

На правах рукописи



Андроник Артём Валерьевич

**ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ НАГРУЗОК
НА НИЖНИЙ УЧАСТОК КИНЕТИЧЕСКОЙ ДИАГРАММЫ
УСТАЛОСТНОГО РАЗРУШЕНИЯ В МЕТАЛЛАХ**

01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2016

Работа выполнена на кафедре “Сопротивление материалов” в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования “Волгоградский государственный технический университет”.

Научный руководитель:

Савкин Алексей Николаевич
доктор технических наук, доцент



Официальные
оппоненты:

Ботвина Людмила Рафаиловна
доктор технических наук, профессор,
Институт металлургии и материаловедения
им. А.А. Байкова РАН, г. Москва,
главный научный сотрудник

Ильин Алексей Витальевич
доктор технических наук, доцент,
ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей», г. Санкт-
Петербург, заместитель генерального
директора – начальник НПК-3

Ведущая организация

ГНЦ РФ АО «Научно-производственное
объединение «**Центральный научно-
исследовательский институт технологии
машиностроения**», г. Москва

Защита состоится «___» апреля 2016 года в _____ часов на заседании диссертационного совета Д 002.075.01, созданного на базе ФГБУН “Институт Проблем Машиноведения РАН” по адресу: 199178, Санкт-Петербург, Большой проспект Василеостровского острова, 61, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института Проблем Машиноведения РАН и на сайте ИПМаш по адресу: ipmash.ru.

Автореферат разослан «___» _____ 2016 года.

Ученый секретарь

диссертационного совета

Дубаренко Владимир Васильевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Детали машин и сооружений на этапе эксплуатации подвергаются комплексному нагружению, включающее как многокомпонентное нагружение, вызываемое нагрузками различной величины, направления и частоты, так и многофакторное нагружение, вызываемое комбинацией повреждающих факторов – механического напряжения, коррозионного, электрического и прочих воздействий. Хотя поведение материалов при регулярном нагружении является хорошо разработанной областью, расчет усталостной долговечности даже при таком простом виде комплексного нагружения, как одноосное циклическое нагружение переменной амплитуды, может давать результаты, плохо коррелирующие с экспериментальными.

Сложные процессы упругопластической деформации, многомерность пространства параметров многокомпонентного и многофакторного нагружения являются существенным препятствием для создания адекватной и физически обоснованной модели оценки долговечности конструкционных материалов. Более того, переменность амплитуды и приложенной нагрузки могут привести к возникновению сложных процессов деформирования по траектории, существенно отличающейся от прямолинейной и прогрессирующему накоплению повреждений, неупругих деформаций и разрушению. Определение условий, при которых это происходит, является важной задачей механики деформируемого твердого тела.

Учет переменности амплитуд и последовательности нагружения при оценке долговечности при изменении амплитуды и последовательности нагружения, т.е. системы условий, описывающей последовательность приложения траектории упругопластического деформирования материала в условиях многомерного пространства параметров комплексного и многофакторного нагружения является сложной нелинейной задачей.

В настоящее время наиболее существенный результат в решении этой задачи достигнут в рамках расчетных и экспериментальных исследований трещиностойкости и распространения трещин. Традиционно модели роста усталостной трещины при нагружении переменной амплитуды классифицируют следующим образом: 1) модели закрытия трещины; 2) статистические модели; 3) модели пластичности около вершины трещины.

Эти модели получили развитие в трудах Бэннентин Ю., Гольштейна Р.В., Гриффитса А.А., Ирвина Д.Р., Леонова М.Я., Лурье С.А., Морозова Н.Ф., Ньюмана Д., Орована Е.О., Пальмова В.А., Партона В.З. Петрова Ю.В., Писаренко Г.С., Схайве Я., Уилера О.Е., Уилленборга Д., Черепанова Г.П., Элбера В. и многих других отечественных и зарубежных ученых.

Критика наиболее известных моделей пластичности около вершины трещины Уилера и Уилленборга, отсутствие физической основы статистических моделей, а также трудность учета местных напряжений в

трещине ввиду присутствия сингулярности привело к торжеству моделей закрытия трещины. Более того, некоторые научные сообщества тяготеют к парадигме “закрытие трещины объясняет все”. Компьютеризация расчетов долговечности закрепила использование этих моделей, которые, превратившись в гибридные модели в попытке объединить преимущества различных классов, используются в современном универсальном расчетном (Ansys, Abaqus) и специальном (NASGRO, FASTRAN) коммерческом программном обеспечении.

Современные модели учета закрытия трещины используют сложные функции открытия, обычно опирающиеся на асимметрию цикла. Однако фундамент таких моделей непрочен. Пусть в текущий момент испытания нагрузка соответствует минимальной нагрузке цикла P_{min} . На восходящем полуцикле нагружения трещина открывается до достижения максимальной нагрузки P_{max} цикла и усталостное разрушение начинается. Тогда справедлив вопрос: как трещина “узнает” об асимметрии цикла до достижения P_{max} ? Ведь событие открытия трещины предшествует событию установления асимметрии цикла, а еще не свершившееся событие не может влиять на событие уже произошедшее. Получается, что эффективность подобных моделей связана с искусно подобранными коэффициентами. Статистические модели учета роста усталостных трещин обычно не учитывают механическую природу разрушения, поэтому имеют ограниченную область применения. Модели учета пластичности около вершины, будучи лишенными этих недостатков, могут заключать в себе большую перспективу развития. В связи с этим большую роль в теории и практике приобретают полуфеноменологические модели усталости со свободными параметрами, которые компенсируют в определенной мере недостаток знаний по действительной физической картине процессов. Корректное формирование таких моделей с учетом накопленного опыта требуют большого объема экспериментов, что крайне необходимо для описания степени связанности и взаимного влияния процессов накопления усталостных повреждений.

Рост макротрещины на различных скоростях обусловлен преобладанием различных механизмов. Наименее исследована область низких скоростей роста трещин - участок околопороговых скоростей, что обусловлено причинами: 1) Длительные базы испытаний $10^6 \dots 10^8$ циклов требуют приложения нагрузки с частотой порядка 10^2 Гц, иначе временные затраты будут значительны. Однако, необходимые испытательные машины мало распространены, поэтому и экспериментальных исследований немного; 2) Инженерные проблемы, актуальные в стратегических областях машиностроения, таких как ракетостроение, авиастроение, судостроение, в атомной и военно-промышленной отраслях, чаще связаны с высокими скоростями роста усталостных трещин, поэтому должного внимания область низких скоростей роста не получила; 3) Многоцикловое нагружение, необходимое для работы с малыми скоростями роста трещин, получило развитие и добилось успехов в испытаниях образцов без трещин, поэтому сложилось ощущение того, что усталость на больших базах испытания хорошо исследована; 4) Развитие

функциональности и снижение стоимости вычислительной техники популяризировало теоретические исследования, отдалив ученых от эксперимента. Существующие модели оценки роста усталостных трещин зачастую недостаточно точно описывают участок околопороговых скоростей роста, что в отсутствие должной вычислительной поддержки приводит к падению интереса к этому участку, хотя последний представляет практический интерес ввиду применения концепции неограниченного срока службы, при решении задач продления ресурса технических объектов и в связи с авариями, связанными с усталостью.

При проведении испытаний в режиме Пэриса на поверхности разрушения образцов образуются усталостные бороздки, различимые при фрактографическом анализе. В околопороговом режиме роста трещин бороздки не появляются, что свидетельствует о различных доминирующих механизмах роста трещин на этих участках. При проведении испытаний в вакууме рост трещин в области низких скоростей замедляется или останавливается в сравнении с атмосферной окружающей средой, а в режиме Пэриса не наблюдается образование бороздок, что свидетельствует о существенном влиянии атмосферной среды на усталостную долговечность металлов. Кроме того, в вакууме кончик трещины округлый, а в атмосферной среде – острый, что наводит на мысль об охрупчивании металла у вершины трещины под действием окружающей среды. Интересно, что при испытаниях в средах кислорода, азота и инертных газов при стандартных условиях результаты сходны с результатами испытаний в вакууме, т. е. их влияние как компонентов среды в этих условиях можно опустить. Значит, модели учета влияния окружающей среды, например, модели водородного охрупчивания представляют повышенный научный интерес при анализе роста усталостных трещин на околопороговом участке скоростей роста.

Цель работы: моделирование роста усталостной макротрещины, основанное на учете величины местных напряжений на удалении от вершины трещины, для расчета ее скорости роста в металле и соответствующего срока службы материала на нижнем участке кинетической диаграммы усталостного разрушения под действием нагружения переменной амплитуды.

Задачи исследования:

1. Проанализировать подходы к оценке скоростей распространения усталостных трещин при различных видах механического нагружения, уравнения скорости роста усталостных трещин, модели расчета роста трещин для оценки долговечности металлов, элементы алгоритмов работы программного обеспечения для расчета усталостной долговечности материалов, влияние окружающей среды на рост трещин (в особенности феномен водородного охрупчивания).

2. Провести испытания для построения кривых роста, кинетических диаграмм усталостного разрушения и определения срока службы образцов на алюминиевых и стальных образцах с целью продемонстрировать и описать

последовательность циклов в истории нагружения, а именно: 1) регулярные нагружения; 2) нагружения с перегрузками и недогрузками различной последовательности; 3) спектральные нагружения, сходные с эксплуатационными нагружениями.

