической долговечности алюминиевого сплава по средним значениям на 20-45 %. При этом доверительные интервалы для этих блоков пересекаются, что можно сказать о несущественном влиянии на долговечность подциклов с коэффициентами асимметрии 0 их количества в блоке. Однако наличие таких подциклов существенно снижает долговечность по сравнению с 1 блоком нагружения.

Представленный комплекс результатов экспериментальных исследований алюминиевого сплава Д16Т далее будет применяться для оценки возможности использования нелинейной модели суммирования повреждений Марко-Старки для случая блочного нагружения.

3.4. Механическое поведение титанового сплава при малоцикловой усталости в условиях повышенных температур

Эксплуатация многих деталей авиационного газотурбинного двигателя происходит при высоких температурах. Поэтому важным является получение экспериментальных результатов для конструкционных материалов в условиях повышенных температур.

Проведено исследование влияния повышенных температур (до 400°С) на характеристики сопротивления малоцикловой усталости в условиях растяжения-сжатия при жестком и мягком нагружениях. Для проведения испытаний использовались сплошные цилиндрические образцы из титанового сплава. Титановые сплавы обладают высокой прочностью, жаропрочностью, хорошей пластичностью и применяются для изготовления деталей и узлов вентилятора и компрессора низкого давления авиационного двигателя (диски, лопатки, детали статора, корпусные детали), которые работают при повышенной температуре.

Испытания проводились с контролем по осевой деформации в диапазоне температур от 22°С до 200°С и с контролем по напряжениям в диапазоне от 22°С до 400°С при различных значениях коэффициента асимметрии. Схемы нагружения представлены на рисунке 3.12. Частота циклирования в процессе каждого испытания поддерживалась постоянной и равнялась 0,5 Гц. Условия нагружения представлены в таблице 3.4. Считалось, что образец разрушен, если максимальные напряжения в цикле снижались на 50 % по сравнению с предыдущим циклом.

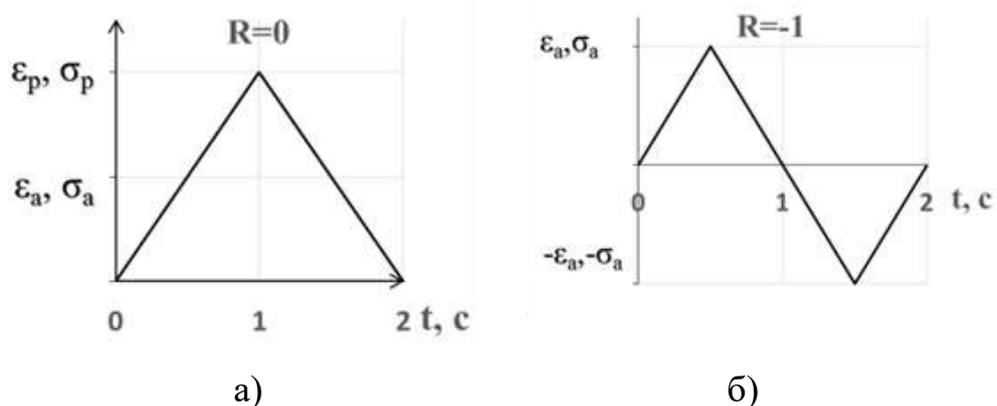


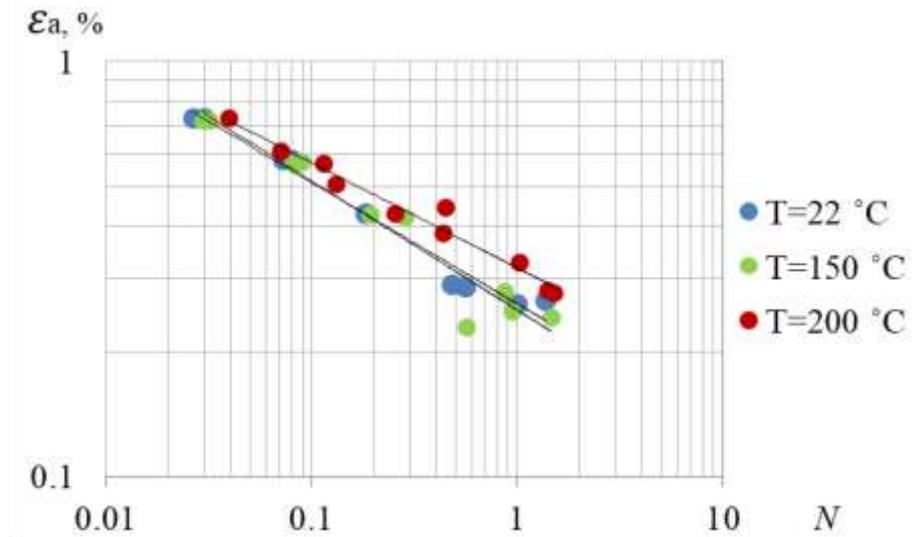
Рисунок 3.12 – Схемы нагружения в испытаниях на малоцикловую усталость при повышенных температурах с коэффициентом асимметрии: а) $R=0$, б) $R=-1$

Таблица 3.4 – Исходные данные для испытаний

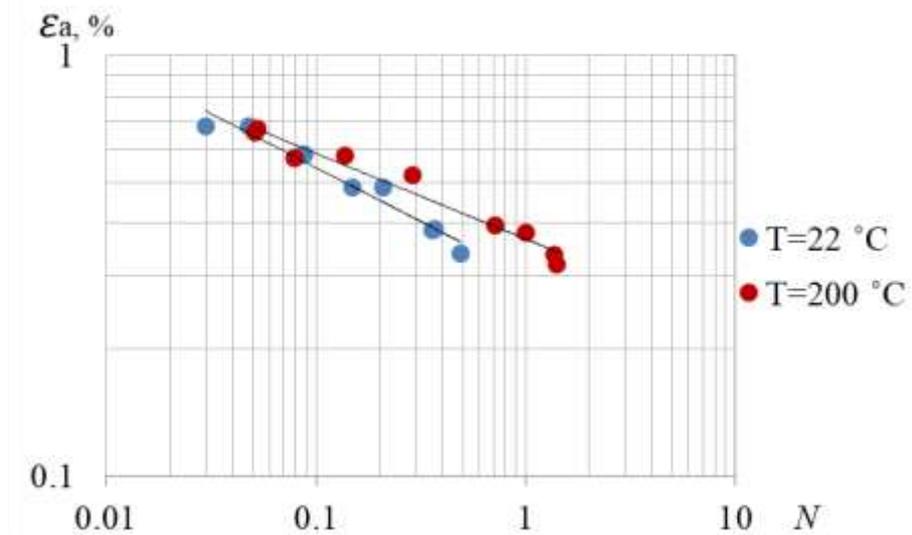
Температура, $T^{\circ}C$	Коэффициент асимметрии, R	Контролируемый параметр в испытании	Количество образцов
22	0	ε_a	10
150			10
200			10
22	-1		10
200			9
22	0		σ_a
22	-1	6	
300	0	5	
300	-1	10	
400	0	4	
400	-1	5	

На основе полученных экспериментальных данных проведена оценка влияния температуры на циклическую долговечность титанового сплава. Построены зависимости циклической долговечности от амплитуды задаваемой деформации ε_a / напряжения σ_a при различных температурах и коэффициентах асимметрии в логарифмических координатах, представленные на рисунках 3.13 и 3.14. Значения долговечностей приведены в относительных единицах. Для серий

испытаний с контролем по деформациям за единицу принимается значение долговечности при амплитуде деформаций 0,3 % и коэффициенте асимметрии 0. Для серий испытаний с контролем по напряжению за единицу принимается значение долговечности при амплитуде напряжений 350 МПа и коэффициенте асимметрии 0.

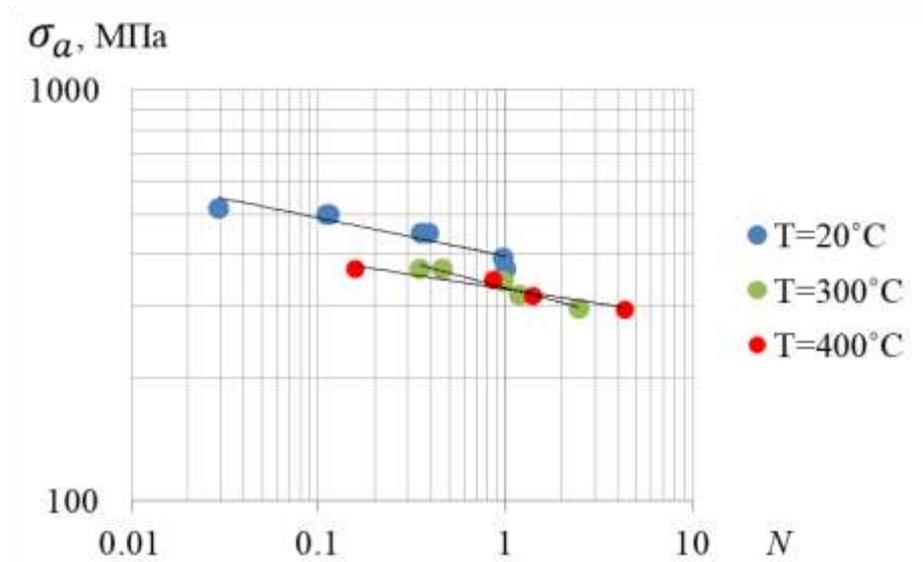


а)

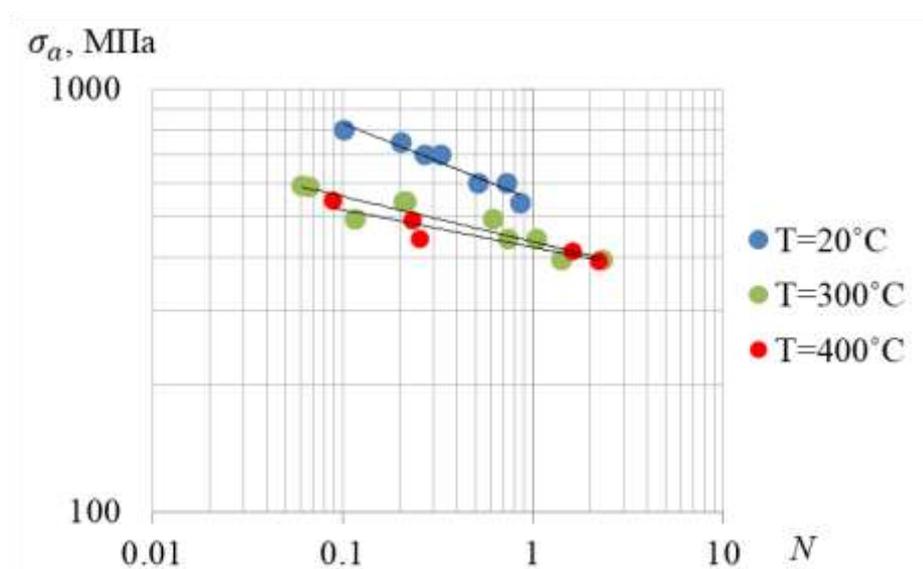


б)

Рисунок 3.13 – Кривые малоциклового усталости при различных температурах с коэффициентом асимметрии: а) $R_\epsilon = 0$, б) $R_\epsilon = -1$ (испытания с контролем по деформациям)



а)



б)

Рисунок 3.14 – Кривые малоциклового усталости, представленные в логарифмических координатах, при различных температурах с коэффициентом асимметрии: а) $R_\sigma = 0$, б) $R_\sigma = -1$ (испытания с контролем по напряжениям)

По полученным опытным данным по линейному регрессионному анализу построены доверительные области для испытаний с контролем по деформациям. На рисунке 3.15 представлены экспериментальные данные при нормальной и повышенной температуре (200°) в виде эмпирических линий регрессий с

границами 95%-ной доверительной области. Данные приведены в логарифмических координатах.

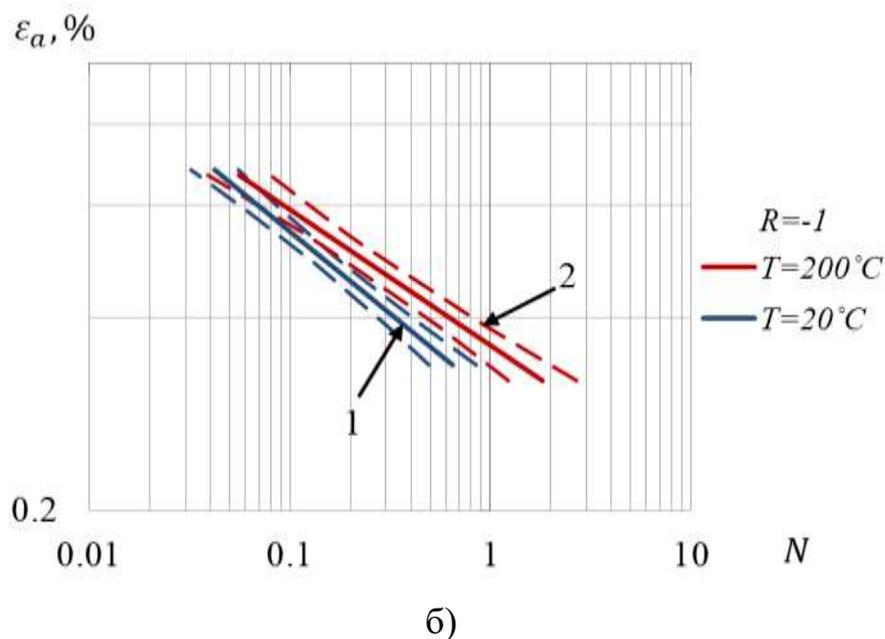
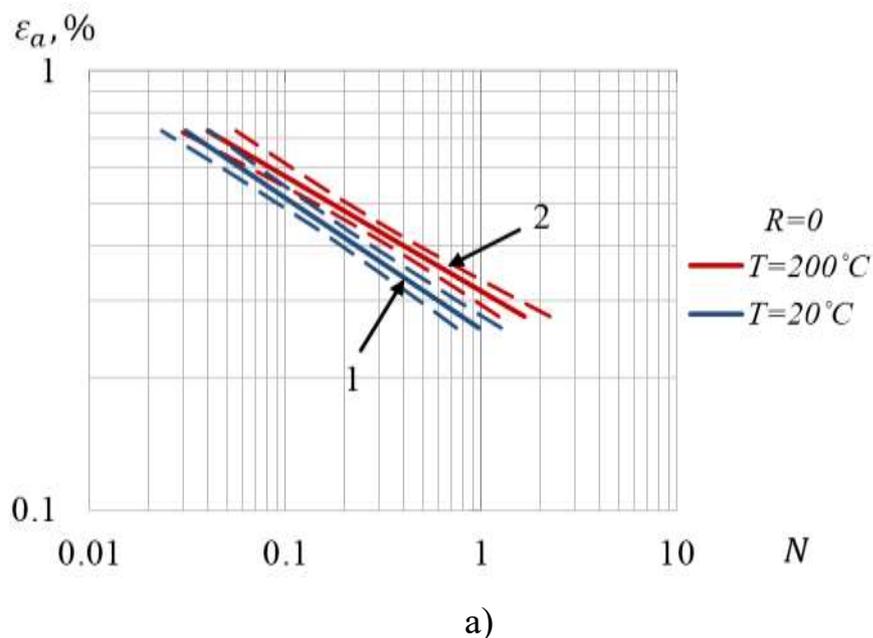


Рисунок 3.15 – Совмещённые кривые малоциклового усталости с доверительными областями при нормальной (кривая 1) и повышенной (кривая 2) температурах с коэффициентами асимметрии: а) $R=0$, б) $R=-1$

Выявлено, что в испытаниях на растяжение с контролем по осевой деформации при заданном диапазоне амплитуд деформаций от 0,3 % до 0,7 % с

коэффициентом асимметрии $R=0$ температура 150°C незначительно сказывается на долговечности титанового сплава. С повышением температуры до 200°C в диапазоне амплитуд деформаций от 0,3 % до 0,7 % наблюдается увеличение долговечности от 23 до 53%. При увеличении температуры в испытаниях при 200°C с коэффициентом асимметрии $R=-1$ при заданном диапазоне амплитуд деформаций от 0,32 % до 0,73 % увеличение долговечности наблюдается от 15 до 50 %. Аналогичные результаты другими авторами получены на алюминиевом сплаве [122, 164. Влияние асимметрии на усталостную долговечность в условиях контролируемой деформации незначительно. При аналогичных испытаниях с контролем по напряжению с увеличением температуры наблюдается уменьшение долговечности титанового сплава. Например, при амплитуде напряжений 350 МПа с коэффициентом асимметрии $R=0$ при увеличении температуры до 300°C - 400°C долговечность титанового сплава снижается более чем на 70 %. При амплитуде напряжений 600 МПа с коэффициентом асимметрии $R=-1$ с увеличением температуры до 300°C - 400°C снижение долговечности титанового сплава происходит более чем на 90 %.

3.5. Оценки влияния параметров сложных режимов нагружения на циклическую долговечность конструкционных материалов при одноосном нагружении

В результате экспериментальных исследований конструкционных материалов на малоцикловую усталость в условиях одноосного нагружения сделаны выводы о влиянии сложных режимов нагружения на циклическую долговечность никелевого сплава, алюминиевого сплава и титанового сплава:

- в диапазоне амплитуд деформаций 0,30 % до 0,7 % усложненная форма (М-образная) цикла снижает циклическую долговечность никелевого сплава на 10-25 %;
- блочное циклическое деформирование снижает циклическую долговечность алюминиевого сплава на 20-45 % в зависимости от схемы блочного нагружения;

- в диапазоне амплитуд деформаций от 0,30 % до 0,70 % с коэффициентом асимметрии $R=0$ при увеличении температуры до 200°C долговечность титанового увеличивается от 20 до 50 % в зависимости от амплитуды деформаций.
- в диапазоне амплитуд деформаций от 0,30 % до 0,70 % с коэффициентом асимметрии $R=-1$ при увеличении температуры до 200°C долговечность титанового сплава возрастает от 15 до 50 %;
- при амплитуде напряжений 350 МПа с коэффициентом асимметрии $R=0$ при увеличении температуры до 300°C-400°C долговечность титанового сплава снижается более чем на 70 %;
- при амплитуде напряжений 600 МПа с коэффициентом асимметрии $R=-1$ с увеличением температуры до 300°C-400°C происходит значительное снижение долговечность титанового сплава более чем на 90 %.

Выводы по главе

1. Проведено экспериментальное исследование влияния усложненной (М-образной) формы цикла на усталостную долговечность никелевого сплава. Показано снижение циклической долговечности никелевого сплава на 10-25% в зависимости от уровня амплитуд деформаций.

2. Проведены серии испытаний на алюминиевом сплаве Д16Т с постоянными и переменными параметрами цикла. Получены опытные данные о механическом поведении алюминиевого сплава Д16Т при блочном циклическом деформировании, отражающие снижение долговечности в блоках состоящих из трех групп циклов с различными параметрами. Проанализировано влияние различных подциклов и их количество в блоке на циклическую долговечность алюминиевого сплава.

3. Представлены результаты серий циклических испытаний по оценке влияния повышенной температуры на усталостную долговечность титанового сплава при одноосном нагружении на растяжение-сжатие сплошных

цилиндрических образцов с контролем по деформациям и с контролем по напряжениям. Полученные экспериментальные данные титанового сплава отражают значительное снижение циклической долговечности при повышении температуры в условиях растяжения-сжатия с контролем по напряжению, которое может достигать порядка, а также увеличение долговечности в условиях растяжения-сжатия с контролем по деформациям от 20 до 50 %.

4. Получены оценки влияния параметров сложных режимов на циклическую долговечность никелевого сплава, алюминиевого сплава Д16Т, титанового сплава, отражающие снижение долговечности при усложненной форме цикла, блочном нагружении, а также значительное снижение долговечности при повышенной температуре в испытаниях с контролем по напряжениям и повышение циклической долговечности в испытаниях с контролем по деформациям.

