

На правах рукописи



Лыкова Анастасия Васильевна

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

1.1.8. Механика деформируемого твердого тела

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Пермь – 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»

Научный руководитель: **Вильдеман Валерий Эрвинович**, доктор физико-математических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Шлянников Валерий Николаевич**, доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр Российской академии наук», научное направление «Энергетика», испытательная лаборатория, руководитель, заведующий испытательной лабораторией

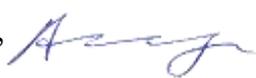
Банников Михаил Владимирович, кандидат физико-математических работ, «Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук» - филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук (ИМСС УрО РАН), лаборатория физических основ прочности, научный сотрудник

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Самарский государственный технический университет", г. Самара

Защита состоится «21» декабря 2022 года в 15 ч. 00 мин. на заседании диссертационного совета 99.0.067.02, созданного на базе ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» и ФГБУН Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук, по адресу: 614990, г. Пермь, пр-т Комсомольский д. 29, ауд. 423 б.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» (www.pstu.ru).

Автореферат разослан «__» ноября 2022 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,  / А.Г. Щербинин
доктор технических наук, профессор

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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. Вращающиеся диски турбин относятся к категории основных деталей, разрушение которых может иметь катастрофические последствия для авиационного газотурбинного двигателя. 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.

Целью 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 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.

Исследования проведены для никелевого сплава, титанового сплава, алюминиевого сплава Д16Т, жаропрочной легированной стали 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.

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».

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.

Методология и методы диссертационного исследования.

Экспериментальные исследования долговечности конструкционных материалов в условиях малоциклового усталости выполнены с использованием комплекса современных испытательных систем Центра экспериментальной механики ПНИПУ и применением высокоточных средств измерения. Для проведения 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;
- оценки влияния параметров сложных режимов нагружения на циклическую долговечность конструкционных материалов;
- выводы о возможности и эффективности использования нелинейной модели суммирования повреждений Марко-Старки и модифицированной модели Сайнса для прогнозирования циклической долговечности при малоцикловом нагружении;
- выводы о необходимости учета сложного напряженно-деформированного состояния в практике аттестации материалов, ресурсных испытаний и прочностных расчетов ответственных конструкций.

Реализация работы. Результаты диссертационной работы использованы при выполнении научно-исследовательских работ 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 положения и результаты диссертационной работы 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); 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 АММА1'2020 (Алушта, 2020); Всероссийская конференция молодых ученых-механиков YSM-2021 (Сочи, 2021).

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

Публикации. По результатам исследований опубликовано 16 публикаций, из них – 4 статьи 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.

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 страницах, включают 67 рисунков и 15 таблиц, 179 библиографических ссылок.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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.

В первой главе рассмотрены актуальные направления исследований механического поведения конструкционных материалов в условиях малоциклового деформирования. Дана оценка современного состояния тематики исследования работы. Отмечены классические работы о закономерностях деформирования и разрушения металлов и сплавов при циклическом нагружении следующих авторов: Дж. Коллинз, Б.Ф. Балашов, В.С. Бондарь, Волков, В.П. Когаев, О.Б. Наймарк, С.В. Серенсен, Н.А. Махутов, А.Н. Романов, В.Т. Трощенко, А.А. Шанявский, В.Н. Шлянников и др. Экспериментальные методы исследования свойств материалов отражены в работах С. Алтури, Ф.Дж. Бела, Э. Бэккера, А.А. Лебедева, М.Н. Степнова, Б.В. Букеткина. Определению характеристик малоциклового усталости посвящены работы X. Chen, Q. Han, Y. Lu, M. Wang, Z. Yang, М.С. Беляева, А.П. Гусенкова, А.Н. Романова и др. Вопросам влияния повышенных температур на циклическую долговечность посвящены работы следующих авторов W. Du, S. Chen, J. Chen, K. Kuwabara, J. Liu, Y. Luo, R. Mishnev, A. Nitta, T. Ogata, Y. Wang, Q. Zhang, М.С. Беляева, Е.П. Голубовского, В.В. Пряхина и др. Отмечена важность изучения процессов накопления повреждений в условиях сложного напряженного состояния. Работы M. Gladskyi, X. Chen, T. Itoh, T. Nakata, M. Noban, N. Shamsaei, S. Xu, M. Wu, Вахромеева А.М., Петухова А.Н., Y. Zheng, X. Chen, Z. Zhang, В.Э. Вильдемана, В.С. Жернакова, А.С. Янкина и др. посвящены многоосным испытаниям при непропорциональной нагрузке с различными путями деформации, комбинированными осевыми и сдвигающими нагрузками. Вопросы прогнозирования циклической долговечности конструкционных материалов в условиях простого и сложного напряженного состояния отражены в работах X. Chen, A. Fatemi, W.N. Findley, Goff, G. Glinka, H. Gough, T.H. Topper, T. Łagoda, J.Z. Liu, C. Lu, G. Sines, R.N. Smith, G. Shen, S. Xu, D.G. Shang, Y.J. Tian, С.Н. Wang, P. Watson, Н.Г. Бураго, А.Б. Журавлева, С.Я. Куранакова, А.С. Куркина, И.С. Никитина, А.Н. Савкина и др. На основе литературного обзора сделаны выводы об актуальности задач темы исследования.