3. Выполнить сравнительный анализ результатов расчета усталостной долговечности по различным моделям роста усталостных трещин и результатов испытаний, а также определить модель или теорию, наиболее подходящую в качестве основы для новой модели расчета усталостной долговечности металла при наличии макротрещины, если результаты существующих моделей окажутся плохо согласующимися с экспериментальными данными. Разработать уравнение скорости роста усталостных трещин, сформулировать, обосновать и автоматизировать методику определения составляющих его компонентов. Автоматизировать и реализовать в оригинальном программном обеспечении этапы методики расчета параметров модели и продолжительности роста усталостной трещины для предлагаемой модели.

4. Оценить проявление закрытия трещины при нагружениях постоянной и переменной амплитуды с помощью фотометрического анализа, чтобы оценить корректность существующих моделей прогнозирования роста усталостных трещин, опирающихся на учет явления закрытия трещины.

5. Рассчитать долговечность материала согласно предложенной модели, провести сравнительный анализ результатов расчета с экспериментальными результатами, а также результатами расчета по существующим моделям роста усталостных трещин, выяснить эффективность предложенной модели, установить ее преимущества и недостатки, описать допущения и ограничения.

6. Провести энергодисперсионную рентгеновскую спектроскопию, чтобы установить возможность существования взаимосвязи между диффузией частиц из среды в материал образца при перегрузках и скоростью роста усталостной трещины. Проанализировать возможность проявления феномена водородного охрупчивания как одной из составляющих физической картины повреждения материала.

Научная новизна работы:

1. Предложен оригинальный метод фотометрического анализа по оценке уровня закрытия трещины, который показал, что существующие модели склонны переоценивать уровень закрытия трещины при нагружениях постоянной или переменной амплитуды.

2. Предложена и верифицирована новая модель расчета роста усталостной трещины, опирающаяся на определение местных напряжений на удалении от вершины трещины, при одноосном нагружении переменной амплитуды, позволяющая учесть и величину, и последовательность циклов. Показана высокая эффективность предлагаемой модели в области малых скоростей роста трещины ($10^{-7} \dots 10^{-5}$ мм/цикл) и уровнях перегрузки ($K_{ol}/K_{max} \leq 1 \dots 1.5$), а также

высокой асимметрии цикла ($R \geq 0.4$) при нагружениях переменной амплитуды, имитирующих эксплуатационные нагружения.

3. На основании предложенной модели получены зависимости продолжительности роста усталостной трещины в металле от асимметрии циклов нагружения, уровня перегрузки и последовательности циклов в перегрузочном блоке для испытаний с перегрузками для алюминиевого сплава и малоуглеродистой стали.

4. Разработана методика расчета постоянных и переменных параметров уравнения скорости роста усталостной трещины, этапы которой могут использоваться и для целей, не связанных с расчетом долговечности материала, таких как аппроксимация кривых, анализ экспериментальных данных испытания с поцикловой записью податливости, расчет реакции материала без трещин на циклическое нагружение и т. д.

Практическая значимость работы

Показана возможность оценки усталостного срока службы материалов с усталостной трещиной, применяющихся в авиационной и автомобильной промышленности с помощью предлагаемой модели учета влияния местных напряжений у вершины трещины на скорость ее роста. Более точные прогнозы долговечности материала с трещиной в области малых скоростей роста трещины ($10^{-7} \dots 10^{-5}$ мм/цикл) и уровнях перегрузки ($K_{ol}/K_{max} \leq 1 \dots 1.5$), а также высокой асимметрии цикла ($R \geq 0.4$) при нагружениях переменной амплитуды, нежели по существующим моделям открывают возможность снижения металлоемкости конструкций из них при проектировании, а также иметь больше обоснований при принятии решения о продлении ресурса технического объекта.

Предложенные методики поциклового расчета длины трещины, аппроксимации кривых кинетической диаграммы усталостного разрушения, подбора коэффициентов уравнений роста трещины, оценки реакции материала на циклическое нагружение, расчета порогового размаха коэффициента интенсивности напряжений, реализованные в оригинальном программном обеспечении, могут использоваться для автоматической обработки результатов испытаний с циклическим нагружением как дополнительные приложения к испытательному оборудованию.

Апробация работы

Материалы диссертационной работы докладывались на международных конференциях: 1) XXIII международная инновационно-ориентированная конференция молодых учёных и студентов МИКМУС-2011 (Москва; 2011, 2015 гг.); 2) II международная научно-практическая конференция “Современное машиностроение” (Санкт-Петербург; 14-15 июня 2012 г.); 3) Международная научно-практическая конференция “Innovation Information Technologies” (Прага, Чехия; 2012-2014 гг.); 4) Международная научно-практическая конференция “Инновации на основе информационных и коммуникационных

технологий” (Сочи; 2012-2014 г.); 5) Международная научно-техническая конференция “Усталость и термоусталость материалов и элементов конструкций” (Киев, Украина; 28-31 мая 2013 г.); 6) Международная научно-практическая конференция “Прогресс транспортных средств и систем” (Волгоград; 24-26 сентября 2013 г.); 7) V международная конференция “Деформация и разрушение материалов и наноматериалов DFMN 2013” (Москва; 26-29 ноября 2013 г.); 8) I International Conference on Structural Intergrity (Кальпаккам, Индия; 4-7 февраля 2014 г.).

Публикации

По теме диссертации опубликовано 65 печатных работ, из них: 6 статей в зарубежных журналах перечня Scopus, 1 статья в зарубежной печати, 8 свидетельств о государственной регистрации программы, 20 статей в журналах перечня ВАК, 22 статьи из сборников материалов конференций, 5 тезисов конференций.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, списка использованной литературы из 113 источников, 5 приложений. Работа изложена на 157 страницах, а вместе с приложениями – на 200 страницах. Суммарное число рисунков - 88, таблиц - 13.

Автор выражает благодарность д.т.н., проф. Багмутову В.П. за оказанную помощь при анализе и обсуждении результатов диссертации и академику Индийской академии наук доктору, проф. Сундеру Р. за оказанную помощь в предоставлении материалов и оборудования для проведения экспериментов, а также наставничество.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, представлены объект, предмет и цели исследования. Показаны задачи и научная новизна решаемой проблемы. Описаны методология и методы, примененные в работе, а также ее практическая значимость и степень достоверности. Приведены сведения об апробации работы и публикациях.

В первой главе выполнен анализ литературных источников с целью определения существующих подходов к оценке усталостного повреждения металлов. Остановившись на моделях оценки роста усталостных трещин для оценки долговечности металлов при нагружении переменной амплитуды было сочтено целесообразным описать наиболее характерные из них. Также в главу занесены сведения о водородном охрупчивании алюминиевых сплавов и сталей, которые в дальнейшем используются как ссылка для предлагаемой модели оценки усталостного роста трещин.

Среди подходов к оценке усталостного повреждения металлов можно выявить подходы рассеянного и локализованного усталостного повреждения. В подходе рассеянного повреждения в качестве основного графика для описания

усталостной повреждаемости и разрушения материала используется кривая выносливости (усталости) Вёлера. Предложенная еще в XIX в., она используется и до сих пор, причем помимо классической кривой, описывающей число циклов до разрушения образцов при различных уровнях напряжений, на графике могут изображаться и такие линии, как линии начала образования микроскопических или субмикроскопических трещин, а долговечности могут охватывать диапазон от статического разрушения до гигацикловой усталости включительно. Подход описан весьма подробно, поэтому представим далеко не исчерпывающий перечень имен отечественных ученых, которых сделали в него свой вклад: Н.А. Махутов, Ю.Н. Работнов, В.С. Иванова, П.И. Кудрявцев, В.Т. Троценко, С.В. Серенсен, В.П. Когаев, Ф.М. Терентьев. Однако, более точно трещиностойкость материала может быть описана с помощью кривой кинетической диаграммы усталостного разрушения, показывающей зависимость скорость роста трещин от величины размаха коэффициента интенсивности напряжений и являющейся одним из важнейших графиков для подхода локализованного усталостного повреждения и механики разрушения. Подход подробно описан в работах В.В. Панасюка, В.Т. Троценко, В.М. Пестрикова, Е.М. Морозова, В.З. Партона, Ч.Г. Черепанова, Н.Ф. Морозова, Ю.В. Петрова и многих-многих других российских исследователей.

Исходя из темы настоящей работы можно заключить, что больший интерес представляет подход локализованного усталостного повреждения. Модели роста усталостных трещин, сформулированные в рамках этого подхода, можно классифицировать следующим образом: 1) статистические модели; 2) модели закрытия трещины; 3) модели пластичности около вершины трещины. Модели учета местных напряжений у вершины трещины можно отнести к моделям пластичности около вершины трещины. Чтобы заложить основу для дальнейшего сравнения результатов прогнозирования усталостной долговечности были описаны следующие классические модели: модель закрытия трещины Элбера, статистическая модель Барсома, модели пластичности около вершины трещины Уилера и Уилленборга.