Основные результаты, содержащиеся в главе, отражены в публикациях автора [41, 42, 45, 48, 126].

4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ДВУХОСНОМ ЦИКЛИЧЕСКОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ

В реальных условиях эксплуатации элементов конструкций в местах сложной геометрии комбинации произвольных нагрузок приводят к сложному напряженному состоянию. При этом долговечность конструкции сильно зависит от типа напряженно-деформированного состояния, реализуемого в объемах материала. В данной главе представлены экспериментальные данные, полученные при двухосном циклическом нагружении. Получены оценки влияния форм цикла, различных траекторий нагружения и повышенной температуры на усталостную долговечность стали ЭП517Ш. Проведено экспериментальное исследование влияния постоянной составляющей кручения и постоянной составляющей растяжения на усталостную долговечность алюминиевого сплава Д16Т при двухосной малоцикловой усталости. Отмечено значительное влияние постоянных составляющих по одной из мод на циклическую долговечность алюминиевого сплава.

4.1. Изучение механического поведения стали ЭП517Ш в условиях двухосной усталости при пропорциональном нагружении

Проведено экспериментальное исследование малоцикловой усталости в условиях сложного напряженного состояния. В качестве исследуемого материала использовалась жаропрочная легированная сталь ЭП517Ш. Химический состав: С – 0,13 %; Cr – 12,5 %; Si – 0,05 %; Ni – 2,05 %; Mo – 1,50 %, W – 0,70 %; Nb – 0,20 %; V – 0,20 %. Данная сталь применяется для изготовления высоконагруженных деталей, валов турбин низкого и среднего давления газотурбинных двигателей, работающих при температурах 300-450°C. Использовались тонкостенные трубчатые образцы, обеспечивающие близкое к однородному плоское

напряженное состояние по толщине кольцевого сечения, эскиз и внешний вид которых приведены на рисунке 4.1.

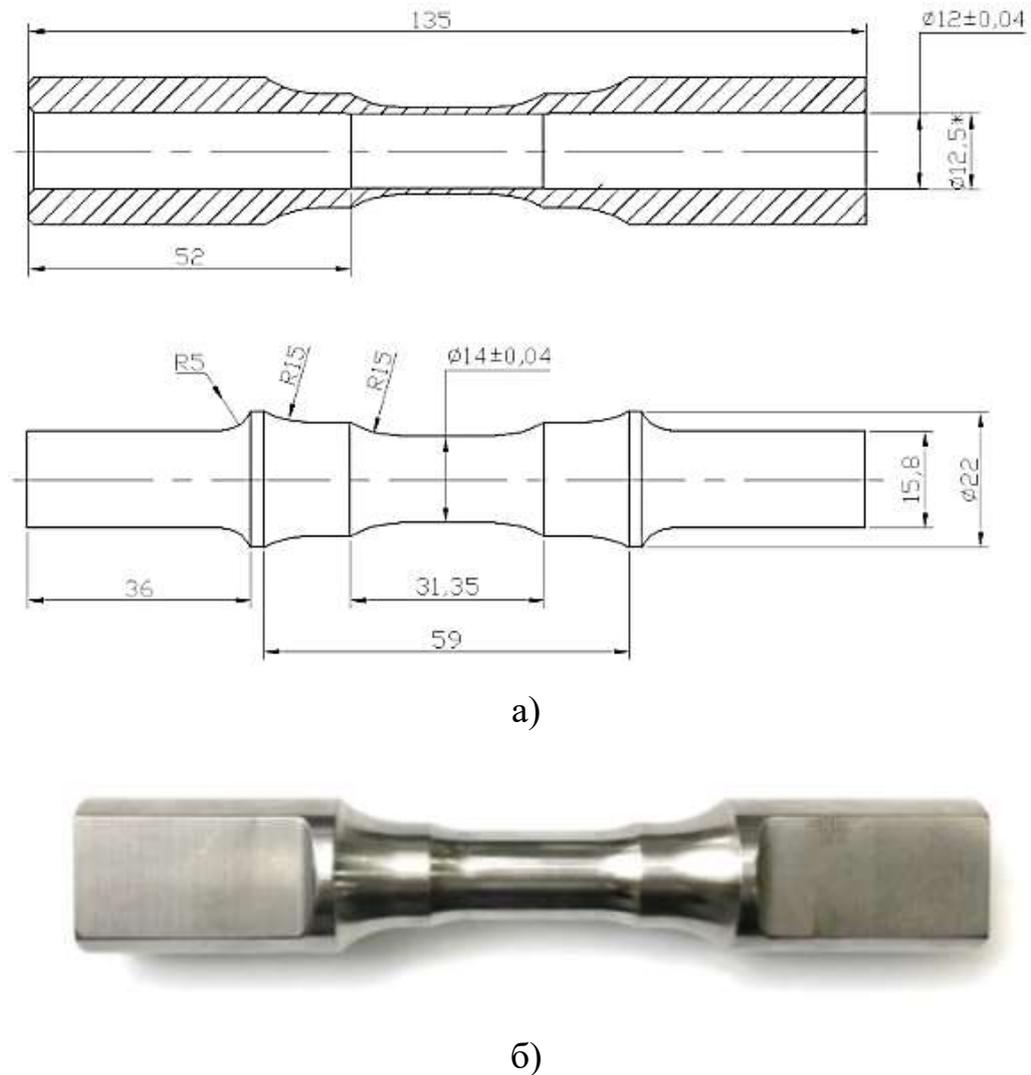


Рисунок 4.1 – Эскиз (а) и внешний вид (б) образца для проведения испытаний на малоцикловую усталость в условиях двухосного нагружения

В работе [26] получена долговечность легированной стали ЭП517Ш при простой треугольной форме цикла с коэффициентом асимметрии $R=0$ (рисунок 4.2, а). Для исследования влияния на долговечность различных параметров нагружения проведены испытания по схемам нагружения, представленным на рисунке 4.2, соответствующим пропорциональному изменению осевой и сдвиговой деформации. Рисунок 4.2, б соответствует деформированию с

коэффициентом асимметрии $R=0,35$, соответствующем отношению минимальной деформации в цикле к максимальной. Для того, чтобы оценить влияние сложной формы на циклическую долговечность стали ЭП517Ш, проведены испытания по М-образному циклу (рисунок 4.2, в).

Значения максимальных и минимальных значений осевой и сдвиговой деформации, задаваемые при циклическом нагружении, выбирались из диаграмм деформирования испытаний на чистый сдвиг и пропорциональное растяжение с кручением при квазистатическом нагружении. Изменение величины деформаций в цикле задано по линейному закону, что обеспечивает постоянную скорость нагружения. Скорости циклического деформирования при растяжении-сжатии и кручении в каждом испытании сохранялись одинаковыми и составляли $\dot{\epsilon} = 0,005 \text{ с}^{-1}$ и $\dot{\gamma} = 0,0033 \text{ с}^{-1}$

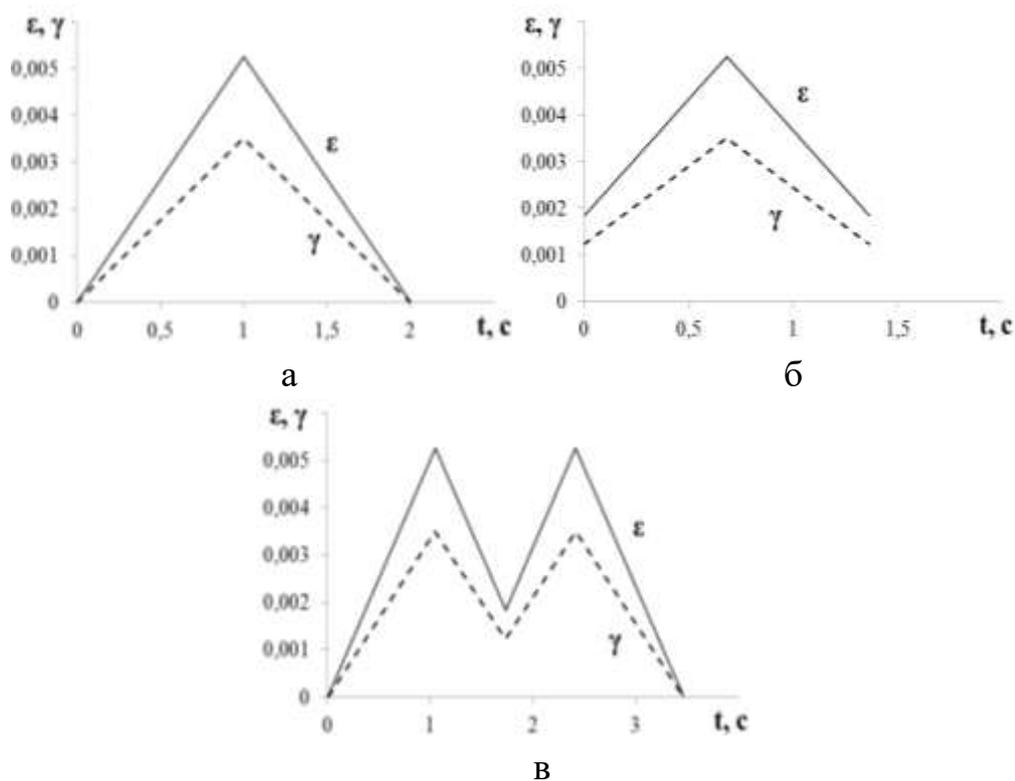


Рисунок 4.2 – Изменение осевых (сплошная) и сдвиговых (штриховая) деформаций при циклическом деформировании с коэффициентом асимметрии $R=0$ (а), $R=0,35$ (б), по М-образному циклу (в)

В результате испытаний образцов получены значения числа циклов, которые соответствуют разрушению образца на части или появлению макротрещины в рабочей части. Задаваемые в испытаниях параметры цикла и полученные результаты испытаний тонкостенных трубчатых образцов из легированной стали приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Результаты экспериментов на малоцикловую усталость при двухосном нагружении

№ образца	Максимальная деформация в цикле		Минимальная деформация в цикле		Размах деформации в цикле		Коэффициент асимметрии, R	Число циклов до разрушения, N
	ε_{\max} , %	γ_{\max} , %	ε_{\min} , %	γ_{\min} , %	ε_p , %	γ_p , %		
Нагружение №1								
1	0,526	0,350	0,000	0,000	0,526	0,350	0,000	2500
2								5600
3								1850
4								4594
5								1839
Среднее количество циклов, N								3277
Среднеквадратическое отклонение, S								769
Нагружение №2								
1	0,526	0,350	0,184	0,126	0,342	0,224	0,350	15580
2								19480
3								11315
Среднее количество циклов, N								15458
Среднеквадратическое отклонение, S								2352
Нагружение №3								
1	0,526	0,350	0,000	0,000	0,526	0,350	0,000	4200
2								1250
3								1706
4								1500
Среднее количество циклов, N								2164
Среднеквадратическое отклонение, S								685

Анализ экспериментальных данных показал, что при циклических испытаниях с одинаковой максимальной осевой и сдвиговой деформацией с увеличением коэффициента асимметрии $R=0,35$ наблюдается увеличение усталостной долговечности стали ЭП517Ш почти в 5 раз относительно испытаний с коэффициентом асимметрии $R=0$.

Для наглядности результатов влияния сложной формы циклов на рисунке 4.3 для различных схем деформирования по оси ординат приведены средние значения (\bullet) долговечностей с учетом среднеквадратических отклонений (Γ). Данные долговечности приведены в логарифмических значениях.

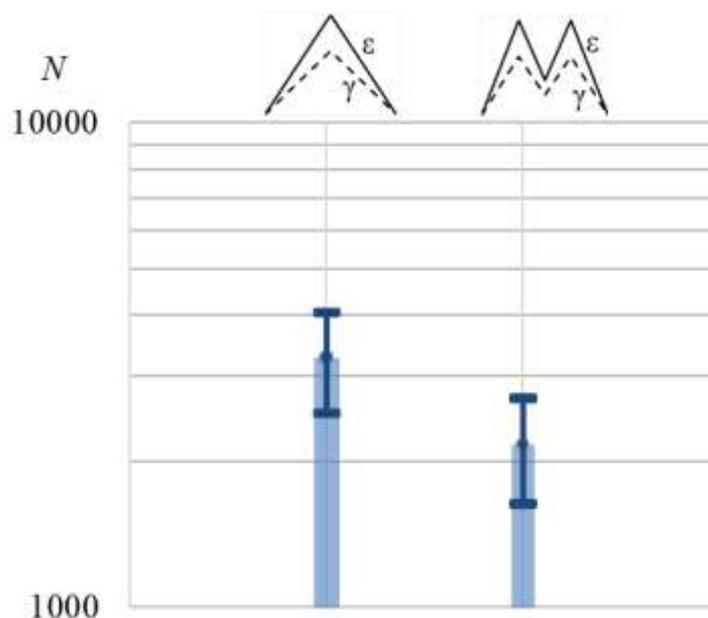


Рисунок 4.3 – Значения циклической долговечности стали ЭП517Ш при треугольной и М-образной формах цикла (среднее значение (\bullet), среднеквадратическое отклонение (Γ))

При циклических испытаниях с одинаковой максимальной осевой и сдвиговой деформацией показано уменьшение циклического ресурса конструкционной стали ЭП517Ш по осредненным значениям долговечности при нагружении по усложненной форме цикла на 30%.

4.2. Исследование циклической долговечности легированной стали ЭП517Ш в условиях двухосной усталости при блочном нагружении

Для оценки вклада повторяющейся последовательности циклов с переменными параметрами на усталостную долговечность проведены испытания по блочному нагружению. Схема нагружения блока представлена на рисунке 4.4. Скорости деформирования при растяжении и при кручении: $\dot{\epsilon} = 0,005 \text{ с}^{-1}$ и $\dot{\gamma} = 0,0033 \text{ с}^{-1}$.

В таблице 4.2 приведены данные о размахах и коэффициентах асимметрии задаваемых осевых и сдвиговых деформации и предельном числе блоков до разрушения или образования макротрещины. До разрушения считалось общее количество блоков.

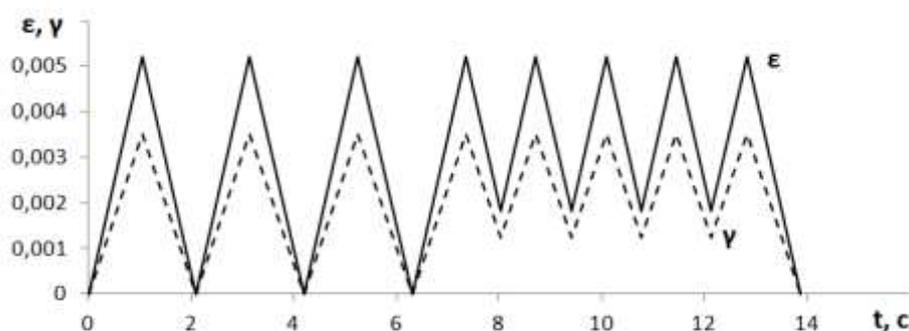


Рисунок 4.4 – Схема блочного циклического нагружения с переменными параметрами цикла при пропорциональном нагружении

Полученные экспериментальные данные легированной стали при блочном циклическом нагружении сравниваются с экспериментальными данными по простой треугольной форме цикла (рисунок 4.2, а).

Таблица 4.2 – Результаты испытаний на малоцикловую усталость при блочном циклическом нагружении в условиях двухосного нагружения

№ образца	первая половина блока				вторая половина блока				Число блоков до разрушения, N
	Размах деформации		Коэффициент асимметрии		Размах деформации		Коэффициент асимметрии		
	ε_{p1} , %	γ_{p1} , %	$R_{\varepsilon 1}$	$R_{\gamma 1}$	ε_{p2} , %	γ_{p2} , %	$R_{\varepsilon 2}$	$R_{\gamma 2}$	
1	0,536	0,36	0	0	0,338	0,224	0,355	0,353	460
2	0,529	0,36	0	0	0,337	0,230	0,354	0,343	506
3	0,527	0,36	0	0	0,342	0,228	0,353	0,351	519
Среднее количество циклов, N									495
Среднеквадратическое отклонение, S									18

Так как в один блок входит 4 цикла с максимальным размахом, который соответствует размаху по простой треугольной форме цикла, долговечность данного блока составила 1980 циклов. Таким образом, снижение циклической долговечности стали ЭП517Ш при блочном нагружении относительно простого треугольного цикла по средним значениям составило 40 %.

4.3. Исследование циклической долговечности стали ЭП517Ш в условиях двухосного непропорционального нагружения

Проведены эксперименты на малоцикловую усталость в условиях непропорционального изменения осевых и сдвиговых деформаций на образцах из легированной стали ЭП517Ш. Параметры нагружения выбраны таким образом, что максимальные и минимальные значения осевых и сдвиговых деформаций, достигаемые в цикле, соответствуют максимальным и минимальным значениям деформаций по схемам нагружения, представленным на рисунке 4.2 и 4.3, представленным в пунктах 4.1 и 4.2. Исследовалось влияние различной траектории непропорционального нагружения (сложного) на долговечность жаропрочной легированной стали по различным схемам нагружения, которые в пространстве деформаций соответствуют двухзвенной ломаной (рисунок 4.6, а, б)

и четырехзвенным ломаным (рисунок 4.6, в, г) с прямыми углами. Заданные скорости деформирования при растяжении-сжатии и кручении: $\dot{\epsilon} = 0,005 \text{ с}^{-1}$ и $\dot{\gamma} = 0,0033 \text{ с}^{-1}$.

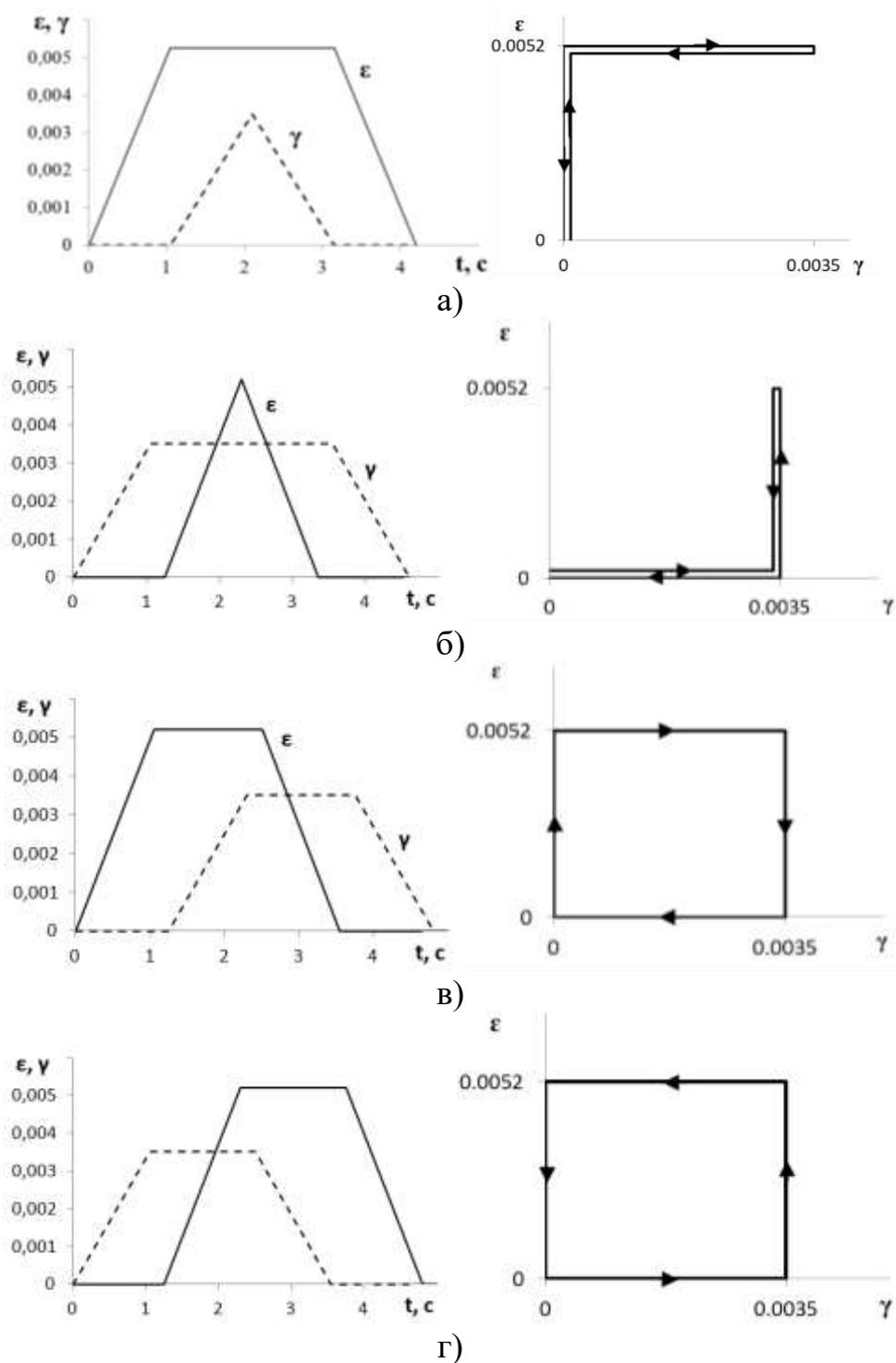


Рисунок 4.6 – Различные траектории осевых (сплошная) и сдвиговых (штриховая) деформаций при непропорциональном циклическом нагружении

На рисунке 4.7 приведена схема непропорционального изменения осевых и сдвиговых деформаций с выдержками по деформациям, которая является модификацией М-образной формы цикла, представленной на рисунке 4.2. Данная схема нагружения позволяет оценить зависимость усталостной долговечности от траектории деформирования при фиксированных значениях амплитуд осевых и сдвиговых деформаций.