Во второй главе рассмотрены вопросы, связанные с методическими аспектами проведения испытаний на малоцикловую усталость при одноосном нагружении на сервогидравлической испытательной системе Instron 8801 (максимальная осевая нагрузка ± 100 кН) и двухосном нагружении при одновременном действии растяжения и кручения на двухосевой сервогидравлической испытательной системе Instron 8850 (максимальная осевая нагрузка ± 100 кН, максимальный крутящий момент ± 1000 Нм) с использованием высокоточных осевых и двухосевых экстензометров и прикладного программного обеспечения WaveMatrix при нормальной и повышенной температурах.

Приведены основные характеристики испытательных систем, средств контроля нагрузок и перемещений, а также специализированного программного обеспечения. Рассмотрены методические вопросы, связанные с реализацией сложных форм циклов, сложного-напряжённого состояния, непропорционального нагружения, повышенных температур. Уделено внимание соосности силовой цепи, выбору геометрии образцов, выбору частоты нагружения, контролю температуры на поверхности образца, повышению точности исполнения задаваемого сигнала.

В третьей главе представлено экспериментальное исследование механического поведения конструкционных сплавов при малоциклового усталости в условиях одноосного деформирования при сложной форме цикла, блочном нагружении и повышенных температурах.

Исследовано влияние усложненной формы цикла нагружения на циклическую долговечность никелевого сплава. При циклическом нагружении по М-образной форме цикла для никелевого сплава наблюдается снижение усталостной долговечности на 10–25 % в диапазоне амплитуд деформаций от 0,30 % до 0,70 %.

Проведено экспериментальное исследование оценки долговечности алюминиевого сплава Д16Т в условиях малоциклового усталости при одноосном нагружении с переменными параметрами цикла. Проведены испытания на сплошных цилиндрических образцах по нескольким блокам программного нагружения, состоящих из циклов различных групп с постоянными параметрами цикла. Схемы для блочного циклического нагружения представлены на рисунке 1.

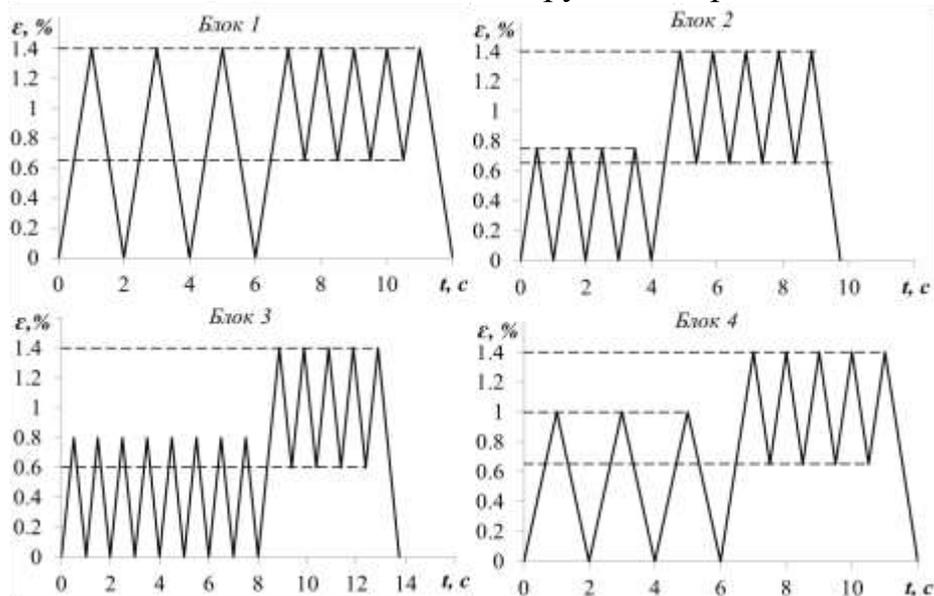


Рисунок 1 – Схемы изменения осевой деформации при блочном циклическом деформировании

По результатам экспериментальных исследований долговечность алюминиевого сплава, полученная для различных блоков, сравнивается с долговечностью, полученной в испытаниях при простом треугольном цикле с размахом деформаций, составляющим максимальный размах в каждом блоке. Долговечность блока 1, состоящего из двух групп циклов и содержащего 4 цикла

с максимальным размахом, эквивалентна долговечности, полученной в испытаниях с простым циклом. По осредненным значениям наблюдается снижение циклической долговечности алюминиевого сплава на 20-45 % по блокам 2,3,4, состоящим из трех групп циклов.

