

Мыльников Владимир Викторович

**СТРУКТУРНО-ДЕФОРМАЦИОННЫЕ ОСОБЕННОСТИ И
ЗАКОНОМЕРНОСТИ ДИНАМИКИ ЭВОЛЮЦИИ УСТАЛОСТНЫХ
ХАРАКТЕРИСТИК МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ В УСЛОВИЯХ
РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ НАГРУЖЕНИЯ**

Специальность 1.1.8 – Механика деформируемого твердого тела

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет» (ННГАСУ)

Научный консультант: доктор технических наук, профессор ФГБОУ ВО Комсомольского-на-Амуре государственного университета, г. Комсомольск-на-Амуре
Дмитриев Эдуард Анатольевич

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, г. Новосибирск
Банщикова Инна Анатольевна

доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры робототехники, мехатроники, динамики и прочности машин ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ», г. Москва
Кирсанов Михаил Николаевич

доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры мехатроники и теоретической механики ФГБОУ ВО «НИУ «МАИ», г. Москва
Кузнецов Евгений Борисович

Ведущая организация: федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва", г. Самара

Защита состоится «14 » декабря 2023 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.316.03 при ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный университет» по адресу: 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, проспект Ленина, д. 27.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный университет» и на сайте www.knastu.ru

Отзывы на автореферат в двух экземплярах (заверенных печатью учреждения) просим присылать по адресу: 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, проспект Ленина, д. 27, ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный университет», ученому секретарю диссертационного совета 24.2.316.03 и по адресу diss@knastu.ru

Автореферат разослан « » ноября 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат физико-математических наук,
доцент



Григорьева
Анна Леонидовна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Одной из основных задач современного материаловедения является изучение природы усталостного разрушения, так как от сопротивления усталости во многом зависит работоспособность конструкций и изделий в машиностроении, авиастроении и других видах промышленности.

Свойство материала сопротивляться усталостному разрушению приобретает особое значение в связи с усложнением современных конструкций, ужесточением режимов эксплуатации, многократным увеличением частот и скоростей новейших машин и агрегатов и интенсификацией их работы. Анализ разрушений деталей машин и конструкций показывает, что большинство из них происходит вследствие усталости металлов, под которой подразумевается постепенное накопление повреждений в материале в условиях действия переменных нагрузок, приводящее к возникновению усталостной трещины, ее развитию и окончательному разрушению. Частые случаи усталостного разрушения объясняются недостаточной изученностью явления усталости металлов, которое характеризуется исключительной сложностью и разнообразием процессов, происходящих в материалах в условиях действия переменных нагрузок, а также большой чувствительностью этих процессов к влиянию различных технологических, эксплуатационных и конструктивных факторов.

Исследованию механизма циклической деформации материалов посвящено большое количество работ. К настоящему времени накоплен определенный материал по исследованию циклической прочности и долговечности металлов и сплавов, и стадийности процесса усталостного нагружения (Давиденков Н.Н., Трошенко В.Т., Матохнюк Л.Е., Одинг И.А., Ярема С.Я., Школьник Л.М., Шетулов Д.И., Козлов Э.В., Панин В.Е., Громов В.Е., Иванова В.С., Ботвина Л.Р., Терентьев В.Ф., Романов А.Н., Вейбулл В., Козаньда С., Екобори Т., Хунтер М., Романив О.Н., Яковлева Т.Ю., Suresh S., Mughrabi H., Kazymyrovych Vitaliy, Hertzberg R.W., French H., Youn Jun Oh, Bong Sang Lee, Sang Chul Kwon, French H. и др.). Можно констатировать, что разработаны расчетные методы оценки прочности, надежности и долговечности наугруного оборудования и конструкций (Махутов Н.А., Шетулов Д.И., Серенсен С.В, Когаев В.П., Багмутов В.П., Бондарь В.С., Никитин И.С., Савкин А.Н., Волков И.А., Коротких Ю.Г. и др.). Современные тенденции развития наук о материалах направлены, все в большей степени на создание и разработку комплексных подходов, методик и методов изучения деформации и разрушения при различных видах нагружения и стадийности. Совместное использование нескольких методов рассмотрено в работах Панина С.В., Зуева Л.Б., Громова В.Е., Махутова Н.А., Наймарка О.Б., Матвиенко Ю.Г., Ботвиной Л.Р., Рыбина В.В., Шаняевского А.А., Митенкова Ф.М., Чувильдеева В.Н., Баренблатта Г.И., Barat V, James M.R., Chu-Shu Kao, Morris W.L. и др., в которых осуществлены различные комбинации методов акустической эмиссии, тензометрии, оптического наблюдения, скейлинги, вейвлет анализа, точек бифуркации, фракталов и т.д. Предложено несколько гипотез усталости материалов: статистическая, механическая, энергетическая, технологическая и др. Ни одна из них не дает полного объяснения природы усталостного разрушения деталей машин и конструкций.

Однако детали машин и элементов конструкций разрушаются и большинство разрушений носит усталостный характер. Это связано с тем, что в расчеты вводятся механические характеристики без учета взаимообусловленного влияния различных факторов. В настоящее время не удастся предвидеть всех сложных физических явлений, происходящих в материале деталей машин и конструкций.

Хорошо известно, что процесс накопления повреждений тесно связан с циклическим деформированием, а поверхностные слои металла подвергаются деформации раньше, чем основная масса металла. Решение задач прочности и долговечности деталей машин и

конструкций наталкиваются на физическую проблему, заключающуюся в изучении влияния изменения структуры поверхности на повреждаемость тонкого активного поверхностного слоя и связанных с ней показателей сопротивления усталости, которые в свою очередь существенным образом реагируют на малейшие изменения схемы и частотно-скоростного спектра нагружения. Зарождение трещин происходит на поверхности деталей, поэтому материал поверхностных слоев деталей машин и конструкций находится в сложных условиях работы.

Проблема ещё более усугубляется тем, что реальные среды практически никогда не бывают однородными и населенными лишь одними дислокациями или точечными дефектами. На развитых стадиях циклической деформации кристаллы материала характеризуются сложным иерархическим строением из разномасштабных фрагментов, зерен, ячеек и блоков различной природы. Попытки описать и понять эти явления с возможностью использования в соответствующей методологии инженерного расчета не являются убедительными, систематических исследований выполнено недостаточно. Поэтому структурно-механические эксперименты и расчеты убеждают в необходимости коренного изменения методологии анализа проблем циклической прочности и долговечности, включая физическое толкование, аналитическое описание и методику самих исследований и приобретают особую актуальность в настоящее время ввиду скачкообразного научного прорыва всемирного технологического прогресса.

Цель и задачи работы: Целью диссертационной работы являлось изучение особенностей структурно-чувствительных факторов металлических материалов при испытаниях на усталость, установление взаимосвязи данных особенностей с физико-механическими закономерностями динамики усталостных характеристик исследованных материалов в условиях различных спектров нагружения при разной наработке, и используя их, разработка и обоснование универсальных критериев для создания новых и модернизации ранее разработанных методов прогноза кривых усталости и прогнозирования долговечности натуральных деталей машин и конструкций.

Для достижения поставленной цели были поставлены следующие задачи:

1. - выявить физическую природу эволюции структурно-фазовых состояний и установить закономерности трансформации структуры, особенности фрактограмм изломов и закономерности деформационного поведения в широком диапазоне частотно-амплитудных режимов и технологических схем нагружения при мало- и многоцикловых испытаниях чистых металлов и конструкционных материалов;

2. - установить и проанализировать связь параметров сопротивления усталости в виде тангенса угла наклона левой ветви и точки перелома со структурными и фазовыми изменениями, количественной повреждаемостью поверхности в виде полос скольжения, количества и эволюции поврежденных зерен, 3D-деформационного рельефа и стадийности разрушения; зоной локальной пластической деформации;

3. - выявить оптимальные нагрузочно-частотные диапазоны областей нагружения, в которых исследуемый материал показывает наивысшую стабильность сопротивления усталости и определить оптимальные режимы термической обработки, способствующие максимальным значениям циклической прочности и долговечности конкретного материала;

4. - провести исследование и анализ интеграции указанных выше параметров в окрестности линии повреждаемости косвенно отражающую переход из штатного малоповрежденного состояния в нештатное с ростом повреждений и разрушения, с целью выявления комплекса наиболее чувствительных параметров и определения критериев, характеризующих предельное состояние для последующего применения в моделях и методах прогнозирования прочности и долговечности конструкционных материалов;

5. - разработать критерии и методы прогноза циклической прочности и долговечности по результатам изменения параметров структурно-фазовых состояний металлов с применением полученных в настоящем исследовании результатов и экспресс-метод, позволяющий сократить количество стендовых испытаний натуральных деталей машин и конструкций или отказаться от дополнительных испытаний совсем.

Научная новизна работы:

- разработан новый подход для аттестации материалов по динамике эволюции безразмерных прочностных показателей. В его рамках создана и успешно опробована на практике аттестация материалов по системе параметров, которая позволяет обстоятельно отображать функциональные связи и закономерности поведения материалов при испытаниях на циклическую прочность и дает возможность обеспечить целостность описания совокупности процессов «упрочнения-разупрочнения» не конкретизируя такие важные параметры, как искажения кристаллической решетки, интенсивность дробления зерен на фрагменты, блоки и их взаимная разориентировка и др, которые так или иначе сказываются на значениях используемых нами показателей;

- разработана методика оценки 3D-структуры для определения наиболее уязвимых мест в зонах локализации деформации и поверхностях разрушения на основе выявления резких перепадов и значительных величин экстремумов в профиле, свидетельствующих о нестабильности прохождения процесса высокоэнергетического распространения магистральной трещины часто связанного с изменением механизма разрушения материала;

- разработана и апробирована экспериментальная методика оценки стабильности усталостных свойств и долговечности материала при высокочастотном нагружении, аппроксимирующем спектр эксплуатационного нагружения деталей;

- получены общие аналитические уравнения для описания поведения кривых усталости поликристаллических сплавов, позволяющие представить соотношение факторов их состояния: дефектности, структурно-энергетического состояния, релаксационной способности, напряженно-деформированного состояния в зависимости от внешних условий циклического нагружения;

- для всех исследованных материалов независимо от структурного состояния выявлены две характерные группы частотно-амплитудного диапазона испытаний: в первой наблюдается увеличение параметров сопротивления усталости с ростом частотно-скоростных характеристик и жесткости напряженного состояния, во второй – наоборот – повышение величины частоты нагружения, и смягчение схемы напряженного состояния приводят к заметному уменьшению параметра сопротивления усталости, т.е. к уменьшению наклона левой ветви кривой усталости, а соответственно увеличению долговечности. Это позволяет рекомендовать оптимальные частотно-скоростные условия для каждого конкретного материала с учетом работы по заданной схеме нагружения. Получены математические выражения для каждой группы материалов.

- выявлены закономерности физических величин, изменения структур и показателей сопротивления усталости в динамике процесса циклического нагружения по различным схемам чистых металлов с разной атомно-кристаллической структурой и конструкционных материалов, определена корреляция с их усталостной прочностью и долговечностью;

- получены новые зависимости показателей сопротивления усталости образцов (деталей), позволяющие определить их прочность и долговечность;

- обоснована применимость новых характеристик поверхностных эффектов, используемых для прогнозирования прочности и долговечности деталей машин и конструкций по повреждаемости их поверхности.

Практическая значимость работы:

- Разработаны, изготовлены и экспериментально протестированы установки для испытаний на усталость чистых легкоплавких металлов и особо легкоплавких металлов, в которых осуществлена схема консольного изгиба вращающегося цилиндрического образца, а величина нагрузки, пропорциональная растяжению пружины динамометра, определяется сопротивлением деформации (изгибу) образца.

- Разработан и изготовлен уникальный лабораторный комплекс, включающий электромагнитную установку для испытаний на усталость и исследования стабильности свойств материалов, обеспечивающую испытания при консольном изгибе в одной плоскости по «мягкой» схеме нагружения исключающая динамические погрешности измерения изгибающего момента, действующего в корневой части испытуемого образца в зависимости от частоты нагружения и обеспечивающая легкость балансировки амплитуд в автоколебательной системе.

- Выявленные физико-механические закономерности динамики усталостных характеристик металлических материалов в условиях различных спектров нагружения, могут быть использованы для дальнейшего развития теории прочности и пластичности, а также способствовать накоплению статистических данных для формирования и обновления универсальных баз данных по физико-механическим свойствам материалов и расширению возможностей применения методов с использованием искусственного интеллекта.

- Сформулированы рекомендации по предпочтительному выбору широко применяемых марок сталей для изготовления реальных деталей машин и конструкций для эксплуатации в условиях нагружения, относящихся к исследованному частотно-скоростному диапазону с учетом стоимости и вида предварительной обработки детали.

- Решен ряд практических задач прогнозирования показателей сопротивления усталости лабораторных образцов и натуральных деталей.

- Полученные научные и методические наработки включены в 2 учебных пособия и используются в учебном процессе в Нижегородском государственном Архитектурно-строительном университете, в Нижегородском государственном техническом университете им. Р.Е. Алексеева, в ЧОУ ДПО «Учебный центр Головного Аттестационного Центра Верхне-Волжского региона».

- Основные положения диссертационной работы применены при разработке и промышленной апробации технологий изготовления, и ремонта изделий из конструкционных материалов на предприятиях г. Н. Новгорода: НОАО «Гидромаш».

- Разработанные методики и методы применяются при реализации гранта РФФИ № 22-13-20009 «Дисперсно упрочненные композиционные материалы на основе алюминия: методы получения, функциональные свойства, перспективные применения» 2022-2024 гг.

Достоверность исследования. Достоверность полученных в работе результатов, обоснованность выносимых на защиту положений и выводов обеспечена использованием современных методов исследования структуры и свойств, задействованием высокоточных экспериментальных установок, корректным применением процедур компьютерной обработки данных, в достаточной статистике испытаний чистых металлов, сталей и сплавов, в хорошей сходимости результатов прогноза и натуральных испытаний деталей машин и конструкций, сопоставлением экспериментальных данных с результатами расчета по известным теоретическим моделям и с данными других авторов.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Анализ влияния условий циклического нагружения, которые оцениваются уровнем напряжений при различном напряженном состоянии (изгиб с вращением, растяжение-сжатие, плоский изгиб и т.д.), частотой нагружения и температурой на физические механизмы формирования деформационного рельефа на поверхности, выраженного в виде экстрезий и

энтрозий, связанных с кристалло-графической ориентацией материала и с движением потоков дефектов по направлениям максимальных касательных напряжений и визуально наблюдаемые в виде полос локализованной пластической деформации. Их распространение обеспечивается чередованием пластических сдвигов растяжения-сжатия при консольном знакопеременном изгибе. Под влиянием тонкого возвратно-поступательного скольжения (гетерогенная деформация) происходят морфологические изменения поверхности в процессе циклического нагружения, а это отображается как накопление повреждений и количественно представлена Ф.

2. Экспериментально установленные значения показателей сопротивления усталости при изменениях частотно-амплитудного режима испытаний в результате чего определены две характерные группы материалов: в первой наблюдается увеличение параметров сопротивления усталости с ростом частотно-скоростных характеристик и жесткости напряженного состояния, во второй – наоборот – повышение величины частоты нагружения, и смягчение схемы напряженного состояния приводят к заметному уменьшению параметра сопротивления усталости вне зависимости от структурного состояния, т.е. к уменьшению наклона левой ветви кривой усталости, а соответственно увеличению долговечности.

3. Закономерности физических величин, изменения структур и показателей сопротивления усталости в различных условиях циклического нагружения металлов с разной атомно-кристаллической структурой и их корреляция с усталостной прочностью и долговечностью.

4. Новые экспериментальные зависимости изменения показателей сопротивления усталости при изменении обозначенных выше факторов.