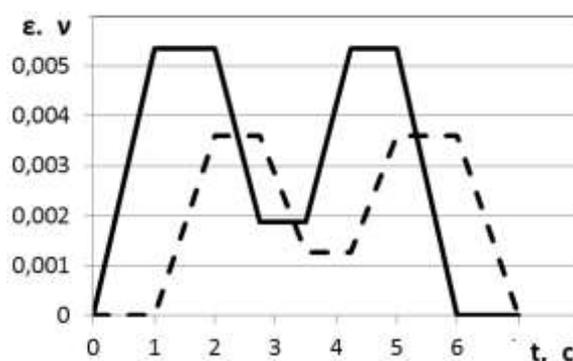


Рисунок 4.7 – Схема непропорционального нагружения с выдержками

В результате циклических испытаний получены значения числа циклов, которые соответствуют разрушению образца на части или появлению макротрещины в рабочей части. Задаваемые в испытаниях параметры нагружения и результаты экспериментальных исследований приведены в таблицах 4.3 и 4.4.

Таким образом, получены опытные данные о механическом поведении легированной стали ЭП517Ш при малоциклового усталости в условиях одновременного действия растяжения-сжатия и кручения при сложном нагружении. На рисунке 4.8 для наглядности результатов по оси ординат отложены средние значения долговечностей (\bullet) с учетом среднеквадратических отклонений (Γ) для различных схем сложного нагружения.

Таблица 4.3 – Результаты экспериментов на малоцикловую усталость при непропорциональном циклическом нагружении

№ образца	Максимальная деформация в цикле		Минимальная деформация в цикле		Размах деформации		Коэффициент асимметрии		Число циклов до разрушения
	$\varepsilon_{max}, \%$	$\gamma_{max}, \%$	$\varepsilon_{min}, \%$	$\gamma_{min}, \%$	$\varepsilon_{p2}, \%$	$\gamma_{p2}, \%$	R_ε	R_γ	
Непропорциональное нагружение (рисунок 4.6, а)									
1	0,526	0,350	0,00	0,00	0,526	0,350	0,00	0,00	2085
2	0,526	0,350	0,00	0,00	0,526	0,350	0,00	0,00	1116
3	0,526	0,350	0,00	0,00	0,526	0,350	0,00	0,00	1768
Среднее количество циклов, N									1656
Среднеквадратическое отклонение, S									285
Непропорциональное нагружение (рисунок 4.6, б)									
1	0,527	0,356	-0,016	-0,001	0,542	0,357	-0,030	-0,003	1627
2	0,534	0,356	-0,019	-0,001	0,553	0,357	-0,036	-0,003	1050
3	0,531	0,357	-0,011	-0,001	0,542	0,358	-0,021	-0,003	890
Среднее количество циклов, N									1189
Среднеквадратическое отклонение, S									223
Непропорциональное нагружение (рисунок 4.6, в)									
1	0,548	0,356	-0,021	-0,006	0,569	0,362	-0,038	-0,017	1350
2	0,545	0,357	-0,017	-0,005	0,562	0,362	-0,031	-0,014	790
3	0,545	0,356	-0,018	-0,006	0,563	0,362	-0,033	-0,017	1425
Среднее количество циклов, N									1188
Среднеквадратическое отклонение, S									200
Непропорциональное нагружение (рисунок 4.6, г)									
1	0,543	0,356	-0,018	-0,006	0,561	0,362	-0,033	-0,017	1335
2	0,544	0,356	-0,015	-0,010	0,559	0,366	-0,028	-0,028	1473
3	0,544	0,357	-0,019	-0,006	0,563	0,363	-0,035	-0,017	1247
Среднее количество циклов, N									1351
Среднеквадратическое отклонение, S									66

Отмечается, что непропорциональное нагружение снижает циклическую долговечность стали ЭП517Ш на 50-60% по различным траекториям нагружения. При сравнении различных траекторий сложного нагружения экспериментально показано, что на циклическую долговечность легированной стали существенно не влияет вид представленных траекторий непропорционального циклического деформирования.

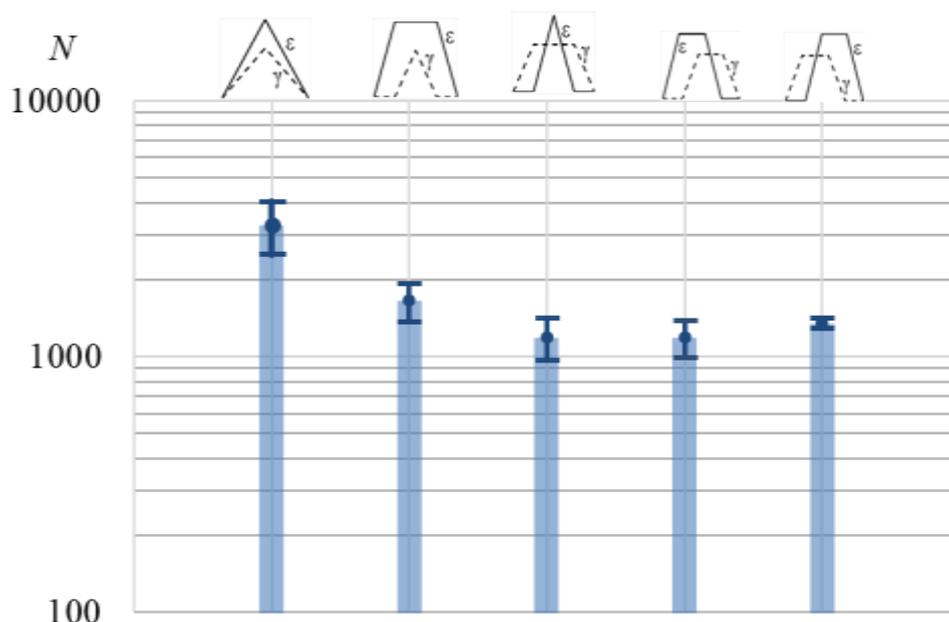


Рисунок 4.8 – Значения циклической долговечности стали ЭП517Ш при различных траекториях нагружения

(среднее значение (•), среднеквадратическое отклонение (I))

Таблица 4.4 – Результаты испытаний на малоцикловую усталость при непропорциональном нагружении с выдержками

№ образца	Размах деформации		Коэффициент асимметрии		Число циклов до разрушения <i>N</i>
	ε_p , %	γ_p , %	R_ε	R_γ	
Непропорциональное нагружение (рисунок № 4.7)					
1	0,536	0,360	-0,001	-0,003	905
2	0,529	0,360	-0,002	-0,001	827
3	0,527	0,360	-0,004	-0,007	1277
Среднее количество циклов, <i>N</i>					1003
Среднеквадратическое отклонение, <i>S</i>					138

При сопоставлении результатов испытаний М-образной формы цикла при пропорциональном нагружении с результатами испытаний по сложному нагружению (рисунок 4.9) сделан вывод о том, что процесс накопления повреждений при сложном непропорциональном нагружении происходит

быстрее, что приводит к снижению циклической долговечности стали ЭП517Ш в два раза по сравнению с пропорциональным нагружением.

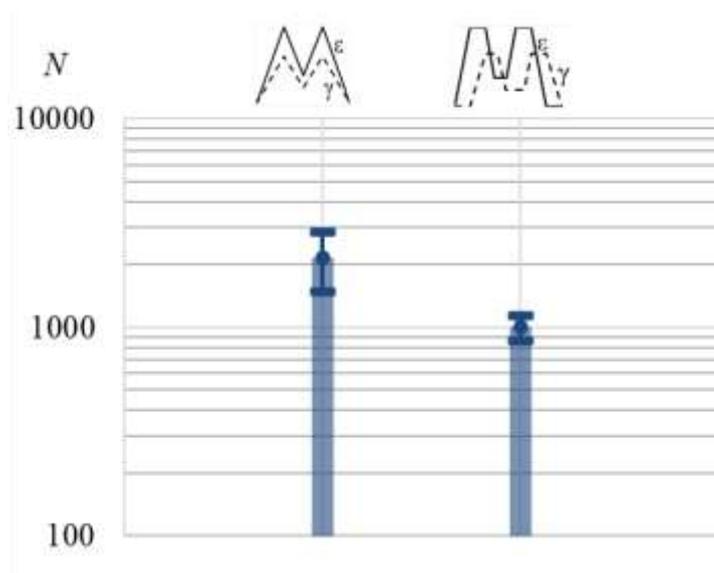


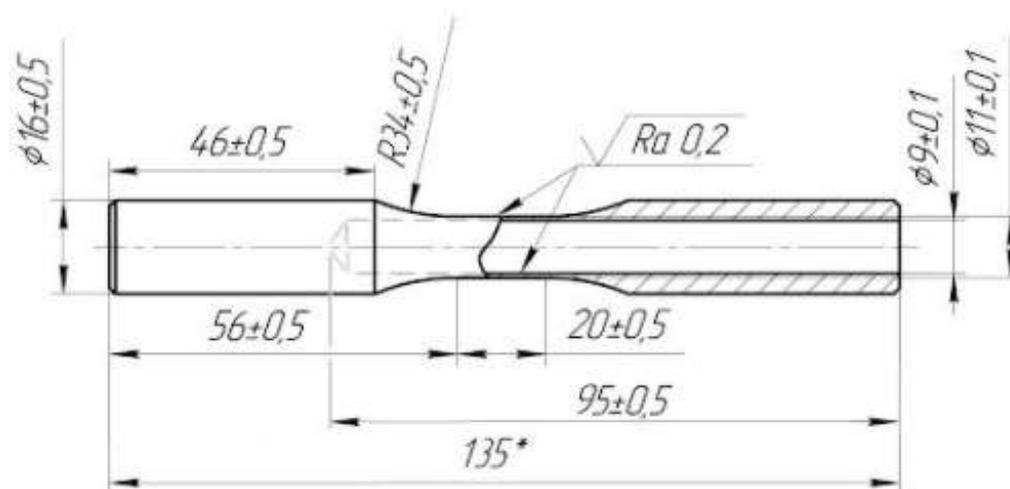
Рисунок 4.9 – Значения циклической долговечности стали ЭП517Ш при простой (№2) и сложной (№8) формах нагружения (среднее значение (•), среднеквадратическое отклонение (I))

4.4. Исследование механического поведения алюминиевого сплава Д16Т в условиях малоциклового нагружения при действии одной составляющей постоянной величины

Из анализа литературных источников отмечена актуальность исследования влияния постоянных составляющих многоосного нагружения на усталостную долговечность (постоянное растяжение и переменное кручение, постоянное кручение и переменное растяжение-сжатие). Большинство исследований проведено для области многоциклового усталости. Особый интерес представляет исследование области малоциклового усталости при наличии второй компоненты малой величины, которая может возникать в условиях сложной эксплуатации.

Проведены эксперименты на двухосную малоцикловую усталость, одна из мод (или нормальное напряжение, или касательное напряжение) которой изменяется циклическим образом, а другая мода остается постоянной по величине

в течение испытания. В качестве исследуемого материала использовался сплав алюминия марки Д16Т. Испытания проводились на тонкостенных трубчатых образцах с кольцевым сечением в рабочей части, эскиз и внешний вид которых приведены на рисунке 4.10. Размеры приведены в миллиметрах.



а)

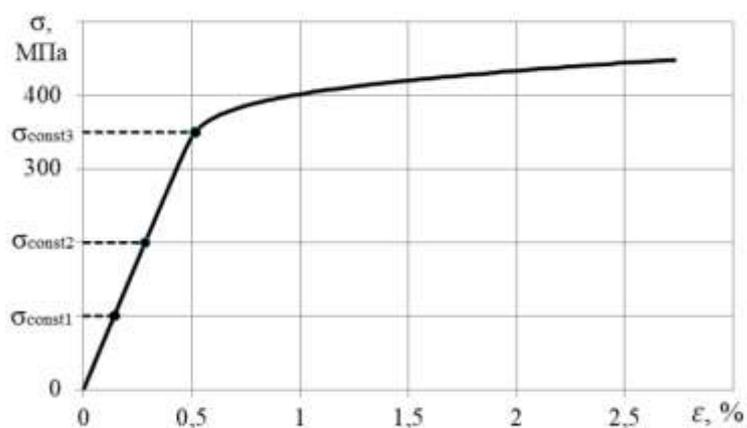


б)

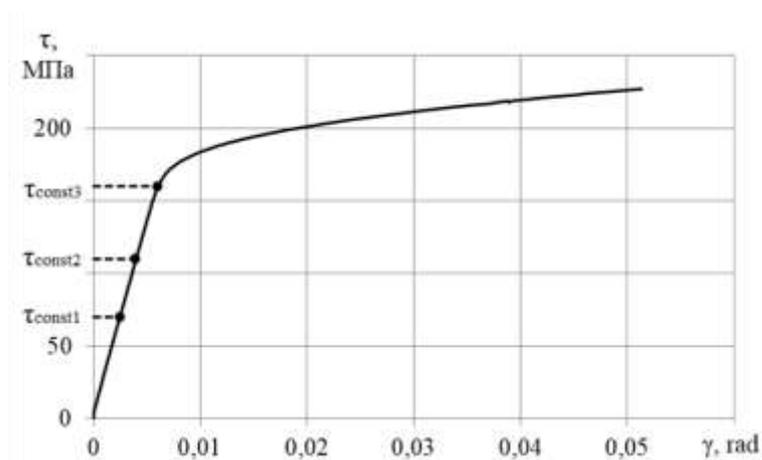
Рисунок 4.10 – Эскиз (а) и внешний вид (б) тонкостенного трубчатого образца

Для оценки влияния на долговечность дополнительных напряжений постоянной величины в испытаниях на малоцикловую усталость было выбрано по три различных уровня постоянных составляющих. Величины постоянных напряжений выбирались по диаграммам деформирования на растяжение и на кручение образцов из сплава Д16Т, представленных на рисунке 4.11. Выбрано три уровня осевых напряжений $\sigma_{const1} = 100$ МПа, $\sigma_{const1} = 200$ МПа, $\sigma_{const1} = 350$ МПа и три уровня касательных напряжений $\tau_{const1} = 70$ МПа, $\tau_{const1} = 110$ МПа, $\tau_{const1} = 160$ МПа. Экспериментальные исследования реализованы по нескольким уровням

амплитуды напряжений, которые обеспечивают разрушение образца в области малоциклового усталости.



а)



б)

Рисунок 4.11 – Диаграммы деформирования цилиндрических образцов из сплава Д16Т: а) при растяжении, б) при кручении

Заданные параметры для испытаний алюминиевого сплава Д16Т на малоцикловую усталость в условиях действия дополнительных напряжений постоянной величины, приведены в таблиц 4.5. Частота циклических испытаний для всех испытаний составляла 1 Гц. Считалось, что образец разрушен, если максимальное напряжение в цикле снижалось на 50 % по сравнению с предыдущим циклом.

Таблица 4.5 – Заданные параметры и результаты испытаний на малоцикловую усталость в условиях двухосного нагружения при действии одной составляющей постоянной величины

Постоянное нормальное напряжение σ_{const} , МПа	Постоянное касательное напряжение τ_{const} , МПа	Амплитуда нормального напряжения σ_a , МПа	Амплитуда касательного напряжения τ_a , МПа	Количество циклов до разрушения, N
0	70	275	0	3411
0	70	275	0	3347
0	70	275	0	3598
0	70	275	0	5344
0	110	275	0	1834
0	110	275	0	1804
0	110	275	0	1824
0	160	275	0	1144
0	70	215	0	51277
0	70	215	0	26912
0	70	215	0	30470
0	110	215	0	18819
0	110	215	0	16668
100	0	0	150	9545
100	0	0	150	4825
200	0	0	150	5450
200	0	0	150	5170
350	0	0	150	1910
350	0	0	150	2978
100	0	0	115	106493
100	0	0	115	77745
100	0	0	115	82800
200	0	0	115	24468
200	0	0	115	49650
350	0	0	115	11234
350	0	0	115	11283

Получены новые экспериментальные данные малоциклового усталости при растяжении-сжатии в условиях действия дополнительных напряжений постоянной величины алюминиевого сплава Д16Т. По результатам испытаний построены зависимости циклической долговечности от уровня напряжений постоянной величины, отнесенной к размаху напряжений. Зависимости в полулогарифмических координатах для различных значений амплитуд напряжений представлены на рисунках 4.12 и 4.13. Полученные результаты свидетельствуют о значительном влиянии постоянных составляющих по одной из мод при двухосной малоциклового усталости на циклическую долговечность.