Во второй главе обоснован выбор алюминиевого сплава и малоуглеродистой стали в качестве исследуемого материала и 5 мм С(Т) образца (рис. 1) в качестве объекта исследования. Целям исследований наиболее соответствовала сервогидравлическая машина Makron 25 kN (рис. 2а), способная прикладывать нагрузку до 25 кН и обладающая максимальной частотой нагружения в 1000 Гц. Эксперименты проводились в лабораториях испытания материалов BiSS (г. Бангалор, Индия) и кафедры “Соппротивление материалов” ВолгГТУ. Использование нестандартных образцов вызвало необходимость разработки хомутовых захватов (рис. 2б). В работе показано, что стандартное программное обеспечение не может оказать достаточную вычислительную поддержку испытаний, поэтому предполагается необходимость разработки дополнительных приложений.

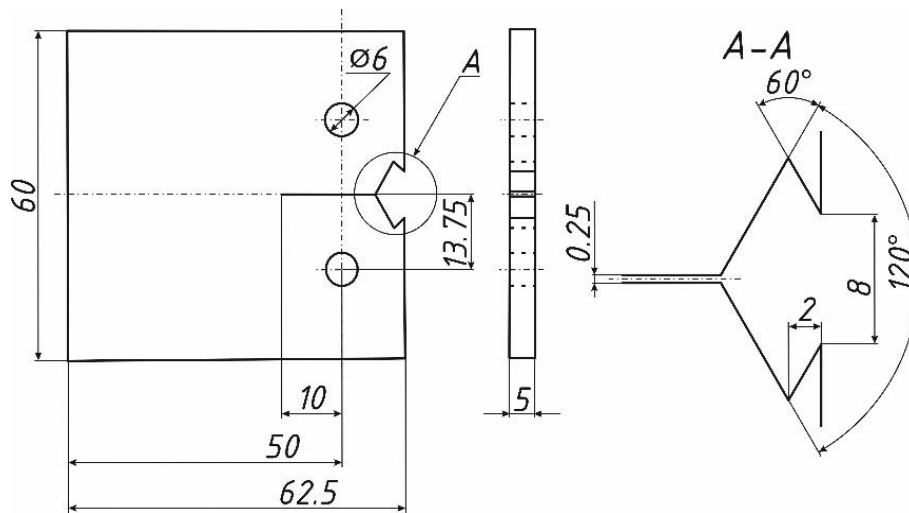


Рис. 1 - Геометрия образца для испытаний



Рис. 2 - (а) Сервогидравлическая испытательная машина Makron 25 kN.
(б) Хомутовые захваты с подшипниками для крепления образца

Также в главе приводится анализ существующих уравнений кривой кинетической диаграммы усталостного разрушения, на основании которого заключается, что уравнение Формэна-Метту наиболее совершенно и потому оно может быть использовано в качестве основы для формулирования предлагаемого уравнения, лучше соответствующего названию и целям работы.

Представлен и анализ коммерческих программных продуктов для моделирования роста усталостных трещин. Рассмотрены модели в универсальных конечно-элементных пакетах Ansys и Abaqus, а также в специальных программах NASGRO и FASTRAN. Чтобы заложить основу для дальнейшего сравнения результатов прогнозирования усталостной долговечности были кратко описаны обобщенная модель Уилленборга и модифицированная обобщенная модель Уилленборга, являющиеся наиболее совершенными моделями в NASGRO, а также модель закрытия трещины в FASTRAN.

Уравнение Формэна-Метту

$$da/dN = C \cdot (\Delta K \cdot (1 - f) / (1 - R_{eff}))^m \cdot (1 - \Delta K_{th} / \Delta K_{eff})^p / (1 - K_{max} / K_c)^q$$

учет закрытия трещины
учет асимметрии цикла

для II участка КДУР
для I участка КДУР
для III участка КДУР

Предлагаемое уравнение

$$da/dN = C \cdot \Delta K_{eff}^m \cdot (1 - \Delta K_{th} / \Delta K_{eff})^p / (1 - K_{max} / K_c)^q$$

для II участка КДУР
для I участка КДУР
для III участка КДУР

Рис. 3 - Учет различных участков КДУР оригинальным и предлагаемым модифицированным уравнением Формэна-Метту

Третья глава посвящена экспериментальным исследованиям. Чтобы показать поспешность постулата “закрытие трещины объясняет все” был проведен фотометрический анализ закрытия трещины при нагружении постоянной и переменной амплитуды. Помимо сервогидравлической машины были задействованы высокоскоростная фотокамера Nikon и программа корреляции изображений для обработки фотографий (DIC), которая была разработана в Институте физики прочности материалов СО РАН (г. Томск). Эксперименты были проведены в лаборатории испытания материалов ViSS. Результаты испытаний при нагружении постоянной и переменной амплитуды представлены на рис. 4 и 5 соответственно. Интересно, что результаты фотометрического анализа совпали с результатами аналогичного анализа с применением лазерной интерферометрии, проведенной ранее в лаборатории Динамики и прочности на базе ВВС США “Wright-Patterson” в том выводе, что значения закрытия трещины, предлагаемые большинством моделей закрытия трещины завышены. Однако, фотометрический анализ закрытия трещины дешевле и доступнее, чем лазерная интерферометрия. Кроме того, при проведении расчетов выявлена возможность замены высокоскоростной фотокамеры на качественную веб-камеру, закрепляемой на образце.

Однако, большинство экспериментов в настоящей работе были посвящены росту трещин при испытаниях с перегрузками и недогрузками различной последовательности с целью построения кривых роста трещины, кинетической диаграммы усталостного разрушения и определения долговечности образцов. Во избежание проявления закрытия трещины была выбрана высокая асимметрия циклов базового нагружения $R \geq 0.7$ и низкий уровень перегрузок $K_{ol}/K_{max} \leq 1.5$. Т.к. согласно названию работу наиболее интересующим участком кривой кинетической диаграммы усталостного разрушения является участок околопороговых скоростей роста, то $\Delta K \approx \Delta K_{th}$ и $\Delta K > \Delta K_{th}$. Показательно сравнение кривых роста и кинетических диаграмм усталостного разрушения в испытаниях с одиночным циклом перегрузки различной последовательности, внедренный в нагружение постоянной амплитуды на рис. 6.

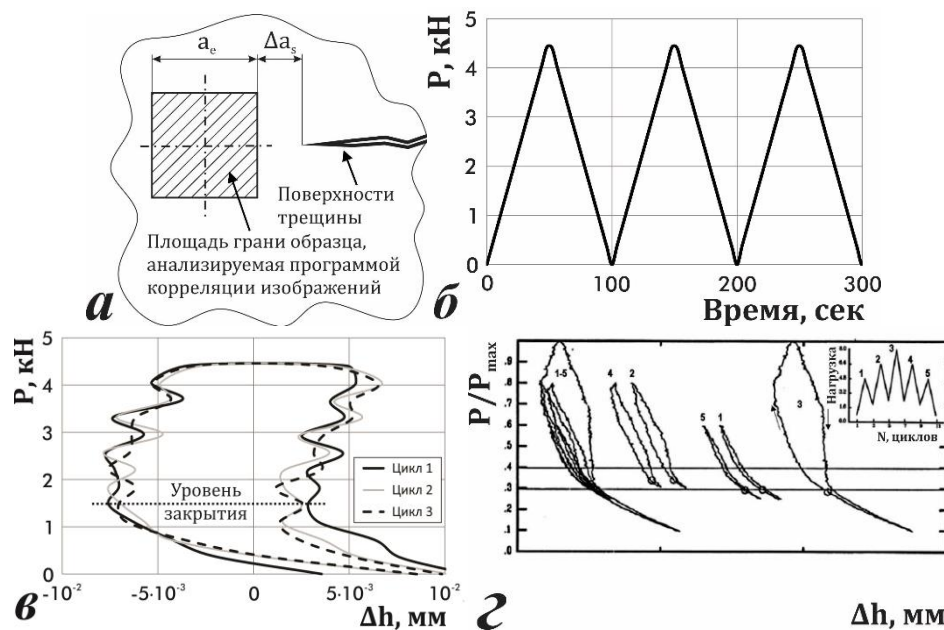


Рис. 4 - Площадь грани образца для осреднения пластической составляющей вертикального смещения вблизи вершины трещины (а); регулярный режим нагружения (б); зависимость пластической составляющей вертикального смещения вблизи трещины Δh от нагрузки P при регулярном отнулевом нагружении в фотометрическом анализе (в); зависимость пластической составляющей вертикального смещения вблизи трещины Δh от нагрузки P при нерегулярном нагружении в анализе лазерной интерферометрии (г)

