

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

Официальные
оппоненты:

Ведущая
организация:

Защита состоится «__» _____ 2022 года в __ ч. __ 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 «__» _____ 2022 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор технических наук, профессор

/ А.Г. Щербинин

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 частности, в дисках турбин высокого давления авиационных двигателей, 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 деформаций 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 используются в учебном процессе кафедры «Экспериментальная механика и конструкционное материаловедение» ФГАОУ ВО ПНИПУ в рамках образовательной программы подготовки магистров «Экспериментальная механика» по направлению 22.04.01 «Материаловедение и технологии материалов».

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

Методология и методы диссертационного исследования.

Экспериментальное исследование 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.

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); 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 АММАИ'2020 (Алушта, 2020); Всероссийская конференция молодых ученых-механиков YSM-2021 (Сочи, 2021).

В полном объеме диссертация докладывалась и обсуждалась на семинарах 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, объединенном семинаре Центра экспериментальной механики ПНИПУ и федерального исследовательского центра «Казанский научный центр Российской академии наук».

Публикации. Результаты исследований по теме диссертационной работы опубликованы в 17 работах, из них – 5 статей опубликованы в изданиях, рекомендованных ВАК, включая 4 статей, опубликованных в изданиях, индексируемых Scopus и Web of Science, 12 публикаций в изданиях РИНЦ.

Личный вклад автора. Совместно с научным руководителем выбрано направление исследований, осуществлены постановка научной задачи и составление плана работ. Личное участие автора состояло в анализе методических вопросов экспериментальных исследований, проведении экспериментальных работ по исследованию характеристик малоциклового усталости конструкционных сплавов, обработке и обобщении результатов испытаний. Подготовка публикаций по диссертационной работе и опубликование в научных журналах проводились совместно с соавторами.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения и списка использованной литературы. Работа содержит 65 рисунков и 17 таблиц. Общий объем диссертационной работы составляет 144 страниц, библиографический список включает 170 источника.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выбранной темы исследования, сформулирована цель и основные задачи данного исследования, полученные в ней новые научные результаты, обоснована их достоверность, теоретическая и практическая значимость, приводятся сведения об апробации диссертации, краткое описание содержания диссертации по главам.

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. Шаняевский, 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. 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 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, C.H. Wang, P. Watson, Н.Г. Бураго, А.Б. Журавлева, С.Я. Куранакова, А.С. Куркина, И.С. Никитина, А.Н. Савкина. 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 выбору образцов, выбору частоты нагружения, контролю температуры на поверхности образца, повышению точности исполнения заданного сигнала.

В третьей главе описано экспериментальное исследование механического поведения конструкционных сплавов при малоциклового усталости в условиях

одноосного нагружения при сложной форме цикла, блочном нагружении, повышенной температуре.

Исследовано влияние сложной формы цикла нагружения на циклическую долговечность и механическое поведение никелевого сплава. При циклическом нагружении по М-образной форме цикла для никелевого сплава наблюдается снижение усталостной долговечности по сравнению с циклами треугольной формы на 10–25% в зависимости от уровня амплитуды осевых деформаций. На основании анализа петель гистерезиса исследовано механическое поведение никелевого сплава. Построены зависимости пластической деформации и коэффициента асимметрии от амплитуды деформации с постоянными и переменными параметрами цикла. Наблюдается рост пластической деформации и сжимающих напряжений при увеличении амплитуды деформации.

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 блочного циклического нагружения представлены на рисунке 1.