5. Модели, методы и алгоритмы исследований и расчетов повреждаемости поверхности, соотношения частот и скоростей нагружения, релаксации напряжений, усталостной прочности и долговечности, оценки надежности и стабильности поведений материалов образцов и натуральных деталей машин с учетом различных схем нагружения.

Апробация результатов работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на научно-технических семинарах и конференциях: «14-я Нижегородская сессия молодых ученых. Технические науки» (Татинец, Нижегородская обл., 2009); Межрегиональная научно-практическая конференция «Заготовительные производства и материаловедение» посвященная 100-летию профессора А.А. Рыжикова (Н.Новгород, 2009); VIII международная молодежная научно-техническая конференция «Будущее технической науки» (Н.Новгород, 2009); 6-я Международная научно-техническая конференция «Современная металлургия начала нового тысячелетия» (Липецк, 2009); III, IV, VI, VII, VIII Международная конференция «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов» («Deformation and Fracture of Materials and Nanomaterials»), М: ИМЕТ РАН (Москва, 2009, 2011, 2015, 2017, 2019); Международный симпозиум «Образование, наука, производство: проблемы, достижения и перспективы». Материалы международной научно-технической конференции. КнАГТУ, (Комсомольск-на-Амуре, 2010); VIII, IX Российская ежегодная конференция молодых научных сотрудников и аспирантов «Физико-химия и технология неорганических материалов» М: ИМЕТ РАН, (Москва, 2011, 2012); Российская научно-техническая конференция «Фундаментальные исследования в области технологий двойного назначения» и Российская конференция «Школа-семинар по методологическому обеспечению и фундаментальным основам технологий двойного назначения». Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВПО «КнАГТУ», (Комсомольск-на-Амуре, 2011); Materiały VII Międzynarodowej naukowo-praktycznej konferencji «Perspektywiczne opracowania są nauką i technikami - 2011». Techniczne nauki.: Przemysł. Nauka i studia. (Польша, 2011); Международная научно-практическая конференция «Научные исследования и их практическое применение. Современное состояние и пути развития 2012» (Одесса, 2012); Международная научно-практическая конференция «Современные проблемы и пути их решения в науке, транспорте, производстве и образовании», (Одесса, 2012); XII, XVII

Международная молодежная научно-технической конференция «Будущее технической науки», НГТУ им. Р.Е. Алексеева, (Н.Новгород, 2013, 2018); Всероссийская молодежная научная конференция с международным участием "Инновации в Материаловедении": Ин-т металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, (Москва, 2013); Международная научная конференция «Технические науки и современное производство», Франция (Париж, 2013); Международная научная конференция «Проблемы и опыт реализации болонских соглашений», Черногория (Будва, 2013 г.); XXVI Международная научная конференция: «Математические методы в технике и технологиях – ММТТ» НГТУ им. Р.Е. Алексеева, (Н.Новгород, 2013); Международные Научные чтения им. чл.- корр. РАН И.А. Одина «Механические свойства современных конструкционных материалов». М: ИМЕТ РАН (Москва, 2014, 2018); Международный симпозиум «Наука. Инновации. Техника и технологии: Проблемы, достижения и перспективы». «Проблемы и достижения в инновационных материалах и технологиях машиностроения». Международная научно-техническая конференция. «КНАГТУ», (Комсомольск-на-Амуре, 2015); Междисциплинарный молодежный научный форум "Новые материалы. Дни науки. Санкт-Петербург 2015", (Санкт-Петербург, 2015); VI, VII, XII Всероссийский фестиваль науки, ННГАСУ, (Н. Новгород, 2016, 2017, 2022); Materials of conferences «Education and Science without Borders», «Fundamental and Applied Research in Nanotechnology» (Munich, Germany, 2017); Третий междисциплинарный молодежный научный форум с международным участием "Новые материалы", РАН, (Москва, 2017); Четвертый, Пятый междисциплинарный научный форум с международным участием "Новые материалы и перспективные технологии", РАН, (Москва, 2018, 2019); IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. (Moscow 2019); XXII Международная научно-практической конференция "Современная наука: Актуальные вопросы, достижения и инновации", (Пенза, 2021); VI - Международная научно-практической конференция, "Приоритетные направления развития науки в современном мире", (Уфа, 2021); XIII Всероссийский съезд по теоретической и прикладной механике (Санкт-Петербург, 2023).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 128 работ, из которых 23 статьи в журналах, включенных в Перечень ВАК Минобрнауки России, 14 статей в журналах, включенных в международные базы цитирования Web of Science и Scopus, в Федеральном институте промышленной собственности (Роспатент) зарегистрированы 4 результата интеллектуальной деятельности, включая 3 патента на изобретения, 1 свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы, содержащего 353 наименований, приложения. Работа содержит 369 листов машинописного текста, в том числе 184 рисунка и 9 таблиц. В приложение включены документы, подтверждающие практическое использование результатов работы на предприятиях г. Н. Новгорода: НОАО «Гидромаш».

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении содержится обоснование актуальности выбранной темы исследований, сформулирована цель, отмечены научная новизна и практическая значимость работы.

В первой главе сделан литературный обзор экспериментальных данных и современных теоретических представлений о механизмах циклической деформации материалов. Рассмотрено состояние вопроса о роли поверхностного слоя в накоплении усталостных повреждений. Представлен сравнительный анализ схем нагружения и амплитудно-частотных форм циклов в процессе усталостных испытаний и циклического упрочнения/разупрочнения материала.

Статистика усталостных разрушений образцов и деталей по работам многих авторов показывает, что разрушение обычно начинается с поверхности, при этом особая роль при

зарождении и развитии усталостной трещины отводится растягивающим напряжениям определяемым схемой нагружения.

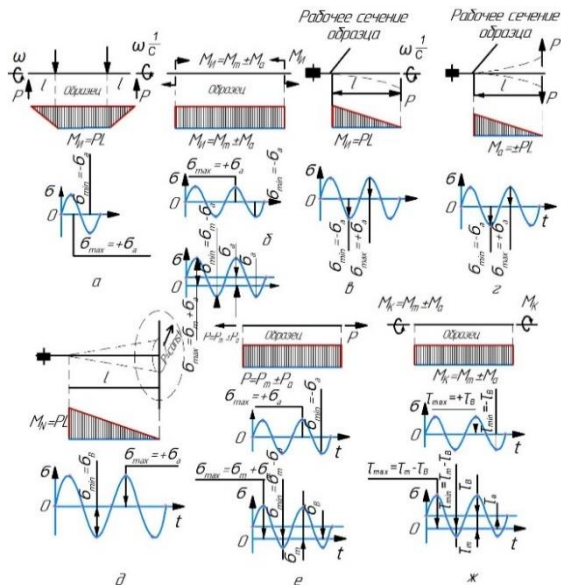


Рис. 1. Схемы нагружения при испытаниях на усталость: а – чистый изгиб вращающегося цилиндрического образца (ЧИВЦО); б – чистый изгиб в одной плоскости (ЧИОП); в – консольный изгиб вращающегося цилиндрического образца (КИВЦО); г – консольный циклический поперечный изгиб плоского образца (КЦПИПО); д – поперечный изгиб при вращении силовой плоскости (ПИВСП); е – осевое растяжение по пульсирующему циклу (ОРПЦ); ж – знакопеременное кручение (ЗК)

(рис. 2, а), при этом локализация деформации проявлялась в формировании выраженного рельефа поверхности (рис. 2, д). Грубые устойчивые полосы скольжения определяют образование усталостных трещин в виде экструзии и интрузии (рис. 2, с).

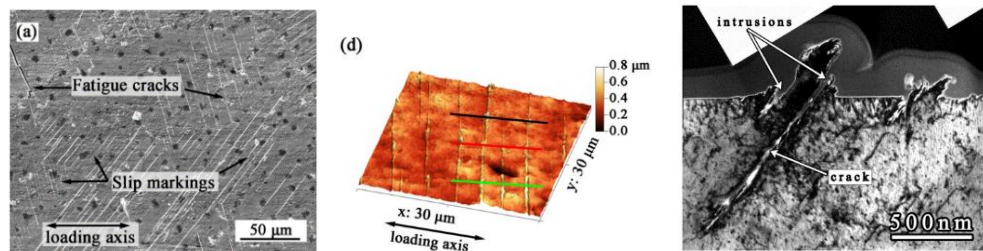


Рис.2. Изображения: а – полученное Ivo Šulák, показывающее многочисленные полосы скольжения и микротрещины и д – соответствующий рельеф поверхности; с - экструзии и интрузии (Jaroslav Polák)

Изменение топографии поверхности является так же результатом движения дислокаций, активизирующихся на определённой глубине и дающих разрядку актов пластической деформации на поверхности, которые сливаясь образуют полосы скольжения. Для проверки указанного положения проводился специальный эксперимент на образцах, изготовленных из монокристаллов алюминия (рис. 3).

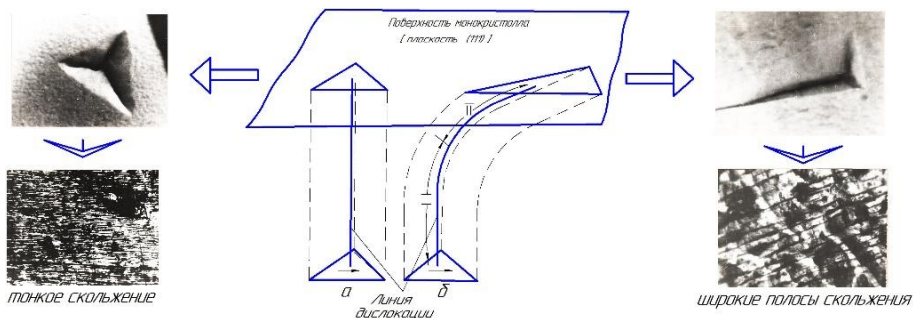


Рис. 3. Схематическое изображение выхода дислокаций на поверхность монокристалла до циклического нагружения и полученные экспериментально микроструктуры: а – крайвая ориентация; б – смешанная (на участке I – составляющая крайвой ориентации, на участке II – составляющая винтовой ориентации) переходящие в структуры после нагружения

Решение задач прочности и долговечности деталей машин и конструкций наталкиваются на физическую проблему, заключающуюся в изучении влияния изменения структуры поверхности на повреждаемость тонкого активного поверхностного слоя и связанных с ней показателей сопротивления усталости, которые в свою очередь существенным образом реагируют на малейшие изменения схемы и частотно-скоростного спектра нагружения. На основании проведенного анализа в конце главы сформулированы цель и задачи исследования.

Во второй главе обоснован выбор материалов для исследования, описаны используемые в работе оборудование и экспериментальные методики, сделан анализ погрешностей результатов измерений и расчетных данных. В соответствии с поставленными задачами выбраны материалы различных типов с разными видами термических обработок:

- модельные материалы: металлы со структурой ОЦК (Fe), ГЦК (Cu, Al, Ni), ГП (Y, La, Cd, Zn, ВТ1-00) и ромбической структурой (Bi, Ga);
- экспериментальные сплавы: дисперсно-упрочненные алюмоматричные композиционные материалы (ДУАКМ) полученные «методом внутреннего окисления»;
- промышленные сплавы: 40, 40Х, 45, 12Х18Н12Т, 30ХГСН2А, Х15Н5Д2Т, 6ХС, 03Н18КМ5Т, ВТ3-1, ОТ4, ОТ4-1.

Испытания цилиндрических и плоских образцов на усталость проводили при комнатной температуре как на стандартных машинах МУИ-6000, АG-Xplus-0.5, так и на разработанных оригинальных установках работающих с использованием различных схем напряженного состояния на рис. 1,а,в,г,е. Расчет наибольшего напряжения в цилиндрических образцах производился по формуле:

$$\sigma = \frac{M_x}{W_x}, \quad (1)$$

где $M_x = p \cdot l$, P – вес грузов с учетом веса поддона и части тросика, l – расчетное расстояние от места приложения нагрузки до предполагаемого места излома, W_x – осевой момент сопротивления, равный $\frac{\pi d^3}{32}$. Величина σ задается и определяется значением P .

Определение напряжения в расчетном сечении плоских образцов производили по амплитуде колебаний. При расчете использовали приближенное дифференциальное уравнение изогнутой оси балки переменного сечения:

$$E \cdot J(x) \cdot \frac{d^2 y}{dx^2} = M(x) \quad (2)$$

где $J(x)$ – момент инерции сечения; E – модуль Юнга; $M(x)$ – изгибающий момент; y – координата в направлении действия силы; x – координата в направлении оси балки.

Начало координат располагается в месте заделки образца. Момент на расстоянии x от места заделки:

$$M = F(l + a - x) \quad (3)$$

Уравнение для перемещения части образца с высотой h :

$$\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{F \cdot (l+a-x)}{E \cdot J_1}, \text{ где } J_1 = bh^3/12$$

Начальные условия: при $x = 0, y_1 = 0, \frac{dy_1}{dx} = 0$. Решение с учетом начальных условий:

$$\begin{cases} \frac{dy_1}{dx} = \frac{F}{E \cdot J_1} \cdot x \cdot (l + a - 0.5x) \\ y_1 = \frac{F}{E \cdot J_1} \cdot \frac{x^2}{2} \left(l + a - \frac{x}{3} \right) \end{cases} \quad (4)$$

Уравнение для перемещения части образца с высотой H :

$$\frac{d^2y_2}{dx^2} = \frac{F(l+a-x)}{E \cdot J_2}, \text{ где } J_2 = bH^3/12$$

Решение уравнения:

$$\begin{cases} \frac{dy_2}{dx} = \frac{F}{E \cdot J_2} \left(l + a - \frac{x}{2} \right) x + C_1 \\ y_2 = \frac{F}{E \cdot J_2} \left(l + a - \frac{x}{3} \right) \frac{x^3}{2} + C_1 x + C_2 \end{cases} \quad (5)$$

Начальные условия: при $x = l$

$$\frac{dy_1}{dx} = \frac{dy_2}{dx}, y_1 = y_2$$

Подставив значения $x = l$ в (4) и (5), и решив полученные уравнения, находим:

$$C_1 = \frac{F}{E} l \left(\frac{l}{J_1} + a \right) \left(\frac{1}{J_1} - \frac{1}{J_2} \right), C_2 = -\frac{F}{E} \cdot \frac{l^2}{2} \left(\frac{l}{J_1} + a \right) \left(\frac{1}{J_1} - \frac{1}{J_2} \right).$$

Значения постоянных C_1 и C_2 и уравнение для y_2 из (5) позволяют найти максимальное смещение в точке приложения силы при $x = l + a$:

$$A_m = \frac{F}{E \cdot J_2} \cdot \frac{(l+a)^3}{3} + \frac{F}{E} l(l+a) \left(\frac{l}{a} + a \right) \left(\frac{1}{J_1} - \frac{1}{J_2} \right) - \frac{F}{E} \cdot \frac{l^2}{2} \left(\frac{l}{J_1} + a \right) \left(\frac{1}{J_1} - \frac{1}{J_2} \right)$$

При принятых размерах h и H имеет место неравенство $J_2 \gg J_1$ ($J_1 = 208.3 \text{ мм}^4$; $J_2 = 3662 \text{ мм}^4$). Учитывая это неравенство и пренебрегая собственным изгибом утолщенной части с высотой H получим более простое выражение:

$$A_m = \frac{Fl}{E \cdot J_1} \left(a^2 + la + \frac{l^2}{3} \right) \quad (6)$$

Напряжение в расчетном сечении (y места заделки): $\sigma = \frac{F(l+a)}{w}$.

Определив F из (6) и учтя, что $\frac{J_1}{W} = \frac{h}{2}$, получим окончательное выражение:

$$\sigma = \frac{1.5h(l+a)}{l(3a^2+3la+e^2)} \cdot E \cdot A_m \quad (7)$$

Для принятых размеров образца: $\sigma = 26,9 \cdot 10^{-5} \cdot E \cdot A_m$. При среднем значении модуля Юнга $E = 2 \cdot 10^5 \text{ МПа}$: $\sigma = 53,8 \cdot A_m$, где напряжение в МПа, амплитуда в мм.

