

*На правах рукописи*

*Багф*

**Бадиков Кирилл Андреевич**

**ОЦЕНКА И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РОСТА УСТАЛОСТНОЙ ТРЕЩИНЫ В  
АЛЮМИНИЕВОМ СПЛАВЕ И КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЯХ ПРИ  
НЕРЕГУЛЯРНОМ НАГРУЖЕНИИ**

01.02.04 – Механика деформированного твердого тела

**АВТОРЕФЕРАТ**

**диссертации на соискание ученой степени**

**кандидата технических наук**

Волгоград – 2019

Работа выполнена на кафедре «Соппротивление материалов» в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Волгоградский государственный технический университет».

Научный руководитель

**Савкин Алексей Николаевич**

доктор технических наук, доцент.

Официальные оппоненты:

**Панин Сергей Викторович**

доктор технических наук, профессор,  
заместитель директора по научной работе  
Федерального государственного  
бюджетного учреждения науки Институт  
физики прочности и материаловедения  
Сибирского отделения Российской  
академии наук (ИФПМ СО РАН), г. Томск;

**Ильин Алексей Витальевич**

доктор технических наук, доцент,  
заместитель генерального директора –  
начальник НПК-3, НИЦ «Курчатовский  
институт» - ЦНИИ КМ «Прометей»,  
г. Санкт-Петербург.

Ведущая организация

АО ГНЦ РФ «НПО «Центральный научно-  
исследовательский институт технологии  
машиностроения» (АО «НПО  
«ЦНИИТМАШ»), г. Москва.

Защита состоится «21» мая 2020 г. в 14 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 002.075.01, созданного на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт проблем машиноведения Российской Академии наук (ИПМаш РАН) по адресу: 199178, Санкт-Петербург, Васильевский остров, Большой проспект, д. 61, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в ОНТИ ИПМаш РАН и на сайте института по адресу <http://www.ipme.ru/>.

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2020 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
д.т.н., профессор

Дубаренко Владимир Васильевич

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность работы

Современные ответственные конструкции в областях ракетно-, авиа-, судостроения, наземных транспортных систем гражданского и военного назначения чаще всего испытывают переменные нагрузки регулярного и особенно опасно нерегулярного случайного характера, отягощенные перегрузками разного уровня. Это инициирует разработку моделей оценки ресурсных возможностей наиболее используемых конструкционных материалов, в частности алюминиевых, титановых, стальных и других сплавов специального назначения. При этом большое значение в инженеростроении приобретают удобные для анализа ситуаций нерегулярного нагружения модели развития трещин именно с учетом параметров нерегулярности и случайного нагружения.

Кинетика развития трещин существенно зависит от взаимодействия последовательности нагрузок (амплитуд) переменного нагружения. Так перегрузочные режимы способствуют замедлению роста трещины, недогрузочные режимы могут ее увеличивать. Режимы перегрузка-недогрузка и недогрузка-перегрузка также влияют на кинетику роста трещин. Случайное внешнее нагружение содержит все эти элементы и поэтому возникает необходимость исследования кинетики роста трещины с приложением внешней нагрузки в виде спектров для различных технических объектов, соответствующих эксплуатационным условиям. Последовательность циклов случайного нагружения отличаются асимметрией и амплитудой, данные особенности затрудняют разработку обобщенного метода определения продолжительности роста усталостных трещин, учитывающего характер нагружения. Это вызывает необходимость расширения научно-исследовательских работ по изучению трещиностойкости металлов и сплавов, формированию моделей разрушения.

Таким образом, актуальной задачей является развитие методов прогнозирования ресурса объекта при регулярном и нерегулярном нагружениях с учетом воздействия на процесс роста трещины разной величины асимметрии, амплитуды и характера переменного нагружения, и взаимодействия последовательности нагрузок при случайном нагружении.

**Цель работы:** разработка моделей прогнозирования продолжительности роста усталостной трещины в алюминиевых и стальных материалах с учетом воздействия на процесс роста трещины разной величины асимметрии, последовательности нагружения, характера переменного нагружения и окружающей среды.

### **Задачи исследования:**

1) Провести серию экспериментальных исследований усталостных характеристик трещиностойкости алюминиевых и стальных конструкционных материалов при различных видах переменного нагружения.