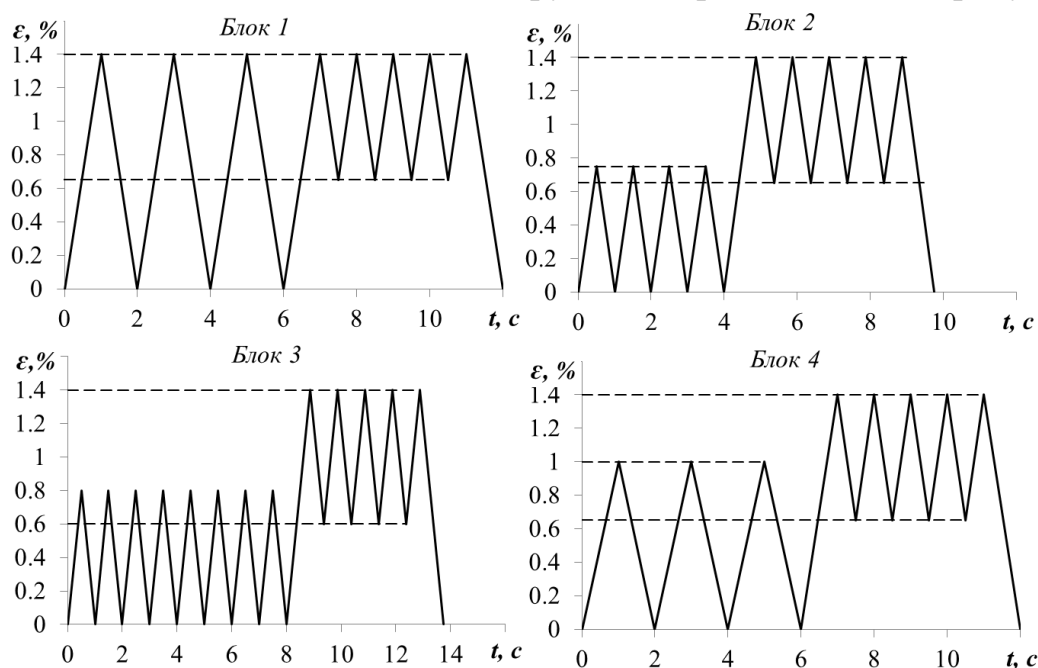


Рис. 1 Схемы изменения осевой деформации при блочном циклическом деформировании

По результатам экспериментальных исследований долговечность алюминиевого сплава различных блоках сравнивается с долговечностью при простом треугольном цикле с размахом деформаций, составляющим максимальный размах в каждом блоке. По осредненным значениям наблюдается снижение циклической долговечности алюминиевого сплава на 20-45% по блокам 2-4, состоящим из трех групп циклов. Блок 1, состоящий из двух групп циклов, в состав которого входит 4 цикла с максимальным размахом, по долговечности

эквивалентен обычному треугольному циклу и не оказывает существенного влияния на долговечность алюминиевого сплава.

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.

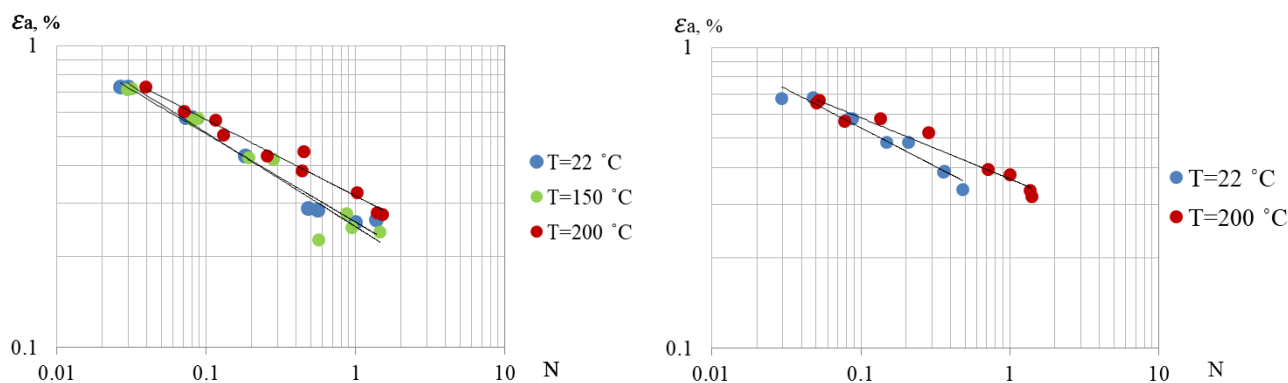


Рис. 2 – Кривые малоциклового усталости титанового сплава в логарифмических координатах при различных температурах с коэффициентом асимметрии:
а) $R_\varepsilon = 0$, б) $R_\varepsilon = -1$