Проведен анализ влияния повышенных температур (до 400°C) на долговечность титанового сплава. Испытания проводились с контролем по осевой деформации в диапазоне температур от 22°C до 200°C и с контролем по напряжениям в диапазоне от 22°C до 400°C. Построены зависимости циклической долговечности от амплитуды задаваемой деформации ε_a / напряжения σ_a при различных температурах и коэффициентах асимметрии в логарифмических координатах. Значения долговечностей приведены в относительных единицах. Для серий испытаний с контролем по деформациям (рисунок 2) за единицу принимается значение долговечности при амплитуде деформаций 0,26 % и коэффициенте асимметрии 0. Для серий испытаний с контролем по напряжению (рисунок 3) за единицу принимается значение долговечности при амплитуде напряжений 350 МПа и коэффициенте асимметрии 0.

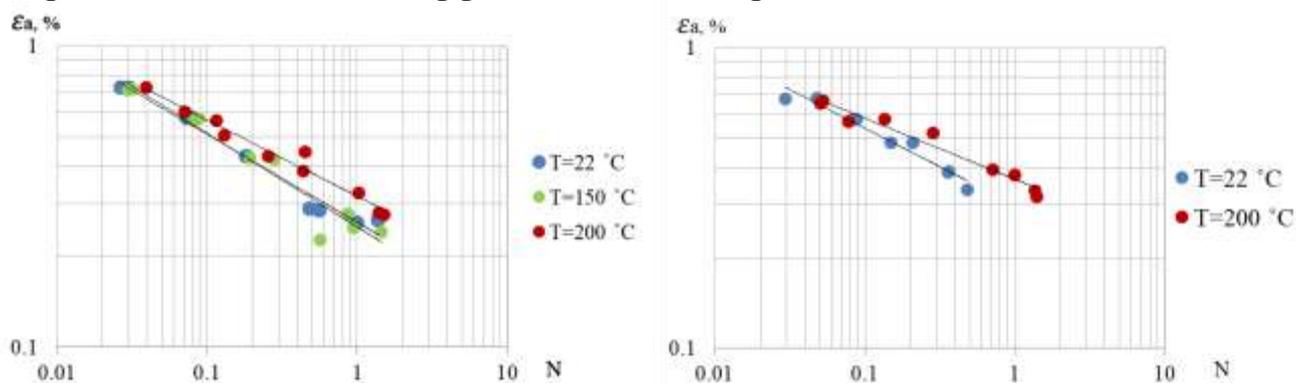


Рисунок 2 – Кривые малоциклового усталости титанового сплава в логарифмических координатах при различных температурах с коэффициентом асимметрии: а) $R_\varepsilon = 0$, б) $R_\varepsilon = -1$

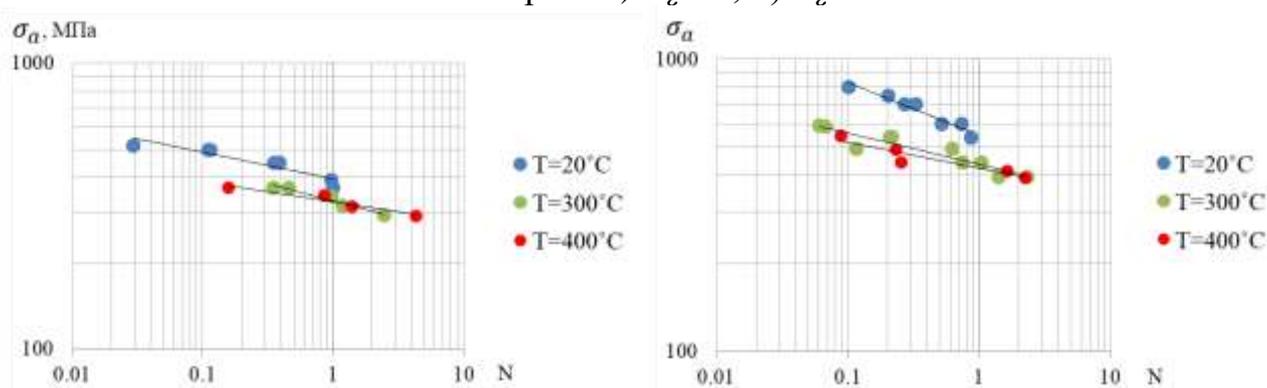


Рисунок 3 – Кривые малоциклового усталости титанового сплава в логарифмических координатах при различных температурах с коэффициентом асимметрии: а) $R_\sigma = 0$, б) $R_\sigma = -1$