2) На основе известного критерия нерегулярности (полноты), использующего параметры кривой выносливости при стационарном циклическом нагружении, разработать его модификацию с включением наклона среднего участка кривой Пэриса и нормированных амплитуд нагружения, более полно учитывающих характер нагружения.

3) С учетом предложенного критерия нерегулярности нагружения сформировать полуфеноменологическую модель оценки роста трещин и более сложную по структуре модель на основе поциклового метода расчета.

4) Определить эффект области их применения для разных материалов, видах и характере переменного нагружения.

5) Провести эксперименты по исследованию влияния на параметры кинетической диаграммы усталостного разрушения (КДУР) при широкой вариации материалов, характера переменного нагружения, силовых параметров, режимов недо- и перегрузки и других эффектов динамики роста трещины с анализом возможности обобщенных КДУР.

6) Разработать модель для оценки кинетики роста усталостных трещин на всех участках КДУР в том числе в околопороговой области роста трещины с учетом локальных напряжений в устье трещины и изменением порогового значения коэффициента интенсивности напряжений (КИН) в процессе циклического нагружения с учетом влияния окружающей среды на основе водородного окрупчивания материала.

7) Провести оценку продолжительности роста усталостных трещин по разработанным моделями и полученным экспериментальным данным на различных конструкционных материалах, видах и характере переменного нагружения.

Методы исследований и используемая аппаратура

Исследования усталостных характеристик материалов проводились на современной сервогидравлической машине Biss Nano 25 kN на компактных образцах с использованием специализированной программы MTL, осуществляющей управление по нагрузке. Анализ экспериментальных результатов проводился апробированными в прикладной математике численными методами с помощью различных компьютерных программ.

### **Научная новизна**

Новыми являются следующие основные результаты:

1) Разработана методика оценки сложного переменного нагружения через модифицированную меру нерегулярности, которая учитывает параметры кривой КДУР материала.

2) Введен эффективный КИН на основе предложенной меры нерегулярности и эффекта закрытия трещины, которые позволяют свести полученные КДУР при переменном нагружении на одну кривую, характерную для регулярного нагружения.

3) Разработаны две новые полуфеноменологические модели прогнозирования кинетики роста усталостных трещин: для экспресс-анализа на среднем участке КДУР на основе принципа эквивалентности нерегулярного нагружения регулярному, а также на основании поциклового расчета на всей длине роста трещины.

4) Введены аналитические зависимости для оценки изменения порогового значения КИН для разных материалов в зависимости от остаточных локальных напряжений в устье усталостной трещины, на основе которых разработана новая модель для оценки кинетики роста трещины на всех участках КДУР с учетом последовательности нагрузок.

5) Предложена и апробирована новая численно-аналитическая методика расчета напряжений в окрестности вершины трещины, которая позволяет более точно учитывать последовательность нагрузок. В основе данной методики лежит вариант теории пластичности, рассматривающий комбинированное изотропно-трансляционное упрочнение и линейное правило определения деформации в окрестности трещины.

6) Проведен сравнительный анализ предложенных моделей, позволяющий выявить эффективность использования модели, учитывающей последовательность нагрузок в околопороговой области нагружения.

#### **Практическая значимость работы**

1) Использование предложенной полуфеноменологической модели по определению продолжительности роста трещин на основании эквивалентности нерегулярного нагружения регулярному с использованием меры нерегулярности для оценки характера нагружения позволяет сократить трудоемкость получения расчетных результатов роста усталостных трещин.

2) Для поциклового расчета по определению кинетики роста усталостной трещины при нагружении переменной последовательностью с учетом характера нагружения и закрытия трещины показана возможность для различных материалов на основании критериальных параметров КДУР без учета эффекта последовательности нагрузок проводить оценку продолжительности роста трещины в первую очередь для различных видов квазислучайного нагружения.

3) Разработанная новая модель, с учетом последовательности нагрузок циклического нагружения, определяемого изменением порогового значения КИН с учетом локальных напряжений в устье трещины, позволяет определять продолжительность роста усталостной трещины на всех трех участках КДУР. В том числе и в околопороговой области с оценкой кинетики роста трещины от дефектов малого размера на основании влияния окружающей среды (водородного охрупчивания) материала в устье трещины.

4) Предложенные модели роста усталостных трещин могут быть использованы для разработки дальнейших теоретических методов оценки развития трещин при различных типах нерегулярного нагружения, в том числе и спектральных для более широкого спектра конструкционных материалов.