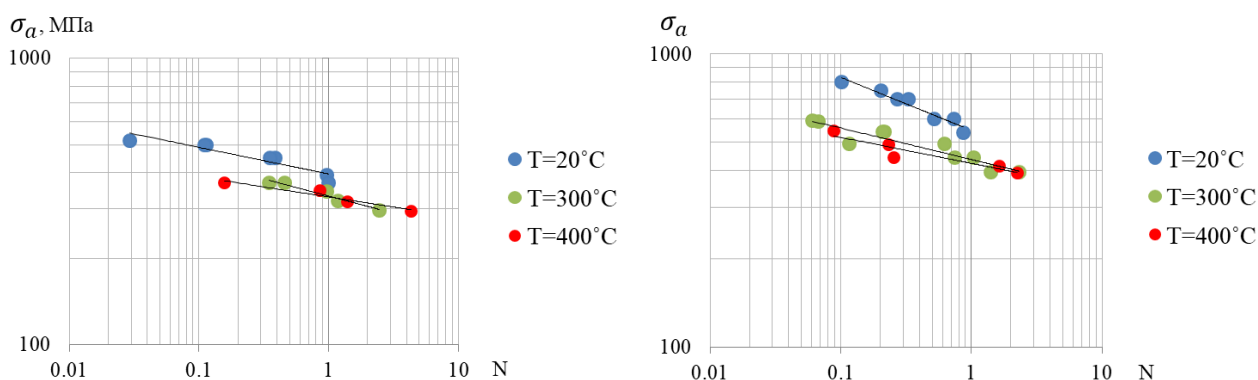


Рис. 3 – Кривые малоциклового усталости титанового сплава в логарифмических координатах при различных температурах с коэффициентом асимметрии:
а) $R_\sigma = 0$, б) $R_\sigma = -1$

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°С с коэффициентом асимметрии $R_\varepsilon = -1$ при заданном диапазоне амплитуд деформаций от 0,32% до 0,73% увеличение долговечности наблюдается от 15 до 50 %. Аналогичные результаты, встречающиеся в литературе, получены на алюминиевом сплаве Al-Si^{1,2}. Влияние асимметрии на усталостную долговечность в условиях контролируемой деформации 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°С-400°С долговечность титанового сплава снижается более чем на 70 %. При амплитуде напряжений 600 МПа и коэффициенте асимметрии $R=-1$ с увеличением температуры до 300°С-400 °С долговечность титанового сплава снижается почти 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.

Реализованы испытания в условиях пропорционального нагружения. Схема нагружения №1 соответствует треугольному циклу с коэффициентом асимметрии $R=0$, соответствующем отношению минимальной деформации в цикле к максимальной деформации в цикле. Схема нагружения №2 соответствует деформированию с коэффициентом асимметрии $R=0,35$. Для того, чтобы оценить влияние сложной формы на циклическую долговечность сплава ЭП517Ш, проведены испытания по М-образному циклу – схема нагружения №3. Схемы нагружения представлены на рисунке 4.

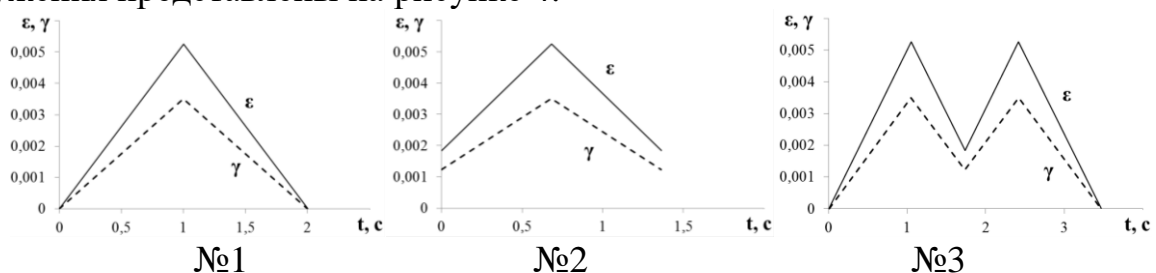


Рис. 4 – Изменение осевых (сплошная) и сдвиговых (штриховая) деформаций при циклическом нагружении с коэффициентом асимметрии $R=0$ (№1) и $R=0,35$ (№2), М-образном циклу (№3)

При циклических испытаниях с одинаковой максимальной осевой и сдвиговой деформации наблюдается увеличение долговечности сплава ЭП517Ш с коэффициентом асимметрии $R=0,35$ почти в 5 раз относительно испытаний с $R=0$.