Выявлено, что в испытаниях на растяжение с контролем по осевой деформации при заданном диапазоне амплитуд деформаций от 0,26 % до 0,73 % с коэффициентом асимметрии $R_\varepsilon = 0$ температура 150°C незначительно сказывается на долговечности титанового сплава, а с повышением температуры до 200°C в

диапазоне амплитуд деформаций от 0,26 % до 0,73 % наблюдается увеличение долговечности от 20 % до 50 %. При увеличении температуры в испытаниях при 200°C с коэффициентом асимметрии $R_\varepsilon = -1$ в заданном диапазоне амплитуд деформаций от 0,32 % до 0,73 % увеличение долговечности наблюдается от 15 % до 50 %. Аналогичные результаты повышения долговечности при увеличении температуры, встречающиеся в литературе, получены на алюминиевом сплаве^{1,2}. Влияние асимметрии цикла на усталостную долговечность незначительно. При аналогичных испытаниях с контролем по напряжению с увеличением температуры наблюдается значительное уменьшение долговечности титанового сплава. При амплитуде напряжений 350 МПа с коэффициентом асимметрии $R=0$ при увеличении температуры до 300-400°C долговечность титанового сплава снижается более чем на 70 %. При амплитуде напряжений 600 МПа и коэффициенте асимметрии $R = -1$ с увеличением температуры до 300-400°C долговечность титанового сплава снижается на порядок.

Таким образом, получены оценки влияния параметров сложных режимов нагружения на циклическую долговечность конструкционных материалов при одноосном нагружении.

В четвертой главе представлены экспериментальные данные о влиянии переменных параметров циклического деформирования, различных траекторий непропорционального нагружения, повышенной температуры на усталостную долговечность конструкционных материалов при сложном напряженном состоянии.

Представлены результаты испытаний на малоцикловую усталость в условиях пропорционального нагружения тонкостенных трубчатых образцов из легированной стали ЭП517Ш. Схема нагружения №1 соответствует треугольному циклу с коэффициентом асимметрии $R=0$, схема нагружения №2 соответствует деформированию с коэффициентом асимметрии $R=0,35$. Для оценки влияния сложной формы на циклическую долговечность проведены испытания по М-образному циклу – схема нагружения №3. Схемы нагружения представлены на рисунке 4.

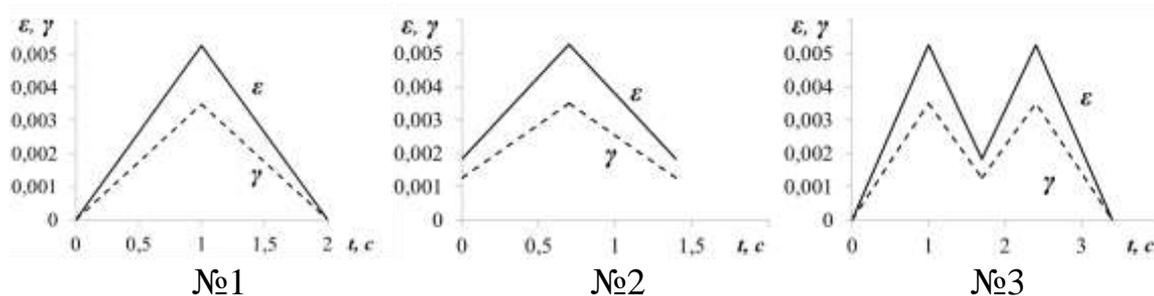


Рисунок 4 – Изменение осевых (сплошная) и сдвиговых (штриховая) деформаций при циклическом нагружении с коэффициентом асимметрии $R=0$ (№1) и $R=0,35$ (№2), М-образном циклу (№3)

¹ J. Liu, Q. Zhang, Z. Zuo, Y. Xiong, F. Ren, A.A. Volinsky Microstructure evolution of Al-12Si-CuNiMg alloy under high temperature low cycle fatigue // Mater Sci Eng A, Vol. 574. 2013. pp. 186-190.

² M. Wang, J.C. Pang, H.Q. Liu, C.L. Zou, Z.F. Zhang Deformation mechanism and fatigue life of an Al-12Si alloy at different temperatures and strain rates // International Journal of Fatigue. Vol. 127. 2019. pp. 268-274.

По результатам циклических испытаний с одинаковыми значениями максимальных и минимальных осевых и сдвиговых деформаций наблюдается увеличение долговечности легированной стали с коэффициентом асимметрии $R=0,35$ почти в 5 раз относительно испытаний с коэффициентом асимметрии $R=0$. В испытаниях со сложной М-образной формой цикла отмечено снижение циклической долговечности стали по средним значениям на 30 %.

Для оценки вклада повторяющейся последовательности циклов с переменными параметрами на усталостную долговечность проведены испытания по блочному нагружению, представленному на рисунке 5.