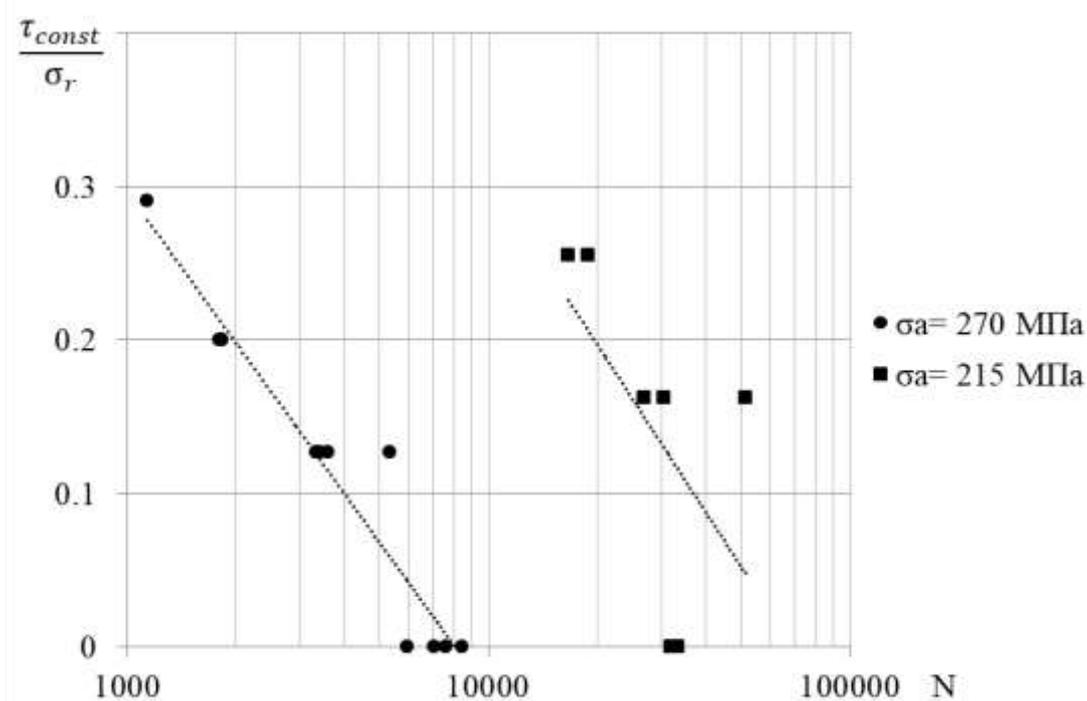


Рисунок 4.12 – Зависимость усталостной долговечности от уровня касательных напряжений постоянной величины, отнесенного к размаху напряжений, при амплитуде нормальных напряжений: $\sigma_a = 270$ МПа (●), $\sigma_a = 215$ МПа (■)

В испытаниях на циклическое растяжение-сжатие снижение долговечности сплава Д16Т при увеличении постоянной составляющей касательных напряжений

составляет от 45 до 85 %. С увеличением амплитуды касательного напряжения влияние постоянной составляющей нагрузки снижается.

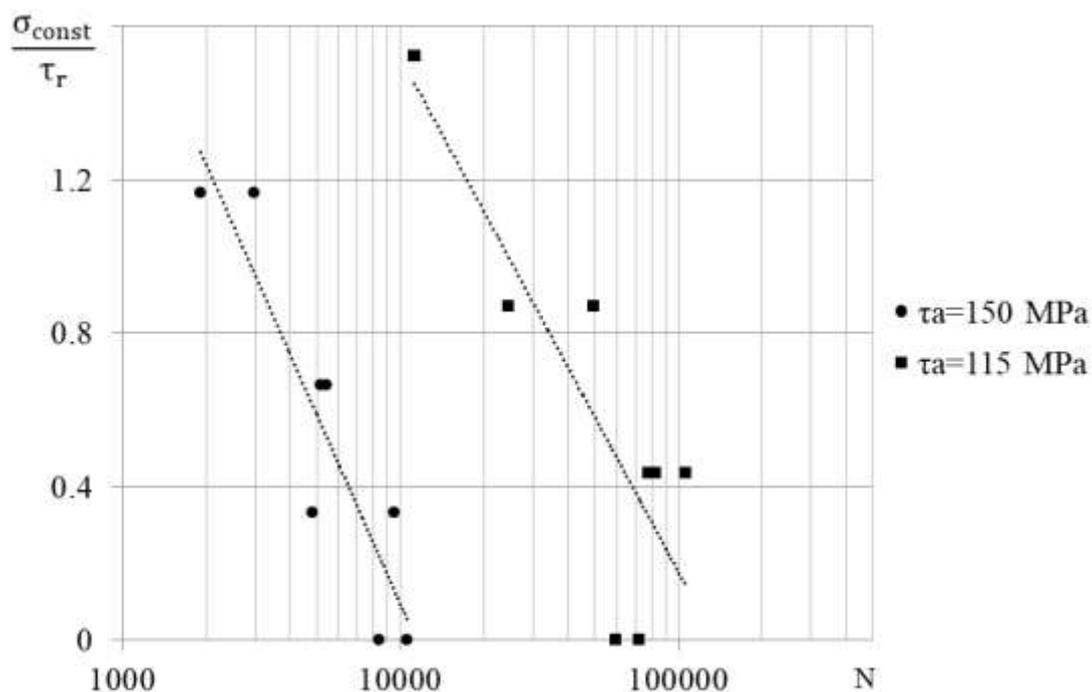


Рисунок 4.13 – Зависимость усталостной долговечности алюминиевого сплава от уровня нормальных напряжений постоянной величины, отнесенного к размаху напряжений, при амплитуде касательного напряжения: $\tau_a=150$ МПа (●), $\tau_a=115$ МПа (■)

В испытаниях на малоцикловую усталость при кручении цилиндрических образцов с увеличением осевого напряжения постоянной величины долговечность сплава Д16Т снижается от 20 до 100%. При значении осевого напряжения 350 МПа и амплитуде касательных напряжений 115 МПа снижение долговечности происходит на порядок.

С применением оптического стереомикроскопа CarlZeiss Discovery.V12 были получены снимки изломов образцов, приведенные на рисунке 4.14. На изломах хорошо видна светло-серая зона равновесного роста трещины. Её площадка расположена под углом 90° к оси образца. Также видна темно-серая зона долома, площадки которой расположены под углом около 45° к оси образца. Из рисунков

видно, что с увеличением постоянных составляющих нормальных напряжений и амплитуды касательных напряжений происходит уменьшение области равновесного роста усталостной трещины, что хорошо коррелирует с данными усталостной долговечности.

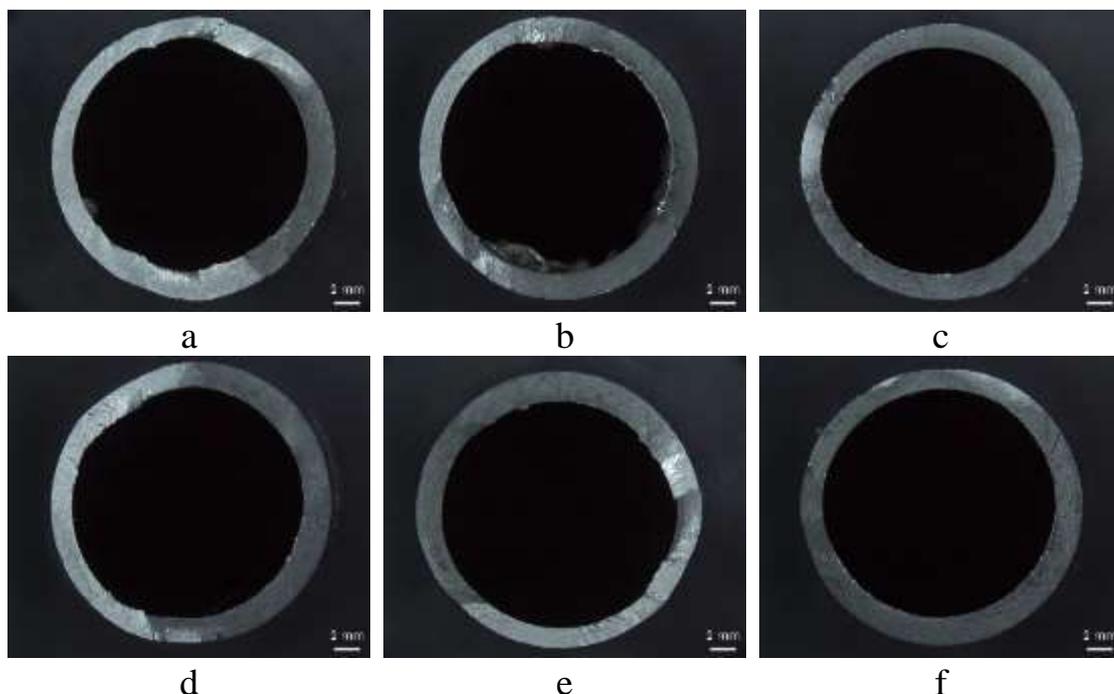


Рисунок 4.14 – Усталостные изломы: а-с – постоянные составляющие нормальных напряжений 100, 200, 350 МПа при амплитуде касательных напряжений 115 МПа; d-f – постоянные составляющие нормальных напряжений 100, 200, 350 МПа при амплитуде касательных напряжений 150 МПа

Полученные экспериментальные данные алюминиевого сплава могут применяться для прочностных расчетов при установлении допустимых пределов постоянных составляющих компонент напряжений.

4.5. Исследование долговечности конструкционной стали ЭП517Ш при малоцикловой усталости в условиях двухосного нагружения при повышенной температуре

Повышенная температура является одним из факторов, которые существенно снижают долговечность конструкционных материалов. Для исследования влияния температуры на циклическую долговечность проведены испытания на малоцикловую усталость в условиях совместного действия растяжения с кручением из легированной стали ЭП517Ш при температуре 600°C. Для циклических испытаний при совместном действии растяжения с кручением при повышенной температуре были использованы тонкостенные полые образцы. Эскиз образца представлен на рисунке 4.15.

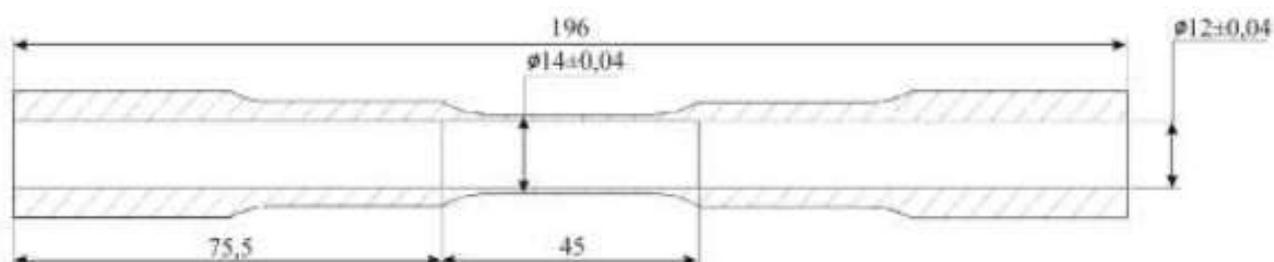


Рисунок 4.15. Эскиз образца для испытаний на малоцикловую усталость при повышенных температурах

Реализованы испытания при пропорциональном циклическом нагружении с простой и сложной формами циклов и непропорциональном нагружении. На рисунке 4.16 представлены схемы пропорционального (нагружение №1 и №2) и непропорционального нагружения (нагружение №3). Задаваемые в испытаниях параметры цикла и полученные результаты представлены в таблице 4.6.

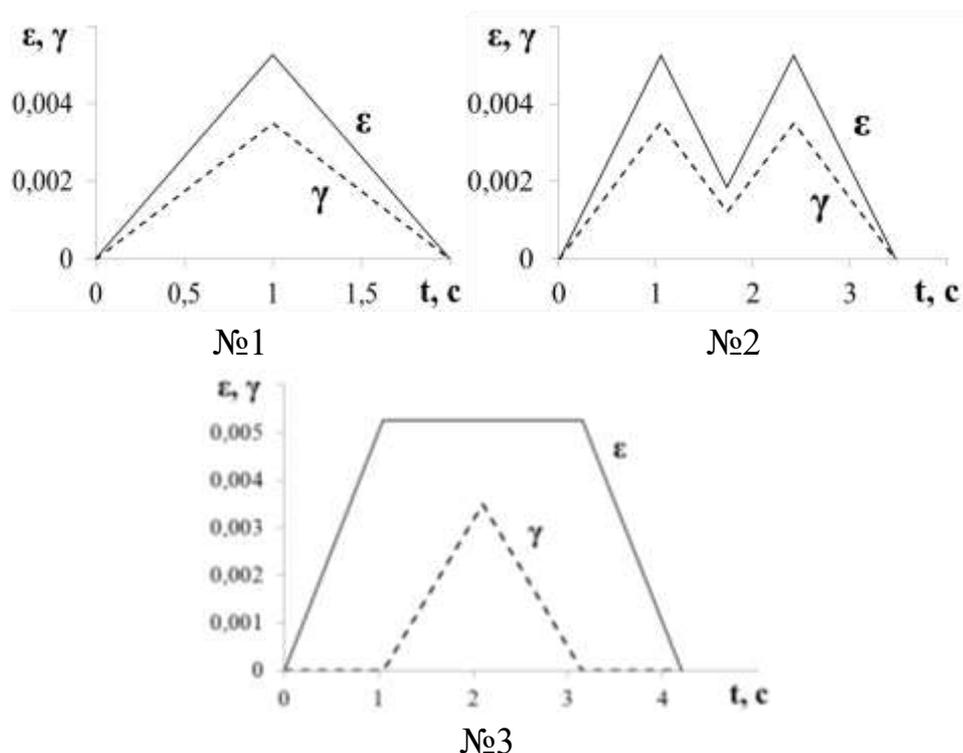


Рисунок 4.16 – Схемы циклического нагружения: треугольная (№1), М-образная (№2) формы циклов, непропорциональное нагружение (№3)

Получены экспериментальные данные о сопротивлении малоциклового усталости при пропорциональном и непропорциональном нагружении легированной стали ЭП517Ш при температуре 600°C . Результаты испытаний на двухосную малоцикловую усталость стали ЭП517Ш при повышенной температуре сравниваются с результатами аналогичных испытаний при комнатной температуре, которые приведены в разделах 4.1 и 4.3. На рисунке 4.18 представлены примеры фотографии разрушенных образцов после испытаний.

Таблица 4.6 – Результаты испытаний на малоцикловую усталость при совместном действии растяжения и кручения при температуре 600 °С

№ образца	Максимальная деформация в цикле		Минимальная деформация в цикле		Размах деформации в цикле		Коэффициент асимметрии R	Число циклов до разрушения N
	$\varepsilon_{max}, \%$	$\gamma_{max}, \%$	$\varepsilon_{min}, \%$	$\gamma_{min}, \%$	$\varepsilon_p, \%$	$\gamma_p, \%$		
Нагружение № 1								
1	0,526	0,35	0	0	0,526	0,35	0	2900
2	0,526	0,35	0	0	0,526	0,35	0	1920
3	0,526	0,35	0	0	0,526	0,35	0	2400
Среднее количество циклов, N								2406
Среднеквадратичное отклонение								283
Нагружение № 2								
1	0,526	0,35	0	0	0,526	0,35	0	620
2	0,526	0,35	0	0	0,526	0,35	0	1320
3	0,526	0,35	0	0	0,526	0,35	0	1700
Среднее количество циклов, N								1214
Среднеквадратичное отклонение								316
Нагружение № 3								
1	0,526	0,35	0	0	0,526	0,35	0	1250
2	0,526	0,35	0	0	0,526	0,35	0	1480
Среднее количество циклов, N								1365
Среднеквадратичное отклонение								115



Рисунок 4.18. – Фотографии разрушенных образцов стали ЭП517Ш после испытаний на малоцикловую усталость при совместном растяжении с кручением при температуре 600°С

Для наглядности результатов на рисунке 4.19 по оси ординат отложены средние значения долговечностей (\bullet) с учетом среднеквадратических отклонений (I) для различных схем пропорционального и непропорционального нагружений. Значения долговечностей при комнатной температуре приведены синим цветом, при температуре 600°C – красным.

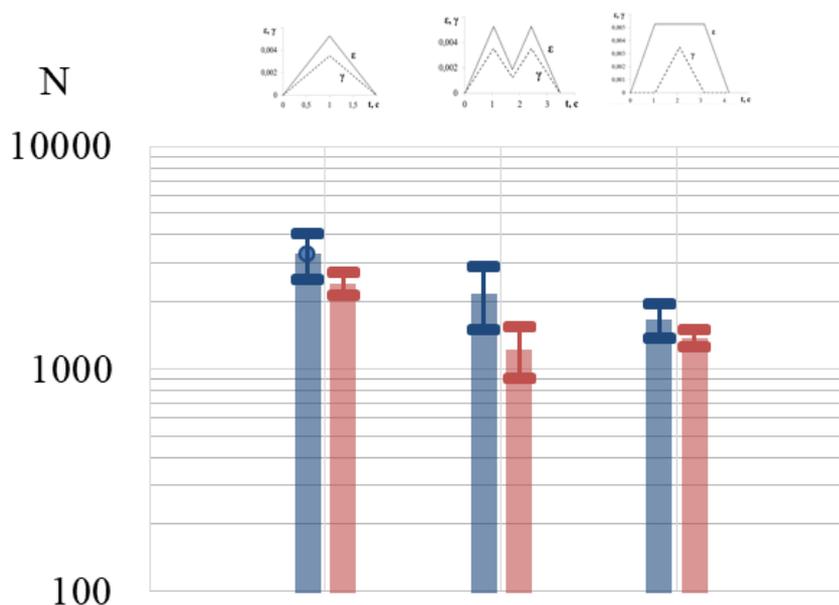


Рисунок 4.19 – Циклическая долговечность стали ЭП517Ш при треугольной (№1), М-образной (№2) формах циклов, непропорциональном нагружении (№3) (синие столбцы – комнатная температура, красные – температура 600°C)

По полученным экспериментальным данным легированной стали отмечено, что температура 600°C по средним значениям снижает циклическую долговечность стали ЭП517Ш при пропорциональном нагружении с треугольной формой цикла на 25 %, с М-образной формой цикла на 45 % и при сложном нагружении на 20 %.

4.6. Оценки влияния параметров сложных режимов нагружения на циклическую долговечность конструкционных материалов при двухосном нагружении

В результате экспериментальных исследований конструкционных материалов на малоцикловую усталость сделаны выводы о влиянии параметров сложных термомеханических воздействий на циклическую долговечность легированной стали ЭП517Ш и алюминиевого сплава Д16Т:

- при циклических испытаниях с одинаковой максимальной осевой и сдвиговой деформацией асимметрия цикла $R=0,35$ увеличивает долговечность стали ЭП517Ш почти в 5 раз относительно испытаний с коэффициентом асимметрии $R=0$;
- усложненная (М-образная) форма цикла снижает циклическую долговечность стали ЭП517Ш на 30 %;
- долговечность стали ЭП517Ш при блочном нагружении снижается на 40 %;
- при различных траекториях непропорционального нагружения снижение циклической долговечности стали ЭП517Ш происходит на 50-60 %;
- при температуре 600°C циклическая долговечность стали ЭП517Ш снижается при пропорциональном нагружении с треугольной формой цикла на 25 %, с М-образной формой цикла на 45% и при сложном нагружении на 20 %;
- при циклических испытаниях на растяжение с увеличением постоянной касательной составляющей снижение циклической долговечности алюминиевого сплава составляет от 45 до 85 %;
- при циклических испытаниях на кручение с увеличением постоянной осевой составляющей снижение циклической долговечности алюминиевого сплава может достигать 10 раз.

Выводы по главе

1. Получены экспериментальные данные малоциклового усталости в условиях двухосного нагружения, отражающие снижение циклической долговечности легированной стали ЭП517Ш при усложненной (М-образной) форме цикла пропорционального изменения осевых и сдвиговых деформаций на 30 %, при блочном нагружении на 40 % и различных траекторий сложного нагружения на 50-60 %.

2. Получены новые экспериментальные результаты исследования долговечности алюминиевого сплава Д16Т при малоциклового двухосевой усталости в условиях действия нормальной или касательной составляющей постоянной величины. Продемонстрировано значительное снижение долговечности сплава с увеличением постоянных составляющих нормальных и касательных напряжений и увеличении амплитуды напряжений. Снижение долговечности может достигать 10 раз.

3. Проведено исследование влияния повышенной температуры на циклическую долговечность легированной стали ЭП517Ш при малоциклового усталости в условиях совместного действия растяжения с кручением. Экспериментально показано, что повышенная температура снижает долговечность при пропорциональном нагружении с треугольной формой цикла на 25%, с М-образной формой цикла на 45% и при непропорциональном нагружении на 20%.

Основные результаты, содержащиеся в главе, отражены в публикациях автора [25, 38, 43, 47, 49, 50, 176].