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.

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 – нагружение №4 (рисунок 5).

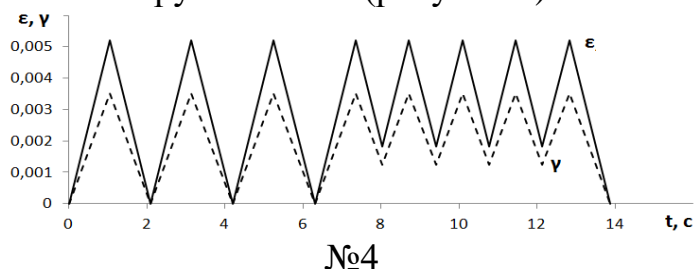


Рис. 5 – Пропорциональное изменение осевых (сплошная) и сдвиговых (штриховая) деформаций при блочном циклическом нагружении

Экспериментальные данные при блочном циклическом нагружении сравниваются с экспериментальными данными по простой треугольной форме цикла (схема нагружения №1). Наблюдается снижение циклической долговечности легированной стали при блочном нагружении относительно простого треугольного цикла по средним значениям почти в 7 раз. Однако один цикл блочного нагружения состоит из нескольких циклов треугольной формы с разными параметрами. В один блок входит 4 цикла с максимальным размахом, который соответствует размаху по треугольной форме цикла. Соответственно долговечность одного блока возрастает в 4 раза и эквивалентна долговечности простого треугольного цикла.

Исследовалось влияние различной траектории непропорционального нагружения на долговечность легированной стали, которое в пространстве деформаций соответствуют двухзвенной ломаной (нагружение №5,6 – рисунок 7) и четырехзвенным ломаными (нагружение №5,6 рисунок 7) с прямыми углами. Параметры нагружения выбраны таким образом, что максимальные и минимальные значения осевых и сдвиговых деформаций, достигаемые в цикле, соответствуют максимальным и минимальным значениям деформаций при испытаниях по треугольному (№1) и М-образному (№2) циклам.

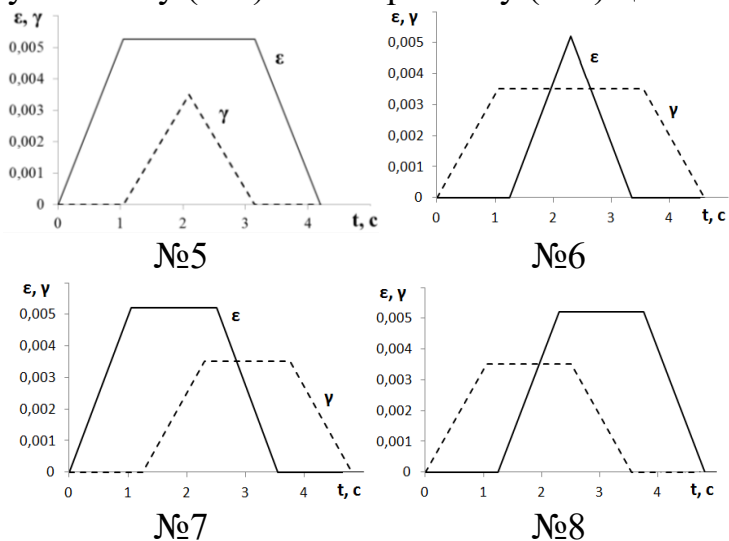


Рис. 6 – Непропорциональное изменение осевых (сплошная) и сдвиговых (штриховая) деформаций при циклическом нагружении

Наблюдается уменьшение циклической долговечности стали ЭП517Ш по осредненным значениям долговечности при непропорциональном нагружении в 2 раза относительно простого треугольного цикла. При этом экспериментально показано, что на циклическую долговечность существенно не влияет вид представленных траекторий непропорционального циклического деформирования.