#### **Апробация работы**

Основные положения и результаты исследований, представленные в диссертационной работе, докладывались и обсуждались на: IX Всероссийская конференция по испытаниям и исследованиям свойств материалов «ТестМат», ВИАМ, г. Москва, 2017; VII Международная конференция «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов, ИМЕТ РАН, г. Москва, 2017; XII Международная конференция «Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций» (г. Екатеринбург, 21-25 мая 2018 г.); VI Международная научно-практическая конференция «Прогресс транспортных средств и систем – 2018» (г. Волгоград, 9-11 октября 2018 г); First Structural Integrity Conference and Exhibition (4-6th July 2016, Bengaluru, India); Second International Conference & Exhibition (27-27th July 2018, Hyderabad, India); Международная научно-техническая конференция «Пром-Инжиниринг» (15-18 мая 2018, г. Москва).

## Публикации

По теме диссертации опубликовано 39 работ, включая 15 статей в журналах, рекомендованных ВАК России, 8 статей в зарубежных журналах перечня Scopus, 6 статей перечня Web of Science, 7 свидетельств о государственной регистрации программ, 15 статей из сборников материалов конференций, 6 тезисов конференций.

## Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, 4 разделов, выводов, списка использованных источников и приложения. Список использованных источников составляет 155 наименований. Общий объем диссертации составляет 182 страницы, в том числе основного текста диссертации 163 страницы. Всего в работе 82 иллюстрации и 10 таблиц.

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 Сундеру Р. за оказанную помощь в выборе методик исследования и интерпретировании результатов экспериментов.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулирована цель исследований, приведено краткое содержание работы.

**В первой главе**, выполнен анализ литературных источников с целью определения существующих подходов к оценке усталостного повреждения металлов. Рассмотрено значение полной кривой усталости в анализе накопления повреждаемости, зарождения и роста трещин в материалах, а также показана стадийность распространения усталостных трещин при малоцикловой и многоцикловой усталости в координатах напряжение  $\sigma$  – количество циклов  $N$ .

Рассматриваются получившие широкое распространение зависимости скорости роста усталостных трещин  $a$  от размаха коэффициента интенсивности напряжений  $\Delta K$ , именуемые кинетическими диаграммами усталостного разрушения (КДУР). Показаны участки данной диаграммы, основные характеристики трещиностойкости для каждого участка. Приведены факторы, влияющие на рост усталостной трещины. Оценено влияние асимметрии нагружения  $R$  на данный процесс и показан подход учета явления закрытия трещины при анализе напряженно-деформационного состояния тел с трещинами, согласно исследованиям В. Эльбера и Я. Схайве, с использованием эффективного значения коэффициента интенсивности напряжений  $\Delta K_{\text{эфф}}$  для алюминиевого сплава AL 2024-T3 с учетом коэффициента закрытия трещины  $U$ . Также показано применение данного подхода для сталей по исследованиям О.В. Емельянова.

Проведен обзор некоторых классических моделей роста усталостных трещин, в виду их большого разнообразия, при постоянной и переменной последовательностях нагрузок, и приведен анализ специализированных коммерческих программных продуктов по оценке трещиностойкости материалов и их функциональные возможности. Традиционно модели роста усталостной трещины при нагружении переменной последовательностью нагрузок

классифицируют следующим образом: 1) модели закрытия трещины; 3) статистические модели; 3) модели пластичности около вершины трещины. Эти модели получили развитие в трудах Гриффитса А.А., Ирвина Д.Р., Ньюмэна Д., Орована Е.О., Партона В.З., Схайве Я., Элбера В., Писаренко Г.С., Уилленборга Д., Уилера О.Е., Матвиенко Ю.Г., Морозова Е.М., Панасюка В.В., Трощенко В.Т., Черепанова Г.П. и других отечественных и зарубежных ученых.

На основании проведенного литературного обзора поставлена цель работы и сформулированы задачи исследования.

**Во второй главе** обоснован выбор материалов для исследования. В качестве исследуемых материалов были выбраны стали AISI 4030, 09Г2, 40 и 40Х, а также алюминиевый сплав AL 2024-T3. Данные марки сталей активно используются в машиностроении и имеют различные механические характеристики. Алюминиевый сплав применяется в самолетостроении и аэрокосмической технике. Испытания на трещиностойкость проводили на сервогидравлической машине BISS Nano 25 kN (рис. 1а) при комнатной температуре и постоянной частоте нагружения в пределах 5-15 Гц с помощью управляющего и регистрирующего пакета программ MTL, в котором были учтены параметры режимов нагружения и справочные значения характеристик материала. Рост трещины в зависимости от числа циклов контролировался и регистрировался датчиком раскрытия трещины BISS Bi-06-201 (рис. 1б). Методика испытаний соответствовала требованиям стандарта ASTM E 647-08. При исследовании были использованы компактные образцы типа С(Т) с краевой трещиной.