Аналогично определяли соотношения между напряжением и амплитудой колебаний для корсетных образцов.

Зная погрешности прямого измерения амплитуды колебаний, модуля Юнга и геометрических размеров образца можно рассчитать погрешность косвенного измерения величины σ воспользовавшись формулой (7):

$$\frac{\Delta\sigma}{\sigma} = \delta_A + \delta_E + \delta_e, \quad (8)$$

где $\delta_E = \frac{\Delta E}{E}$ относительная погрешность определения модуля Юнга;

$\delta_A = \frac{\Delta A}{A}$ относительная погрешность определения амплитуды;

$$\delta_e = \frac{\Delta h}{h} + \left(\frac{1}{a+l} + \frac{1}{l} + \frac{2l+3a}{3(a^2+ab+l^2/3)} \right) \cdot \Delta l + \left(\frac{1}{a+l} + \frac{2a+l}{a^2+al+l^2/3} \right) \cdot \Delta a \quad (9)$$

δ_e относительная погрешность определения линейных размеров образца.

В результате получили: $\delta_A = 0,01$ (1%); $\delta_e = 0,0123$ ($\approx 1,23\%$); $\delta_E = 0,05$ (5%).

Микроструктуру материалов на разных этапах наработки изучали с помощью оптических микроскопов МИМ-7 и KEYENCE VHX-1000. Трехмерную фрактографическую картину структуры получали с использованием оптического микроскопа KEYENCE VHX-1000 с расширенными возможностями за счет усовершенствованной длиннофокусной оптической системы и цифровой обработкой изображения. Для изучения характерных областей усталостного излома использовали растровые электронные микроскопы JEOL JSM-IT300LV, Hitachi S-3400N. Измерение микротвёрдости выполняли на приборе ПМТ-3 с нагрузкой на пирамидку Виккерса 0,98 Н (100 г).

Для количественных оценок показателей сопротивления усталости были приняты повреждаемость поверхности (Φ) и наклон левой ветви кривой усталости к оси циклов $\text{tg } \alpha_w$ которые определяли по следующим соотношениям:

$$\text{tg } \alpha_w = \frac{d \lg \sigma}{d \lg N} \quad (10)$$

где σ – циклическое напряжение; N – количество циклов.

Формула для подсчета повреждаемости поверхности:

$$\Phi = K_\Phi \frac{m_{MT} F_M}{m_{нов} F_{з.л.}}, \quad (11)$$

где K_Φ – коэффициент, учитывающий «форму» повреждений; он определяется как отношение a_{MT}/l_{MT} ; a_{MT} , l_{MT} – ширина и длина наиболее развитой микротрещины соответственно; m_{MT} – количество микротрещин на микроструктуре; $m_{нов}$ – общее количество повреждений на микроструктуре; F_M – фактическая площадь микроструктуры в очаге деформации; $F_{з.л.}$ – площадь поверхности образца в зоне повреждения (в зоне максимального изгибающего момента).

Для сравнительной оценки прочностных характеристик на требуемой базе испытаний был введен относительный коэффициент ограниченной выносливости χ вычисляемый по формуле:

$$\chi = \frac{\sigma_{N=10^6}}{\sigma_B}, \quad (12)$$

где $\sigma_{N=10^6}$ – напряжение, соответствующее долговечности $N = 10^6$ циклов, МПа.

Предложен новый подход аттестации материалов по прочностным характеристикам и стабильности поведения сплавов. В рамках представленного подхода предполагается аттестовывать исследованные материалы по динамике эволюции следующих показателей: $\text{tg } \alpha_w$; $K_{кор}$ и χ . На рисунке 4 представлена схема названных параметров в сопоставлении с экспериментальными данными и прочностными показателями.

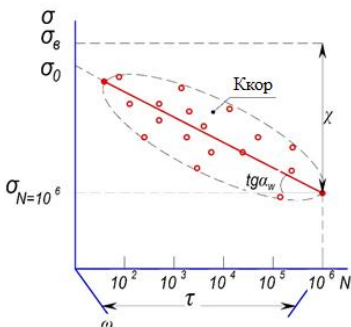
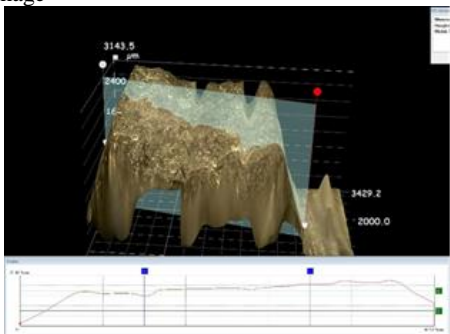


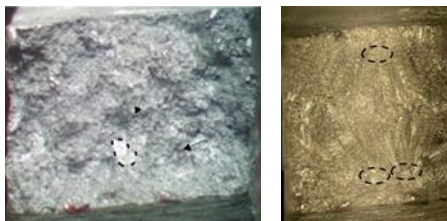
Рис. 4. Схематическое изображение системы показателей оценки поведения материалов при испытаниях на усталость

Методики исследования структур

Методика изучения поверхности разрушения материалов в 3-D изображении с использованием режима e-Preview Optimal Image

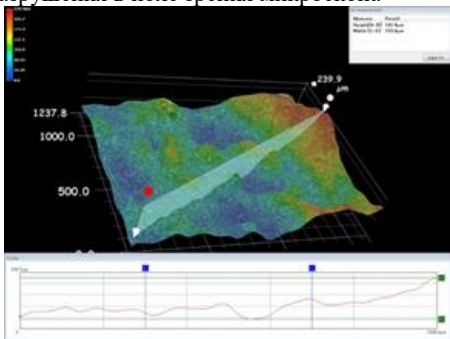


Методика макроструктурного анализа исследуемых образцов с использованием режима e-Preview Optimal Image

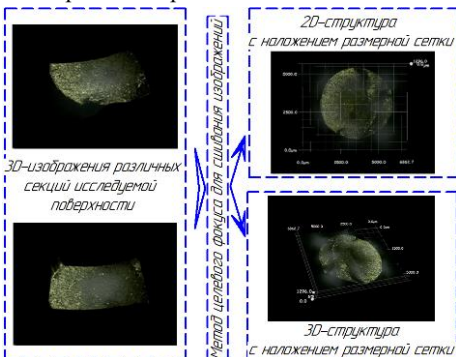


Методики микроструктурного анализа исследуемых образцов с использованием 2-D и 3-D измерительных систем:

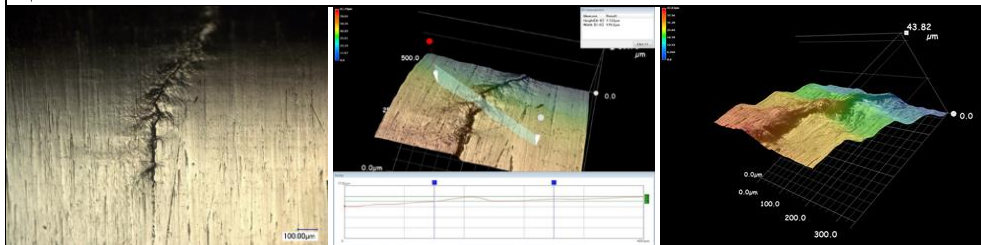
Методика изучения поверхности разрушения в поле зрения микроскопа



Методика изучения поверхностей разрушения, превышающих максимальное поле зрения микроскопа



Методика изучения деформационного рельефа на разных этапах наработки при циклических испытаниях



Данная система параметров позволяет обстоятельно отображать функциональные связи и закономерности поведения материалов при испытаниях на усталость с учетом изменения частот нагружения (с увеличением частоты нагружения время пребывания под нагрузкой уменьшается, что показано на рис. 4) и по нашему мнению дает возможность обеспечить целостность описания совокупности процессов «упрочнения-разупрочнения» не конкретизируя такие важные параметры, как искажения кристаллической решетки, интенсивность дробления зерен на фрагменты, блоки и их взаимная разориентировка и др., которые так или иначе сказываются на значениях используемых нами показателей.

Разработаны новые методики исследования макро- и микроструктур металлических материалов в 2-D и 3-D изображениях с использованием цифрового микроскопа (табл. 1).

Разработан алгоритм комплексного исследования структуры материалов и проведена его аппаратная реализация показанные на рис. 5.

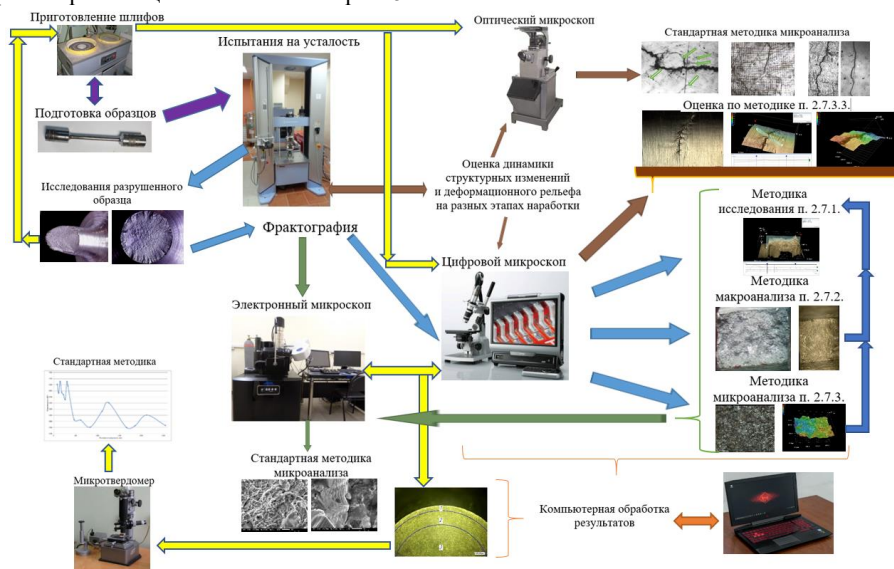


Рис. 5. Схема алгоритма комплексного исследования структуры материалов

В третьей главе представлены результаты экспериментальных исследований физико-механических характеристик материалов с учетом эволюции структурно-фазовых состояний в широком диапазоне частотно-амплитудных режимов и технологических схем нагружения при усталостных испытаниях.

В процессе знакопеременного нагружения в цветных металлах и сплавах происходит сложный процесс эволюции микроструктуры, связанный с процессом возникновения и накопления микрповреждений – вакансий, дислокаций, дисклинаций, микропор, полос скольжения и микротрещин. Поскольку усталостное разрушение начинается в поверхностных слоях металлов, их структурное состояние должно определять способность материала сопротивляться воздействию циклических нагрузок. Соответственно, кинетика локализованного деформационного структурного состояния поверхностного слоя, выявляющаяся на микро- и субмикроскопических масштабах в виде полос скольжения, должна сильно влиять на усталостную прочность и долговечность материала.

Физические механизмы формирования деформационного рельефа на поверхности, выраженные в виде экструзий и энтрузий, связаны с кристалло-графической ориентацией

материала и с движением потоков дефектов по направлениям максимальных касательных напряжений и визуально наблюдаются в виде полюс локализованной пластической деформации. Их распространение обеспечивается чередованием пластических сдвигов растяжения-сжатия при знакопеременном нагружении. Под влиянием тонкого возвратно-поступательного скольжения (гетерогенная деформация) происходят морфологические изменения поверхности в процессе циклического нагружения, а это отображается как накопление повреждений и количественно представлена Φ .

В контексте частотно-временного фактора влияние частоты (ω) можно рассматривать как воздействие на сопротивление усталости (пластическому деформированию) скорости деформирования, либо продолжительности времени действия напряжений. С увеличением частоты циклов нагружения (скорости деформирования) время нарастания напряжения сокращается, при этом напряжения, соответствующие определенной пластической деформации, увеличиваются. Интенсивность снижения сопротивления разрушению материала связана с интенсивностью накопления повреждений. Облегчение деформаций поверхностного слоя приводит к увеличению повреждений поверхности материала (величина Φ). Активный слой, подвергнутый повреждениям и повреждаемость поверхности материала, описывается следующим уравнением:

$$U_{п.с} = \frac{\tau B_{л.у} - U_n K_j}{K_j} \left[\frac{\tau B_{л.у}}{\tau B_{л.у} - U_n K_j} e^{-K_{Ay} K_j j} \right], \quad (12)$$

где $U_{п.с}$ – параметр повреждаемости активного слоя поверхности; τ – напряжение, действующее на петлю дислокации; $B_{л.у}$ – площадь дефекта упаковки; U_n – энергетический порог повреждаемости поверхностного слоя; K_j – параметр, связанный обратной зависимостью с поперечным размером (толщиной) поверхностного слоя j ; K_{Ay} – параметр, определяющий сопротивление среды прохождению физического процесса пластической деформации, параметр упрочнения материала поверхностного слоя.

Вследствие увеличения прочности (при $\omega_2 > \omega_1 \rightarrow \sigma_{\omega 2} > \sigma_{\omega 1}$) энергетический порог начала повреждаемости поверхностного слоя (U_n) повышается за счет роста сопротивления металла сдвиговой деформации (K_y увеличивается) и параметра повреждаемости активного слоя поверхности ($U_{п.с}$):

$$U_n = U_{\sigma_{оп}} + U_{о.д} + U_{S_n/V} + U_{п.в}, \quad (13)$$

где $U_{\sigma_{оп}}$ – энергия, зависящая от прочности окисной пленки; $U_{о.д}$ – энергия, связанная с величиной отрицательного давления (натяжением поверхности, удерживающим твердое тело как единое целое); $U_{S_n/V}$ – энергия, определяемая отношением площади поверхности (S_n) к объему (V); $U_{п.в}$ – энергия, зависящая от прочности вещества (имеется в виду материал тонкого поверхностного слоя).

Параметр, определяющий сопротивление среды прохождению физического процесса пластической деформации (параметр упрочнения материала) при скольжении расщеплённых дислокаций обозначается K_{Ay} . Стало быть $K_{Ay\gamma_1} > K_{Ay\gamma_2}$ при $\gamma_1 < \gamma_2$.

Необходимо учесть свойства j – го слоя, обусловленного его толщиной, т.е. ввести некоторый параметр K_j , связанный обратной зависимостью с поперечным размером слоя ($K_j, \frac{1}{мм}$).

Выражение для потенциального энергетического порога пластической деформации поверхностного слоя имеет вид:

$$U_{п.г.} = [(U_{п.г.}) - A_n] * e^{-\frac{K_j}{K_{Ay}} j} + A_n, \quad (14)$$

где A_n – некоторый параметр материала поверхностного слоя. Отношение $\frac{K_j}{K_{Ay}}$ как видно из последнего выражения, характеризует насыщение функции $U_{п.г.} = f(j)$, т.е чем больше K_{Ay} ,

тем ниже потенциальный энергетический порог $U_{п.г.}$ и тем раньше начинается физический процесс пластической деформации. Параметр K_j , в сущности определяется только толщиной слоя j и не чувствителен к описанным факторам (γ, ω), в то время как K_{Au} зависит от названных факторов.

Таким образом, влияние перечисленных факторов описывается представленным выражением для энергетического порога $U_{п.г.}$. Это выражение позволяет проанализировать, тем что больше параметр K_{Au} , т.е. чем больше сопротивление прохождению физического процесса пластической деформации, чем медленнее насыщается функция $U_{п.г.} = f(j)$, и тем выше потенциальный энергетический порог.

В соответствии с предложенной моделью природа возникновения широких полос связана с поперечным скольжением, энергия активизации которого обратна энергии дефекта упаковки (γ). Снижение (γ) способствует деформационному упрочнению. Сопротивление среды прохождению физического процесса пластической деформации становится выше, чем ниже γ и тем больше материал способен к деформационному упрочнению. Широкая дислокация с низкой γ ограничена в движении в отличие с узкой дислокации, которая имеет более высокую энергию дефекта упаковки – γ и движется в плоскости скольжения свободней совершая поперечное скольжение без стеснения.