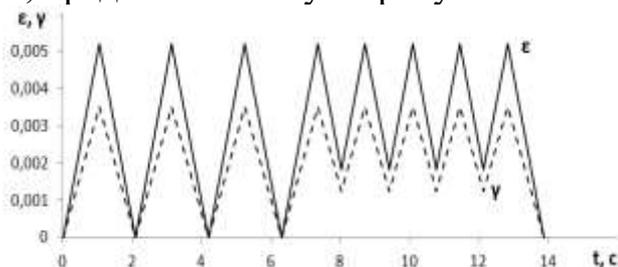


Рисунок 5 – Изменение деформаций при блочном циклическом нагружении

Наблюдается снижение циклической долговечности легированной стали при блочном нагружении относительно простого треугольного цикла (схема нагружения №1) по средним значениям на 30 %.

Исследовалось влияние различной траектории непропорционального нагружения на долговечность легированной стали, которое в пространстве деформаций соответствуют двухзвенным ломаным (рисунок 6, а, б) и четырехзвенным ломаным (рисунок 6, в, г) с прямыми углами.

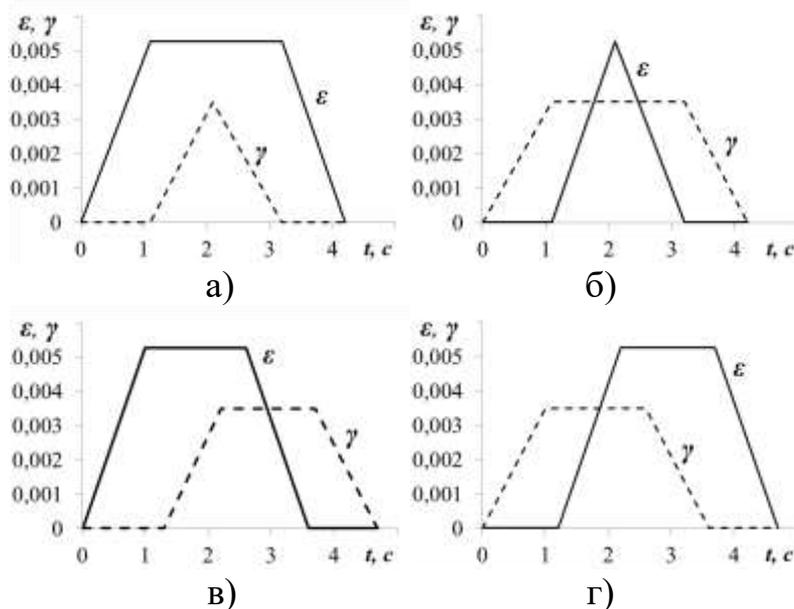


Рисунок 6 – Непропорциональное изменение осевых (сплошная) и сдвиговых (штриховая) деформаций при циклическом нагружении

Наблюдается уменьшение циклической долговечности стали ЭП517Ш при непропорциональном нагружении по осредненным значениям в 2 раза относительно долговечности, полученной в испытаниях с простым треугольным циклом. При этом экспериментально показано, что на циклическую

долговечность существенно не влияет вид представленных траекторий непропорционального циклического деформирования.

Представлены новые экспериментальные данные о влиянии постоянного нормального напряжения при циклическом кручении и постоянного касательного напряжения при циклическом растяжении-сжатии на долговечность алюминиевого сплава Д16Т в области малоциклового усталости. Для проведения циклических испытаний было выбрано по три различных уровня постоянных нормальных и касательных напряжений из диаграмм деформирования на растяжение и на кручение образцов из алюминиевого сплава. Выбранные уровни осевых напряжений: $\sigma_{const1} = 100$ МПа, $\sigma_{const2} = 200$ МПа, $\sigma_{const3} = 350$ МПа. Выбранные уровни касательных напряжений $\tau_{const1} = 70$ МПа, $\tau_{const2} = 110$ МПа, $\tau_{const3} = 160$ МПа. По результатам испытаний построены зависимости циклической долговечности от уровня напряжений постоянной величины, отнесенной к размаху напряжений (рисунок №7).