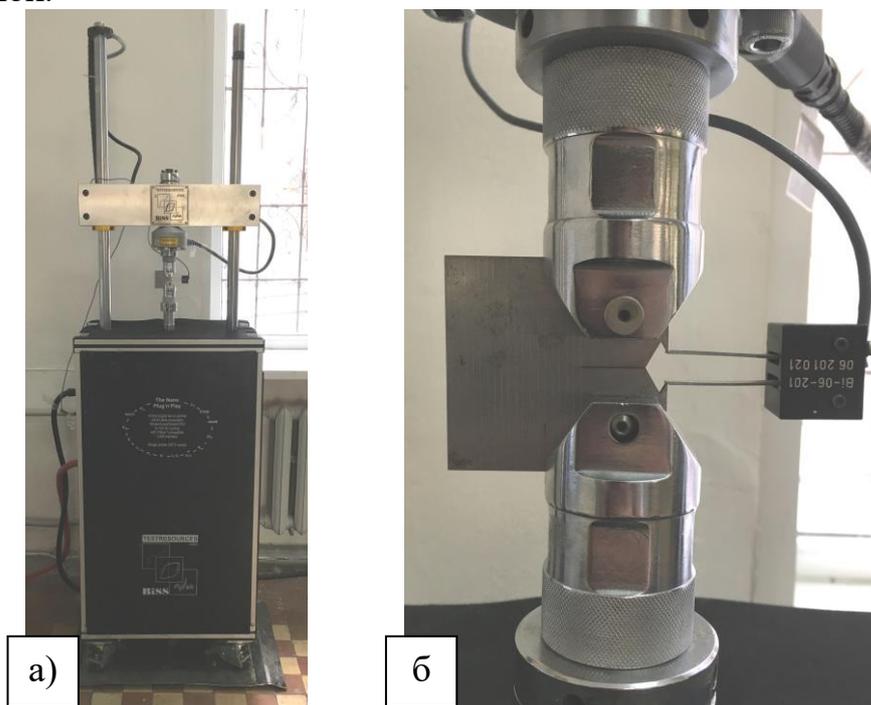


Рис. 1 – Сервогидравлическая испытательная машина Biss Nano 25 kN (а); захваты для крепления образца и датчик раскрытия трещины (б)

Проводится описание используемых в работе типов нагружения. Были использовано регулярное нагружение с различной асимметрией и максимальных значением  $P_{\max}$  и нерегулярное нагружение, которое представлено следующими типами: блочное нагружение; квазислучайное нагружение; регулярное с

возмущающими недогрузочными или перегрузочными воздействиями с постоянным или переменным значением  $P_{\max}$ . Последовательности нагрузений были сформированы с различными асимметриями блоков  $R$  и разными величинами максимальной нагрузки  $P_{\max}$  для изучения влияния силовых параметров на кинетику роста трещин. Для испытаний при спектральном нагружении были сформированы спектры квазислучайного характера на основании стандартных спектров нагружения, характерных для переменного нагружения различных конструктивных элементов, например такие как: MiniFalstaff (MFS) – нагрузки фюзеляжа боевого самолета; MiniTwist (MTW) – крыла транспортного самолета; Saetrans – трансмиссии транспортного средства и т.д. Примеры нагружений в нормированных значениях показаны на рис. 2.