Необходимо учесть гомологическую температуру материалов, которая выражается соотношением:

$$\Theta = \frac{T_{on}}{T_{пл}}, \quad (15),$$

где $T_{on} = t_{on} + 273$ °С, – температура эксперимента, К; $T_{пл} = t_{пл} + 273$ °С – температура плавления металла, К.

Из этого выражения следует, что при одинаковой температуре эксперимента гомологическая температура различных металлов будет существенно отличаться. Это скажется на плотности полос скольжения и положении кривой усталости и в конечном итоге определит циклическую прочность и долговечность.

Экспериментальные исследования на усталость материалов с разными типами атомно-кристаллического строения позволили установить закономерности указанных физических величин, изменения структур и показателя сопротивления усталости в динамике процесса циклического нагружения по различным схемам испытаний (рис. 6).

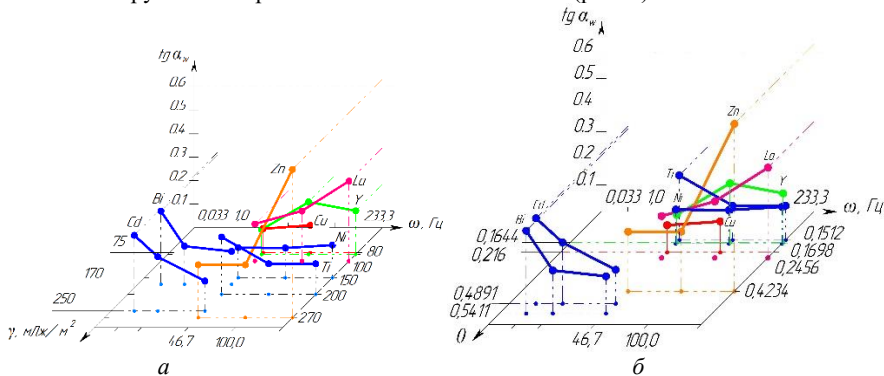


Рис. 6. Закономерности показателя сопротивления усталости с частотно-скоростными режимами циклического нагружения в зависимости: а – от энергии дефекта упаковки и б – гомологической температуры

Сопоставив экспериментальные результаты в условиях одинаковых θ скоростной эффект оказывается сильнее у металлов с большой энергией дефекта упаковки (γ), что подтверждается характером и интенсивностью полос скольжения. При одинаковых же значениях θ и γ скоростная зависимость усиливается в последовательности типов атомно-кристаллических структур ГЦК – ОЦК – АК.

Кадмий, никель, титан ВТ-1-00 имеют высокую γ . Поверхность этих материалов повреждается сильно (рис. 7, а, б, в). Цинк имеет тоже высокую γ , но из-за особенностей атомной упаковки в нем пластическая деформация идет двойникованием (рис. 7, з), но в более чистом металле наблюдаются полосы скольжения (рис. 7, д). Железо, как известно, тоже имеет высокую γ , поэтому в ферритных зернах углеродистых сталей мы наблюдаем развитые полосы скольжения, т.е. имеем достаточно высокое значение повреждаемости (рис.7, ж). Медь по величине γ занимает как бы промежуточное значение и повреждаемость поверхности у нее соответствующая (рис. 7, з).

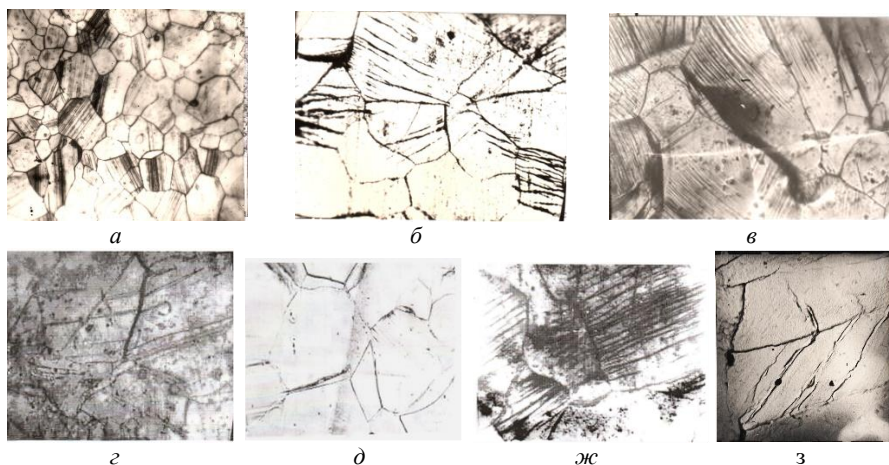


Рис. 7. Микроструктуры при испытаниях на усталость: а - кадмий (x600); $\sigma = 36$ МПа; $N = 10^3$; $\omega = 0,033$ (а); б – титан ВТ-1-00 (x600): $\sigma = 160,1$ МПа; $N = 9,55 \cdot 10^4$ циклов; $\omega = 46,7$ Гц; в – никеля: (x340): $\sigma = 191$ (в) МПа; $N = 2 \cdot 10^5$ (б) циклов; $\omega = 100$ (б) Гц; цинка (x450 (г) и 300 (д)): $\sigma = 48$ (г) и 33 (д) МПа; $N = 8 \cdot 10^5$ (г) и $2,7 \cdot 10^4$ (д) циклов; $\omega = 46,7$ Гц (г и д); ж – железа (x500): $\sigma = 100$ МПа; $N = 1,3 \cdot 10^3$ циклов; $\omega = 46,6$ Гц; з – медь (x9700): $\sigma = 225$ МПа; $N = 7 \cdot 10^3$ циклов; $\omega = 46,6$ Гц

Четвертая глава посвящена выявлению и анализу закономерностей параметров сопротивления усталости с изменениями структурно чувствительных факторов с учетом вида термической обработки и спектра нагружения.

Анализ экспериментальных результатов позволил выделить две характерные группы частотно-амплитудного диапазона испытаний: в первой наблюдается увеличение параметров сопротивления усталости с ростом частотно-скоростных характеристик и жесткости напряженного состояния, во второй – наоборот – повышение величины частоты нагружения, и смягчение схемы напряженного состояния приводят к заметному уменьшению параметра сопротивления усталости, т.е. к уменьшению наклона левой ветви кривой усталости $\lg a_w$, а соответственно увеличению долговечности (рис. 8.).

Используя предложенный подход аттестации материалов по прочностным характеристикам и стабильности поведения по динамике эволюции следующих показателей: $\text{tg } \alpha_w$; $K_{\text{кор}}$ и χ было проведено комплексное исследование материалов из обеих групп. Максимальная циклическая прочность стали 40X (первая группа), термообработанной на предел прочности $\sigma_b = 920$ МПа обнаруживается при спектре нагружения с частотой 100 Гц, что количественно выражено в увеличении значений $K_{\text{кор}}$ и χ , при этом величина $\text{tg } \alpha_w$ значительно уменьшается по отношению к результатам при испытаниях в диапазоне низкочастотного спектра 2 и 2,7 Гц и характеризуется повышением долговечности и стойкости этой стали под действием циклических напряжений по «мягкой» схеме КИВЦО. Наблюдается увеличение стабильности поведения стали марки 40X в область повышения скорости деформирования, что подтверждается уменьшением разброса экспериментальных данных и числом выражено коэффициентом корреляции $K_{\text{кор}} = 0,9411$.

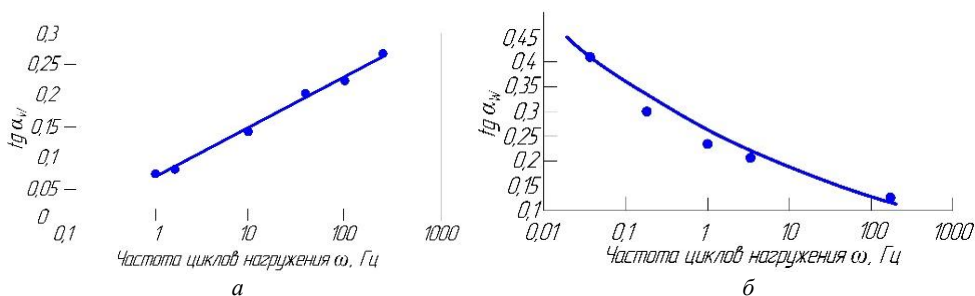


Рис. 8. Зависимости показателя сопротивления усталости от частоты спектра нагружения: а – первая группа; б – вторая группа материалов

Испытания при низкочастотном спектре циклического нагружения показывают неоднозначное распределение прочности и долговечности. При $\omega = 2,7$ Гц материал выдерживает существенно большие напряжения, чем при $\omega = 2$ Гц, при одинаковой наработке в 10^3 циклов, но базе долговечности 10^6 коэффициент χ оказывается ниже и сопровождается высоким значением $\text{tg } \alpha_w$, что говорит о большем разупрочнении стали 40X при нагружении $\omega = 2,7$ Гц. Для этого амплитудно-частотного спектра наблюдается средняя стабильность поведения материала, которая идентифицируется относительным постоянством разброса экспериментальных данных и выражена практически одинаковым коэффициентом корреляции.

Результаты экспериментов стали марки 40, проиллюстрированные на рис. 10, показывают противоположную тенденцию изменения циклической прочности в сравнении со сталью 40X – рост частоты циклов нагружения (ω) снижает усталостную прочность испытанной по той же схеме нагружения, что и сталь 40X. Сталь 40, термообработанная на предел прочности $\sigma_b = 780$ МПа при $\omega = 2$ Гц демонстрируют: высокое значение показателя χ и очень низкую величину наклона кривой усталости $\text{tg } \alpha_w$, но низкий показатель стабильности поведения материала $K_{\text{кор}} = -0,779$ указывает на непредсказуемость работы материала, одним словом при одном и том же значении напряжений при этой частоте, разрушение может произойти достаточно быстро, а может не произойти вовсе. С возрастанием частоты нагружения $\text{tg } \alpha_w$ численно растет, коэффициент χ снижается – циклическая прочность падает, но при этом нужно отметить, очень высокие значения коэффициентов корреляции при частотах нагружения 2,7 и 46,7 Гц, что показывает постоянство работы стали во всем диапазоне долговечности.

Анализ полученных результатов по титановому сплаву ОТ-4-1 выявляет одинаковые значения показателя χ при различных частотах, однако существенно меньшее значение $\text{tg } \alpha_w$ при

$\omega = 1$ Гц показывает более высокую прочность за весь период циклов нагрузки, в тоже время как стабильность титанового сплава очень высока, что подтверждается $K_{кор}$.

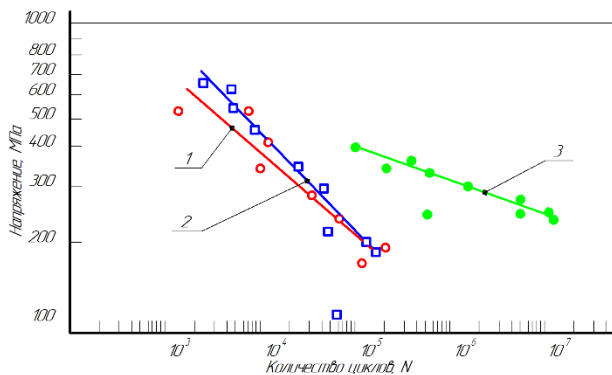


Рис. 9. Кривые усталости стали 40X: 1 – $\omega = 2,7$ Гц; 2 – $\omega = 2,0$ Гц; 3 – $\omega = 100,0$ Гц, Уравнения кривых усталости: 1 – $\lg \sigma = 2,65 - 0,2655 \lg N$; $K_{кор} = 0,901$; 2 – $\lg \sigma = 2,97 - 0,3293 \lg N$; $K_{кор} = 0,8956$; 3 – $\lg \sigma = 2,297 - 0,1337 \lg N$; $K_{кор} = 0,9411$;

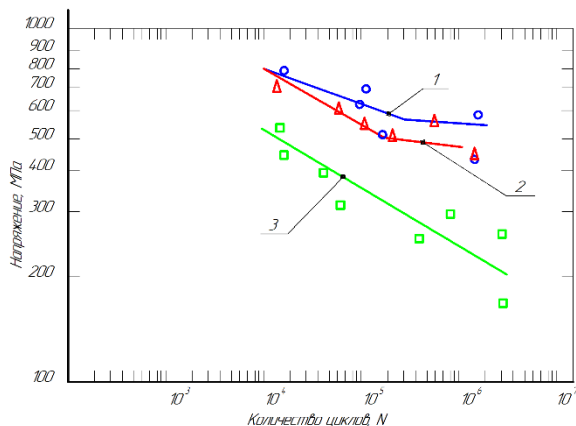


Рис. 10. Кривые усталости стали 40: 1 – $\omega = 2,0$ Гц; 2 – $\omega = 2,7$ Гц; 3 – $\omega = 46,7$ Гц, уравнения кривых усталости: 1 – $\lg \sigma = 2,244 - 0,0877 \lg N$; $K_{кор} = 0,779$; 2 – $\lg \sigma = 2,4275 - 0,1311 \lg N$; $K_{кор} = 0,9977$; 3 – $\lg \sigma = 2,353 - 0,16 \lg N$; $K_{кор} = 0,98$;

У стали 30ХГСН2А максимальные значения прочности и долговечности выявлены при спектрах нагружения $\omega = 3,33$ и 50 Гц, что в основном связано со смягчением схемы нагружения. Стабильность стали при разных видах испытаний очень высока, однако при $\omega = 50$ Гц замечен некоторый её спад.

Испытания стали 30ХГСН2А выявили, что как при частотном спектре нагружения $0,17$ Гц, так и при $40,0$ Гц сопротивление усталости стали термообработанной на предел прочности $\sigma_b = 1800$ МПа выше, чем у менее прочных образцов с $\sigma_b = 1280$ МПа испытанных по «жесткой» схеме (ОРПЦ). При $\omega = 40,0$ Гц углы $\text{tg } \alpha_w$ показывают незначительное расхождение $\text{tg } \alpha_w = 0,2552$ для стали с пределом прочности $\sigma_b = 1800$ МПа и $\text{tg } \alpha_w = 0,2466$ с $\sigma_b = 1280$ МПа, а при $\omega = 0,17$ Гц вообще равенство, что характеризует материал определенной устойчивостью к восприятию циклических нагрузок по жесткой схеме нагружения. Существенные отличия от рассмотренных экспериментов обнаруживаются при смене вида испытаний на испытания по схеме КЦПИПО термообработанных на категорию прочности $\sigma_b = 1500$ МПа. Наблюдается

значительное уменьшение наклона кривых усталости с $\text{tg } \alpha_w = 0,301$ при $\omega = 0,17$ Гц для образцов с $\sigma_b = 1800$ МПа и $\sigma_b = 1280$ МПа (рис. 12) до $\text{tg } \alpha_w = 0,15051$ при $\omega = 3,33$ Гц с $\sigma_b = 1500$ МПа (рис. 11 кривая усталости 3). Аналогичная динамика изменения показателей сопротивления усталости прослеживается и при более высоких частотах циклического нагружения (40,0 и 50,0 Гц) по «мягкой» схеме (КИВЦО) при этом обнаружен рост циклической прочности на базе $N = 10^6$ циклов в 1,5-2 раза.