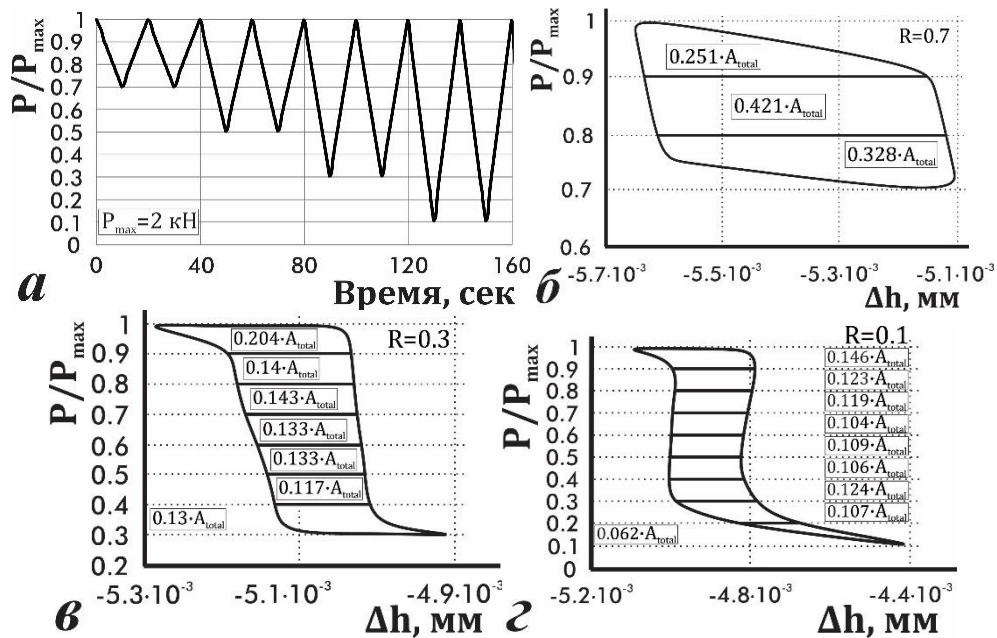


Рис. 5 - Нагружение переменной амплитуды для фотометрического анализа (а); зависимость осредненной пластической составляющей вертикального смещения вблизи трещины Δh от величины нагрузки P при нагружении переменной амплитуды на циклах различной асимметрии (б)-(г)

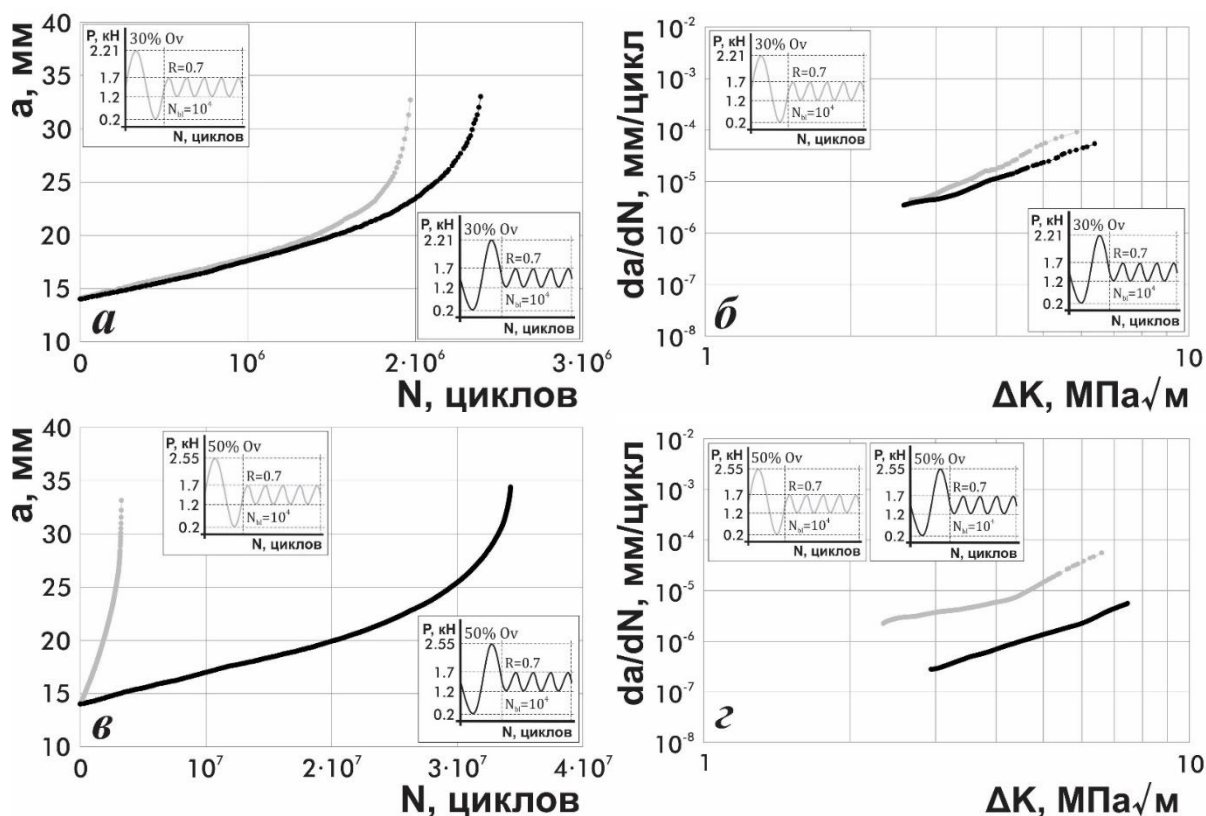


Рис. 6 – Кривые роста трещины и КДУР в испытаниях с перегрузками для алюминиевого сплава

Обобщенная кривая кинетической диаграммы усталостного разрушения для алюминиевого сплава 2024-T3 показана на рис. 7, а для малоуглеродистой стали – на рис. 8.

Кроме того, были проведены испытания и с модифицированными спектрами MiniTWIST и MiniFALSTAFF на алюминиевом сплаве, результаты которых представлены на рис. 9.

Для верификации полученных кинетических диаграмм усталостного разрушения для некоторых образцов был проведен фрактографический анализ поверхностей разрушения, позволивший оценить скорость роста трещин по маркирующим признакам, вызываемым недогрузками. Одно из характерных сравнений приведено на рис. 10.

Высокие значения средних составляющих нагрузки циклов могут вызывать высокие местные напряжения у вершины трещины, что увеличивает межатомное расстояние в слоях материала, облегчая проникновение в них инородных атомов окружающей среды. Очевидно, чем меньше размер инородного атома, тем легче его проникновение, что наводит на мысль о влиянии водорода. Увеличение объема, подверженного проникновению атомов, может приводить к более глубокому охрупчиванию металла, что увеличивает объем, подверженный хрупкому разрушению по I моде, однако возможно, что для участка околопороговых скоростей роста этот факт малозначим, т. к. характерная скорость роста $10^{-7} \dots 10^{-5}$ мм/цикл означает продвижение трещины на расстояние не более нескольких сотен атомных слоев, а то и десятков. А в

режиме Пэриса преобладающим механизмом роста усталостной трещины становится циклическое скольжение, поэтому механизм хрупкого разрушения может на нем и присутствовать, но малозначим и завуалирован гораздо более сильным механизмом разрушения.

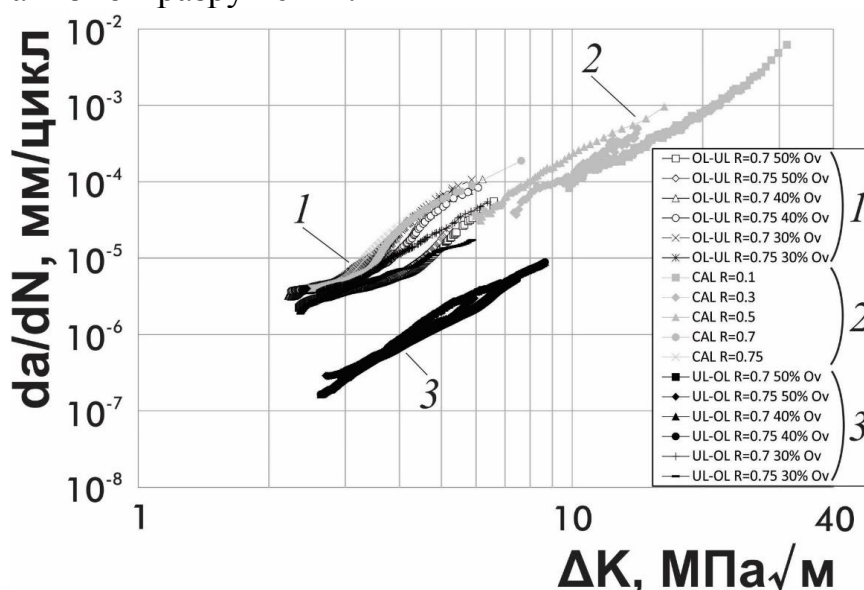


Рис. 7 – Обобщенная кинетическая диаграмма усталостного разрушения для алюминиевого сплава 2024-T3

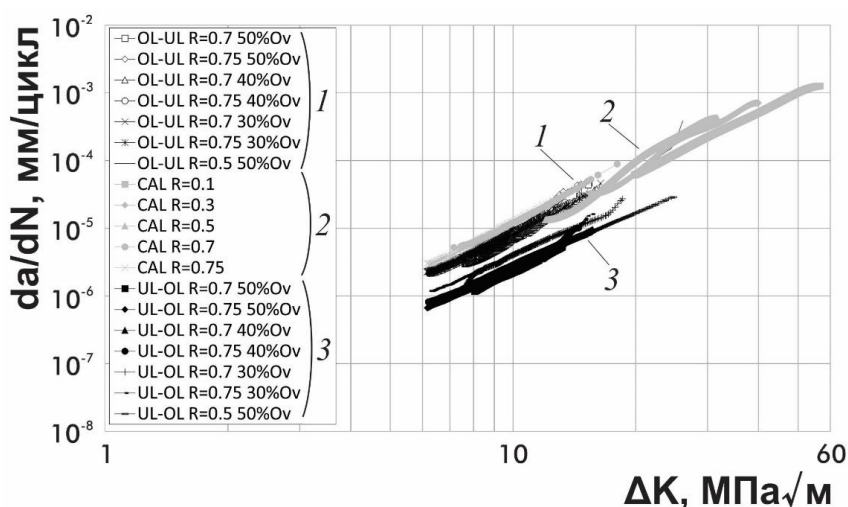


Рис. 8 – Обобщенная кинетическая диаграмма усталостного разрушения для малоуглеродистой стали