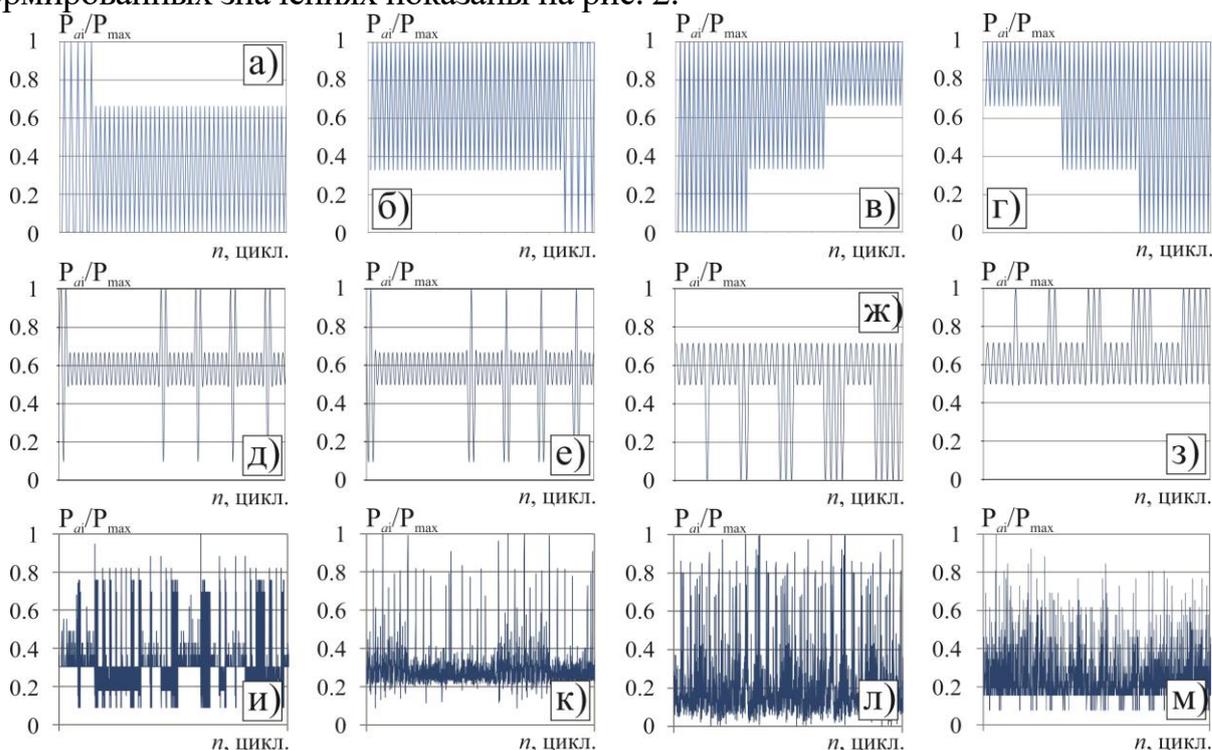


Рис. 2 – Примеры используемых типов нагружений: блочное нагружение (а-г); регулярное с перегрузками и недогрузками (д-ж); с перегрузками (з); выборка из нормированных спектров нагружения (и-м)

**В третьей главе** рассматривается экспериментальное исследование влияния взаимодействия последовательности нагрузок для различных материалов на продолжительность роста трещин при разных типах нагружений. Оценивать различия нерегулярного нагружения предлагается с использованием модифицированной меры нерегулярности блока программного нагружения  $V$ :

$$V = \left[ \frac{1}{v_b} \left[ \sum_{i=1}^{v_b} v_{ai} \left( \frac{\Delta P_{ai}}{P_{\max}} \right)^n \right] \right]^{\frac{1}{n}} \quad (1)$$

где  $v_b$ ,  $v_{ai}$  – продолжительность используемой выборки и блока переменного нагружения с нагрузкой  $\Delta P_{ai}$ ;  $\Delta P_{ai} / P_{\max}$  – нормированная  $i$ -ая амплитуда нагружения,  $n$  – коэффициент наклона кривой Пэриса в координатах  $(da/dN-\Delta K)$  при регулярном нагружении. Учитывая, что значения  $n$  для разных материалов и

видов нагружения могут принимать различные величины, он был принят постоянным, равным среднему значению для исследуемых сталей  $n=3.5$ , а для алюминиевого сплава  $n=3.35$ .

Была рассмотрена возможность использования меры нерегулярности для оценки продолжительности роста усталостной трещины на среднем участке кривой Пэриса. Взаимосвязь этого критерия с продолжительностью роста усталостной трещины для алюминиевого сплава и сталей показана на рис. 3, где  $N_3$  – экспериментальная продолжительность роста усталостной трещины;  $N_{CAL}$  – продолжительность трещины при регулярном нагружении, соответствующая по силовым параметрам нерегулярному нагружению.