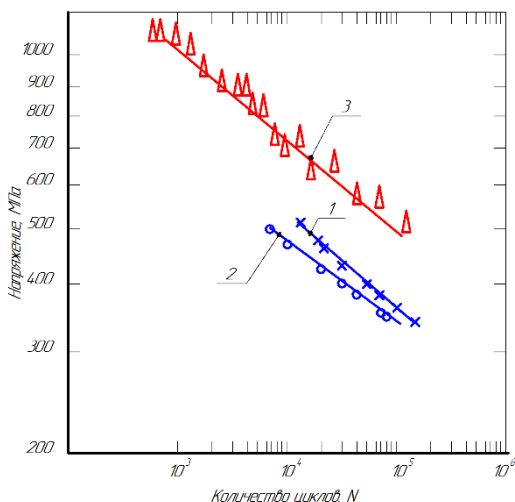


Рис. 11. Кривые усталости образцов из титанового сплава ОТ-4-1: 1 – $\omega = 37,0$ Гц, 2 – $\omega = 1,0$ Гц и стали 30ХГСН2А: 3 – $\omega = 3,33$ Гц; уравнения кривых усталости: 1 – $\lg \sigma = 3,5866 - 0,2219 \lg N$; $K_{\text{кор}} = 0,9799$; 2 – $\lg \sigma = 3,2607 - 0,1461 \lg N$; $K_{\text{кор}} = 0,9899$; 3 – $\lg \sigma = 3,4446 - 0,15051 \lg N$; $K_{\text{кор}} = 0,9994$

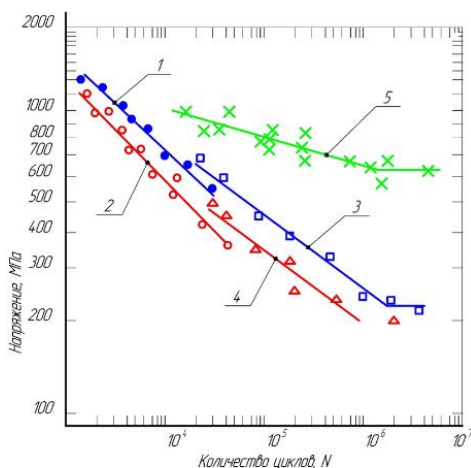


Рис. 12. Кривые усталости образцов из стали 30ХГСН2А: $\omega = 0,17$ Гц (1, 2) и 40,0 Гц (3, 4) и соответствующие им пределы прочности $\sigma_b = 1800$ (1, 3) и 1280 (2, 4) МПа; 5 – $\omega = 50,0$ Гц, $\sigma_b = 1500$ МПа; Уравнения кривых усталости: 1 – $\lg \sigma = 4,0779 - 0,3010 \lg N$; $K_{\text{кор}} = 0,9890$; 2 – $\lg \sigma = 3,9821 - 0,3010 \lg N$; $K_{\text{кор}} = 0,9795$; 3 – $\lg \sigma = 3,9239 - 0,2552 \lg N$; $K_{\text{кор}} = 0,9900$; 4 – $\lg \sigma = 3,7682 - 0,2466 \lg N$; $K_{\text{кор}} = 0,9834$; 5 – $\lg \sigma = 3,3432 - 0,08723 \lg N$; $K_{\text{кор}} = 0,8404$;

Улучшение параметра сопротивления усталости $\text{tg } \alpha_w$ связано с повышением упрочняемости поверхностных слоев образцов, что снижает усталостную повреждаемость собственно поверхности. Процесс накопления повреждений тесно связан с циклическим микропластическим деформированием. Чтобы разрыв атомных связей в локальном объеме,

ответственном за разрушение, стал необратимым, в нем должна произойти перегруппировка атомов, т.е. микропластическая деформация. Именно в этих зонах локализации деформации происходит зарождение и распространение усталостной трещины. На рис. 13,а показана микроструктура стали, на которой виден ярко выраженный экструзионно-интрузионный рельеф поверхности, образовавшийся в ходе циклического испытания плоских образцов по схеме консольного изгиба. Конкретная последовательность возникновения структурных изменений в виде экструзий (выступов) и интрузий (впадин) различной геометрии и масштаба определяется внутренней структурой материала и наблюдаются в зоне максимальных напряжений. Зародышами трещин усталости являются поверхностные впадины (интрузии), образованные за счет выхода краевых дислокаций на поверхность зерна или при круговом перемещении винтовой дислокации и её выходе на поверхность. В зонах локализации деформации поверхностных слоев отчетливо наблюдаются неразвитые микротрещины (показаны стрелками на рис.13,а). В целом поврежденность поверхности стали 30ХГСН2А можно охарактеризовать как относительно малую, без видимых полос скольжения, что возможно связано с ее мелкодисперсной структурой.

С увеличением ω угол $\text{tg } \alpha_w$ заметно уменьшается, что связано с повышением степени упрочнения поверхностных слоев данной стали. Об этом свидетельствует уменьшение поврежденности их поверхности, на которой не наблюдается микроскопического растрескивания, хотя видны акты локализации микроскопической деформации в виде экструзий и интрузий в области максимальных напряжений (рис. 13,б). Для выявления масштаба циклического упрочнения изготавливали шлиф в зоне разрушения образца. В структуре образца (рис. 13,в) отчетливо видны три зоны: 1 – зона упрочнения; 2 – переходная; 3 – центральная. Зона упрочнения 1 занимает значительную часть поперечной площади образца. Для этой зоны характерна в основном мартенситная структура. В переходной зоне 2 наблюдается структура бейнита с небольшой долей мартенсита, сформированная в процессе стандартной термической обработки. Очевидно, образование зоны 2 обусловлено низкой скоростью теплоотвода при закалке образцов, что и привело к формированию в ней как бейнита, так и мартенсита. Центральная зона 3 имеет ферритно-карбидную структуру.

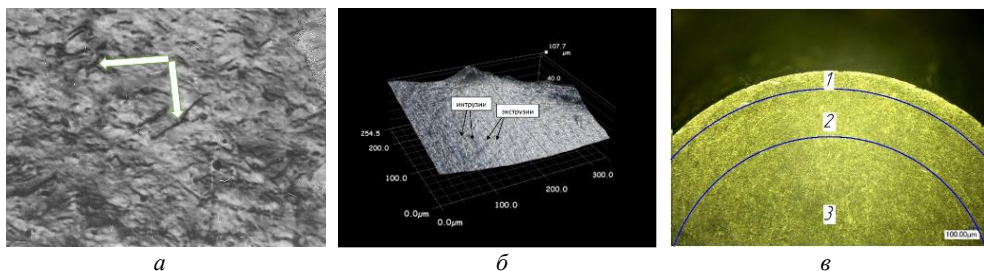


Рис.13. Изображения: а – Микроструктура поверхности стали 30ХГСН2А при КЦПИПО сечением 3х3 мм при $\sigma = 1000$ МПа, $N = 1,5 \cdot 10^3$ циклов, $\omega = 3,33$ Гц; б – дисторсия поверхности образца диаметром 5 мм при КИВЦО $\sigma = 1010$ МПа, $N = 1,3 \cdot 10^4$, $\omega = 50$ Гц; в – Микроструктура поперечного сечения образца $\sigma = 1010$ МПа, $N = 1,4 \cdot 10^4$ циклов, $\omega = 50$ Гц: 1 – область упрочнения; 2 – переходная область; 3 – центральная

На рис. 14,а приведены результаты измерений микротвердости по сечению образцов стали 30ХГСН2А после испытаний на усталость. Видно, что её максимальное значение находится вблизи поверхности.

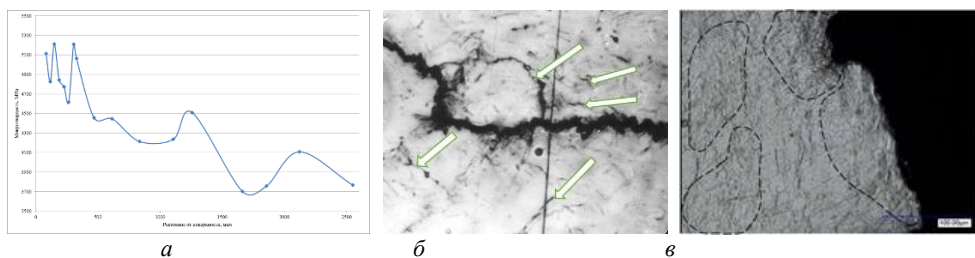


Рис. 14. Изменение микротвёрдости по толщине образца, показанного на рис. 13,в; б – микроструктура магистральной усталостной трещины; в – зона локальной пластической деформации в циклически упрочненном слое вблизи излома

На рис. 14,б представлена микроструктура фрагмента магистральной усталостной трещины на поверхности образца после циклического плоского изгиба. Стадия зарождения такой трещины характеризуется наличием большого количества локальных пластически деформированных объемов (рис. 14,в), являющихся источниками возникновения микроскопических трещин. Раскрытие магистральной трещины происходило волнообразно (рис. 14,б) с периодическим изменением знака поворота (волновой характер).



Рис. 15. Поверхности излома: а – 3D-изображение, стрелкой показана вторичная микротрещина; б – макроизлом разрушенного образца (1 – зона зарождения трещины; 2 – зона усталостного распространения трещины; 3 – зона долома); в, г – микроизлом

На рис. 15 представлены результаты фрактографических исследований излома после циклической деформации при КИВЦО стали 30ХГСН2А. Одна из микротрещин, формирующихся на поверхности при нагружении, показана на рис. 15, а. Установлено, что для макроизлома разрушенных образцов характерны три типичные зоны (рис 15, б): зарождения трещины, усталостного распространения трещины и зоны статического вязкого долома. Однако на стадии ускоренного распространения трещины (рис. 14,б) наблюдается ее скачкообразное формирование с чередованием областей вязкого ямочного излома и усталостного бороздчатого

рельефа. Фрактографические исследования показали смешанную картину разрушения: на фоне ямочного разрушения виден бороздчатый рельеф (рис 15, в, з). Кроме того, в изломе обнаружена вторичная микротрещина, имеющая клиновидную форму (показана стрелкой на рис 15, а). Довольно развитый рельеф излома соответствует волновому характеру распространения пластических сдвигов. Следует отметить, что в макрогеометрии рельефа поверхности разрушения не наблюдается резких изменений высот, что может свидетельствовать о стабильном во времени характере разрушения.

Были проведены исследования кинетики усталостного разрушения с позиций периодичности и стадийности процессов накопления повреждений. Известно, что весь процесс усталости металлических материалов разделяется на два периода: зарождения и распространения трещин.

Период зарождения усталостных трещин, в свою очередь, делиться на три стадии:

1. Стадия циклической микротекучести. На этой стадии происходит некоторая микропластическая деформация металла, наиболее интенсивно – в поверхностных слоях металла глубиной порядка размера зерна. Необходимо отметить, что эти процессы могут протекать в локальных объемах металла вплоть до разрушения, что отчетливо наблюдается на рис. 14, в вблизи поверхности раздела при разрушении материала.

2. Стадия циклической текучести или неомогенной деформации, в которой наблюдается пластическое течение материала, при этом на поверхности появляется волнистый рельеф, выраженный в виде экструзий и интрузий (рис. 13, б).

3. Стадия циклического упрочнения (разупрочнения), на которой повышается плотность дислокаций и возможны различные фазовые превращения. Она завершается достижением линии необратимых повреждений (линии Френча), чему соответствует образование микротрещин (рис. 13, а). Этим процессом и заканчивается период зарождения усталостных трещин.

Стадия распространения усталостных трещин является заключительной при разрушении образцов в процессе циклических испытаний. Характеризуется стартом одной из микротрещин, перерастающей в магистральную трещину (рис. 14, б), которая, распространяясь по телу образца, приводит его к разрушению. При графическом изображении эта стадия находится в диапазоне между линией Френча и линий (кривой) усталости.

У исследованной стали упрочнение происходит на ранних стадиях нагружения – начиная с $5 \div 10\%$ от времени полной наработки, затем достигается длительное состояние насыщения вплоть до разрушения, при сохранении локальной пластической деформации. Локальные зоны в поверхностном слое одновременно являются источниками экструзий и интрузий, образующих деформационный профиль и инициирующих полосы скольжения. Эти полосы по мере накопления повреждений в поверхностном слое генерируют микрорастрескивание поверхности, после чего развивается магистральная трещина. При знакопеременном поперечном изгибе и изгибе с вращением микропластическую деформацию испытывает только поверхностный слой образца. Именно в нем и прилегающей к нему зоне наблюдается локальное структурное превращение, о чем свидетельствует максимальная микротвердость образца вблизи поверхности. Данный факт приводит к снижению $\text{tg}\alpha_w$, что сопровождается упрочнением поверхности и увеличением сопротивления усталости, исследованной стали. В случае работы материала по пульсирующему циклу растяжения-сжатия микропластической деформации подвержено все сечение образца. Однако за счет существования градиента плотности дислокаций по толщине образца его поверхность упрочняется в этом случае в меньшей степени, чем при испытаниях по более мягким схемам нагружения, что отражается в увеличении $\text{tg}\alpha_w$. Из этого следует, что предел выносливости и показатели сопротивления усталости зависят от вида усталостных испытаний и режима предварительной термической обработки образцов.

В пятой главе представлены частотные характеристики и выявлена динамика частотной стабильности испытаний образцов при испытании на усталость при нагружении по «мягкой» схеме консольного изгиба плоских образцов. Исходили из того, что когда в детали действует заданное напряжение при заданном частотно-амплитудном спектре нагружения, то идет процесс упрочнения-разупрочнения материала, из которого она сделана. Если деталь упрочняется, то амплитуда уменьшается, если разупрочняется, то наоборот амплитуда возрастает. Изменение прочности в ту или другую сторону приводит к изменению частоты на $\Delta\omega$ тоже в ту или другую сторону. Кроме того, незначительные изменения частот собственных колебаний, которые как известно связаны с модулем упругости, явлением неупругости и колебанием атомов и их решеток, приводят к недопустимым погрешностям при преобразовании видов колебаний и преждевременному усталостному разрушению. Отсюда следует, что надо зафиксировать изменение величины частоты $\Delta\omega$. Для таких исследований была разработана оригинальная электромагнитная установка, работающая в автоколебательном режиме. В установке реализована работа на основе электромеханической системы, в которой возбуждение механических колебаний осуществляется исходя из собственной частоты колебания (СЧК) испытуемого образца, т.е. осуществлен режим, когда частота возбуждающей силы (частота циклического нагружения ЧЦН) всегда равна СЧК образца. Сравнительную оценку изменения частотных характеристик проводили при наработке 50 млн. циклов. Наибольший интерес представляет стабильность частоты при нагрузках близких к пределу усталости. Поэтому строили кривые усталости для определения предела выносливости и производили их анализ с учетом различных видов термической обработки материалов. При напряжениях, приближающихся к пределу усталости, испытания по времени были длительными, и установка отключалась на ночь. Частота собственных колебаний образца изменяется при остановке на ночь: утром, после 10 часовой паузы, частота больше, чем накануне вечером при остановке испытаний. На частотных характеристиках, приводимых на рис. 16,а изображены две огибающие кривые, одна из которых (верхняя) соответствует частоте в момент включения, а другая (нижняя) частоте в момент отключения после дневной работы. Следовательно, верхняя кривая показывает изменение начальной частоты (частоте включения) а нижняя - изменение конечной частоты (частоты отключения). Суточные изменения частоты при наработке циклов лежат в области, ограниченной этими двумя кривыми. На рис. 16,в показаны частотные характеристики в виде одной ломаной линии.

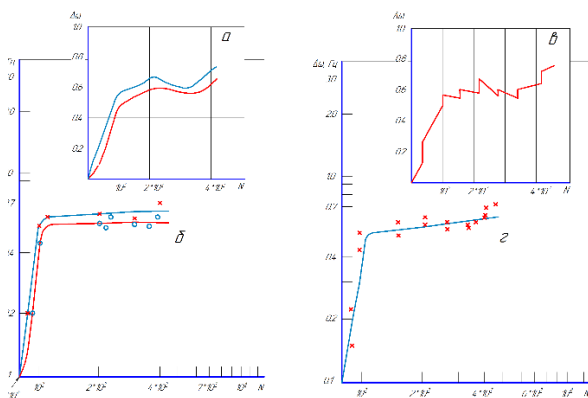


Рис. 16. Графическое изображение частотных характеристик стали 03Н18КМ5Т-Эл: а – изменения частоты колебаний образца; б, в – зависимости $\Delta\omega = f(N)$ в истинных координатах; в – отклонение частоты колебаний образца в зависимости от количества циклов нагружения. Режим ТО: 3+С 550°С, начальная частота $\omega = 198,72$ Гц, нагрузка $\sigma = 670$ МПа

Вертикальные скачки соответствуют изменению частоты после ночного перерыва испытаний. Наклонные линии показывают ход суточного изменения частоты по мере увеличения числа циклов работы.