Поэтому кроме фрактографического анализа поверхностей разрушения была проведена рентгеновская спектроскопия поверхностей разрушения на базе микроскопа Versa 3D DualBeam с целью определения весового содержания кислорода. Повышенное содержание кислорода на поверхности разрушения может свидетельствовать о повышенной активной адсорбционных процессов, что может явиться признаком водородного охрупчивания металла. К сожалению, после анализа нескольких образцов не было получено ярких доказательств водородного охрупчивания, однако были сделаны выводы: 1) в области маркирующего признака часто наблюдается скачок содержания кислорода; 2) при меньшей скорости роста содержание кислорода на поверхности разрушения выше. Некоторые результаты показаны на рис. 11.

Завершается глава сравнительным анализом прогнозируемых значений долговечности по классическим моделям и моделям NASGRO и FASTRAN, а также предлагаемой модели, речь о которой идет в следующей главе (рис. 12). В таблице 1 приведены коэффициенты корреляции прогнозируемых и экспериментальных значений усталостной долговечности по моделям NASGRO, FASTRAN и предлагаемой модели. В таблице 2 приведены значения экспериментальных и расчетных величин усталостной долговечности для испытаний с переменными нагрузениями в алюминиевом сплаве.

Четвертая глава начинается с критики постановки и выводов дилеммы Даля-Рота о том, что же влияет на рост усталостной трещины – закрытие трещины или местные напряжения. На рис. 13 и 14 приведены фрактографические свидетельства в результате испытаний с переменной длительностью блока базового нагружения, которые не могут быть объяснены только закрытием трещины, но могут быть объяснены при предположении переменного характера порогового размаха коэффициента интенсивности напряжений.

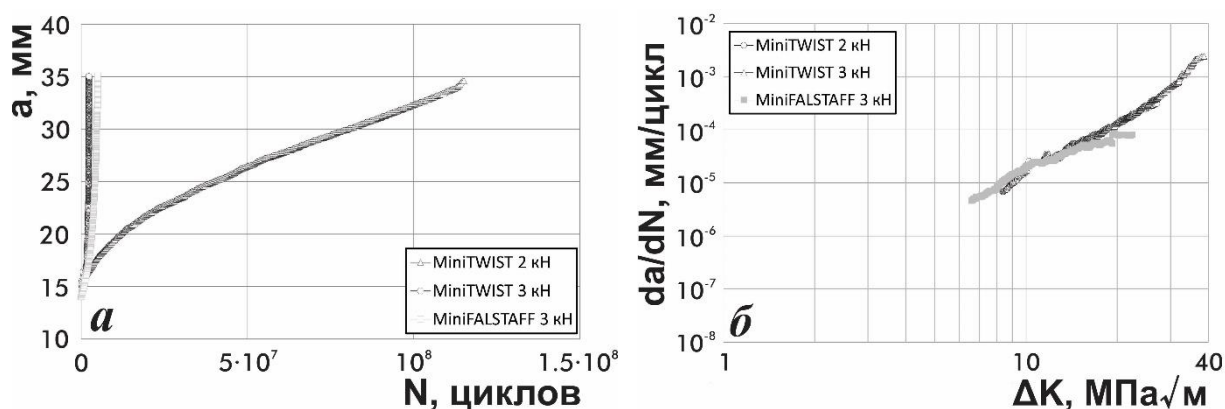


Рис. 9 – Кривые роста трещин и кинетические диаграммы усталостного разрушения для переменных нагружений в алюминиевом сплаве 2024-Т3

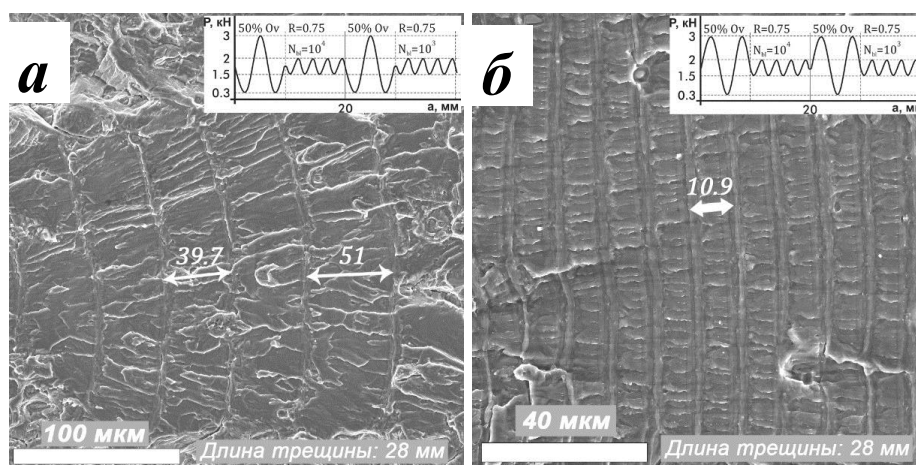


Рис. 10 – Фрактографии поверхностей разрушения образцов с перегрузками различного характера в алюминиевом сплаве 2024-Т3

Табл. 1.

Коэффициенты корреляции значений усталостной долговечности

Модель	Алюминиевый сплав	Малоуглеродистая сталь
Обобщенная модель Уилленборга (NASGRO)	0.469	0.45
Модифицированная обобщенная модель Уилленборга (NASGRO)	0.479	0.563
Модель закрытия трещины (FASTRAN)	0.525	0.751
Предлагаемая модель учета местных напряжений	0.759	-

Табл. 2.

Экспериментальные и расчетные величины долговечности в испытаниях с переменными нагружениями в алюминиевом сплаве, млн циклов

Спектр	MiniTWIST (2 кН)	MiniTWIST (3 кН)	MiniFALSTAFF (3 кН)
Результат испытания	115	2.34	4.95
Обобщенная модель Уилленборга (NASGRO)	100	3.91	8
Модифицированная обобщенная модель Уилленборга (NASGRO)	84.5	3.43	7.05
Модель закрытия трещины (FASTRAN)	97.4	2.62	5.6
Предлагаемая модель учета местных напряжений	108	1.97	4.13

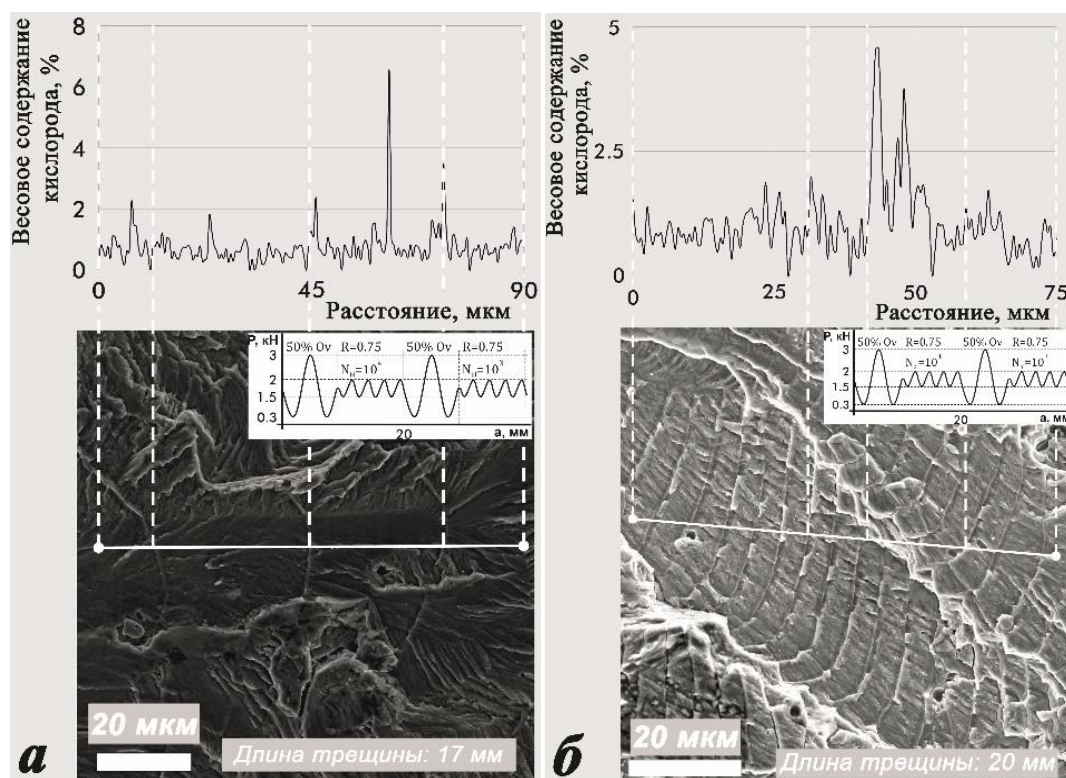


Рис. 11 - Весовое содержание кислорода на поверхностях разрушения при различной длине трещины для испытания на алюминиевом сплаве 2024-T3