Для исследования влияния температуры на циклическую долговечность при совместном действии растяжения-сжатия и кручения тонкостенных трубчатых образцов из сплава ЭП517Ш проведены испытания при температуре 600°C на малоцикловую усталость при простой треугольной (нагружение №1 – рисунок 4), М-образной формах цикла (нагружение №3 – рисунок 4) и непропорциональном нагружении (нагружение №5 – рисунок 6). Анализ результатов показывает, что повышенная температура снижает долговечность стали ЭП517Ш при пропорциональном нагружении с треугольной формой цикла по средним значениям долговечность на 25%, с М-образной формой цикла на 45% и при сложном нагружении на 20%.

Представлены новые экспериментальные данные о влиянии постоянного нормального напряжения при циклическом кручении и постоянного касательного напряжения при циклическом растяжении-сжатии в области малоцикловой усталости алюминиевого сплава Д16Т при комнатной температуре. С целью оценки их влияния на долговечность алюминиевого сплава для проведения циклических испытаний было выбраны по три различных уровня постоянных составляющих по диаграммам деформирования образцов на растяжение и кручение. Выбранные уровни осевых напряжений: $\sigma_{const1} = 100$ МПа, $\sigma_{const1} = 200$ МПа, $\sigma_{const1} = 350$ МПа. Выбранные уровни касательных напряжений $\tau_{const1} = 70$ МПа, $\tau_{const1} = 110$ МПа, $\tau_{const1} = 160$ МПа. По результатам испытаний построены зависимости циклической долговечности от уровня напряжений постоянной величины, отнесенной к размаху напряжений (рисунок №7).

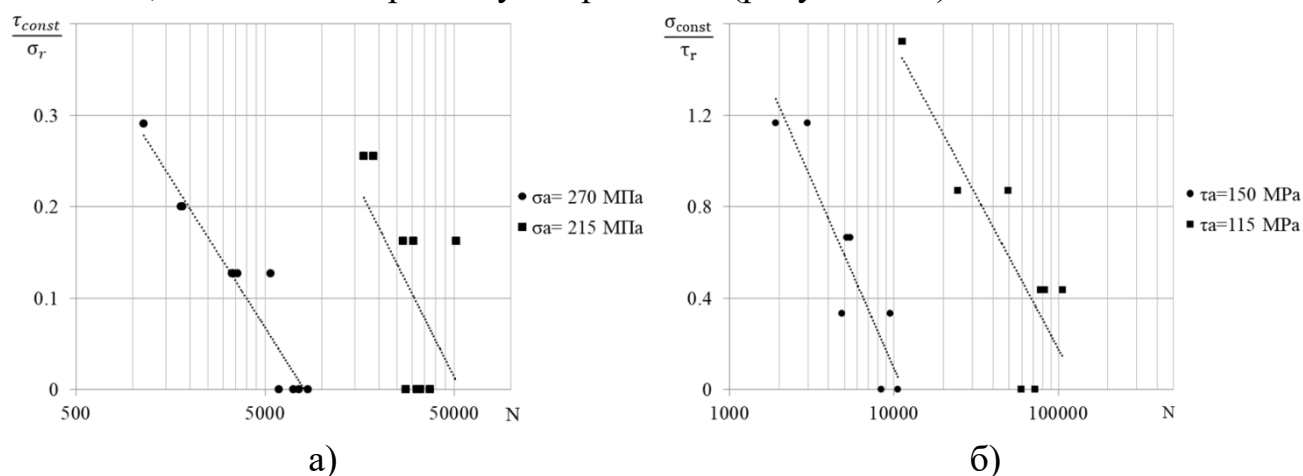


Рис. 7 – Зависимости усталостной долговечности от уровня касательных напряжений постоянной величины (а), уровня нормальных напряжений постоянной величины (б)

В испытаниях на циклическое растяжение-сжатие снижение долговечности сплава Д16Т при увеличении постоянной составляющей касательных напряжений составляет от 45 до 100 %. При значении постоянной составляющей осевого напряжения 350 МПа и амплитуде касательных напряжений 115 МПа снижение долговечности происходит на порядок. С увеличением амплитуды касательного напряжения влияние постоянной составляющей нагрузки снижается. В испытаниях на малоцикловую усталость при кручении цилиндрических образцов с увеличением осевого напряжения постоянной величины долговечность сплава Д16Т снижается от 20 до 100%.

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.