Зависимость $\Delta\omega = f(N)$ имеет вид двух прямых с изломом в районе долговечности около 10^7 циклов. До 10^7 циклов прямая имеет крутой наклон, что говорит об области интенсивного упрочнения. Прямая после излома имеет небольшой наклон, который свидетельствует об умеренном упрочнении материала, т.е. сталь набирает циклы долговечности не разрушаясь, выйдя на характерный участок «стабилизации». Изменение частоты нарастает медленно, материал работает стабильно, упрочнение – разупрочнение относительно значительно менее интенсивное. Для представленной стали максимальное изменение частоты за время испытаний составило 0,75 Гц. Наиболее интенсивно частота изменялась при первых 10 млн циклов нагружения, за это время частота изменилась на 0,54 Гц. За последующие 35 млн циклов отклонение частоты ($\Delta\omega$) составило 0,21 Гц. Такие характеристики являются средними по значениям в сравнении с инструментальными сталями и титановыми сплавами, которые были испытаны по этой методике, что в целом можно принять данную сталь приемлемой для изготовления деталей со стабильными свойствами.

При напряжениях, приближающихся к пределу усталости, испытания по времени были длительными, и установка отключалась на ночь. Установлено что, прирост частоты после отдыха носит случайный характер и не зависит от числа циклов наработки. В течение следующего дня работы образца частота может уменьшаться, но полученный прирост полностью не исчезает.

Проведены непрерывные испытания в течении всего времени наработки. Выявлено, что перерывы в циклических испытаниях приводят к скачкообразному приросту частоты, а при непрерывных испытаниях таких скачков нет. При этом сравнительный анализ с результатами непрерывных испытаний показал, что общее отклонение частоты примерно одинаковое за весь цикл наработки в обоих случаях.

В главе 6 приводятся численные и графические зависимости параметров сопротивления усталости, критерии и методы прогноза циклической прочности и долговечности с учетом полученных экспериментальных результатов.

Получены общие аналитические уравнения (16-19) для описания поведения кривых усталости поликристаллических металлов и сплавов, позволяющие представить влияние факторов их состояния: дефектности, структурно-энергетического состояния, релаксационной способности, напряженно-деформированного состояния в зависимости от влияния внешних условий циклического нагружения. Учет влияния условий циклического нагружения оценивали уровнем напряжений при различном напряженном состоянии (изгиб с вращением, растяжение-сжатие и т.д.), частотой нагружения и температурой.

Теоретически возможные значения показателя напряженного состояния Π получены из анализа выражения $\Pi = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{\sigma_i}$ при условии, что значения $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3 \neq 0$. Они представлены на рис. 17, а, в системе координат $\Pi = \varphi(i_1, i_2, i_3)$, где $i_1 = \sigma_1 / \sigma_1 = 1.0$; $i_2 = \sigma_2 / \sigma_1$; $i_3 = \sigma_3 / \sigma_1$ (рис. 17, б в интервале значений Π от -18 до +18). Области действительных значений Π обозначены сплошными линиями.

$$\varepsilon_i^{np} = \varepsilon_0 + \frac{\ln(\rho_{m0}/\rho_{mкр})}{\left(\frac{HB}{\sigma_T} - 2\right) e^{\alpha\Pi} - \left[\frac{\dot{\varepsilon}_p}{\dot{\varepsilon}_H} - \left(\frac{\dot{\varepsilon}_p}{\dot{\varepsilon}_H}\right)_{волн}\right]} \quad (16)$$

$$\sigma_K = \sigma_{K_0} e^{\left\{\left(\frac{HB}{\sigma_T} - 2\right) - \left[\frac{\dot{\varepsilon}_{рел}}{\dot{\varepsilon}_H} - \left(\frac{\dot{\varepsilon}_p}{\dot{\varepsilon}_H}\right)_{волн}\right] \varepsilon_{рх} e^{\alpha\Pi}\right\} (\varepsilon_i^{np} - \varepsilon_0)} \quad (17)$$

где $\left(\frac{\dot{\varepsilon}_p}{\dot{\varepsilon}_H}\right)_{волн}$ – соотношение скоростей с учетом спектра волн пластической деформации; $\varepsilon_{рх} = e^{\omega}$ – коэффициент разрыхления, зависящий от поврежденности, изменяющейся от нуля до

единицы; ε_0 – упругая деформация; $(\rho_{M0}/\rho_{Mкр})$ – исходная плотность металла; HB – твердость материала в заданном термомеханическом состоянии; σ_T – предел текучести (упругости) основы материала при котором возможны сдвиги при циклическом нагружении; Π – показатель напряженного состояния, изменяющийся от $-\infty$ (при сжатии) до $+\infty$ (при растяжении); α – коэффициент, учитывающий влияние коэффициентов Лодэ – вида деформаций и напряжений.

Выражены зависимости $N(\sigma_a)$ для связи диаграмм усталости с указанными параметрами состояния:

$$N = \frac{\sigma_K}{\sigma_a K_{II} \left[\left(\frac{HB}{\sigma_T} - 2 \right) e^{\alpha \Pi} - \frac{\ln(\rho_{M0}/\rho_{Mкр})}{\varepsilon_{HP} - \varepsilon_0} + \left(\frac{\varepsilon_P}{\varepsilon_H} \right)_{волн} \right]} \quad (18)$$

$$N = \frac{\sigma_K \varepsilon_{рх} e^{\alpha \Pi}}{\sigma_a K_{II} \left[\left(\frac{HB}{\sigma_T} - 2 \right) - \frac{\ln(\sigma_K/\sigma_{K0})}{\varepsilon_{HP} - \varepsilon_0} + \left(\frac{\varepsilon_P}{\varepsilon_H} \right)_{волн} \right] \varepsilon_{рх} e^{\alpha \Pi}} \quad (19)$$

Уравнение (18) и (19) позволяют моделировать различные ситуации поведения поликристаллов при усталости в металлах, а также анализировать кривые усталости материалов, находящихся в различных состояниях.

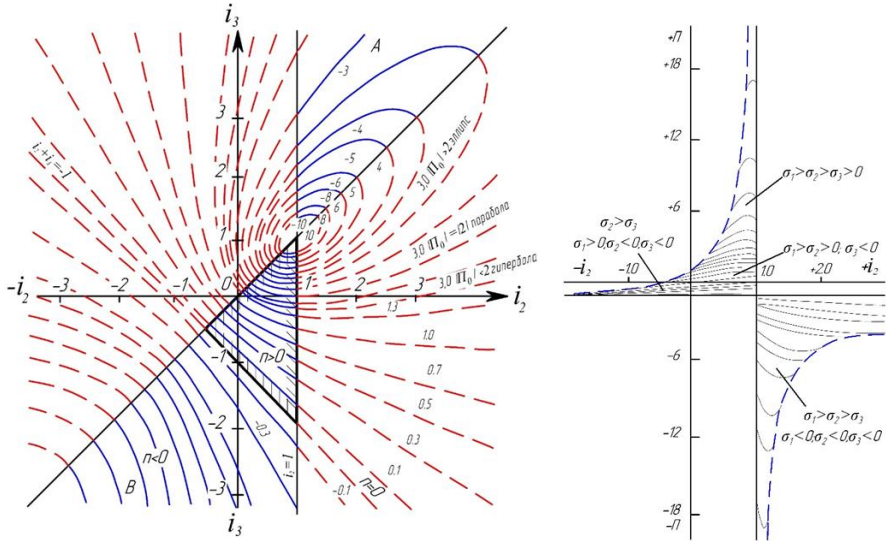


Рис. 17. Теоретическое значение показателя напряженного состояния Π

Предложен частотно-машинной параметр, к применению в расчетах действительного запаса прочности деталей машин и конструкций определяемый выражением:

$$\varepsilon_{\omega}^m = \frac{(\sigma_{-1})_{исх}}{(\sigma_{-1})_{тек}}, \quad (20)$$

где $(\sigma_{-1})_{исх}$ – исходные значения предела усталости соответствующее минимальной частоте циклов нагружения (рис.8), $(\sigma_{-1})_{тек}$ – текущее, каждое последующее значение предела усталости.

Учитывая выражение: $\sigma_{-1} = A \frac{(tg \alpha_{\omega})^2 + 1}{tg \alpha_{\omega}}$, (21)

получаем действительный запас прочности (n_g) по усталости:

$$n_g = \frac{\sigma_{-1}}{K_{\Sigma} \sigma}, \quad (22)$$

где σ_{-1} – предел усталости материала, из которого сделана деталь, σ – действующее циклическое напряжение в детали, K_{Σ} – коэффициент суммарного воздействия реальных факторов в расчет которого введен параметр (20) в виде $\frac{1}{\varepsilon_{\omega}^m}$.

По результатам работы построены зависимости:

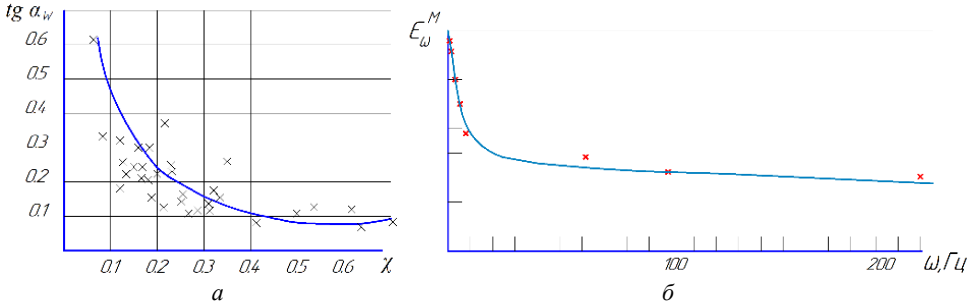


Рис. 18. Зависимости: *а* – показателя сопротивления усталости от коэффициента ограниченной выносливости; *б* – частотно-скоростного параметра от частоты

Учитывая эти зависимости и пользуясь дифференциальным уравнением вида:

$$K_0 \frac{d^n tg \alpha_w}{d\Phi^n} + K_1 \frac{d^{(n-1)} tg \alpha_w}{d\Phi^{(n-1)}} + \dots + K_{(n-1)} \frac{d tg \alpha_w}{d\Phi} + K_n tg \alpha_w = 0 \quad (23)$$

получаем корни уравнения $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$, где K_0, K_1, \dots, K_n – коэффициенты.

Любой корень λ_i учитывает один из факторов, влияющих на параметры сопротивления усталости.

Решение уравнения (23) и последующие математические преобразования приводят к системе уравнений:

$$tg \alpha_{w_{\Pi}}^{(k)} = c_1 tg \alpha_{w_{\omega}}^{(k)} + c_2 tg \alpha_{w_{ac}}^{(k)} + c_3 tg \alpha_{w_{\sigma_e}}^{(k)}, \quad (24)$$

Определяем корни уравнений: $\lambda_{ac}=0,3351$; $\lambda_{\omega}=0,2950$; $\lambda_{\sigma_e}=0,30103$;

В результате получена система трёх уравнений: где c_1, c_2 и c_3 – константы интегрирования, которые можно отыскать через определитель вида

$$\Delta_{OP} = (\lambda_{ac} - \lambda_{\omega})(\lambda_{\sigma_e} - \lambda_{\omega})(\lambda_{\sigma_e} - \lambda_{ac}), \quad (25)$$

Константы интегрирования определяются как отношение:

$$C_i = \frac{\Delta_{OP_i}}{\Delta_{OP}}, \quad (26)$$

где Δ_{OP_i} получается путем замены λ_i на $\lambda_0=0,2426$. После определения констант интегрирования получено выражение для прогнозируемого наклона кривой усталости:

$$tg \alpha_{w_{\Pi}} = 22,35251275 \cdot tg \alpha_{w_{\omega}} + 2,241077932 \cdot tg \alpha_{w_{ac}} - 23,59359068 \cdot tg \alpha_{w_{\sigma_e}} \quad (27)$$

Факторные значения наклонов $tg \alpha_{w_{\omega}}, tg \alpha_{w_{ac}}$ и $tg \alpha_{w_{\sigma_e}}$ определим по зависимостям упомянутым выше. Получаем прогнозируемое значение наклона кривой усталости детали $tg \alpha_{w_{\Pi}} = 0,3807$. Предел усталости на базе 10^6 циклов определим по формуле (21).

В приложение включены документы, подтверждающие практическое использование результатов работы на предприятиях г. Н. Новгорода: НОАО «Гидромаш».

В заключении приведены основные результаты выполненной работы.

1. Разработаны новые методики исследования макро- и микроструктур металлических материалов в 2-D и 3-D изображениях с использованием новейшего цифрового материаловедческого микроскопа Keyence VHX-1000 с расширенными возможностями за счет усовершенствованной длиннофокусной оптической системы и цифровой обработки изображения в режиме Optimal Image с использованием функций автоматического распознавания объектива и приближения DOUBLE'R. Для этого были решены две задачи: 1 – необходимо было изучить, проанализировать и выделить из этого многообразия наиболее важные функции наблюдения, записи и измерения, интегрированные в этот микроскоп для исследования структуры металлических материалов в соответствии с целями и задачами, поставленными в наших исследованиях; 2 – разработать методики исследования структуры материалов с применением продвинутых возможностей этих функций микроскопа при механических испытаниях, в том числе на разных стадиях наработки.

2. Разработан новый подход аттестации материалов по прочностным характеристикам и стабильности поведения сплавов, включающий в себя систему параметров, позволяющих обстоятельно отображать функциональные связи и закономерности поведения материалов при испытаниях на усталость и дает возможность обеспечить целостность описания совокупности процессов «упрочнения-разупрочнения» не конкретизируя такие важные параметры, как искажения кристаллической решетки, интенсивность дробления зерен на фрагменты, блоки и их взаимная разориентировка и др, которые так или иначе сказываются на значениях используемых нами показателей. Для сравнительной оценки прочностных характеристик на требуемой базе испытаний был введен относительный коэффициент ограниченной выносливости, который позволяет производить сравнительную оценку относительно максимальных прочностных характеристик (предел прочности σ_b), как одного материала при разных спектрах нагружения, так и сравнивать различные материалы без каких-либо сложных расчетов. В рамках представленного подхода предложено аттестовывать исследованные материалы по динамике эволюции рассмотренных параметров в процессе циклического нагружения.

3. Предложен алгоритм комплексного исследования структуры металлических материалов, который представляет исследование несколькими взаимодополняющими методами, включающими оптическую, цифровую и электронную микроскопию, анализ распределения микротвердости по сечению образца вблизи поверхности разрушения, как в процессе циклической деформации на разных этапах наработки, так и после полного разрушения. Определена последовательность и варианты действий, показанные в виде наглядной схемы в данном разделе совместно с его аппаратной реализацией.