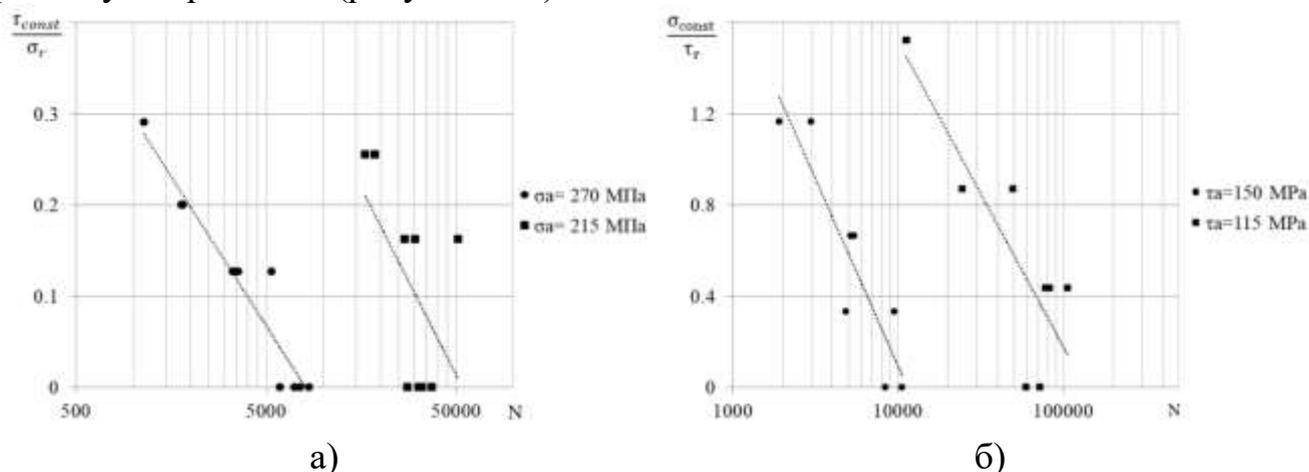


Рисунок 7 – Зависимости усталостной долговечности от уровня касательных напряжений постоянной величины (а), уровня нормальных напряжений постоянной величины (б), отнесенной к размаху напряжений

Полученные экспериментальные данные свидетельствуют об очень значительном снижении циклической долговечности алюминиевого сплава даже при малом значении постоянной осевой либо сдвиговой составляющей. При повышении постоянной составляющей напряжений снижение долговечности может достигать 10 раз.

Для исследования влияния повышенной температуры проведены испытания в условиях малоциклового усталости при совместном действии растяжения и кручения при температуре 600°C по треугольной (рисунок 4 – нагружение №1), М-образной (рисунок 4 – нагружение №3) формах цикла и непропорциональном нагружении (рисунок 6, а). Анализ результатов показывает, что повышенная температура снижает долговечность стали ЭП517Ш по средним значениям при пропорциональном нагружении с треугольной формой цикла на 25%, с М-образной формой цикла на 45 % и при сложном нагружении на 20 %.

Таким образом, получены оценки влияния параметров сложных режимов нагружения на циклическую долговечность конструкционных материалов при двухосном нагружении.

В пятой главе на основе полученных экспериментальных данных проведена проверка применимости моделей прогнозирования усталостной долговечности при переменных параметрах цикла и сложном напряженном состоянии.

Рассмотрен распространенный подход, в котором поврежденность материала связана с энергией пластического деформирования. В качестве критической величины выбиралась удельная энергия разрушения при статическом разрыве. Для использования данного подхода применялись экспериментальные результаты, полученные для никелевого сплава. Проведен расчет значений удельной энергии пластического деформирования для различных форм цикла и различных значений амплитуд деформаций с учетом изменения петли гистерезиса в процессе испытания. Отмечается, что энергия пластического деформирования к моменту разрушения значительно выше, чем энергия, затраченная на разрушение при статическом разрыве, что не позволяет говорить о применимости данного подхода в таком виде для описания экспериментальных данных никелевого сплава.

Самой простой в использовании является линейная модель суммирования повреждений. Однако экспериментальные данные как отечественных, так и зарубежных исследователей в большинстве случаев не подтверждают линейную теорию. Предлагается использование гипотезы Марко и Старки³ о нелинейном суммировании повреждений. В случае ступенчатого нагружения, при изменяющемся уровне деформаций, суммарная поврежденность вычисляется по следующей формуле⁴:

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

где D – параметр поврежденности, n – количество циклов нагружения при определенном уровне деформаций, N – количество циклов до разрушения, m_i – показатель степени, зависящий от уровня деформаций.

Проведена оценка возможности использования нелинейной модели суммирования повреждений для случая сложной формы цикла и блочного нагружения.

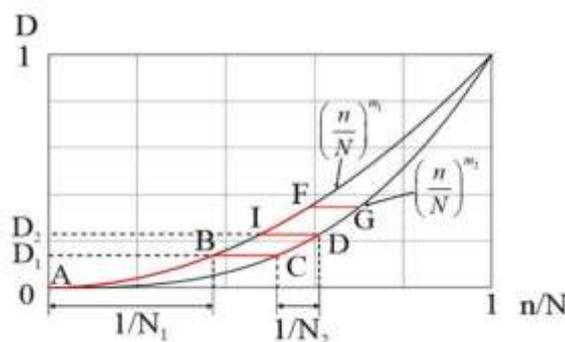


Рисунок 8 – Траектория накопления повреждений при усложненной форме цикла

³ Marco S.M., Starkey W.L. A concept of fatigue damage // Trans ASME. – 1954. – Vol. 76. – pp. 627-632.