Рассматривается возможность прогнозирования циклической долговечности с использованием энергетических критериев разрушения, в которых поврежденность материала связана с общей энергией упругопластических деформаций. Для оценки пластичности металлов и сплавов используется энергия пластического деформирования W_{pl}^i за цикл, которая равна площади петли гистерезиса. Рассмотрены критерии, в которых в качестве критической величины выбирается удельная энергия разрушения при статическом разрыве и величина удельной энергии, затраченной на пластическое деформирование при определенной амплитуде деформации. Для использования энергетических критериев применяются экспериментальные данные, полученные для никелевого сплава. Для различных значений амплитуд деформаций и различных форм цикла были рассчитаны значения удельной энергии пластического деформирования, которые сравнивались с критическими величинами при статическом и циклическом нагружении. Расчёт энергии пластического деформирования проводился с учетом изменения петли гистерезиса в процессе испытания. Отмечается, что энергия пластического деформирования к моменту разрушения значительно выше, чем критическая величина, что не позволяет говорить о применимости данного подхода для описания экспериментальных данных никелевого сплава. Поэтому для описания данных с переменными параметрами цикла целесообразным представляется использование моделей суммирования повреждений.

Самой простой в использовании является линейная модель суммирования повреждений. Экспериментальные данные как отечественных, так и зарубежных исследователей в большинстве случаев не подтверждают линейную теорию. И так как анализ линейной суммирования повреждений дает существенное отклонение результатов прогнозирования, предлагается использование нелинейной модели. Проведена оценка возможности использования нелинейной модели суммирования

повреждений Марко и Старки³ для случая сложной формы цикла и блочного нагружения. 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 или напряжений.

Рассмотрена возможность применения нелинейной модели для анализа процессов накопления повреждений при цикле сложной М-образной формы. Использованы экспериментальные данные никелевого сплава, полученные в условиях малоциклового усталости при простых треугольных формах цикла с различными значениями амплитуд и коэффициентами асимметрии ($R=0$ и $R=0,35$), а также при сложной М-образной формах цикла. Сложный М-образный цикл рассматривается как сумма двух простых циклов треугольной формы с различными коэффициентами асимметрии. Схематичное описание процесса накопления повреждений для цикла М-образной формы представлено на рисунке №8.

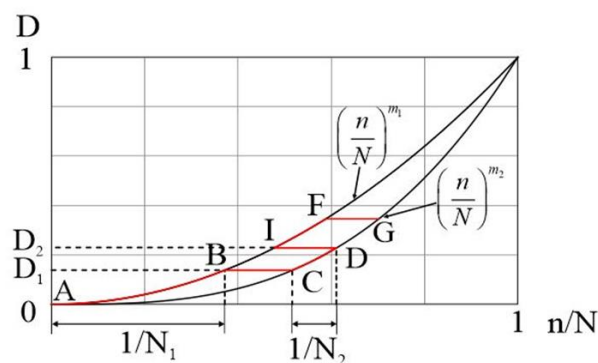


Рис. 8 – Траектория накопления повреждений при М-образной форме цикла

На основе экспериментальных данных испытаний на малоцикловую усталость никелевого сплава при простых формах цикла с коэффициентами асимметрии $R=0$ и $R=0,35$ при различных значениях амплитуд осевых деформаций подобраны значения коэффициентов m , при которых расчётная долговечность хорошо согласуется с экспериментальными данными, что показывает возможность применения нелинейной модели Марко-Старки для прогнозирования циклической долговечности при сложной М-образной форме цикла. Однако появляется вопрос о единственности решения.

Для оценки возможности нахождения набора значений показателей степени в нелинейной модели Марко-Старки использовались полученные результаты экспериментальных исследований алюминиевого сплава Д16Т при блочном нагружении. Предложена методика определения показателей степеней, входящих

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.

в модель Марко-Старки, по которой поиск m осуществлялся в диапазоне показателей степени от 0,2 до 10 с шагом 0,2. Сопоставление результатов прогнозирования по блокам 2-4, состоящих из трёх групп, 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. Выбранные значения коэффициентов позволили осуществить прогноз долговечности при блочном малоцикловом нагружении с использованием нелинейной модели Марко-Старки.