Далее речь идет о предлагаемой модели учета местных напряжений. На основании правила Нойбера и уравнения Рэмберга-Озгуда были получены уравнения, связывающие коэффициент интенсивности напряжений и его размах с местным напряжением на удалении от кончика трещины.

$$K = \sqrt{2 \cdot \pi \cdot r^* \cdot E \cdot \sigma^* \cdot \left(\frac{\sigma^*}{E} + \left(\frac{\sigma^*}{K'} \right)^{\frac{1}{n'}} \right)}, \quad (1)$$

$$\Delta K = \sqrt{2 \cdot \pi \cdot r^* \cdot E \cdot \Delta \sigma^* \cdot \left(\frac{\Delta \sigma^*}{E} + \left(\frac{\Delta \sigma^*}{2K'} \right)^{\frac{1}{n'}} \right)}, \quad (2)$$

$$r^* = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \left(\frac{K_c^2}{\sigma_f \cdot \varepsilon_f \cdot E} \right) \quad (3)$$

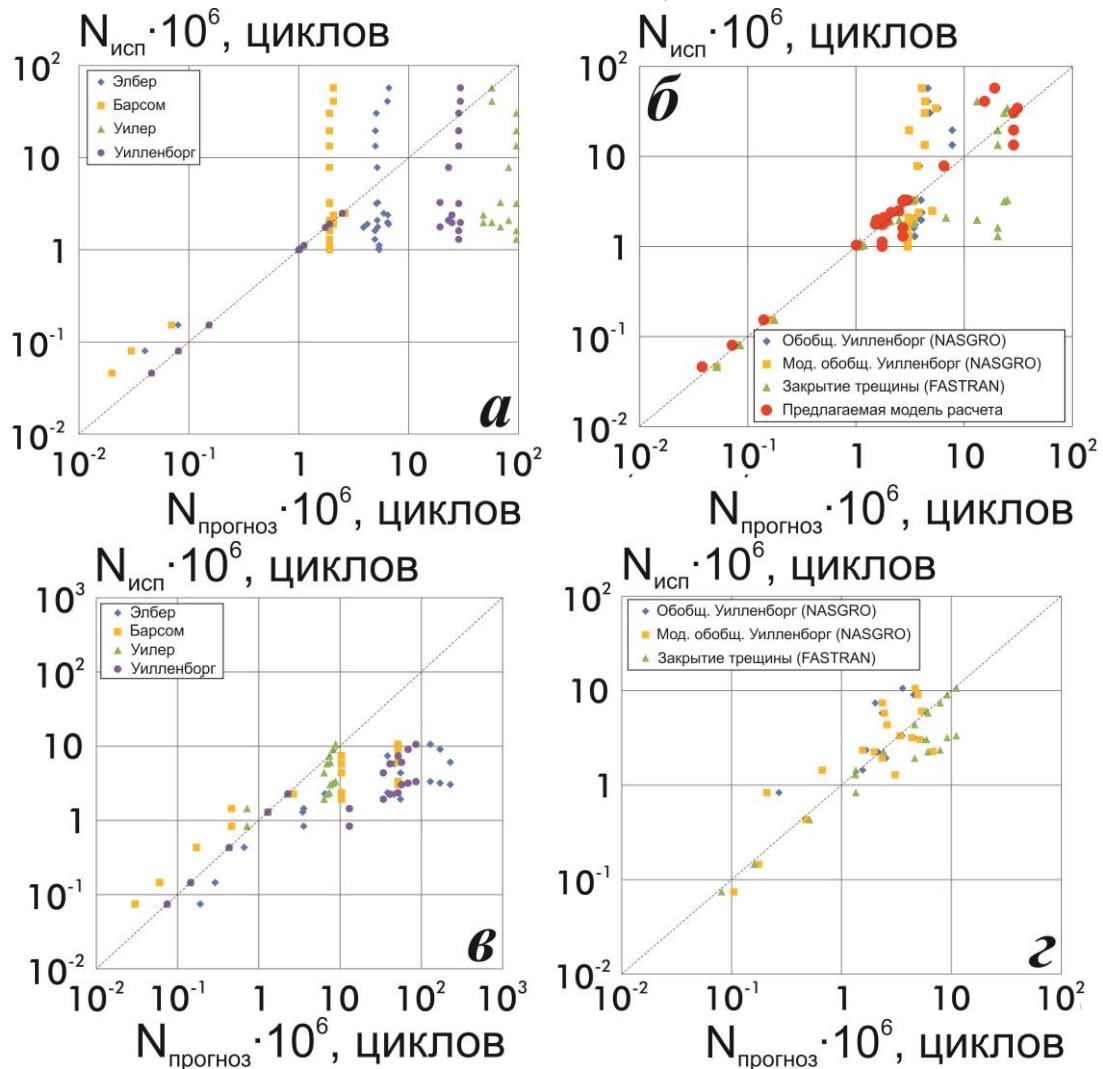


Рис. 12 – Корреляция экспериментальных и прогнозируемых результатов усталостной долговечности в испытаниях с перегрузками для алюминиевого сплава 2024-Т3 (а, б) и малоуглеродистой стали (в, г)

Местное напряжение на удалении от кончика трещины (рис. 15), определяемое уровнем перегрузки (последним полуциклом), связано с пороговым размахом коэффициента интенсивности напряжений, как показывает эмпирическая зависимость, полученная проф. Сундером (рис. 16).

Для расчета скорости роста предлагается уравнение:

$$\frac{da}{dN} = C \cdot \Delta K_{eff}^m \cdot \frac{\left(1 - \frac{\Delta K_{th}}{\Delta K_{eff}}\right)^p}{\left(1 - \frac{K_{max}}{K_c}\right)^q} \quad (4)$$

Совокупность методик расчета скорости роста усталостной трещины по вышеупомянутому уравнению приведена на рис. 17 и подробно описана в приложениях. Глава завершается описанием программного обеспечения, разработанного для автоматизации расчетов согласно предлагаемой модели. На рис. 18 приведена визуальная форма одной из разработанных программ.

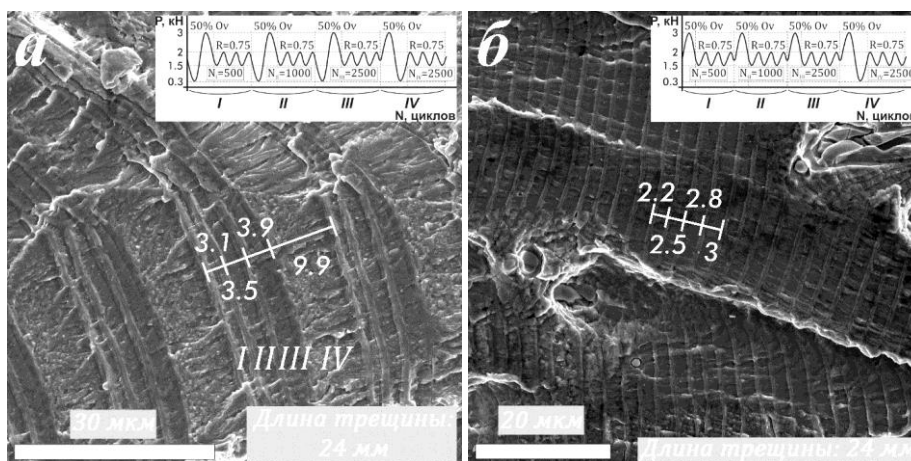


Рис. 13 - Фрактографические снимки алюминиевого сплава 2024-T3 в результате испытаний с различным характером перегрузок

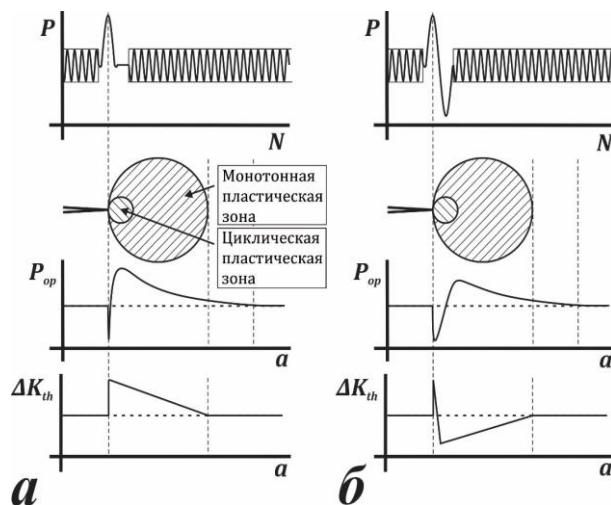


Рис. 141 - Влияние перегрузок различного характера на изменение усилия открытия трещины и пороговый размах КИН