⁴ Вильдеман В.Э. Моделирование процессов деформирования и разрушения композитов. Ч. 1: Модели накопления повреждений: Учеб. пособие / Перм. гос. техн. ун-т. Пермь, 2000. 76с.

Сложный М-образный цикл рассматривается как сумма простых циклов треугольной формы с различными коэффициентами асимметрии. Схематичное описание процесса накопления повреждений для цикла М-образной формы представлено на рисунке №8.

Для различных значений амплитуд осевых деформаций подобраны показатели степени m , при которых расчётная долговечность хорошо согласуется с экспериментальными данными, полученными для никелевого сплава, что показывает возможность применения нелинейной модели Марко-Старки для прогнозирования циклической долговечности при сложной М-образной форме цикла.

Для оценки возможности нахождения набора значений показателей степени в нелинейной модели Марко-Старки использовались экспериментальные данные, полученные для алюминиевого сплава Д16Т при блочном нагружении. Предложена методика определения показателей степеней, входящих в модель Марко-Старки, по которой поиск осуществлялся в диапазоне показателей степени от 0,2 до 10 с шагом 0,2. Сопоставление результатов прогнозирования по блокам, состоящих из трёх групп циклов с различными коэффициентами асимметрии, позволило найти несколько комбинаций общих показателей степеней по двум группам, которые присутствуют во всех блоках. Окончательный выбор пары коэффициентов осуществлялся из условия близости прогнозируемой поврежденности к единице в первом (проверочном) блоке, состоящим из двух групп циклов. Выбранные значения коэффициентов позволили осуществить удовлетворительный прогноз долговечности алюминиевого сплава при блочном малоцикловом нагружении по нелинейной модели суммирования повреждений Марко-Старки.

Для описания процесса накопления повреждений при малоцикловой усталости в условиях сложного напряженного состояния рассмотрена модифицированная модель Сайнса⁵, основанная на использовании двух кривых усталости:

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

Для записи модели использованы максимальные и минимальные значения первого и второго инвариантов этих составляющих:

$$\begin{aligned} \sqrt{I_{2a}} &= \frac{1}{\sqrt{6}} \sqrt{(\sigma_{11a} - \sigma_{22a})^2 + (\sigma_{22a} - \sigma_{33a})^2 + (\sigma_{11a} - \sigma_{33a})^2 + 6(\tau_{12a}^2 + \tau_{23a}^2 + \tau_{13a}^2)}, \\ \sqrt{I_{2m}} &= \frac{1}{\sqrt{6}} \sqrt{(\sigma_{11m} - \sigma_{22m})^2 + (\sigma_{22m} - \sigma_{33m})^2 + (\sigma_{11m} - \sigma_{33m})^2 + 6(\tau_{12m}^2 + \tau_{23m}^2 + \tau_{13m}^2)}, \\ I_{1a} &= \sigma_{11a} + \sigma_{22a} + \sigma_{33a}, \\ I_{1m} &= \sigma_{11m} + \sigma_{22m} + \sigma_{33m}, \end{aligned}$$

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

⁵ A. S. Yankin, V. E. Wildemann, N. S. Belonogov, O. A. Staroverov (2020). Influence of static mean stresses on the fatigue behavior of 2024 aluminum alloy under multiaxial loading // Frattura ed Integrita Strutturale Vol. XIV, Iss. 51- P. 151-163.

Параметры модели: $A = \frac{1}{\tau_f'(2N)^{b_0}}$; $B = \frac{1}{\tau_u}$; $C = \frac{1}{\sigma_u} - \frac{1}{\sqrt{3}\tau_u}$; $D = \frac{1}{\sigma_f'(2N)^b} - \frac{1}{\sqrt{3}\tau_f'(2N)^{b_0}}$.

Проведена проверка применимости модифицированной модели Сайнса по результатам усталостных испытаний на образцах из алюминиевого сплава Д16Т в условиях двухосного малоциклового нагружения. Параметры модели определялись из установочных экспериментов на статическое растяжение и статическое кручение, симметричное циклическое растяжение-сжатие и симметричное циклическое кручение. Предел прочности при растяжении $\sigma_B = 450$ МПа, предел прочности при кручении $\tau_B = 566$ МПа. Коэффициенты: $\sigma_f' = 12710$, $\tau_f' = 566$, экспоненты: $b = -0,160$, $b_0 = -0,135$.

На рисунке 9 представлены результаты расчета усталостной долговечности по предложенной модели. Цветными точками отмечены испытания при различных значениях амплитуды нормального и касательного напряжения. Пунктирными и штрихпунктирными линиями на графиках приведены ± 2 и ± 3 факторные ошибки.