4. Сопоставление величин энергии дефекта упаковки γ , изменений структур и наклона кривых усталости при одинаковой гомологической температуре показало, что чем выше γ , тем сильнее развито поперечное скольжение и тем круче наклон кривых усталости ($tg \alpha_w$). Скоростной эффект выражается при условии $\omega_2 > \omega_1$, когда напряжения σ_{ω_2} , всегда больше σ_{ω_1} , что и наблюдается у испытанных металлов, но в разной степени, за исключением случаев, относящихся к деформационному старению. Причём, скоростной эффект выражен тем сильнее, чем выше гомологическая температура испытания (θ). При сопоставлении металлов в условиях одинаковых гомологических температур (θ) (например: висмут и кадмий) скоростной эффект оказывается сильнее у металлов с большой энергией дефекта упаковки (γ), что и наблюдается у висмута ($\gamma = 300$ мДж/м²) по сравнению с кадмием ($\gamma = 150$ мДж/м²), это подтверждается характером и интенсивностью полос скольжения. Что согласуется с теорией вопроса, так как $K_{AyBi} < K_{AyCd}$ и интенсивность функции $U_{п.с.}$ в виде произведения $|K_{Ay} * K_j|_{Bi} < |K_{Ay} * K_j|_{Cd}$, что

приводит к соотношению $U_{п.с. \text{ в}i} < U_{п.с. \text{ сд}}$. При одинаковых значениях (θ) и (γ) скоростная зависимость усиливается в последовательности типов кристаллических структур: ГЦК – ГП – ОЦК – АК.

5. Установлено влияние энергии дефекта упаковки на повреждаемость поверхности в условиях изменения частоты циклов нагружения: чем выше энергия γ , тем более превалирует разупрочнения над упрочнением и тем меньше сопротивление среды прохождению физического процесса пластической деформации путём скольжения расщеплённых дислокаций. И наоборот: чем ниже γ , тем больше материал способен к деформационному упрочнению, сопротивление среды прохождению физического процесса пластической деформации выше. В металлах с низким показателем γ и малыми значениями наклона кривой усталости определена слабая температурная зависимость сопротивления усталости, проявляющаяся в близком (по оси ординат) расположении друг к другу кривых усталости, полученных при разных θ ; с другой стороны, в металлах с большими значениями γ и крутыми наклонами кривых усталости к оси количества циклов (N) отмечается сильная температурная зависимость прочности, выражающаяся в больших расстояниях между кривыми усталости, полученных при соответствующих температурах. Среди этой группы металлов, как указывалось никель ведет себя аномально. Поперечные скольжения у N_i развиты достаточно сильно, это следует из микроскопических снимков. Разрушение у N_i носит внутризеренный характер, а при сопряжении полосы скольжения с разницей зерна в соседнем зерне точно с этого же места начинает развиваться новая полоса скольжения. В дальнейшем в этих полосах зарождается трещина, границы при этом не разрушаются. Границы в N_i настолько прочны, что доля вакансионного механизма сводится почти к нулю. В этом случае рост температуры не приводит к смене механизма, и температурная зависимость усталостной прочности выражена слабо. При рассмотрении поведения границ зерен аналогично никелю ведет себя титан и стали аустенитного класса. Однако у этих сплавов пограничное разрушение все же наблюдается, как и у меди. Что касается углеродистых сталей, то они «плохо» сопротивляются усталостному разрушению, что может быть тоже обусловлено сильно развитым поперечным скольжением в зернах феррита, в следствии высокой γ .

6. Установлены значения показателей сопротивления усталости при изменении частотно-амплитудного режима испытаний в результате чего определены две характерные группы материалов: в первой наблюдается увеличение параметров сопротивления усталости с ростом частотно-скоростных характеристик и жесткости напряженного состояния, во второй – наоборот – повышение величины частоты нагружения, и смягчение схемы напряженного состояния приводят к заметному уменьшению параметра сопротивления усталости вне зависимости от структурного состояния, т.е. к уменьшению наклона левой ветви кривой усталости, а соответственно увеличению долговечности. Улучшение параметра сопротивления усталости связано с повышением упрочняемости материала поверхностных слоев образцов (деталей), что снижает усталостную повреждаемость собственно поверхности. Таким образом, по изменению угла наклона кривой усталости можно сделать косвенную оценку результатов испытаний по различным схемам и спектрам нагружения в разном структурном состоянии материала. Однако, надо иметь в виду, что параметр $\text{tg } \alpha_w$ напрямую связан с повреждаемостью поверхности (Φ), и в обеих группах материалов рост показателя (Φ) приводит к увеличению $\text{tg } \alpha_w$.

7. На примере исследования кинетики усталостного разрушения стали 30ХГСН2А с позиций периодичности и стадийности процессов накопления повреждений при различных вариациях частотно-амплитудного режима испытаний по различным схемам нагружения установлено, что на стадии циклической текучести или негомогенной деформации, в которой наблюдается пластическое течение материала, на поверхности появляется волнистый рельеф,

выраженный в виде экструзий и интрузий. Стадия циклического упрочнения (разупрочнения) завершается достижением линии необратимых повреждений (линии Френча), чему соответствует образование микротрещин. Стадия распространения усталостных трещин является заключительной при разрушении образцов в процессе циклических испытаний. Характеризуется стартом одной из микротрещин, перерастающей в магистральную трещину, которая, распространяясь по телу образца, приводит его к разрушению. При графическом изображении эта стадия находится в диапазоне между линией Френча и линией (кривой) усталости. упрочнение происходит на ранних стадиях нагружения. Начиная с $5 \div 10\%$ от времени полной наработки, достигается длительное состояние насыщения вплоть до разрушения, при сохранении локальной пластической деформации. Локальные зоны в поверхностном слое одновременно являются источниками экструзий и интрузий, образующих деформационный профиль и иницирующих полосы скольжения. Эти полосы по мере накопления повреждений в поверхностном слое генерируют микрорастрескивание поверхности, после чего развивается магистральная трещина. При знакопеременном поперечном изгибе и изгибе с вращением микропластическую деформацию испытывает только поверхностный слой образца. Именно в нем и прилегающей к нему зоне наблюдается локальное структурное превращение, о чем свидетельствует максимальная микротвердость образца вблизи поверхности. Данный факт приводит к снижению $tg \alpha_w$, что сопровождается упрочнением поверхности и увеличением сопротивления усталости. В случае работы материала по пульсирующему циклу растяжения-сжатия микропластической деформации подвержено все сечение образца. Однако за счет существования градиента плотности дислокаций по толщине образца его поверхность упрочняется в этом случае в меньшей степени, чем при испытаниях по более мягким схемам нагружения, что отражается в увеличении $tg \alpha_w$.

8. Получены общие аналитические уравнения для описания поведения кривых усталости поликристаллических металлов и сплавов, позволяющие представить влияние факторов их состояния: дефектности, структурно-энергетического состояния, релаксационной способности, напряженно-деформированного состояния в зависимости от влияния внешних условий циклического нагружения. Уравнения позволяют моделировать различные ситуации поведения поликристаллов при усталости в металлах, а также анализировать кривые усталости материалов, находящихся в различных состояниях. Из уравнений следует, что с ростом показателя напряженного состояния, что соответствует переходу от схем сжатия к схемам растяжения, картина обнаруживается двойственная – рост показателя напряженного состояния сам по себе снижает уровень кривой усталости, но т.к. с увеличением этого показателя уменьшается пластичность, то окончательный итог определится соотношением их вкладов и наоборот, рост величины показателя напряженного состояния сам по себе приведет к росту уровня кривой $N(\sigma_a)$, но т.к. одновременно должны изменяться пластичность и сопротивление разрушению, то итог определится их соотношением. Поскольку скорость релаксации в поликристаллах – величина векторная $\vec{\epsilon} = \vec{\epsilon}_{пл.д} + \vec{\epsilon}_p$, представляющая сумму векторов скорости пластической деформации ($\vec{\epsilon}_{пл.д}$) и скорости собственно разрушения $\vec{\epsilon}_p$ – зарождение и рост трещин, то с учетом этого можно получить, что с ростом $\vec{\epsilon}_{пл.д}$ при постоянстве общей скорости релаксации скорость разрушения снизится, кривая усталости пойдет ниже (положе).

9. Разработана методика оценки стабильности усталостных свойств и долговечности материала при высокочастотном нагружении, аппроксимирующем спектр эксплуатационного нагружения деталей и произведена оценка влияния перерывов процесса длительных испытаний на параметры усталости материалов.

10. На базе выполненных теоретических и экспериментальных исследований разработаны рекомендации по практическому применению по предпочтительному выбору широко применяемых марок сталей для изготовления реальных деталей машин и конструкций

для эксплуатации в условиях нагружения, относящихся к исследованному частотно-скоростному диапазону с учетом стоимости и вида предварительной обработки детали. Например, при изготовлении валов, работающих при очень низких частотах нагружения при выборе материала для их изготовления между сталью 40 и сталью 40Х, при прочих равных условиях (одинаковые размеры, форма, стоимость этих сталей существенно не различается и прочностные характеристики близки при определенных методах обработки, и т.д.) рекомендуем взять сталь 40, а при частотах 50 Гц и выше сталь 40Х.

11. Разработаны модели, методы и алгоритмы исследований и расчетов повреждаемости поверхности, соотношения частот и скоростей нагружения, релаксации напряжений, усталостной прочности и долговечности, оценки надежности и стабильности поведений материалов образцов и натуральных деталей машин с учетом различных схем нагружения. Метод определения параметров сопротивления усталости при любой частоте нагружения в пределах заданного спектра. Метод экспресс-оценки параметров сопротивления усталости. Метод прогноза прочности и долговечности деталей по параметрам их структуры и повреждаемости поверхности. Представленные методики, модели, алгоритмы и рекомендации использованы: для анализа и прогнозирования долговечности деталей ОАО «Гидромаш» Нижний Новгород.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Монографии

1. **Мыльников, В.В.** Циклическая прочность и долговечность конструкционных материалов: монография / **В.В. Мыльников**, О.Б. Кондрашкин, Д.И. Шетулов. – Нижний Новгород: ННГАСУ, 2018. – 177 с.

2. **Мыльников, В.В.** Прогнозирование циклической прочности и долговечности конструкционных материалов: монография / В.В. Мыльников, Е.А. Чернышов, Д.И. Шетулов. – Москва, Из-во: Спутник+. 2013. – 146 с.

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России

1. **Мыльников, В.В.** Влияние термической обработки на сопротивление усталости и частотную стабильность инструментальной стали 6ХС / **В.В. Мыльников**, Э.А. Дмитриев, Д.И. Шетулов // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2023. – № 7(817). – С. 22-27.

2. **Мыльников, В.В.** Методика изучения поверхности разрушения материалов с использованием современной микроскопии и применением цифровой обработки изображения / **В.В. Мыльников**, Э.А. Дмитриев // Металловедение. – 2023. – № 3. – С. 12-21.

3. Шетулов, Д.И. Усталостная прочность и частотная стабильность титанового сплава / Д.И. Шетулов, **В.В. Мыльников**, Э.А. Дмитриев // Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия. – 2023. – Т. 29, № 2. – С. 74-82.

4. Структура и механизм разрушения алюмоматричных композитов, полученных методом внутреннего окисления, при растяжении / **В.В. Мыльников**, Е.А. Чернышов, А.Д. Романов, М.В. Мыльникова, Е.А. Захарычев, Н.А. Рябов // Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия. – 2023. – Т. 29, № 2. – С. 38-48.

5. **Мыльников, В.В.** Влияние режимов термической обработки мартенситностареющей стали на усталостные характеристики и параметры микродеформации / **В.В. Мыльников**, Д.И. Шетулов, А.М. Мясников // Современные наукоемкие технологии. – 2021. – № 6-1. – С. 74-78.

6. **Мыльников, В.В.** Исследование изменений показателей сопротивления усталости стали 30ХГСН2А в процессе циклического деформационного упрочнения / **В.В. Мыльников**,

Д.И. Шетулов, А.И. Пронин // *Металловедение и термическая обработка металлов*. – 2020. – № 10 (784). – С. 52-60.

7. **Мыльников, В.В.** Изменение показателей сопротивления усталости конструкционных сталей при различных спектрах нагружения / **В.В. Мыльников**, Д.И. Шетулов, О.Б. Кондрашкин, Е.А. Чернышов, А.И. Пронин // *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия*. – 2019. – Т.62. – № 10. – С. 796-802.

8. **Мыльников, В.В.** Влияние различных параметров состояния на закономерности поведения кривых усталости / **В.В. Мыльников**, В.А. Скуднов // *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия*. – 2018. – Т. 61. – № 3. – С. 244-250.

9. Чернышов, Е.А. Некоторые аспекты влияния природы масштабного эффекта при циклических испытаниях на эксплуатацию и надежность изделий из алюминиевых сплавов / Е.А. Чернышов, А.Д. Романов, **В.В. Мыльников**, // *Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия*. – 2018. – № 5. – С. 56-65.

10. **Мыльников, В.В.** Исследование влияния количества упрочняющей фазы дисперсно-упрочненного композиционного материала на основе алюминия на закономерности процесса разрушения / **В.В. Мыльников**, А.Д. Романов, Е.А. Чернышов // *Известия высших учебных заведений. Порошковая металлургия и функциональные покрытия*. – 2018. – № 3. – С. 55-63.

11. **Мыльников, В.В.** Влияние температуры старения стали на параметры сопротивления усталости и микродеформации / **В.В. Мыльников**, А.Д. Романов, Д.И. Шетулов, А.А. Хлыбов // *Металловедение и термическая обработка металлов*. – 2016. – № 4 (730). – С. 36-39.

12. Чернышов, Е.А. Исследование микроструктуры алюмоматричного дисперсно-наполненного литого композиционного материала, полученного методом внутреннего окисления / Чернышов Е.А., С.З. Лончаков, А.Д. Романов, **В.В. Мыльников**, Е.А. Романова // *Перспективные материалы*. – 2016. – № 9. – С. 78-83.

13. **Мыльников, В.В.** Скоростной эффект при изменении частоты циклического нагружения некоторых чистых металлов / **В.В. Мыльников**, Д.И. Шетулов, Е.А. Чернышов // *Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия*. – 2015. – № 5. – С. 46-52.

14. Шетулов, Д.И. Прогнозирование показателей прочности и долговечности деталей автомобиля на основании модели усталостного разрушения конструкционных материалов / Д.И. Шетулов, В.Н. Кравченко, **В.В. Мыльников** // *Вестник машиностроения*. – 2015. – № 5. – С. 28-31.

15. Шетулов, Д.И. Усталостная повреждаемость высокопрочных сталей / Д.И. Шетулов, **В.В. Мыльников** // *Металлы*. – 2014. – № 2. – С. 81-86.

16. **Мыльников, В.В.** Исследование повреждаемости поверхности чистых металлов с учетом частоты циклического нагружения / **В.В. Мыльников**, Д.И. Шетулов, Е.А. Чернышов // *Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия*. – 2013. – № 2. – С. 55-60.

17. **Мыльников, В.В.** Влияние термической обработки стали 03Н18К9М5Т-ЭЛ на параметры микропластической и циклической деформации / **В.В. Мыльников**, Д.И. Шетулов, Е.А. Чернышов // *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия*. – 2013. – № 11. – С. 30-32.

18. **Мыльников, В.В.** Зависимость сопротивления усталости конструкционных материалов от частоты циклического нагружения / **В.В. Мыльников**, Д.И. Шетулов, Е.А. Чернышов, А.И. Пронин // *Технология металлов*. 2013. – № 9. – С. 30-37.

19. **Мыльников, В.В.** Связь параметров сопротивления усталости ряда конструкционных материалов с изменением частоты циклического нагружения / **В.В.**

Мыльников, Е.А. Чернышов, Д.И. Шетулов // Заготовительные производства в машиностроении. – 2012. – № 7. – С. 41-45.

20. **Мыльников, В.В.** Прогнозирование прочности и долговечности материалов деталей машин и конструкций с учетом частоты циклического нагружения / **В.В. Мыльников, Д.И. Шетулов, А.И. Пронин, Е.А. Чернышов** // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2012. – № 9. – С. 32-37.

21. **Мыльников, В.В.** Изменение показателей сопротивления усталости некоторых чистых металлов в зависимости от влияния частоты циклов нагружения / **В.В. Мыльников, Е.А. Чернышов, Д.И. Шетулов** // Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия. – 2010. – № 3. – С. 40-45.