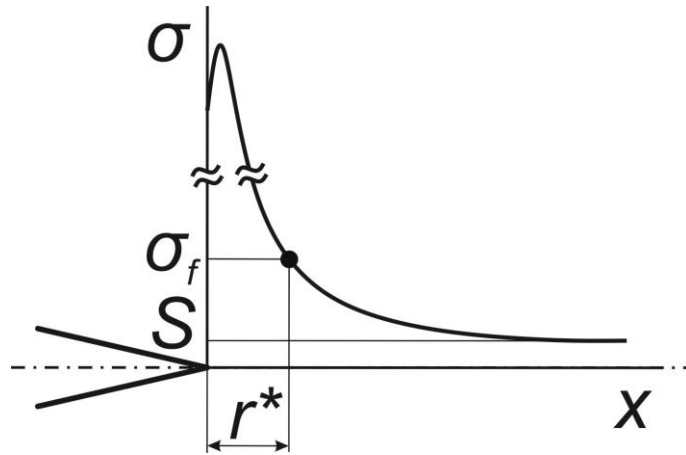


Рис. 152 – Удаление от вершины трещины при расчете местного напряжения в предлагаемой модели прогнозирования роста усталостной трещины

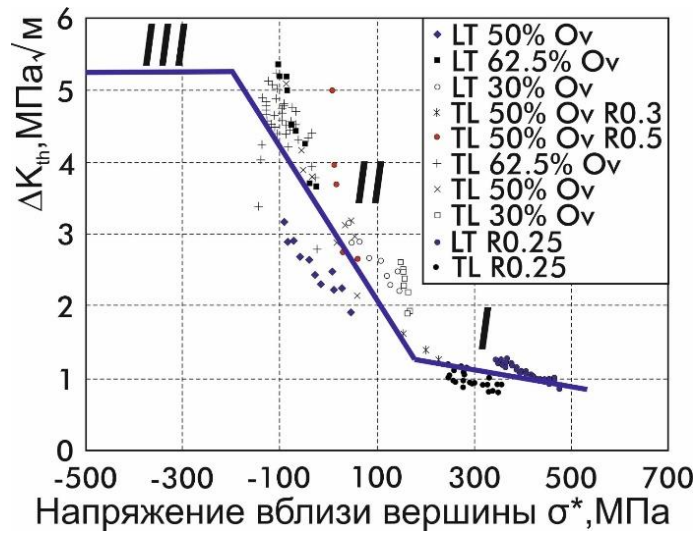


Рис. 163 - Зависимость порогового размаха КИН от напряжения вблизи трещины для алюминиевого сплава 2024-T3 по Сундеру

Совокупность методик расчета скорости роста усталостной трещины

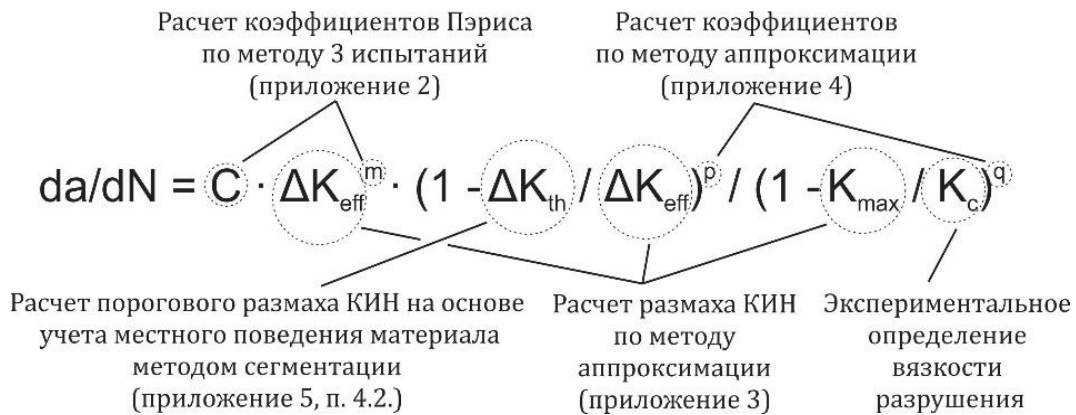


Рис. 174 - Совокупность методик расчета скорости усталостной трещины согласно предлагаемому уравнению КДУР

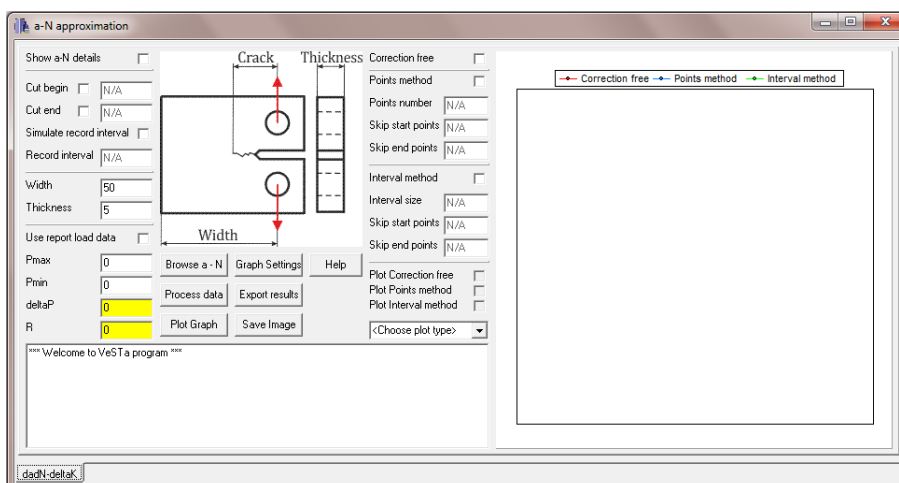


Рис. 18 - Интерфейс программы для аппроксимации кривых роста и КДУР в испытаниях с перегрузками и для регулярных нагружений

Основные результаты и выводы

1. Сформулирована новая полуфеноменологическая модель учета местных напряжений для прогнозирования скорости роста усталостной трещины. Она эффективно прогнозирует продолжительность роста усталостной трещины в диапазоне околопороговых скоростей роста усталостной трещины при допущении малости перегрузок для алюминиевого сплава 2024-T3, применяемого в авиационной и автомобильной промышленности. Показана эффективность предлагаемой модели не только в испытаниях с перегрузками и недогрузками, но и со спектральным нагружением, имитирующим эксплуатационное.

2. Предложена новая методика фотометрического анализа закрытия трещины при нагружении постоянной и переменной амплитуды. Фотометрический анализ испытаний с нагружениями постоянной и переменной амплитуды подтвердил результаты лазерной интерферометрии при аналогичных испытаниях о том, что уровень закрытия трещины в моделях закрытия трещины, таких как модели Элбера и FASTRAN, переоценен. Предложенная методика позволяет проводить более детальное изучение уровня закрытия трещины, в том числе и неполного закрытия трещины. Кроме того, предложенная методика фотометрического анализа дешевле лазерной интерферометрии и доступнее для лабораторий.

3. Автоматизированы и реализованы в наборе оригинальных программ этапы методики расчета параметров уравнения КДУР. Также реализована в программном обеспечении методика расчета усталостной долговечности как по существующим моделям, так и по предлагаемой модели, причем как для нагружений с перегрузками, так и для спектров. Эти программы позволили ускорить обработку результатов испытаний, автоматизировать расчет долговечности, улучшить воспроизводимость результатов при последующих испытаниях, исключить ошибки расчета.

4. Программное обеспечение NASGRO и FASTRAN, использует гибридные модели расчета продолжительности роста усталостной трещины,

чтобы, сочетая преимущества составляющих моделей, добиться более достоверных прогнозов. В работе показано, что некоторые результаты применения этих программ в области малых скоростей роста трещины и уровнях перегрузки, а также высокой асимметрии цикла при нагружениях переменной амплитуды могут демонстрировать невысокие значения коэффициентов корреляции и плохо учитывают последовательность нагружения.

5. Результаты энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии поверхностей разрушения образцов показали возможность влияния диффузии частиц из среды при перегрузках на скорость роста усталостной трещины в алюминиевом сплаве. Наиболее очевидной причиной этого влияния кажется охрупчивание, происходящее при адсорбции частиц водорода и кислорода, появляющихся в результате реакции металла у вершины трещины с влагой. Прямого доказательства влияния водорода в работе не представлено, но результаты испытаний в вакууме, средах кислорода, азота, водорода, инертных газах наводят на мысль об охрупчивающем действии именно водорода. Эти доводы могут использоваться для физического обоснования предлагаемой модели при дальнейшем ее развитии.

После изложения основных выводов приведены приложения, описывающие этапы расчета, примененные в настоящей работе, в том числе, в разработанном программном обеспечении.

В приложении 1 приведен метод определения порогового размаха коэффициента интенсивности напряжений.

В приложении 2 дан метод расчета коэффициентов Пэриса на примере алюминиевого сплава.

В приложении 3 представлен метод аппроксимации кривой роста трещины и получения кинетической диаграммы усталостного разрушения на примере алюминиевого сплава.

Приложение 4 описывает метод расчета коэффициентов кинетической диаграммы усталостного разрушения.

Приложение 5 показывает метод сегментации для расчета местной циклической реакции материала.