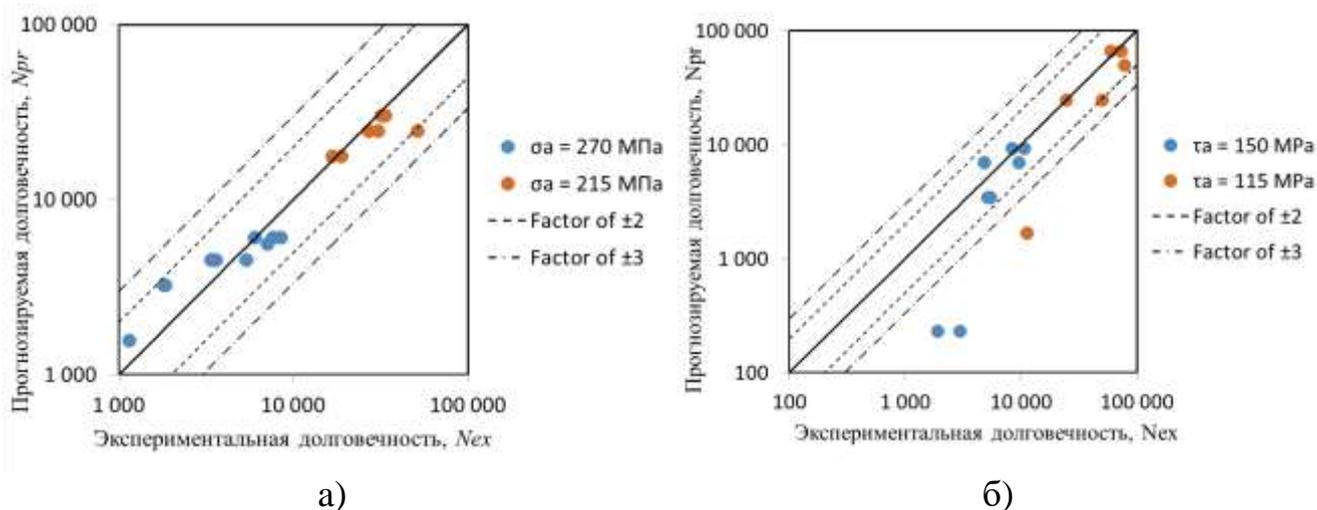


Рисунок 9 – Результаты прогнозирования циклической долговечности по модифицированной модели для образцов из алюминиевого сплава Д16Т:

а) касательные напряжения постоянной величины; б) нормальные напряжения постоянной величины

Из приведенных графиков видно, что большинство точек лежат внутри ± 2 факторного интервала. Это свидетельствует о том, что данная модель хорошо прогнозирует усталостную долговечность алюминиевого сплава при малоциклового усталости. Однако несколько точек находятся в области ± 3 факторного интервала, а две точки выходят за пределы этих интервалов. При этом значения постоянных нормальных напряжений для этих точек составили 350 МПа, что близко к пределу текучести материала. В результате сделан 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.

В Заключение отражены основные результаты диссертационной работы.

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 х воздействиях с дополнительными постоянными составляющими напряжений.
7. Результаты работы используются на кафедре «Экспериментальная механика и конструкционное материаловедение» ФГАОУ ВО «ПНИПУ» в процессе обучения магистров по образовательной программе «Экспериментальная механика» в рамках направления 22.04.01 «Материаловедение и технологии материалов».

Основные публикации автора по теме диссертационной работы

1. 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 Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2019. – № 1. – С. 77-86. (**ВАК, Scopus**)
2. **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. (**Scopus**)
3. A.S. Yankin, **A.V. Lykova**, A.I. Mugatarov, V.E. Wildemann, A.V. Ilinykh Influence of additional static stresses on biaxial low-cycle fatigue of 2024 aluminum alloy // Fracture and Structural Integrity. – 2022. – Vol. 16, № 62. – pp. 180-193. (**Scopus**)
4. **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. (**ВАК, Scopus**)

Статьи в других изданиях и материалах конференций

1. 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 г. – С. 200-203.
2. 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.
3. 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», 4-7 октября 2017 г., Пермь. – С. 227-228.
4. 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.
5. 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.

6. 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 г. – С. – 192-195.
7. 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.
8. Ильиных А.В., Лыкова А.В., Паньков А.М. Механическое поведение и долговечность конструкционных сталей и сплавов в условиях малоциклового усталости при растяжении-сжатии и кручении // Материалы XII Всероссийского съезда по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики, 2019 г. – С. 647-649.
9. 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 (МИКМУС - 2019), 2019 г., – С. 787-790.
10. 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.
11. 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 (МИКМУС - 2021), 2021 г. – С. 59-64.
12. 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.