5. ПРОВЕРКА ПРИМЕНИМОСТИ МОДЕЛЕЙ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ УСТАЛОСТНОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ

В данной главе рассматривается вопрос о возможности прогнозирования циклического ресурса с использованием энергетических критериев разрушения, в которых поврежденность материала связана с общей энергией пластических деформаций. Проведена проверка адекватности нелинейной модели суммирования повреждений на полученных экспериментальных данных в условиях одноосного циклического деформирования. Проведена проверка применимости модифицированной модели многоосной усталости, позволяющая описать механическое поведение алюминиевого сплава в области малоциклового усталости.

5.1. Использование энергетических критериев разрушения

Так как при малоциклового усталости на каждом цикле нагружения является характерным наличие пластических деформаций, то для расчета ресурса элементов конструкций представляется интересным использование критериев разрушения, в основе которых заложена гипотеза об ограниченности ресурса пластической деформации, величина которого определяется из установочных экспериментов. Ряд авторов (Махутов Н.А., Романов А.Н. и др.) с успехом использовали данный подход для прогнозирования циклической долговечности в условиях малоциклового усталости, предполагая, что поврежденность материала связана с общей энергией упругопластических деформаций, а также необратимой энергией пластических деформаций.

Рассматривается возможность прогнозирования циклического ресурса с использованием энергетических критериев разрушения, в которых поврежденность материала связана с общей энергией пластического деформирования. В качестве характеристики пластичности металлов и сплавов используется энергия пластического деформирования W_{pl}^i за цикл, которая равна

площади петли гистерезиса. Рассмотрено несколько энергетических критериев. В первом критерии за критическую величину принимается удельная энергия разрушения при статическом разрыве:

$$\sum_1^N W_{pl}^i = W_{кр}, \quad (5.1)$$

где N – число циклов до разрушения, W_{pl}^i – удельная энергия пластического деформирования за цикл, $W_{кр}$ – критическая величина энергии, которая равна удельной энергии разрушения при статическом разрыве. Схемы определения энергий представлены на рисунке 5.1.

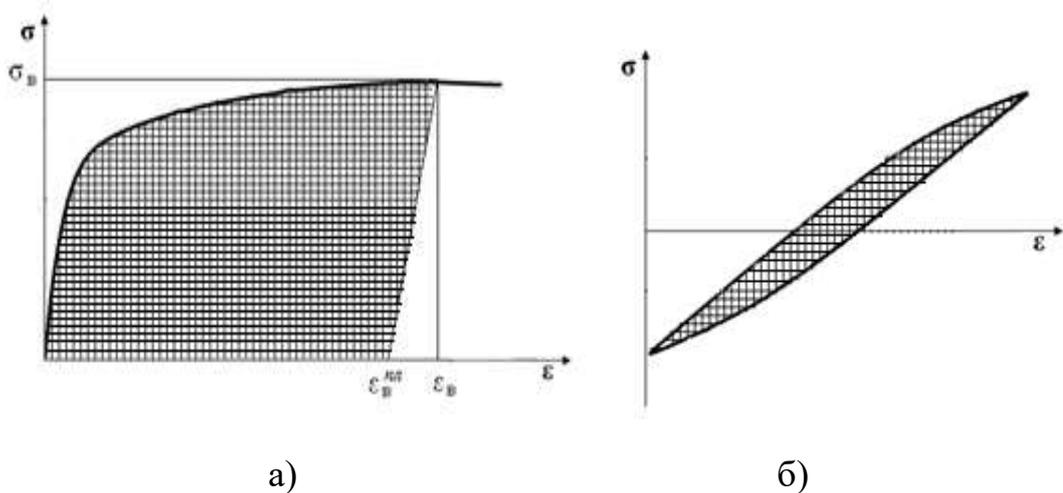


Рисунок 5.1 – Схемы определения энергии:

- а) энергия, затраченная на разрушение при статическом нагружении;
- б) энергия, затраченная на пластическое деформирование за один цикл при малоцикловом нагружении

Для применения энергетических критериев разрушения используются экспериментальные данные никелевого сплава, представленные в разделе 3.1 и 3.2.

Критическая величина, равная удельной энергии, затраченной на разрушение при статическом нагружении, определялась по построенным диаграммам, как

средняя площадь под кривыми статического нагружения (рисунок 5.1, а). По результатам экспериментов на одноосное растяжение никелевого сплава партии образцов из 5 штук строились диаграммы деформирования. Характерная диаграмма деформирования никелевого сплава представлена на рисунке 5.2. Критическая величина при статическом нагружении составила $W_{кр.стат} = 26,58$ ГДж/м³.

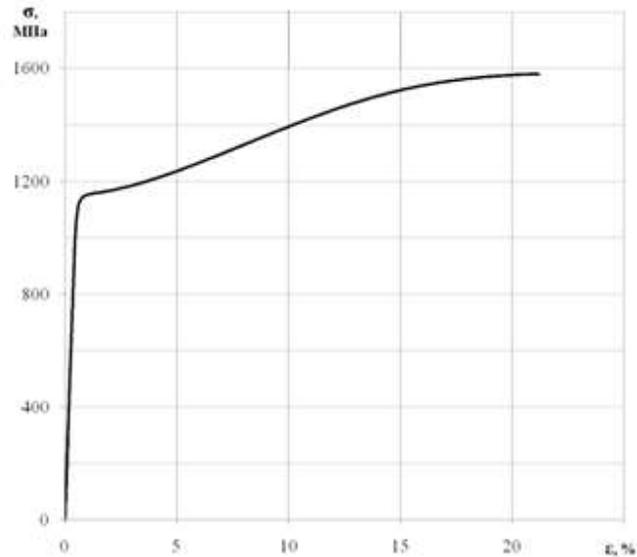


Рисунок 5.2 – Характерная диаграмма деформирования на растяжение цилиндрических образцов из никелевого сплава

Во-втором случае в качестве критической величины при циклическом нагружении с различными параметрами выбирается величина удельной энергии, затраченной на пластическое деформирование при определенной амплитуде деформации:

$$\sum_1^N W_{pl}^i = W_{кр.цикл}. \quad (5.2)$$

Для определения критической величины при циклическом нагружении принимаем за основной эксперимент испытание на малоцикловую усталость с амплитудой деформаций 0,695% при треугольной форме цикла с коэффициентом

асимметрии $R=0$. На основе данного испытания определена критическая энергия циклического деформирования по схеме, представленной на рисунке 5.1, б. По результатам обработки экспериментальных данных значение критической величины при циклическом нагружении составило $W_{кр.цикл} = 1061,02 \text{ ГДж/м}^3$.

Для различных значений амплитуд при простых и сложной формах цикла никелевого сплава были рассчитаны удельные энергии пластического деформирования. Расчёт энергии пластического деформирования проводился с учетом изменения петли гистерезиса в процессе испытания. Результаты представлены в таблице 5.1. Полученные значения сравниваются с критическими величинами при статическом и циклическом нагружениях.

На рисунке 5.3 представлен график зависимости удельной энергии пластического деформирования, отнесенной к удельной энергии, затраченной на разрушение при статическом нагружении от амплитуды осевой деформации. Отмечается, что энергия пластического деформирования к моменту разрушения значительно выше, чем критическая величина, что не позволяет говорить об информативности энергетического подхода в таком виде для описания данных никелевого сплава при простой и сложной формах цикла.

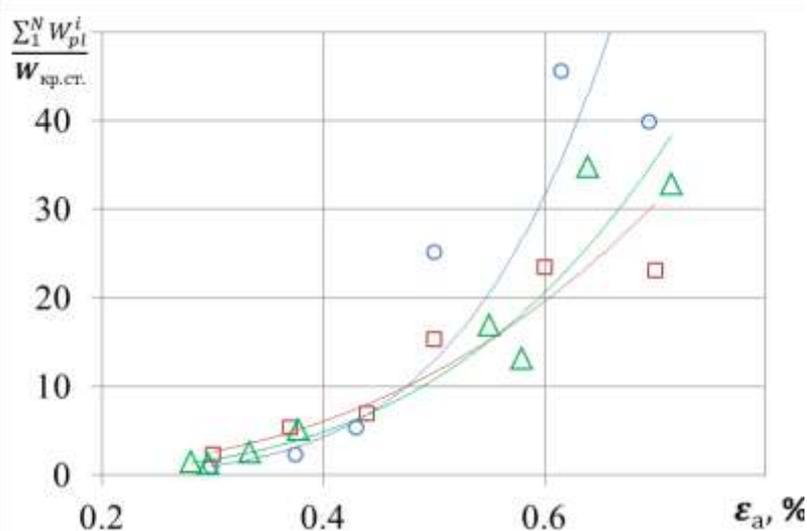


Рисунок 5.3 – Зависимость удельной энергии от амплитуды деформации при: треугольном цикле, $R=0$ (\circ); треугольном, $R=0,35$ (Δ) и M-образном (\square) цикле

Таблица 5.1 – Прогнозирование циклической долговечности при различных формах нагружения по энергетическим критериям

Амплитуда деформаций $\varepsilon_a, \%$	Число циклов до разрушения N	Удельная энергия пластического деформирования $\sum_1^N W_{pl}^i, \text{ГДж/м}^3$	Удельная энергия, затраченная на разрушение при статическом нагружении $W_{кр.стат}, \text{ГДж/м}^3$	Удельная энергия пластического деформирования при определенной амплитуде деформаций $W_{кр.цикл}, \text{ГДж/м}^3$
Треугольная форма цикла, R=0			26,58	1061,03
0,70	1899	1061,03		
0,62	3529	1212,22		
0,50	6250	668,14		
0,43	5636	142,24		
0,38	17711	62,48		
0,30	31249	26,88		
Треугольная форма цикла, R=0,35				
0,83	955	855,06		
0,72	1620	872,83		
0,58	2018	348,86		
0,55	3249	448,42		
0,33	23811	69,98		
0,30	26600	34,65		
М-образная форма цикла				
0,70	1784	615,57		
0,60	2285	623,66		
0,50	5046	409,44		
0,44	6731	184,23		
0,37	12634	141,60		
0,30	23549	61,53		

Из приведенных на рисунках 3.8 и 3.9 в разделе 3.2 зависимостей пластических деформации и сжимающих напряжений от амплитуды деформаций, отмечается рост величины пластической деформации, в сравнении с упругой, и

величины сжимающих напряжений с увеличением амплитуды деформаций. Поэтому было выдвинуто предложение о том, что общая удельная энергия, затраченная на разрушение, может зависеть данных величин.

В связи с этим предположением, для уточненного расчета циклической долговечности по энергетическим критериям, вводим коэффициенты R_1 и R_2 :

– коэффициент R_1 , как отношение пластической ε_{pl} деформации к упругой ε_e :

$$R_1 = \frac{\varepsilon_{pl}}{\varepsilon_e} = \frac{\varepsilon_{pl}}{2\varepsilon_a - \varepsilon_{pl}}, \quad (5.3)$$

– коэффициент R_2 , описывающий величину сжимающих напряжений, как отношение минимального напряжения к максимальному:

$$R_2 = \left| \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} \right|. \quad (5.4)$$

Для применения критерия с учетом введенных коэффициентов за критическую величиной выбирается величина равная удельной энергии разрушения при статическом нагружении:

$$\sum_1^N W_{pl}^i / R_1 = W_{кр.стат}, \quad (5.5)$$

$$\sum_1^N W_{pl}^i / R_2 = W_{кр.стат}. \quad (5.6)$$

В таблице 5.2 представлены значения коэффициентов R_1 и R_2 , полученные значения удельных энергий, затраченные на пластическое деформирование, учитывающие введенные коэффициенты для различных амплитуд деформаций и различных форм нагружения.

Таблица 5.2 – Результаты обработки данных циклических испытаний при постоянных и переменных параметрах цикла

Амплитуда деформации, ε_a , %	Число циклов до разрушения, N	Коэффициент R_1	Коэффициент R_2	Удельная энергия пластического деформирования, $\frac{\sum_1^N W_{pl}^i}{R_1}$, ГДж/м ³	Удельная энергия пластического деформирования, $\frac{\sum_1^N W_{pl}^i}{R_2}$, ГДж/м ³	Удельная энергия, затраченная на разрушение при статическом нагружении, $W_{кр.стат}$, ГДж/м ³	
Треугольный цикл, R=0							
0,70	1899	0,33	0,95	3215,24	1113,95	26,583	
0,62	3529	0,17	0,84	7089,00	1451,63		
0,50	6250	0,07	0,67	9081,35	996,80		
0,43	5636	0,03	0,35	5268,11	406,46		
0,38	17711	0,01	0,34	4659,84	185,67		
0,30	31249	0,02	0,11	1619,24	245,05		
Треугольный цикл, R=0.35							
0,72	1620	0,01	0,27	12340,49	506,10		
0,58	2018	0,02	0,12	1813,57	284,11		
0,55	3249	0,07	0,69	5298,58	502,58		
0,38	17171	0,20	0,86	245,89	56,12		
0,30	26600	0,05	0,77	9363,25	581,19		
М-образный цикл							
0,70	1784	0,30	0,94	2055,35	653,11		
0,60	2285	0,10	0,77	6431,91	811,38		
0,50	5046	0,06	0,61	6420,47	674,55		
0,44	6731	0,02	0,46	7875,95	396,68		
0,37	12634	0,01	0,22	11424,49	655,81		
0,30	23549	0,02	0,12	3540,00	528,06		

По результатам обработки опытных данных никелевого сплава при простых и сложных формах циклов сделан вывод, что для описания полученных экспериментальных данных использование энергетического критерия с учетом введённых коэффициентов также является не вполне пригодным, что может быть

объяснено неучетом явления локализации пластических деформаций на стадии, предшествующей разрушению.

5.2. Проверка применимости нелинейной модели суммирования повреждения при одноосном малоцикловом нагружении со сложной формой цикла

Так как применение энергетических критериев не дало удовлетворительных прогнозов для оценки степени поврежденности материала при малоцикловой усталости в условиях действия переменных амплитуд одноосного циклического нагружения предлагается использование моделей суммирования повреждений.

Самая простая и наиболее широко применяемая теория суммирования повреждений – линейная теория А. Пальмгрена и М.А. Майнера. Однако экспериментальные данные как отечественных, так и зарубежных исследователей в большинстве случаев не подтверждают линейную теорию. Сумма накопленной поврежденности колеблется в очень широких пределах в зависимости от материала и программы нагружения, т.е. большое влияние на долговечность при последующем нагружении оказывает предыстория нагружения [28]. Поэтому целесообразным является использование нелинейных моделей накопления повреждений.

Одной из первых и простых нелинейных гипотез суммирования повреждений была предложена Марко и Старки [12]. По данной гипотезе кривые поврежденности для любой по величине амплитуды деформаций/напряжений описываются следующим соотношением:

$$D = \left(\frac{n}{N}\right)^{m_i}, \quad (5.7)$$

где D – показатель поврежденности при разрушении $D=1$, n – количество циклов нагружения при определенном уровне деформаций, N – количество циклов до

разрушения, m_i – показатель степени, который зависит от уровня деформаций или напряжений.

В случае ступенчатого нагружения, когда изменяется уровень деформаций, суммарная поврежденность вычисляется по следующей формуле [14]:

$$\sum_{k=1}^i D_k = \left[\frac{n_i}{N_i} + \left(\sum_{k=1}^{i-1} D_k \right)^{\frac{1}{m_i}} \right]^{m_i}, \quad (5.8)$$

где D_k – параметр поврежденности за i этапов нагружения.

Рассмотрена возможность применения нелинейной модели для анализа процессов накопления повреждений при цикле сложной формы. Используются экспериментальные данные жаропрочного никелевого сплава при простых формах цикла с разными значениями амплитуд и коэффициентами асимметрии ($R=0$ и $R=0,35$), а также при сложной форме цикла. Сложный М-образный цикл разложен как сумма двух простых циклов треугольной формы (рисунок 5.3).

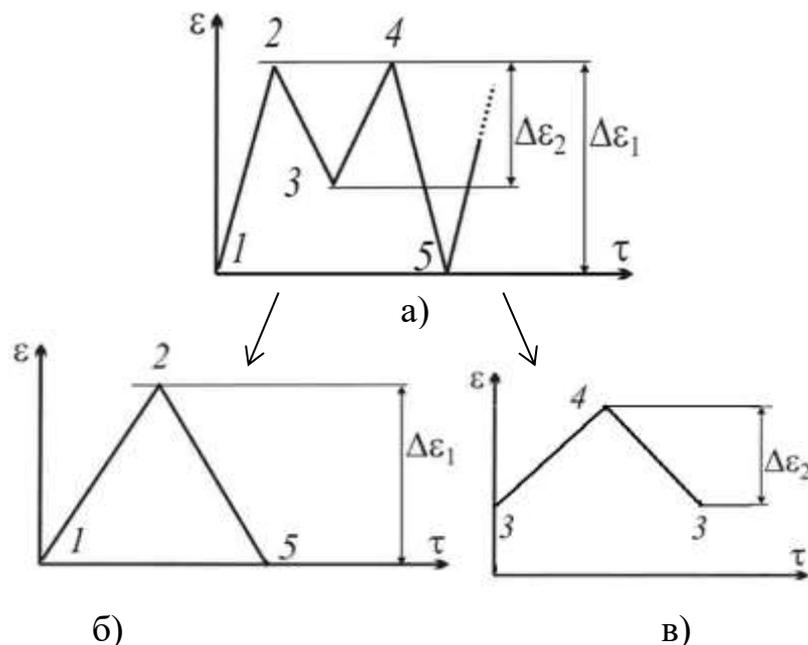


Рисунок 5.3 – Разложение М-образного цикла на циклы простой формы:

а) сложный цикл; б) треугольный цикл, $R=0$; в) асимметричный цикл, $R=0,35$

Схематичное описание процесса накопления повреждений для цикла сложной М-образной формы представлено на рисунке 5.4, где каждая кривая

Таблица 5.3. Предложенные значения показателей степени m , экспериментальные и расчетные данные испытаний на малоцикловую усталость

Амплитуда деформаций ε_a , %	Экспериментальное количество циклов		m_1	m_2	Экспериментальное число циклов для М-обр. формы нагружения $N_{\text{экспер.}}$	Прогнозируемое число циклов для М-обр. формы нагружения $N_{\text{прогноз.}}$
	при R=0 $N_{\text{экспер.}}$	при R=0,35 $N_{\text{экспер.}}$				
0,30	29624	138879	1,8	3,4	23308	23384
0,35	17752	81170	1,8	3,2	14062	14042
0,40	11392	50974	1,8	3,2	9077	9056
0,45	7703	33817	1,8	2,6	6170	6170
0,50	5428	23427	2,0	2,6	4368	4368
0,55	3955	16807	2,0	2,2	3196	3196
0,60	2962	12414	2,0	2,0	2402	2392
0,70	1775	7254	2,0	2,0	1449	1427

Для оценки возможности нахождения единственного набора значений показателей степени в нелинейной модели Марко-Старки использовались полученные результаты экспериментальных исследований алюминиевого сплава Д16Т при блочном нагружении, представленные в разделе 3.3.

Предложена методика определения показателей степени модели Марко-Старки, по которой поиск m осуществлялся в диапазоне показателей степеней от 0,2 до 10 с шагом 0,2. Сопоставление результатов прогнозирования по блокам 2, 3 и 4, состоящих из трёх групп, позволило найти четыре комбинации идентичных показателей степеней m по группам 1 и 5 (так как они присутствуют во всех блоках). Значения комбинаций степеней и расчетные значения долговечностей приведены в таблице 5.4. Результат прогнозирования по модели Марко-Старки с использованием данных показателей степеней соответствует экспериментальным данным.