Для прогнозирования усталостной долговечности различных материалов используются различные модели. В частности, для описания процесса при малоциклового усталости 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:

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

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

$$I_{1a} = \sigma_{11a} + \sigma_{22a} + \sigma_{33a}$$

$$I_{1m} = \sigma_{11m} + \sigma_{22m} + \sigma_{33m}$$

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.

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

Данная модель апробирована по данным усталостных испытаний на образцах из алюминиевого сплава Д16Т в условиях двухосной малоциклового усталости, одна из мод (или нормальное напряжение, или касательное напряжение) которой изменяется циклическим образом, а другая мода остается постоянной по величине в течение испытания. Определены параметры, входящие в модель. В параметры модели B и C входят предел прочности при растяжении и предел прочности при кручении, которые были определены из испытаний на статическое растяжение и статическое кручение: $\sigma_B = 450$ МПа, $\tau_B = 566$ МПа. Коэффициенты, входящие в константы A и D , определялись из усталостных кривых, полученных при

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.

симметричном растяжении-сжатии и симметричном кручении. Получены коэффициенты: $\sigma'_f = 12710$ МПа, $\tau'_f = 566$ МПа, экспоненты: $\beta_1 = -0,160$, $\beta_0 = -0,135$.

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.

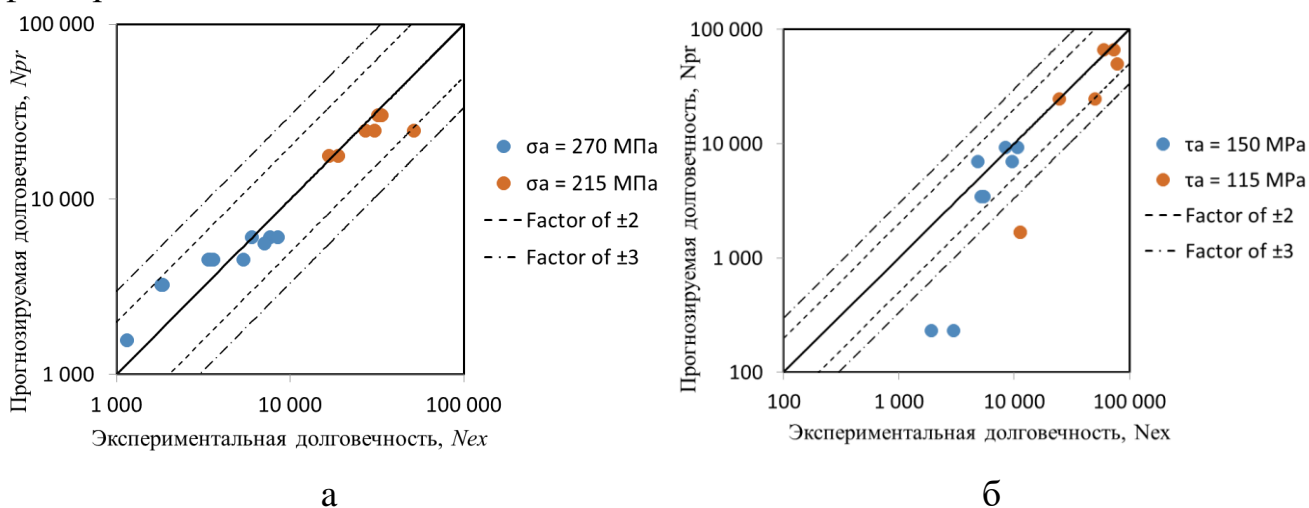


Рис. 9 – Результаты прогнозирования циклической долговечности по модифицированной модели для образцов из алюминиевого сплава Д16Т: а) касательные напряжения постоянной величины; б) нормальные напряжения постоянной величины

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 малоциклового 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 малоциклового 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 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».

Основные публикации по теме диссертационной работы

1. Ломакин Е.В., Третьяков М.П., Ильиных А.В., **Лыкова А.В.** Механическое поведение конструкционной стали ЭП517Ш при двухосной малоциклового 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. **(ВАК, 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. **(ВАК, 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. (ВАК, Scopus)
5. **Lykova A.V.**, Ilinykh A.V. «Mechanical Behavior Regularities of an Aluminum Alloy Under Biaxial Low-cycle Loading Under Conditions of the Axial Component Action of a Constant Value» // AIP Conference Proceedings (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 малоцикловой

- 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.