Основные положения диссертационного исследования опубликованы в журналах, входящих в перечень Scopus:

1. Savkin, A.N. Advanced materials of automobile bodies in volume production / A.N. Savkin, A.V. Andronik, A.I. Gorunov, A.A. Sedov, M.A. Sukhanov // European Transport – Trasporti Europei (Italy). - 2014. - Iss. 56, No. 10. - P. 1-27.

2. Savkin, A.N. Approximation Algorithms of Crack Growth Rate Curve Based on Crack Size Variations / A.N. Savkin, A.V. Andronik, R. Koraddi // Journal of Testing and Evaluation (USA). - 2016. - Vol. 44, No. 1. - P. 1-10.

3. Savkin, A.N. Crack Closure Detection Using Photometrical Analysis / A.N. Savkin, A.V. Andronik, R. Abhilash // Periodica Polytechnica. Mechanical Engineering (Hungary). - 2015. - Vol. 59, No. 3. - P. 114-119.

4. Savkin, A.N. Test procedure to determine the Paris equation coefficients for crack growth rates exemplified by aluminum alloy 2024-T3 / A.N. Savkin, A.V. Andronik, R. Koraddi // Materialpruefung / Materials Testing (Germany). - 2015. - Vol. 57, No. 10. - P. 912-919.

5. Savkin, A.N. The steel damageability simulation under random loading by the power, energetical and strain fracture criterions / A.N. Savkin, A.A. Sedov, A.V. Andronik // Periodica Polytechnica, Mechanical Engineering (Hungary). - 2014. - Vol. 58, Issue 2. - P. 119-126.

6. Sunder, R. Combined action of crack closure and residual stress under periodic overloads: A fractographic analysis / R. Sunder, A.V. Andronik, A.V. Byakov, A.V. Eremin, S.V. Panin, A.N. Savkin // International Journal of Fatigue (UK). - 2016. - Vol. 82, Part 3. - P. 667-675.

В журналах, рекомендованных ВАК:

В центральной печати:

1. Савкин, А.Н. Анализ перспективных материалов в конструкциях легковых автомобилей / А.Н. Савкин, А.В. Андроник, А.И. Горунов, А.А. Седов // Автомобильная промышленность. - 2015. - № 3. - С. 31-36.

2. Савкин, А.Н. Анализ перспективных материалов в конструкциях легковых автомобилей (Окончание) / А.Н. Савкин, А.В. Андроник, А.И. Горунов, А.А. Седов // Автомобильная промышленность. - 2015. - № 4. - С. 35-38.

3. Савкин, А.Н. Анализ усталостного ресурса конструктивных элементов автомобиля при использовании различных материалов и случайном нагружении / А.Н. Савкин, А.С. Горобцов, А.В. Андроник, А.А. Седов // Вестник машиностроения. - 2013. - № 4. - С. 3-7.

4. Савкин, А.Н. Компьютерное моделирование и расчёт транспортных конструкций в различных программных комплексах / А.Н. Савкин, А.В. Андроник, А.А. Седов // Справочник. Инженерный журнал. - 2013. - № 2. - С. 32-36.

5. Савкин, А.Н. Компьютерное моделирование усталостного разрушения верхнего рычага подвески автомобиля-внедорожника / А.Н. Савкин, А.С. Горобцов, А.В. Андроник, А.А. Седов // Автомобильная промышленность. - 2013. - № 2. - С. 12-14.

6. Савкин, А.Н. Моделирование и расчёт статического нагружения силовых элементов транспортного средства / А.Н. Савкин, А.В. Андроник, А.А. Седов // Тяжёлое машиностроение. - 2014. - № 6. - С. 31-34.

7. Савкин, А.Н. О применении подходов непрерывной повреждаемости и распространения трещины в оценке усталостной долговечности конструктивных элементов транспортных средств / А.Н. Савкин, А.В. Андроник, М.А. Суханов // Наука и техника транспорта. - 2015. - № 1. - С. 86-94.

8. Савкин, А.Н. Оценка долговечности материала конструктивного элемента / А.Н. Савкин, А.С. Горобцов, А.А. Седов, А.В. Андроник // Главный механик. - 2015. - № 2. - С. 38-47.

9. Савкин, А.Н. Оценка предела усталости элементов подвески автомобиля в программе SolidWorks / А.Н. Савкин, А.В. Андроник, М.А. Суханов // Вестник машиностроения. - 2014. - № 12. - С. 47-49 + 4-я стр. обл.

10. Савкин, А.Н. Оценка прочности и усталостной долговечности конструктивных элементов автомобиля / А.Н. Савкин, А.С. Горобцов, А.В. Андроник // САПР и графика. - 2012. - № 8. - С. 93-96.

11. Савкин А.Н. Методика определения коэффициентов уравнения скорости роста трещины при циклическом нагружении / А.Н. Савкин, А.В. Андроник, Р. Корадди // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. - 2016. – Т. 82, № 1. - С. 57-63.

В известиях ВолгГТУ:

1. Савкин, А.Н. Анализ продолжительности роста усталостных трещин низколегированной стали при различном характере внешнего блочного и случайного нагружения / А.Н. Савкин, А.В. Андроник, К.А. Бадиков // Известия ВолгГТУ. Сер. Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении. Вып. 10. - Волгоград, 2014. - № 23 (150). - С. 67-72.

2. Савкин, А.Н. Анализ эксплуатационной нагруженности рамы грузового автомобиля большой грузоподъемности / А.Н. Савкин, А.С. Горобцов, А.В. Андроник, А.А. Седов, К.А. Бадиков // Известия ВолгГТУ. Сер. Наземные транспортные системы. Вып. 11. - Волгоград, 2015. - № 5 (165). - С. 25-29.

3. Савкин, А.Н. Использование фотометрического анализа для изучения закрытия трещины при переменном нагружении / А.Н. Савкин, А.В. Андроник, Р. Абиляш, К.А. Бадиков // Известия ВолгГТУ. Сер. Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении. - Волгоград, 2015. - № 5 (160). - С. 106-112.

4. Савкин, А.Н. Кинетика роста усталостных трещин при блочном нагружении и эффекты взаимодействия переменных амплитуд напряжений в низколегированной стали / А.Н. Савкин, А.В. Андроник, К.А. Бадиков, Е.С. Леготин, Д.С. Рыльцов // Известия ВолгГТУ. Сер. Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении. - Волгоград, 2015. - № 8 (168). - С. 80-85.

5. Савкин, А.Н. Оценка долговечности материала конструкционного элемента автомобиля при случайном нагружении / А.Н. Савкин, А.А. Седов, А.В. Андроник, К.А. Бадиков // Известия ВолгГТУ. Сер. Наземные транспортные системы. Вып. 10: межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. - Волгоград, 2015. - № 4 (162). - С. 55-61.

6. Савкин, А.Н. Оценка долговечности стали при случайном нагружении по феноменологическим моделям повреждаемости / А.Н. Савкин, А.А. Седов, А.В. Андроник // Известия ВолгГТУ. Серия "Наземные транспортные

системы". Вып. 7: межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. - Волгоград, 2013. - № 21 (124). - С. 38-41.

7. Савкин, А.Н. Оценка характеристик усталостной прочности передней подвески грузового автомобиля / А.Н. Савкин, А.В. Андроник, Р. Сундер // Известия ВолгГТУ. Сер. Наземные транспортные системы. Вып. 10: межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. - Волгоград, 2015. - № 4 (162). - С. 50-54.

8. Савкин, А.Н. Прогнозирование долговечности конструктивных элементов в среде SolidWorks / А.Н. Савкин, А.В. Андроник, М.А. Суханов // Известия ВолгГТУ. Серия "Наземные транспортные системы". Вып. 8: межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. - Волгоград, 2014. - № 3 (130). - С. 41-44.

9. Савкин, А.Н. Прогнозирование долговечности стали при моделировании случайного внешнего воздействия / А.Н. Савкин, А.А. Седов, А.В. Андроник // Известия ВолгГТУ. Сер. Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении. - Волгоград, 2015. - № 5 (160). - С. 113-118.

10. Савкин, А.Н. Стандартные спектры нагружения для различных технических объектов / А.Н. Савкин, А.А. Седов, А.В. Сирوماхин, А.В. Андроник // Изв. ВолгГТУ. Серия "Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении". Вып. 5: межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. - Волгоград, 2011. - № 5. - С. 99-105.

11. Савкин, А.Н. Формирование спектра случайного нагружения для оценки поврежденности и долговечности материала конструктивного элемента / А.Н. Савкин, А.С. Горбцов, А.А. Седов, А.В. Андроник // Известия ВолгГТУ. Серия "Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении". Вып. 7: межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. - Волгоград, 2013. - № 6 (109). - С. 60-63.

Личный вклад автора

Все выносимые на защиту научные и практические результаты получены автором лично или в соавторстве. Соискателем Андроником А.В. лично предложены методики проведения экспериментов и обработки их результатов, выполнены испытания образцов, разработаны программы обработки результатов, проведена оценка усталостной долговечности образцов с трещиной из алюминиевого сплава и малоуглеродистой стали при регулярном нагружении, нагружениях с перегрузками различной последовательности и нагружениях спектрами. Также выполнены фрактографический анализ и энергодисперсионная рентгеновская спектроскопия поверхностей разрушения некоторых образцов, а также фотометрический анализ закрытия трещины нескольких испытаний.