Таблица 5.4. Найденные комбинации показателей степеней для различных блоков

№ блока	Показатели степеней, входящих в уравнение Марко-Старки					Экспериментальное число циклов $N_{экспер.}$	Прогнозируемое число циклов, $N_{прогноз.}$
	m_1	m_2	m_3	m_4	m_5		
2	0,4	1,0	-	-	0,6	546	546
	0,8	2,0	-	-	1,2		
	1,2	3,0	-	-	1,8		
	3,2	6,6	-	-	5,6		
3	0,4	-	2,8	-	0,6	376	376
	0,8	-	5,6	-	1,2		
	1,2	-	8,4	-	1,8		
	3,2	-	1,0		5,6		
4	0,4	-	-	1,2	0,6	405	406
	0,8	-	-	2,4	1,2		
	1,2	-	-	3,6	1,8		
	3,2	-	-	9,4	5,6		

Для поиска наиболее подходящих комбинаций использовался блок 1, состоящий только из групп 1 и 5. Окончательный выбор пары коэффициентов осуществлялся из условия близости прогнозируемого параметра поврежденности к единице, представленной в таблице 5.5.

Таблица 5.5. Показатели степени для блока 1

m_1	m_5	Суммарное значение параметра поврежденности для 1 блока, $\sum D_{Б1}$
0,4	0,6	1,03
0,8	1,2	1,07
1,2	1,8	1,11
3,2	5,6	1,33

Наиболее близкий прогноз, который предсказывает суммарную поврежденность в блоке близкую к единице дают значения коэффициентов $m_1 =$

0,4 и $m_5 = 0,6$. Для однозначного выбора показателей степени других групп (коэффициенты m_3, m_4) требуется проведение дополнительных экспериментов при блочном нагружении, состоящий из подциклов оставшихся групп.

Таким образом, на основе полученных экспериментальных данных усталостного поведения алюминиевого сплава показана принципиальная возможность использования нелинейной модели накопления повреждений Марко-Старки для случая блочного циклического нагружения.

5.3. Прогнозирование циклической долговечности алюминиевого сплава в условиях многоосного циклического нагружения с использованием модифицированной модели Сайнса

Существуют различные многоосные модели, которые можно использовать для прогнозирования усталостной долговечности различных материалов при сложном напряженном состоянии. В работе [175] авторами предложена модифицированная модель Сайнса, которая позволяет учесть наклоны S-N кривых при растяжении-сжатии и кручении. Модифицированная модель хорошо прогнозирует циклическую долговечность алюминиевого сплава при многоосной многоцикловой усталости. Предложено использование данной модели для прогнозирования усталостной долговечности в условиях двухосного нагружения для случая малоцикловой усталости.

Модель в упрощенном виде можно представить следующим образом:

$$\sqrt{(A\sqrt{I_{2a}})^2 + (B\sqrt{I_{2m}})^2} + CI_{1m} + DI_{1a} \leq 1, \quad (5.8)$$

$$\sqrt{I_{2a}} = \frac{1}{\sqrt{6}} \sqrt{(\sigma_{11a} - \sigma_{22a})^2 + (\sigma_{22a} - \sigma_{33a})^2 + (\sigma_{11a} - \sigma_{33a})^2 + 6(\tau_{12a}^2 + \tau_{23a}^2 + \tau_{13a}^2)}, \quad (5.9)$$

$$\sqrt{I_{2m}} = \frac{1}{\sqrt{6}} \sqrt{(\sigma_{11m} - \sigma_{22m})^2 + (\sigma_{22m} - \sigma_{33m})^2 + (\sigma_{11m} - \sigma_{33m})^2 + 6(\tau_{12m}^2 + \tau_{23m}^2 + \tau_{13m}^2)}, \quad (5.10)$$

$$I_{1a} = \sigma_{11a} + \sigma_{22a} + \sigma_{33a}, \quad (5.11)$$

$$I_{1m} = \sigma_{11m} + \sigma_{22m} + \sigma_{33m}, \quad (5.12)$$

где I_{2a} и I_{2m} – амплитуда и среднее значение второго инварианта тензора девиатора напряжений, I_{1a} и I_{1m} – амплитуда и среднее значение первого инварианта тензора напряжений.

Параметры модели А, В, С и D вычисляются по следующим формулам:

$$A = \frac{1}{\tau_f'(2N_{eq})^{b_0}}, \quad (5.13)$$

$$B = \frac{1}{\tau_u}, \quad (5.14)$$

$$C = \frac{1}{\sigma_B} - \frac{1}{\sqrt{3}\tau_B}, \quad (5.15)$$

$$D = \frac{1}{\sigma_f'(2N_{eq})^{b_1}} - \frac{1}{\sqrt{3}\tau_f'(2N_{eq})^{b_0}}, \quad (5.16)$$

$$N_{eq} = \sqrt{N_\tau N_\sigma}, \quad (5.17)$$

$$N_\sigma = \frac{\nu_\sigma}{\nu_\tau} N_\tau, \quad (5.18)$$

где: N_{eq} является эквивалентом усталостной долговечности;

N_σ и N_τ значения прогнозируемой усталостной долговечности (при растяжении-сжатии и кручении);

σ_B – предел прочности при растяжении;

τ_B – предел прочности при кручении;

τ_f' – коэффициент усталостной прочности при кручении;

b_0 – показатель усталостной прочности при кручении;

σ_f' – коэффициент усталостной прочности;

b_1 – показатель усталостной прочности;

ν_σ и ν_τ – частоты по нормальной и сдвиговой моде.

Для случая двухосного циклического деформирования в условиях растяжения с кручением выражения представлены в следующем виде:

$$\sqrt{(A\sqrt{I_{2a}})^2 + (B\sqrt{I_{2m}})^2} + CI_{1m} + DI_{1a} \leq 1, \quad (5.19)$$

$$\sqrt{I_{2a}} = \frac{1}{\sqrt{3}} \sqrt{(\sigma_{11a})^2 + 3(\tau_{12a}^2)}, \quad (5.20)$$

$$\sqrt{I_{2m}} = \frac{1}{\sqrt{3}} \sqrt{(\sigma_{11m})^2 + 3(\tau_{12m}^2)}, \quad (5.21)$$

$$I_{1a} = \sigma_{11a}, \quad (5.22)$$

$$I_{1m} = \sigma_{11m}. \quad (5.23)$$

Для прогнозирования усталостной долговечности используются результаты испытаний на малоцикловую усталость алюминиевого сплава Д16Т в условиях двухосного нагружения, одна из мод которой изменялась циклическим образом, а другая мода оставалась постоянной по величине в течение испытания, приведенные в разделе 4.4 настоящей работы.

Для нахождения констант, входящих в модифицированную модель Сайнса, были проведены установочные испытания на статическое растяжение (рисунок 4.11 а), статическое кручение (рисунок 4.11 б), а также испытания на симметричное циклическое растяжение-сжатие (рисунок 5.5 а) и симметричное циклическое кручение (рисунок 5.5 б).

Полученные результаты установочных испытаний: предел прочности при растяжении: $\sigma_B = 450$ МПа, предел прочности при кручении $\sigma_B = 566$ МПа; коэффициенты: $\sigma_f' = 12710$, $\tau_f' = 566$, экспоненты: $b_1 = -0,160$, $b_0 = -0,135$.

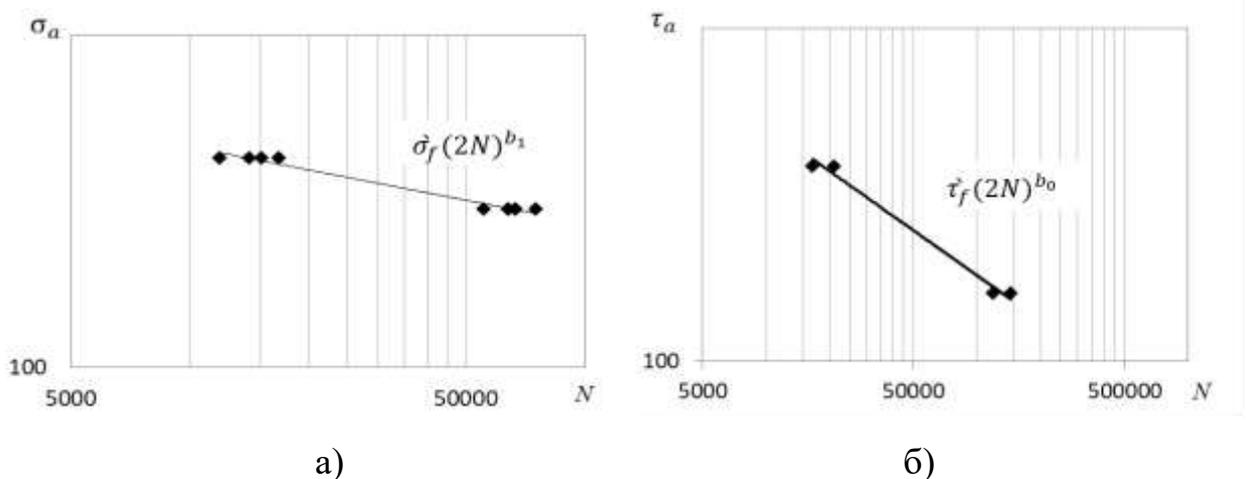


Рисунок 5.5 – Кривые усталости алюминиевого сплава Д16Т при растяжении (а), при кручении (б)

Ниже представлены результаты расчета усталостной долговечности по модифицированной модели Сайнса. На рисунке 5.6 приведены графики зависимости прогнозируемой долговечности от экспериментальной. Цветными точками отмечены испытания при разных значениях амплитуды нормального и касательного напряжения. Штриховыми линиями обозначена область двухфакторной ошибки ($\pm 20\%$) и штрихпунктирными линиями – область трёхфакторной ошибки ($\pm 30\%$).

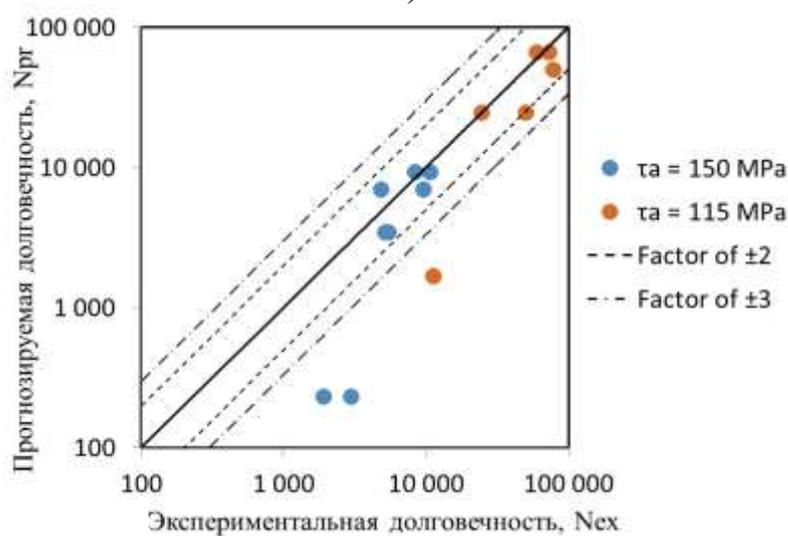
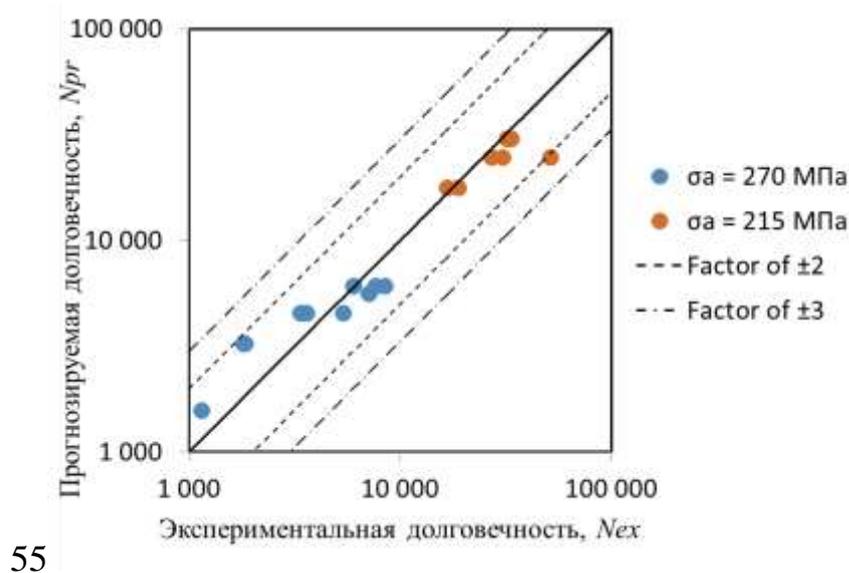


Рисунок 5.6 – Результаты прогнозирования циклической долговечности по предложенной модели образцов алюминиевого сплава Д16Т при циклическом растяжении-сжатии (а), при циклическом кручении (б)

Приведенные выше графики показывают, что при нагрузке с постоянным напряжением сдвига все точки лежат в пределах интервала ± 3 коэффициента. Это свидетельствует о том, что данная модель хорошо предсказывает усталостную долговечность алюминиевого сплава при таких воздействиях. Однако при нагрузке с постоянным нормальным напряжением три точки выходят за пределы интервала ± 3 коэффициента. При этом значения постоянных нормальных напряжений для этих точек составили 350 МПа, что близко к пределу текучести материала. В результате можно сделать вывод, что модель достаточно хорошо предсказывает результат при значениях постоянных нормальных напряжений, меньших предела текучести материала, и становится существенно консервативной при значениях постоянных нормальных напряжений, близких и больших предела текучести. Кроме того, отмечается работа J. Papuga [140], в которой авторы также указывают на аналогичные результаты использования данной модели. Таким образом, возможно, стоит ввести в параметры модели дополнительный член, отвечающий за одностороннее накопление деформаций (ратчетинг), для уточнения прогноза предлагаемой модели в будущем. Это слагаемое вероятно позволит лучшим образом описать экспериментальные данные при высоких значениях статических составляющих напряжений.

Выводы по главе

1. Для прогнозирования циклической долговечности никелевого сплава рассмотрены энергетические критерии разрушения, в которых поврежденность материала связана с общей энергией пластических деформаций. Применение энергетических критериев для описания накопления повреждений никелевого сплава, в которых за критическую величину выбрана удельная энергия разрушения при статическом разрыве и энергия пластического деформирования при определенной амплитуде деформаций, дает неудовлетворительные результаты.

2. Получены новые результаты применения нелинейной модели суммирования повреждений Марко-Старки для прогнозирования циклической долговечности никелевого сплава. На основе результатов циклических испытаний при простых формах цикла с различными значениями амплитуд и коэффициентами асимметрии подобраны значения степеней, позволяющие для случая малоциклового усталости при усложненной (М-образной) форме цикла расчетным способом получить долговечность, хорошо согласующуюся с экспериментальными данными.

3. На основе полученных опытных данных алюминиевого сплава показана принципиальная возможность использования нелинейной модели накопления повреждений Марко-Старки для случая блочного циклического нагружения. По предложенной методике произведен подбор комбинаций коэффициентов степеней, входящих в модель, поиск которых осуществлялся в диапазоне показателей степеней от 0,2 до 10 с шагом 0,2. Показана возможность нахождения единственной комбинации показателей степеней, исходя из условия близости к единице значения параметра поврежденности для проверочного блока.

4. Проведена проверка применимости модифицированной модели многоосной усталости по новым экспериментальным данным алюминиевого сплава Д16Т. Показано, что модифицированная модель Сайнса достаточно хорошо описывает усталостное поведение материала при симметричном растяжении-сжатии с постоянным касательным напряжением и при симметричном кручении с постоянным нормальным напряжением при значениях постоянных нормальных напряжений меньше предела текучести.

Основные результаты, содержащиеся в главе, отражены в публикациях автора [39, 40, 126, 176].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты, полученные в настоящей диссертационной работе, состоят в следующем.

1. Рассмотрены методические аспекты проведения испытаний на малоцикловую усталость при одноосном и двухосном нагружениях с использованием сервогидравлических испытательных систем и измерительных средств контроля напряжений и деформаций. Отработаны вопросы, связанные с реализацией сложных форм циклов при циклическом деформировании, сложного напряженного состояния, непропорционального нагружения и повышенных температур.
2. Проведено экспериментальное исследование механического поведения конструкционных сплавов (никелевого, алюминиевого, титанового) в условиях малоцикловой усталости при одноосных воздействиях с усложненной (М-образной) формой цикла, различными схемами блочного нагружения при нормальных и повышенных температурах.
3. Исследовано влияние сложных форм цикла, различных траекторий сложного циклического нагружения и повышенной температуры на усталостную долговечность легированной стали ЭП517Ш при одновременном действии растяжения-сжатия и кручения.
4. Получены новые экспериментальные данные для алюминиевого сплава Д16Т, отражающие влияние постоянного нормального напряжения при циклическом кручении и постоянного касательного напряжения при циклическом растяжении-сжатии в области малоцикловой усталости. Выявлено значительное изменение долговечности при малых значениях напряжений по второй моде в условиях циклических воздействий с постоянными статическими составляющими по одной оси нагружения.
5. На основе полученных экспериментальных данных о механическом поведении никелевого сплава при усложненной форме цикла и алюминиевого сплава при блочном нагружении проведена проверка применимости нелинейной

модели суммирования повреждений для прогнозирования циклической долговечности.

6. На основе полученных опытных данных для алюминиевого сплава в условиях плоского напряженного состояния проведена верификация модифицированной модели Сайнса, основанной на использовании двух базовых кривых усталости, и проведена оценка точности прогнозируемого ресурса при циклически x воздействиях с дополнительными постоянными составляющими напряжений.

7. Результаты работы используются в учебном процессе кафедры «Экспериментальная механика и конструкционное материаловедение» ФГАОУ ВО «ПНИПУ» по образовательной программе подготовки магистров «Экспериментальная механика» в рамках направления 22.04.01 «Материаловедение и технологии материалов».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алтури С., Кобаяси А., Дэлли Д. и др. Экспериментальная механика. В двух книгах / под ред. А. Кобаяси. – М.: Мир, 1990. – 616 с.
2. Баженов В.Г., Жегалов Д.В., Павленкова Е.В. Численное и экспериментальное исследование упругопластических процессов растяжения-кручения осесимметричных тел при больших деформациях // Изв. РАН. Механика твердого тела. – 2011. – № 2. – С. 57–66.
3. Баженов В.Г., Казаков Д.А., Нагорных Е.В., Осетров Д.Л., Рябов А.А. Экспериментальное и теоретическое исследование больших деформаций цилиндрических образцов из стали 09Г2С с концентраторами напряжений при нагружении растяжением–кручением до разрушения // Вестник ПНИПУ. Механика. – 2018. – № 4. – С. 69–81.
4. Белл Дж.Ф. Экспериментальные основы механики деформируемых твёрдых тел. Часть 1. Малые деформации. – М: Наука, 1984. 800 с.
5. Белл Дж.Ф. Экспериментальные основы механики деформируемых твердых тел, Конечные деформации, Часть 2, Белл Ф.Д., 1984. – 432 с.
6. Беляев М.С., М.А. Горбовец, М.М. Бакрадзе Изменение параметров упругопластического деформирования в процессе испытаний на МЦУ при жестком нагружении жаропрочного сплава ВЖ175 // Труды ВИАМ. – 2015. №12. – С. 30-35.
7. Бондарь В.С., Даншин В.В., Макаров Д.А. Математическое моделирование процессов деформирования и накопления повреждений при циклических нагружениях // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2014. – № 2. – С. 125–152.
8. Букеткин Б.В., Горбатовский А.А., Кисенко И.Д. Экспериментальная механика / под ред. Р.К. Вафина, О.С. Нарайкина. – М: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 136 с.