22. **Мыльников, В.В.** Об оценочных критериях долговечности углеродистых сталей / **В.В. Мыльников, Е.А. Чернышов, Д.И. Шетулов** // Технология металлов. – 2010. – № 2. – С. 19-22.

23. **Мыльников, В.В.** Влияние частоты циклического нагружения на сопротивление усталости высокопрочных конструкционных материалов / **В.В. Мыльников, Е.А. Чернышов, Д.И. Шетулов** // Заготовительные производства в машиностроении. – 2009. – № 2. – С. 33-36.

Публикации в изданиях, включенных в международные базы цитирования Web of Science, Scopus:

1. **Mylnikov, V.V.** Heat treatment effect on fatigue strength and frequency stability of maraging steel / **V.V. Mylnikov, E.A. Dmitriev** // Letters on Materials. – 2023. – Vol. 13, No. 3(51). – P. 266-271.

2. **Мыльников, В.В.** Метод изучения частотной стабильности материалов при испытаниях на многоцикловую усталость стали / **В.В. Мыльников, Э.А. Дмитриев** // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2023. – Т. 66, № 3. – С. 367-375.

3. **Mylnikov, V.V.** A study of changes in fatigue resistance parameters of steel 30khgns2a in the process of cyclic deformation hardening / **V.V. Mylnikov, D.I. Shetulov, A.I. Pronin** // Metal Science and Heat Treatment. – 2021. – Т. 62. – № 9-10. – С. 648-655.

4. **Мыльников, В.В.** Влияние частоты нагружения на усталость конструкционных материалов / **В.В. Мыльников** // Наука и техника. – 2019. – Т. 18. – № 5. – С. 427-435.

5. **Mylnikov, V.V.** Fatigue resistance changes of structural steels at different load spectra / **V.V. Mylnikov, O.B. Kondrashkin, D.I. Shetulov, E.A. Chernyshov, A.I. Pronin** // Steel in Translation. – 2019. – Т. 49. – № 10. – С. 678-682.

6. **Mylnikov, V.V.** Effect of the aging temperature of steel on the parameters of fatigue resistance and microstrain / **V.V. Mylnikov, A.D. Romanov, D.I. Shetulov, A.A. Khlybov** // Metal Science and Heat Treatment. – 2016. – Т. 58. – № 3-4. – С. 223-225.

7. **Mylnikov, V.V.** Prediction of strength and durability of materials of machine parts and structures, taking into account the frequency of cyclic loading / **V.V. Mylnikov, D.I. Shetulov, A.I. Pronin, E.A. Chernyshov** // Russian Journal of Non-Ferrous Metals. – 2015. – Т. 55. – № 9. – С. 32.

8. **Mylnikov, V.V., Shetulov D.I., Chernyshov E.A.** Speed effect upon varying the cyclic loading frequency for certain pure metals / **V.V. Mylnikov, D.I. Shetulov, E.A. Chernyshov** // Russian Journal of Non-Ferrous Metals. – 2015. – Т. 56. – № 6. – С. 627-632.

9. **Shetulov, D.I.** Predicting the strength and life of auto parts on the basis of fatigue strength / **D.I. Shetulov, V.N. Kravchenko, V.V. Mylnikov** // Russian Engineering Research. – 2015. – Т. 35. – № 8. – С. 580-583.

10. **Shetulov D.I.** Fatigue-induced damage of high-strength steels / **D.I. Shetulov, V.V. Mylnikov** // Russian Metallurgy (Metally). – 2014. – Т. 2014. – № 3. – С. 241-245.

11. **Mył'nikov, V.V.** Influence of the heat treatment of 03H18K9M5T-E{CYRILLIC}L{CYRILLIC} steel on its microplastic and cyclic deformation / **V.V. Mył'nikov, D.I. Shetulov, E.A. Chernyshov** // Steel in Translation. – 2013. – Т. 43. – № 11. – С. 695-697.

12. **Mył'nikov, V.V.** Investigation into the surface damage of pure metals allowing for the cyclic loading frequency / **V.V. Mył'nikov, D.I. Shetulov, E.A. Chernyshov** // Russian Journal of Non-Ferrous Metals. – 2013. – Т. 54. – № 3. – С. 229-233.

13. **Mył'nikov V.V.** Variation in factors of fatigue resistance for some pure metals as a function of the frequency of loading cycles / **V.V. Mył'nikov, D.I. Shetulov, E.A. Chernyshov** // Russian Journal of Non-Ferrous Metals. – 2010. – Т. 51. – № 3. – С. 237-242.

14. **Mył'nikov, V.V.** On evaluation of durability criteria in carbon steels / **V.V. Mył'nikov, D.I. Shetulov, E.A. Chernyshov** // Metals Technology. – 2010. – № 2. – С. 19.

Публикации в других изданиях

1. **Мыльников, В.В.,** Мыльникова М.В., Шетулов Д.И. Структурные исследования материалов с использованием современной микроскопии / **В.В. Мыльников, М.В. Мыльникова, Д.И. Шетулов** // В сборнике: XII Всероссийский Фестиваль науки. Сборник докладов. Редколлегия: Д.Л. Щёголев, Д.В. Монич, А.А. Смыков, И. В. Шкода [и др.]. Нижний Новгород, 2022. С. 143-146.

2. **Мыльников, В.В.,** Прогноз долговечности деталей строительных машин в комплексной технологии и организации строительства / **В.В. Мыльников** // В сборнике: Приоритетные направления развития науки в современном мире. Сборник научных статей по материалам VI - Международной научно-практической конференции. Уфа, 2021. С. 38-45.

3. Шетулов, Д.И. О связи физико-механических характеристик металлов с показателями сопротивления усталости / Д.И. Шетулов, **В.В. Мыльников, Е.А. Чернышов, О.Б. Кондрашкин** // В книге: новые материалы и перспективные технологии. сборник материалов пятого междисциплинарного научного форума с международным участием. 2019. с. 800-802.

4. **Мыльников, В.В.** Связь диаграмм усталости с параметрами предельной деформации металлических сплавов, с учетом влияния условий циклического нагружения, для оценки характеристик разрушения / **В.В. Мыльников** // В сборнике: Механические свойства современных конструкционных материалов. Материалы конференции. 2018. С. 100.

5. Шетулов, Д.И. О корреляции наклона кривой усталости с деформационным упрочнением / Д.И. Шетулов, **В.В. Мыльников, А.И. Пронин, О.Б. Кондрашкин, И.И. Рожков, Е.А. Чернышов** // В сборнике: Механические свойства современных конструкционных материалов. Материалы конференции. 2018. С. 171.

6. **Мыльников, В.В.** Новый подход в оценке поведения материалов при испытаниях на усталость / **В.В. Мыльников** // В книге: четвертый междисциплинарный научный форум с международным участием "новые материалы и перспективные технологии". 2018. С. 731-734.

7. **Мыльников, В.В.** Циклическое деформационное упрочнение высокопрочной стали / **В.В. Мыльников** // В сборнике: механические свойства современных конструкционных материалов. Материалы конференции. 2018. С. 98.

8. **Мыльников, В.В.** О волновом характере продвижения магистральной трещины при усталостных испытаниях стали / **В.В. Мыльников** // В сборнике: Механические свойства современных конструкционных материалов. Материалы конференции. 2018. С. 99.

9. **Мыльников, В.В.** Роль энергии дефекта упаковки в сопротивлении прохождению физического процесса локализованной пластической деформации на усталость металлов / **В.В. Мыльников, Д.И. Шетулов, О.Б. Кондрашкин, А.И. Пронин, Е.А. Чернышов** // В сборнике: VII Международная конференция "Деформация и разрушение материалов и наноматериалов". Сборник материалов. 2017. С. 182-183.

10. **Мыльников, В.В.** Гомологическая температура как отклик на параметрах сопротивления усталости при изменении частоты нагружения / **В.В. Мыльников, Д.И. Шетулов, О.Б. Кондрашкин, А.И. Пронин, Е.А. Чернышов** // В сборнике: VII Международная конференция "Деформация и разрушение материалов и наноматериалов". Сборник материалов. 2017. С. 183-185.
11. **Мыльников, В.В.,** Шетулов Д.И., Кондрашкин О.Б., Пронин А.И. Определение параметров сопротивления усталости при любой частоте нагружения в пределах заданного спектра / **В.В. Мыльников, Д.И. Шетулов, О.Б. Кондрашкин, А.И. Пронин** // В сборнике: Третий междисциплинарный молодежный научный форум с международным участием "Новые материалы". Сборник материалов. 2017. С. 315-316.
12. **Мыльников, В.В.** Закономерности прочностных характеристик и стабильности поведения высокопрочной стали / **В.В. Мыльников** // В сборнике: VII Всероссийский фестиваль науки. сборник докладов: в 2 томах. Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет. 2017. С. 54-58.
13. **Мыльников, В.В.** Экспресс оценка параметров сопротивления усталости / **В. В. Мыльников, Д.И. Шетулов, О.Б. Кондрашкин, А.И. Пронин** // В сборнике: VII Международная конференция "Деформация и разрушение материалов и наноматериалов". Сборник материалов. 2017. С. 734-735.
14. **Мыльников, В.В.** Учет влияния условий циклического нагружения в зависимости от факторов состояния материала для оценки предельных характеристик разрушения / **В.В. Мыльников, В.А. Скуднов** // В сборнике: VII Международная конференция "Деформация и разрушение материалов и наноматериалов". Сборник материалов. 2017. С. 84-86.
15. **Mylnikov, V.V.** Account of load conditions for estimation of limit characteristics of cyclic destroying / **V. V. Mylnikov, V. A. Skudnov** // International Journal of Applied and Fundamental Research. 2017. № 3. С. 112.
16. Pronin, A.I. Fatigue of high-strength steel at various frequencies of loading and the schemes of the stress state / **A.I. Pronin, V.V. Mylnikov, E.A. Chernyshov, O.B. Kondrashkin, D.I. Shetulov, A.D. Romanov** // International Journal of Applied and Fundamental Research. 2017. № 3. С. 91.
17. Shetulov, D.I. Application of interpolation functions in the express evaluation of parameters of fatigue resistance / **D.I. Shetulov, V.V. Mylnikov, O.B. Kondrashkin, A.I. Pronin, E.A. Chernyshov** // International Journal of Applied and Fundamental Research. 2017. № 3. С. 92.
18. **Мыльников, В.В.** О влиянии частоты приложения нагрузки на сопротивление усталости материалов / **В.В. Мыльников** // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2016. № 6-2. С. 202-205.
19. **Мыльников, В.В.** Структурные изменения сталей для прогноза долговременности деталей автомобиля / **В.В. Мыльников** // В сборнике: Междисциплинарный молодежный научный форум "Новые материалы. Дни науки. Санкт-Петербург 2015". Сборник материалов. 2015. С. 225-227.
20. **Мыльников, В.В.** Анализ изменения показателей сопротивления усталости сталей и титановых сплавов в зависимости от физических процессов, протекающих на их поверхности / **В.В. Мыльников, М.В. Мыльникова, Е.А. Чернышов, Д.И. Шетулов, Е.С. Беляев** // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2014. № 3 (105). С. 247-252.
21. **Мыльников, В.В.** Изменение показателей сопротивления усталости некоторых металлических материалов, в зависимости от пластической деформации, протекающей в их поверхностных слоях / **В.В. Мыльников, А.Д. Романов, Е.А. Чернышов, Д.И. Шетулов, М.В. Мыльникова, А.И. Пронин** // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2014. № 9-1. С. 25-29.

22. **Мыльников, В.В.** Прогнозирование параметров усталости рычага шасси самолета / **В.В. Мыльников, Д.И. Шетулов, Е.А. Чернышов, И.И. Рожков, А.Д. Романов** // В книге: Будущее технической науки. Сборник материалов XII Международной молодежной научно-технической конференции. Редакционная коллегия: Н.Ю. Бабанов, В.В. Беляков, В.П. Хранилов, Е.Н. Соснина, Е.В. Бычков, И.Л. Лаптев, А.Е. Жуков, Т.М. Колосова, М.А. Легчанов, А.А. Куркин, В.А. Козырин, О.А. Казанцев, В.И. Поздьяев, Е.А. Зайцева, Д.А. Корнилов, О.М. Власова, В.Е. Колотилин, Н.П. Тежикова, О.В. Пугина, К.О. Гончаров. 2013. С. 92-93.

23. **Мыльников, В.В.** Влияние частоты циклического нагружения на суммарную пластическую деформацию конструкционных материалов / **В.В. Мыльников, Е.А. Чернышов, Д.И. Шетулов** // Международный журнал экспериментального образования. 2013. № 10-2. С. 380-381.

24. **Мыльников, В.В.** О корреляции показателей сопротивления усталости стали 6ХС / **В.В. Мыльников, Е.А. Чернышов, Д.И. Шетулов, А.И. Пронин** // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2013. № 10-2. С. 227-228.

25. **Мыльников, В.В.** Связь коэффициента формы повреждений с показателями сопротивления усталости стали 30ХГСН2А / **В.В. Мыльников, Д.И. Шетулов, И.И. Рожков, А.И. Пронин** // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2013. № 10-2. С. 229.

26. **Мыльников, В.В.** Ускоренный метод прогноза параметров сопротивления усталости металлических материалов с учетом частоты циклического нагружения / **В.В. Мыльников, Д.И. Шетулов** // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2013. № 12. С. 23-25.

27. **Mylnikov, V.V.** Damage to the surface of rare-earth metals under cyclic loading with changes in cycle frequency / **V.V. Mylnikov, I.I. Rozhkov, D.I. Shetulov** // Modern scientific research and their practical application. 2013. Т. J11307. № 4. С. 206-213.

28. **Мыльников, В.В.** Температурно-скоростные зависимости сопротивления деформации некоторых чистых металлов / **В.В. Мыльников, Д.И. Шетулов, Е.А. Чернышов** // Литейные процессы. 2012. № 11. С. 124-132.

29. **Мыльников, В.В.** Прогноз долговечности конструкционных материалов по параметрам их структуры / **В.В. Мыльников, Е.А. Чернышов, Д.И. Шетулов** // В сборнике: Деформация и разрушение материалов и наноматериалов. Сборник материалов третьей международной конференции. 2009. С. 180-181.

30. **Мыльников, В.В.** Прогнозирование кривой усталости рычага взлетно-посадочного устройства самолета / **В.В. Мыльников** // В книге: Будущее технической науки. тезисы докладов VIII Международной молодежной научно-технической конференции. Федеральное агентство по образованию, Министерство образования Нижегородской области, Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева, Фонд содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере. Нижний Новгород, 2009. С. 234.

Патенты, свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ

1. Патент на изобретение № 2777863 Российская Федерация. Способ определения параметров сопротивления усталости материалов: заявл. 14.09.2021; опубл. 11.08.2022 / **В.В. Мыльников, Д.И. Шетулов**; Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет.

2. Патент на изобретение № 277108 Российская Федерация. Устройство управления электромагнитной установкой для испытания материалов на усталость: заявл. 12.10.2021; опубл.

04.05.2022 / **В.В. Мыльников**, Д.И. Шетулов; Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет.

3. Патент на изобретение № 278166 Российская Федерация. Установка для испытания образцов на усталость: заявл. 14.09.2021: опубл. 12.10.2022 / **В.В. Мыльников**, Д.И. Шетулов; Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет.

4. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023611589 Российская Федерация. Расчет параметров сопротивления усталости при любой частоте нагружения в пределах заданного спектра: заявл. 10.01.2023: опубл. 23.01.2023 / **В.В. Мыльников**, Н.А. Рябов.

Подписано в печать _____ Формат 60×90 1/16
Бумага офсетная. Печать электрографическая. Гарнитура Times
Объем ____ усл. печ.л. Тираж ____ экз. Заказ № _____
Полиграфцентр ННГАСУ, 603950, Н.Новгород, Ильинская, 65.