9. Бураго Н.Г., Журавлев А.Б., Никитин И.С. Модели многоосного усталостного разрушения и оценка долговечности элементов конструкций // Механика твердого тела. – 2011. – № 6. – С. 22–33.
10. Васин Р.А., Еникеев Ф.У. Введение в механику сверхпластичности. Часть 1. Уфа: Гилем. 1998. 278 с.
11. Вахромеев А.М. Определение циклической долговечности материалов и конструкций транспортных средств: методические указания // А.М. Вахромеев. – М.: МАДИ, 2015. – 64 с.
12. Вахромеев А.М. Экспериментальное исследование выносливости алюминиевых сплавов при двухосном асимметричном нагружении // Вестник МАДИ. – 2010. – Т. 46, №24. – С. 22-26.
13. Вахромеев А.М., Петухов А.Н. Сопротивление усталости титанового сплава ВТ3-1 в условиях совместного действия изгиба, кручения и асимметрии цикла нагружения // Проблемы прочности и динамики в авиадвигателестроении. – 1989. – №4. – С. 253-262.
14. Вильдеман В.Э. Моделирование процессов деформирования и разрушения композитов. Ч. 1: Модели накопления повреждений: Учебю пособие / Перм. гос. техн. ун-т. Пермь, 2000. – 76 с.
15. Вильдеман В.Э., Бабушкин А.В., Третьяков М.П., Ильиных А.В., Третьякова Т.В., Ипатова А.В., Словииков С.В., Лобанов Д.С. Механика материалов. Методы и средства экспериментальных исследований: учебное пособие / под ред. В. Э. Вильдемана. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2011. – 165 с.
16. Вильдеман В.Э., Ломакин Е.В., Третьякова Т.В., Третьяков М.П. Закритическое деформирование и разрушение тел с концентраторами в условиях плоского напряженного состояния // Известия РАН. Механика твердого тела. – 2017. – № 5. – С. 22–29.
17. Вильдеман В.Э., Третьяков М.П., Староверов О.А., Янкин А.С. Влияние режимов двухосного нагружения на усталостную долговечность алюминиевого сплава Д16Т и стали 40ХГМА // Вестник ПНИПУ. Механика. 2018. – № 4. – С. 169-177.

18. Вольмир А.С. Сопротивление материалов.Лабораторный практикум/ А.С. Вольмир, Ю.П. Григорьев, А.И. Станкевич. - Москва: Дрофа, 2006. – 352 с.
19. Голубовский Е.Р., Светлов И.Л., Петрушин Н.В., Черкасова С.А., Волков М.Е. Малоцикловая усталость монокристаллов жаропрочных никелевых сплавов при повышенных температурах // Деформация и разрушение материалов. – 2009. – №8. – С. 41-48.
20. ГОСТ 25.502-79 «Методы механических испытаний металлов. Методы испытаний на усталость».
21. ГОСТ 25.505-85. Методы механических испытаний металлов. Метод испытаний на малоцикловую усталость при термомеханическом нагружении.
22. ГОСТ 9651-84. Методы испытаний на растяжение при повышенных температурах.
23. Гусев А.С. Сопротивление усталости и живучесть конструкций при случайных нагрузках. – М.: Машиностроение, 1989. – 248 с
24. Жернаков В.С., Семенова И.П., Ермоленко А.Н. Влияние напряженно-деформированного состояния деталей из объемных наноматериалов на усталостную прочность // Вестник УГАТУ. – 2009. – Т. 12, № 2(31). – С. 62–68.
25. Ильиных А.В., Лыкова А.В., Паньков А.М. Механическое поведение и долговечность конструкционных сталей и сплавов в условиях малоцикловой усталости при растяжении-сжатии и кручении // Материалы XII Всероссийского съезда по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики. – 2019. – С. 647-649.
26. Ильиных А.В., Вильдеман В.Э., Третьяков М.П. Экспериментальное исследование механического поведения конструкционных сплавов при двухосном циклическом нагружении // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. – 2017. – № 51. – С. 115-123.
27. Ильюшин А.А. Пластичность. Основы общей математической теории. М.: Изд-во АН. СССР, 1963. – 271 с.
28. Иноземцев А.А., Нихамкин М.Ш., Ильиных А.В., Ратчиев А.М. Экспериментальная проверка модели суммирования повреждений при

- циклическом нагружении дисков турбин // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2012. – Т. 14, № 4-5. – С. 1372-1375.
29. Кадашевич Ю.И., Новожилов В.В. Об учете микронапряжений в теории пластичности // Инж. Ж. МТТ. – 1968. – № 3. – С. 83-91.
30. Керштейн И.М., Ключников В.Д., Ломакин Е.В., Шестериков С.А. Основы экспериментальной механики разрушения. – М.: Изд-во Моск. Ун-та, 1989. – 140 с.
31. Когаев В.П., Махутов Н.А., Гусенков А.П. Расчеты деталей машин и конструкций на прочность и долговечность: Справочник. – М.: Машиностроение. – 1985. – 224 с.
32. Коллинз Дж. Повреждение материалов в конструкциях. Анализ, предсказание, предотвращение: Пер. с англ. – М: Мир, 1984. – 624 с.
33. Колмогоров В.Л. Напряжения, деформации, разрушение. М.: Metallurgia. – 1970. – 229 с.
34. Куранаков С.Я. О применимости кинетического уравнения повреждений энергетического типа для расчета момента разрушения металлических материалов // Известия вузов. МАШИНОСТРОЕНИЕ. – 2007. – №6. – С.71-75.
35. Куркин А. С., Батов Г. П. Предельная пластичность - универсальная локальная критериальная характеристика разрушения для оценки ресурса сварных конструкций // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2010. – Т. 76. – № 6. – С. 45-54.
36. Кузьменко В.А. Усталостные испытания при высоких частотах нагружения (Под ред. В.А. Кузьменко) – Киев: Наук. думка, 1979. – 335с.
37. Лебедев, А.А. Механические свойства конструкционных материалов при сложном напряженном состоянии. – Киев: Изд. Дом «Ин Юре», 2003. – 540 с.
38. Ломакин Е.В., Третьяков М.П., Ильиных А.В., Лыкова А.В. Механическое поведение конструкционной стали ЭП517Ш при двухосной малоцикловой усталости в условиях нормальных и повышенных температур // Вестник ПНИПУ. Механика. – 2019. – №1. С. – 77–86.

39. Лыкова А.В. Прогнозирование циклической долговечности конструкционных сплавов при малоцикловой усталости с использованием энергетических критериев разрушения // Материалы XVIII Всероссийской научно-технической конференции Аэрокосмическая техника, высокие технологии и инновации, 2017 г. – С.126-129.
40. Лыкова А.В., Ильиных А.В., Вильдеман В.Э. Прогнозирование циклической долговечности при малоцикловой усталости с использованием нелинейной модели Марко-Старки // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2022. – №. 3. – С. 14–22. DOI: 10.15593/perm.mech/2022.3.02
41. Лыкова А.В., Ильиных А.В. Изучение закономерностей накопления повреждений в условиях малоциклового нагружения и переменных параметров цикла // Материалы XXXI Международной инновационной конференции молодых ученых и студентов по проблемам машиноведения. – 2019. – С. 787-790.
42. Лыкова А.В., Ильиных А.В. Изучение закономерностей накопления повреждений конструкционных сплавов при одноосном малоцикловом нагружении // Материалы XII Международной конференции «Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций», 2018 г. – С. 209.
43. Лыкова А.В., Ильиных А.В. Механическое поведение алюминиевого сплава в условиях двухосного малоциклового нагружения при действии осевой составляющей постоянной величины // Материалы XXXIII Международной инновационной конференции молодых ученых и студентов по проблемам машиноведения. – 2021. – С. 59-64.
44. Лыкова А.В., Ильиных А.В. Модели прогнозирования долговечности конструкционных сплавов при малоцикловой усталости и разных формах цикла // Материалы XX Зимней школы по механике сплошных сред, 2017 г. – С. 201.
45. Лыкова А.В., Ильиных А.В. Особенности механического поведения конструкционных сплавов при малоцикловой усталости и переменных параметрах циклов жесткого нагружения // Материалы XXV Всероссийской школы-

конференции молодых ученых и студентов «Математическое моделирование в естественных науках». – 2016 – С. 200-203.

46. Лыкова А.В., Ильиных А.В. Экспериментальное исследование циклической долговечности сплава ЭП517Ш при сложном нагружении с использованием эквивалентных параметров // Материалы XIX Всероссийской научно-технической конференции Аэрокосмическая техника, высокие технологии и инновации. – 2018. – С. 192-195.

47. Лыкова А.В., Ильиных А.В. Упругопластическое деформирование и разрушение конструкционной стали в условиях двухосного нагружения // Материалы XIII Международной конференции по прикладной математике и механике в аэрокосмической отрасли (АММАГ'2020), 2020 г. – С. 306-307.

48. Лыкова А.В., Ильиных А.В. Механическое поведение конструкционных сплавов при циклическом воздействии с переменными параметрами цикла // Материалы XXVI Всероссийской школы-конференции молодых ученых и студентов «Математическое моделирование в естественных науках». С. 227-228.

49. Лыкова А.В., Ильиных А.В. Циклическая долговечность конструкционных сплавов в условиях двухосного малоциклового нагружения // Материалы XXVII Всероссийской школы-конференции молодых ученых и студентов «Математическое моделирование в естественных науках», 2018 г. С. 165-166.

50. Лыкова А.В., Ильиных А.В., Янкин А.С., Вильдеман В.Э. Влияние е дополнительных статических воздействий на малоцикловую усталость при растяжении и кручении // Материалы XVI Международной конференции «Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций», 2022 г. – С. 89.

51. Махутов Н.А. Конструкционная прочность, ресурс и техногенная безопасность: в 2 ч. / Новосибирск: Наука, 2005. Ч.1: Критерии прочности и ресурса. 494с.

52. Наймарк О.Б., Банников М.В. Нелинейная кинетика развития поврежденности и аномалии упругих свойств металлов при гигацикловом нагружении Письма о материалах. – 2015. – Т. 5. – № 4 (20) – С. 497-503.

53. Шанявский А.А. Моделирование усталостных разрушений металлов. Синергетика в авиации / Уфа: ООО «Монография», 2007. 500с.
54. Пряхин В.В. Закономерности малоциклового деформирования, разрушения и влияние нестационарного нагружения на повреждаемость штамповых материалов в условиях эксплуатационных температур // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2014. – №11. – С. 169 – 175.
55. Романов А. Н. Разрушение при малоцикловом нагружении: [монография] / А.Н. Романов; отв. ред. А. А. Чижик; Акад. наук СССР, Ин-т машиноведения им. А.А. Благоднарова. – М.: Наука, 1988. – 279 с.
56. Романов А. И. Энергетические критерии разрушения при малоцикловом нагружении // Проблемы прочности. 1974. № 1. с. 4-13.
57. Савкин, А.Н. Прогнозирование долговечности материала при блочном переменном циклическом нагружении / Савкин А.Н., Седов А.А. // Проблемы машиностроения и надёжности машин. - 2011. - № 4. - С. 50-55.
58. Серенсен С.В. Прочность материалов и элементов конструкций при статическом нагружении. Избр. Тр.: в 3-х т. – Киев: Наук.думка, 1985. – Т.1. 256 с.
Серенсен С.В. Усталость материалов и элементов конструкций. Избр. Тр.: в 3-х т. – Киев: Наук.думка, 1985. – Т.2. 256 с
59. Шлянников В.Н. Вычислительная механика деформирования и разрушения / Шлянников В.Н. // Изд-во КГЭУ. Казань, 2001. 257 с.
60. Степнов М.Н. Вероятностные методы оценки характеристик механических свойств материалов и несущей способности элементов конструкций. Новосибирск: Наука, 2005. – 245 с.
61. Терентьев, В. Ф. Усталость металлов / В. Ф. Терентьев, С. А. Кораблева. М.: Наука. – 2015. – 479 с.
62. Терентьев В.Ф. Усталость металлических материалов. – М.: Наука, 2003. – 254 с.
63. Трощенко, В. Т. Сопротивление усталости металлов и сплавов / В. Т. Трощенко, Л. А. Сосновский. Киев: Наукова думка. – 1987. – 1303 с.

64. Трощенко В.Т. Критерии усталостной прочности металлов и сплавов, основанные на учете рассеяния энергии//Рассеяние энергии при колебаниях упругих систем. – Киев: Наук. думка. – 1966. – С. 168-177.
65. Школьник Л.М. Методика усталостных испытаний. Справочник. М.: Металлургия, 1978. – 304 с
66. Abdalla J.A., Hawileh R.A., Oudah F. et al. Energy-based prediction of low-cycle fatigue life of BS 460B and BS B500B steel bars // Materials Design. 2009. – Vol. 30. – Issue. 10. – P. 4405-4413.
67. Anes V., Reis L., LiB., FreitasM. Effect of non-proportionality in the fatigue strength of 42CrMo4 steel // Materials Science Forum. – 2013. – Vol.730-732. – P.757-762.
68. Anes V., Reis L., Li B., Freitas M. Crack path evaluation on HC and BCC microstructures under multiaxial cyclic loading // International Journal of Fatigue. – 2014. – Vol. 58. – P.102-113.
69. ASTM E 606-04 «Standard Practice for Strain-Controlled Fatigue Testing».
70. ASTM E 2207-02 «Practice for strain-controlled axial-torsional fatigue test with thin-walled tubular specimens»
71. Basquin O.H. The exponential law of endurance tests // ASTM Proc. – 1910. – Vol. 10. – P. 625-630.
72. Bassindle C., Miller R.E., Wang X. Effect of single initial overload and mean load on the low-cycle fatigue life of normalized 300 M alloy steel // International Journal of Fatigue. – 2020. – Vol. 130. – 105273.
73. Benham P.P. and Ford H. Low endurance fatigue of a mild steel and an aluminum alloy // Journal of Mechanical Engineering and Sciences. – 1961. – Vol. 3. Iss. 3. – P. 119-132.
74. Bennebach M., Palin-Luc T. Effect of static and intermittent shear stress on the fatigue strength of notched components under combined rotating bending and torsion // Procedia Engineer-ing, 6th Fatigue Design Conference, Fatigue Design. –2015. – Vol.133. – P. 107–114.

75. Bennebach M., Palin-Luc T., Messenger A. Effect of mean shear stress on the fatigue strength of notched components under multiaxial stress state // *Procedia Engineering*, 7th International Conference on Fatigue Design, Fatigue Design. –2018. – Vol. 213. – P. 25-35.
76. Bocher L. et al. Mechanical and microstructural investigations of an austenitic stainless steel under non-proportional loadings in tension–torsion–internal and external pressure // *International Journal of Plasticity*. – 2001. – Vol. 17. – P. 1491–1530.
77. Brown M.W., Miller K.J. A theory for fatigue under multiaxial stress–strain conditions // *Proc Inst Mech Eng*. – 1973. – Vol.187. – P. 745-756.
78. Carpinteri, E. Macha, R. Brighenti, et al. Critical fracture plane under multiaxial random loading by means of Euler angles averaging // *Eur Struct Integr Soc*. – 1999. – Vol.25. – P. 166-178.
79. Chen X., Jiao R. Modified kinematic hardening rule for multiaxial ratcheting prediction // *International Journal of Plasticity*. – 2004. – Vol. 20. – P. 871–898.
80. Chen X., Jiao R., Kim K.S. On the Ohno–Wang kinematic hardening rules for multiaxial ratcheting modeling of medium carbon steel // *International Journal of Plasticity*. – 2005. – Vol. 21. – P. 161–184.
81. Chen H., Shang D.G., Tian Y.J., Liu J.Z. Comparison of multiaxial fatigue damage models under variable amplitude loading // *J Mech Sci Technol*. – 2012. – Vol. 26. – Iss. 11. – P. 3439-3446.
82. Chen X., Xu S., Huang D. A Critical Plane-Strain Energy Density Criterion for Multiaxial Low-Cycle Fatigue Life Under Non-proportional Loading // *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct*. – 1999. – Vol 22. – P. 679–686.
83. Chen C., Zhang F., Lv B., Ma H., Wang L., Zhang H., Shen W. Asynchronous effect of N+Cr alloying on the monotonic and cyclic deformation behaviors of Hadfield steel // *Materials Science and Engineering: A*. – 2019. – Vol. 761. – 138015.
84. Chen G., Zhang Y., Xu D.K., Chen X. Low cycle fatigue and creep-fatigue interaction behavior of nickel-base superalloy GH4169 at elevated temperature of 650 °C // *Materials Science and Engineering: A*. – 2016. – Vol. 655. – P. 175-182.

85. Chu C.-C. Fatigue damage calculation using the critical plane approach // *Journal of Engineering Materials and Technology*. – 1995. – Vol. 117. – P 41-49.
86. Diarmid D.M. A general criterion for high cycle multiaxial fatigue failure // *Fatigue Eng Mater Struct*. – 1991. – Vol. 14. – P. 429-453
87. Dong Y., Kang G., Liu Y., Jiang H. Multiaxial Ratcheting of 20 Carbon Steel: Macroscopic Experiments and Microscopic Observations // *Mater. Charact.* – 2013. – Vol. 83. – P. 1–12.
88. Du W., Luo Y., Wang Y., Chen S., Yu D. A new energy-based method to evaluate low-cycle fatigue damage of AISI H11 at elevated temperature // *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*. – 2017. – Vol. 40. – Iss.6. – P.994-1004.
89. Fan Y.S., Huang W.Q., Yang X.G., Shi D.Q., Han S.W. The role of coarsening on LCF behavior using small coupons of a DS Ni-based superalloy // // *International Journal of Fatigue*. – 2019. – Vol. 125. – P. 418-431.
90. Fatemi A., Shamsaei N. Multiaxial fatigue: an overview and some approximation models for life estimation // *International Journal of Fatigue*. – 2011. – Vol. 33. – P. 948-958.
91. Fatemi A., Socie D.F. A critical plane approach to multiaxial fatigue damage including out-of-phase loading // *Fatigue Fract Eng Mater Struct*. – 1988. – Vol. 11. – P. 149-165.
92. Findley W.N. A theory for the effect of mean stress on fatigue of metals under combined torsion and axial load or bending *J Eng Ind* (1959), pp. 301-306.
93. Gates, N.R., Fatemi, A. On the consideration of normal and shear stress interaction in multiaxial fatigue damage analysis// *International Journal of Fatigue*. – 2017. – Vol. 100. – P. 322-336.
94. Gillham B., Yankin A., McNamara F., Tomonto C., Taylor D., Lupoi R. Application of the Theory of Critical Distances to predict the effect of induced and process inherent defects for SLM Ti-6Al-4V in High Cycle Fatigue // *CIRP Annals*. – 2021. – Vol. 70. – Iss.1. – P. 171–174.

95. Gladskiy M., Shukaev S. A New Model for Low Cycle Fatigue of Metal Alloys Under Non-proportional Loading // *International Journal of Fatigue*. – 2010. – Vol. 32. – P. 1568–1572.
96. Glinka G., Shen G., Plumtree A. Mean stress effect in multiaxial fatigue // *Fatigue Fract Eng Mater Struct*. – 1995. – Vol.18. – P. 755-764.
97. Goodman J. *Mechanics applied to engineering* // London: Longmans Green. – 1899.
98. Gough H.J. Engineering steels under combined cyclic and static stresses // *J Appl Mech*. – 1950. – Vol. 50. – P. 113-125.
99. Han C., Chen X., Kim K.S. Evaluation of multiaxial fatigue criteria under irregular loading // *International Journal of Fatigue*. – 2002. – Vol. 24. – P. 913-922.
100. Han Q., Wang P., Lu Y. Low-cycle multiaxial fatigue behavior and life prediction of Q235B steel welded material // *International Journal of Fatigue*. – 2019. – Vol. 127. – P. 417-430
101. Hasunuma S., Ogawa T. Crystal plasticity FEM analysis for variation of surface morphology under low cycle fatigue condition of austenitic stainless steel // *International Journal of Fatigue*. – 2019. – Vol. 127. – P. 488-499.
102. Hasunuma S., Oki S., Motomatsu K., Ogawa T. Fatigue life prediction of carbon steel with machined surface layer under low-cycle fatigue // *International Journal of Fatigue*. – 2019. – Vol. 123. – P. 255-267.
103. He J., Chen J., Sun Q. Effect of Loading Rate on Low-cycle Fatigue Properties of Turbine Rotor Steel // *Procedia Materials Science*. – 2014. – Vol.3. – P. 1773 – 1779.
104. Htoo A.T., Miyashita Y., Otsuka Y., Mutoh Y., Sakurai S. Variation of local stress ratio and its effect on notch fatigue behavior of 2024-T4 aluminum alloy // *International Journal of Fatigue*. – 2016. – Vol. 88. – P. 19-28.
105. Humayun Kabir S. M., Yeo Tae-in Influence of temperature on a low-cycle fatigue behavior of a ferritic stainless steel // *Journal of Mechanical Science and Technology*. – 2014. – Vol. 28 (7). P. 2595-2607.
106. Itoh T. A model for evaluation of low cycle fatigue lives under non-proportional straining // *J Soc Mater Sci Jpn*. – 2001. – Vol. 50. – Iss.12. – P. 1317-1322.

107. Itoh T., Fukumoto K., Hagi H. Low Cycle Fatigue Damage of Mod.9Cr-1Mo Steel under Non-Proportional Multiaxial Loading // *Procedia Engineering*. – 2013. – Vol. 55. – P. 457-462.
108. Itoh T., Murashima K., Hirai T. Material dependence of multiaxial low cycle fatigue properties under non-proportional loading // *J Soc Mater Sci Jpn*. – 2007. – Vol. – 56. – Iss. 2. – P. 157-163.
109. Itoh T., Nakata T., Sakane M., Ohnami M. Nonproportional low cycle fatigue of 6061 aluminum alloy under 14 strain paths // *Elsevier International Series on Structural Integrity*. – 1999. – Vol. 25. – P. 41-54.
110. Kalluri S., Bonacuse P.J. In-phase and out-of-phase axial-torsional fatigue behavior of Haynes 188 superalloy at 760C // *Advances in multiaxial fatigue // ASTM Int*. – 1993.
111. Kandil F.A., Brown M.W., Miller K.J. Biaxial low cycle fatigue fracture of 316 stainless steel at elevated temperatures. In: *Book 280 // The Metals Society, London*. – 1982. – P. 203-210.
112. Kang G.Z., Liu Y.J. Uniaxial ratcheting and low cycle fatigue failure of the steel with cyclic stabilizing or softening feature // *Materials Science and Engineering A*. – 2008. – Vol. 472. – P. 258-268.
113. Kang G.Z., Liu Y.J., Zhao L. Experimental study on ratcheting-fatigue interaction of SS304 stainless steel in uniaxial cyclic stressing // *Materials Science and Engineering A*. – 2006. – Vol. 435–436. – P. 396-404.
114. Kardas D., Kluger K., Łagoda T., Ogonowski P. Fatigue life of 2017(a) aluminum alloy under proportional constant-amplitude bending with torsion in energy approach // *Mater Sci*. – 2008. – Vol. 44. – Iss. 4. – P. 541-549.
115. Kluger K. Fatigue life estimation for 2017A-T4 and 6082-T6 aluminum alloys subjected to bending-torsion with mean stress // *International Journal of Fatigue*. – 201. – Vol. 80. – P. 22-29.
116. Kluger K., Łagoda T. New energy model for fatigue life determination under multiaxial loading with different mean values // *International Journal of Fatigue*. – 2014. – Vol. 66. – P. 229-245.

117. Łagoda T. Energy models for fatigue life estimation under uniaxial random loading. Part I: The model elaboration // *International Journal of Fatigue*. – 2001. – Vol. 23. – Iss. 6. – P. 467-480.
118. Li H., Gao J., Li Q. Fatigue of Friction Stir Welded Aluminum Alloy // *Applied Sciences*. – 2018. – Vol. 8. – Iss. 12. 2626. DOI:10.3390/app8122626.
119. Li J., Wang X., Li R., Qiu Y. Multiaxial fatigue life prediction for metals by means of an improved strain energy density-based critical plane criterion // *European Journal of Mechanics - A/Solids*. – 2021. – Vol. 90. 104353.
120. Liu K.C. A method based on virtual strain energy parameters for multiaxial fatigue life prediction // *Advances in multiaxial fatigue, ASTM STP 1191*. – 1993. – P. 67–84.
121. Liu Y.J., Kang G.Z., Gao Q. Stress-based fatigue failure models for uniaxial ratcheting-fatigue interaction // *International Journal of Fatigue*. – 2008. – Vol. 30. – P. 1065-1073.
122. Liu L., Meng J., Liu J., Jin T., Sun X. Effects of crystal orientations on the cyclic deformation behaviour in the low cycle fatigue of a single crystal nickel-based superalloy // *Materials Design*. – 2017. – Vol. 131. – P. 441-449.
123. Liu T., Shi X., Zhang J., Fei B. Crack initiation and propagation of 30CrMnSiA steel under uniaxial and multiaxial cyclic loading // *International Journal of Fatigue*. – 2019. – Vol. 122. – P. 240-255.
124. Liu J., Zhang Q., Zuo Z., Xiong Y., Ren F., Volinsky A.A. Microstructure evolution of Al-12Si-CuNiMg alloy under high temperature low cycle fatigue // *Mater Sci Eng A*. – 201. – Vol. 574. – P. 186-190.
125. Lu C., Melendez J., Martínez-Esnaola J.M. Prediction of crack initiation plane direction in high-cycle multiaxial fatigue with in-phase and out-of-phase loading // *Fatigue Fract Eng Mater Struct*. – 2017. – Vol. 40. – P. 1994-2007.
126. Lykova A.V., Ilinikh A.V. Studying of accumulation damages regularities under low cycle loading and cycle variable parameters conditions // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2020. – № 747. – 012122.

127. Malek B., Mabru C., Chaussumier M. Fatigue behavior of 2618-T851 aluminum alloy under uniaxial and multiaxial loadings // *International Journal of Fatigue*. – 2019. – Vol. 131. – 105322.
128. Ma T.-H., Gao N., Chang L., He X.-H., Zhou C.-Y. Low-cycle fatigue behavior and life prediction of CP-Ti under non-proportional and multiaxial loading // *Engineering Fracture Mechanics*. – 2021. – Vol. 254. 107930.
129. Manson S.S. Discussion of Tavernelli and Coffin // *J Basic Eng, Trans ASME*. – 1962. – Vol. 84. – P. 537-541.
130. Mishnev R., Dudova N., Kaibyshev R. Effect of the strain rate on the low cycle fatigue behavior of a 10Cr-2W-Mo-3Co-NbV steel at 650 °C // *International Journal of Fatigue*. – 2017. – Vol. 100. – Part 1. – P. 113-125.
131. Močilnik V. et al. The influence of constant axial compression pre-stress on the fatigue failure of torsion loaded tube springs // *Engineering Fracture Mechanics*. – 2010. – Vol. 77. – P. 3132–3142.
132. Močilnik V., Gubelj N., Predan J. The Influence of a Static Constant Normal Stress Level on the Fatigue Resistance of High Strength Spring Steel // *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*. – 2017. – Vol. 91. – P. 139–147.
133. Morrow J.D. *Fatigue design handbook: Advances engineering* // Warrendale, P.A: Society of Automotive Engineers. – 1968. – Vol. 4. – P. 21-29.
134. Mylnikov V.V., Shetulov D.I., Chernyshov E.A. Investigation into the Surface Damage of Pure Metals Allowing for the Cyclic Loading Frequency // *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*. – 2013. – Vol. 54. – No. 3. – P.229–233.
135. Nagesha A., Goyal Sunil, Nandagopal M. et al. Dynamic strain ageing in Inconel Alloy 783 under tension and low cycle fatigue // *Mater. Sci. and Eng. A*. – 2012. – Vol. 546. – P. 34-39.
136. Nikhamkin M.S., Ilinykh A.V. Low Cycle Fatigue and Crack Grow in Powder Nickel Alloy under Turbine Disk Wave Form Loading: Validation of Damage Accumulation Model // *Applied Mechanics and Materials*. – 2014. – Vol. 467. – P. 312-316.

137. Nitta A., Ogata T., Kuwabara K. The effect of axial-torsional straining phase on elevated-temperature biaxial low-cycle fatigue life in SUS304 stainless steel // *J Soc Mater Sci Jpn.* – 1989. – Vol. 36. – P. 376-382.
138. Noban M., Jahed H., Ibrahim E., Ince A. Load Path Sensitivity and Fatigue Life Estimation of 30CrNiMo8HH // *International Journal of Fatigue.* – 2012. – Vol. 37. – P. 123–133.
139. Noban M., Jahed H., Winkler S., Ince A. Fatigue characterization and modeling of 30CrNiMo8HH under multiaxial loading // *Materials Science and Engineering A.* – 2011. – Vol. 528. – Iss. 6. – Pp. 2484–2494.
140. Papuga J., Nesládek M., Hasse A., Cízová E., Suchý L. Benchmarking Newer Multiaxial Fatigue Strength Criteria on Data Sets of Various Sizes // *Metals.* – 2022. – Vol. 12. – 289. DOI:10.3390/met12020289.
141. Patricio E. Carrion, Nima Shamsaei, Steven R. Daniewicz, Robert D. Moser Fatigue behavior of, Ti-6Al-4V ELI including mean stress effects // *International Journal of Fatigue.* – 2017. – Vol. 99. – Iss. 1. – P. 87-100.
142. Pei, X., Ravi, S.K., Dong, P., Li, X. and Zhou, X. A multi-axial vibration fatigue evaluation procedure for welded structures in frequency domain // *Mechanical Systems and Signal Processing.* – 2022. – Vol. 167. 108516. DOI:10.1016/j.ymssp.2021.108516.
143. Pejkowski L., Skibicki D., Seyda J. Stress-strain response and fatigue life of a material subjected to asynchronous loadings // *AIP Conference Proceeding.* – 2018. Vol. 2028. – 020016.
144. PečM., Zapletal J., Šebek F., Petruška J. Low-Cycle Fatigue, Fractography and Life Assessment of EN AW 2024-T351 under Various Loadings // *Experimental Techniques.* – 2018 – Vol. – 43. – P. 41-56.
145. Portier L. et al. Ratcheting under tension-torsion loadings: experiments and modeling. *International Journal of Plasticity.* – 2000. – Vol. 16. – P. 303–335.
146. Reis L., Li B., De M. Freitas A multiaxial fatigue approach to Rolling Contact Fatigue in railways // *International Journal of Fatigue.* – 2014. Vol. – 67. – P. 191-202.

147. Ribeiro A.S., De Jesus A.M. Fatigue Behaviour of Welded Joints Made of 6061-T651 Aluminium Alloy // Aluminium Alloys, Theory and Applications, IntechOpen, London. – 2011. DOI: 10.5772/14489.
148. Rodriguez R.I., Jordon J.B., Allison P.G., Rushing T., Garcia L. Low-cycle fatigue of dissimilar friction stir welded aluminum alloys // Materials Science and Engineering: A. – 2016. – Vol. 654. – P. 236-248.
149. Shamsaei N., Fatemi A. Effect of Microstructure and Hardness on Non-proportional Cyclic Hardening Coefficient and Predictions // Materials Science and Engineering A. – 2010. – Vol. 527. – Iss. 12. – P. p 3015–3024.
150. Shang D.G., Sun G.Q., Deng J. et al. Multiaxial fatigue damage parameter and life prediction for medium-carbon steel based on the critical plane approach // International Journal of Fatigue. – 2007. – Vol. 29. – Iss.12. – P. 2200-2207.
151. Shanyavskiy A. Fatigue cracking simulation based on crack closure effects in Al-based sheet materials subjected to biaxial cyclic loads // Engineering Fracture Mechanics. – 2011. – Vol. 78. – Iss. 8. – P. 1516-1528.
152. Sharifimehr, S., Fatemi, A. Interaction Between Normal and Shear Stresses and Its Effect on Multiaxial Fatigue Behavior // MATEC Web of Conferences. – 2019. – Vol. 300. 16007. DOI: 10.1051/mateconf/201930016007.
153. Sinaha S., Ghosh S. Modeling cyclic ratcheting-based fatigue life of HSLA steels using crystal plasticity FEM simulations and experiments // International Journal of Fatigue. – 2006. – Vol. 28. – P. 1690-1704.
154. Sines G. Behaviour of metals under complex static and alternating stresses // Metal Fatigue. – 1959. – P. 145-169.
155. Skibicki D., Pejkowski L. Low-cycle multiaxial fatigue behaviour and fatigue life prediction for CuZn37 brass using the stress-strain models // International Journal of Fatigue. – 2017. – Vol. 102. – P. 18-36.
156. Smith R.N., Watson P., Topper T.H. A stress–strain function for the fatigue of metals // J Mater. – 1970. – Vol. 5. – Iss. 4. – P. 767-77
157. Socie D. Critical plane approaches for multiaxial fatigue damage assessment // Advances in Miltiaxial Fatigue. – 1993. – Vol.1191. – P. 7-36.

158. Huang H.-M., Chang W.-J., Teng N.-C. et al. Structural Analysis of Cyclic-loaded Nickel-Titanium Rotary Instruments by Using Resonance Frequency as a Parameter // *Journal of Endodontics*. – 2011. – Vol. 37. – No 7. – P. 993–996.
159. Susmel L. Tovo R., Socie D.F. Estimating the orientation of Stage I crack paths through the direction of maximum variance of the resolved shear stress // *International Journal of Fatigue*. – 2014. – Vol. 58. – P. 94-101.
160. Sun G.-Q., Shang D-G. Low cycle fatigue and creep-fatigue interaction behavior of nickel-base superalloy is // *Materials Design*. – 2010. – Vol.31. – P. 126.
161. Tobias J., Chlupova A., Petrevec M. et al. Low Cycle Fatigue and Analysis of the Cyclic Stress-Strain Response in Superalloy Inconel 738LC // 18-th International Conference «Engineering Mechanics 2012». Svatka. – 2012. – P. 1407-1411.
162. Varvani-Farahani A. A new energy-critical plane parameter for fatigue life assessment of various metallic materials subject to in-phase and out-of-phase multiaxial fatigue loading conditions // *International Journal of Fatigue*. – 2000. – Vol. 22. – P. 295-305.
163. Walat K., Kurek M., Ogonowski P., Łagoda T. The multiaxial random fatigue criteria based on strain and energy damage parameters on the critical plane for low-cycle range // *International Journal of Fatigue*. – 2012. Vol. 37. – P. 100-111.
164. Wang C.H., Brown M.W. A path-independent parameter for fatigue under proportional and non-proportional loading // *Fatigue Fract Eng Mater Struct*. – 1993. – Vol. 16. – P. 1285-1298.
165. Wang M., Pang J.C., Li S.X., Zhang Z.F. Low-cycle fatigue properties and life prediction of Al-Si piston alloy at elevated temperature // *Mater Sci Eng A*. – 2017. – Vol.704. – P. 480-492.
166. Wang M., Pang J.C., Liu H.Q., Zou C.L., Zhang Z.F. Deformation mechanism and fatigue life of an Al-12Si alloy at different temperatures and strain rates // *International Journal of Fatigue*. – 2019. – Vol. 127. – P. 268-274.
167. Wang J.J., Wen Z.X., Zhang X.H., Zhao Y.C., Yue Z.F. Effect mechanism and equivalent model of surface roughness on fatigue behavior of nickel-based single crystal superalloy // *International Journal of Fatigue*. – 2019. – Vol. 125. – P. 101-111.

168. Wang Q., Xin C., Sun Q., Xiao L., Sun J. Biaxial fatigue behavior of gradient structural purity titanium under in-phase and out-of-phase loading *International Journal of Fatigue*. – 2018. – Vol.116. P. 602-609.
169. Wu Z.R., Hu X.T., Song Y.D. Multiaxial fatigue life prediction for titanium alloy TC4 under proportional and nonproportional loading // *International Journal of Fatigue*. – 2014. – Vol. 59. – P. 170-175.
170. Wu M., Itoh T., Shimizu Y., Nakamura H., Takanashi M. Low cycle fatigue life of Ti–6Al–4V alloy under non-proportional loading // *International Journal of Fatigue*. – 2012. – Vol. 44. – P. 14-20.
171. Xia T., Yao W., Lu J-G. On the Shear Stress Parameter of Thin-walled Tubular Specimens under Torsional Loading // *Procedia Engineering*. – 2014. – Vol. 74. – P. 191–198.
172. Xia T., Yao W., Zou J., Gao D. A novel accumulative fatigue damage model for multiaxial step spectrum considering the variations of loading amplitude and loading path // *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.* – 2015. – Vol. 39. – Iss. 2. – P. 194–205.
173. Yang X.J. A unified time dependent model for low cycle fatigue and ratcheting failure based on microcrack growth // *Nucl. Eng. Des.* – 2007. – Vol. 237. – P. 1381-1387.
174. Yankin A. S., Wildemann V. E., Belonogov N. S., Staroverov O. A. Influence of static mean stresses on the fatigue behavior of 2024 aluminum alloy under multiaxial loading // *Frattura ed Integrita Strutturale*. – 2020. – Vol. 14. – Iss. 51. – P. 151-163.
175. Yankin, A.S., Wildemann, V.E., Mugatarov, A.I. Influence of different loading paths on the multiaxial fatigue behavior of 2024 aluminum alloy under the same amplitude values of the second invariant of the stress deviator tensor // *Fracture and Structural Integrity*. – 2021. – Vol. 55. – P. 327-335.
176. Yankin A.S., Lykova A.V., Mugatarov A.I., Wildemann V.E., Ilinykh A.V. Influence of additional static stresses on biaxial low-cycle fatigue of 2024 aluminum alloy // *Fracture and Structural Integrity*. – 2022. – Vol.16. – №62. – P. 180-193.

177. Yu H., Li F., Wang Z., Zeng X. Fatigue performances of selective laser melted Ti-6Al-4V alloy: Influence of surface finishing, hot isostatic pressing and heat treatments // *International Journal of Fatigue*. – 2019. – Vol. 120. – P. 175-183.
178. Yu Q., Zhang J., Jiang Y., Li Q. Multiaxial fatigue of extruded AZ61A magnesium alloy // *International Journal of Fatigue*. – 2011. – Vol. 33. – P. 437-447.
179. Zhang Q., Zuo Z., Liu J. High-temperature low-cycle fatigue behaviour of a cast Al-12Si-CuNiMg alloy // *Fatigue Fract Eng Mater Struct*. – 2013. – Vol. 36. – Iss.7. – P. 623-630.
180. Zhao B., Xie L., Wang L., Hu Z., Zhou S, Bai, X. A new multiaxial fatigue life prediction model for aircraft aluminum alloy // *International Journal of Fatigue*. – 2021. – Vol. 143. 105993. DOI:10.1016/j.ijfatigue.2020.105993.
181. Zheng Y., Chen X., Zhang Z., Shi S., Chen G., Li B. Multiaxial low cycle fatigue behavior and life prediction method of 316LN stainless steel at 550 °C // *International Journal of Fatigue*. – 2022. – Vol. 156. 106637.

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по образовательной
деятельности Пермскогонационального исследовательского
политехнического университета,

доктор технических наук, профессор

Петроченков А.Б.

2022 г.



АКТ

**внедрения в учебный процесс кафедры «Экспериментальная механика и
конструкционное материаловедение» ФГАОУ ВО «Пермский национальный
исследовательский политехнический университет»
результатов диссертации Лыковой Анастасии Васильевны
на тему «Малоцикловая усталость конструкционных сплавов при сложных
термомеханических воздействиях»**

Настоящий акт составлен в том, что материалы диссертационной работы Лыковой А.В. используются в учебном процессе кафедры «Экспериментальная механика и конструкционное материаловедение» ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» по направлению магистерской подготовки 22.04.01 «Материаловедение и технологии материалов» профиль «Экспериментальная механика» по дисциплинам «Экспериментальная механика материалов», «Усталость и разрушение материалов».

Заведующий кафедрой
«Экспериментальная механика и
конструкционное материаловедение»,
доктор физико-математических наук,
профессор



/Вильдеман В.Э./