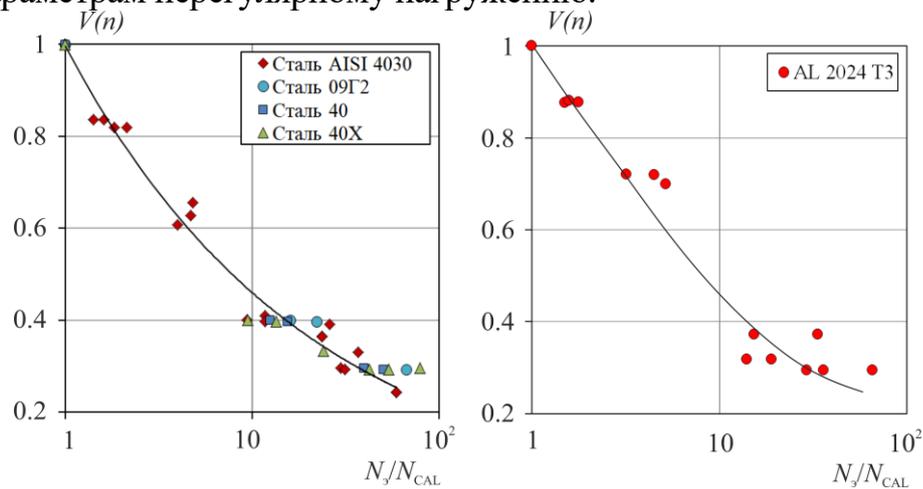
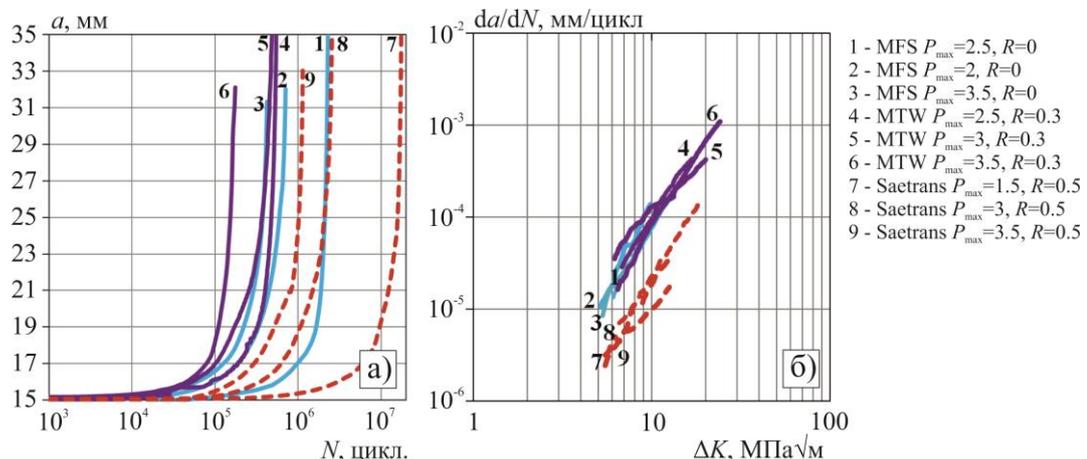


Рис. 3 – Оценка относительной долговечности роста трещины по критерию  $V(n)$  блоков и спектров нагружения для сталей и алюминиевого сплава

Описание взаимосвязи кинетики роста трещин и характера случайного нагружения, определяемого мерой нерегулярности  $V$ , показывает, что эту связь можно описать одинаковой степенной функцией в полулогарифмических координатах.

Большинство экспериментов в настоящей работе были выполнены с целью построения кривых роста трещины, кинетической диаграммы усталостного разрушения и определения долговечности образцов. Показано сравнение экспериментальных кривых роста и кинетических диаграмм усталостного разрушения при описанных выше историях нагружений для различных материалов. Примеры данных кривых показаны на рис. 4.



- 1 - MFS  $P_{max}=2.5, R=0$
- 2 - MFS  $P_{max}=2, R=0$
- 3 - MFS  $P_{max}=3.5, R=0$
- 4 - MTW  $P_{max}=2.5, R=0.3$
- 5 - MTW  $P_{max}=3, R=0.3$
- 6 - MTW  $P_{max}=3.5, R=0.3$
- 7 - Saetrans  $P_{max}=1.5, R=0.5$
- 8 - Saetrans  $P_{max}=3, R=0.5$
- 9 - Saetrans  $P_{max}=3.5, R=0.5$

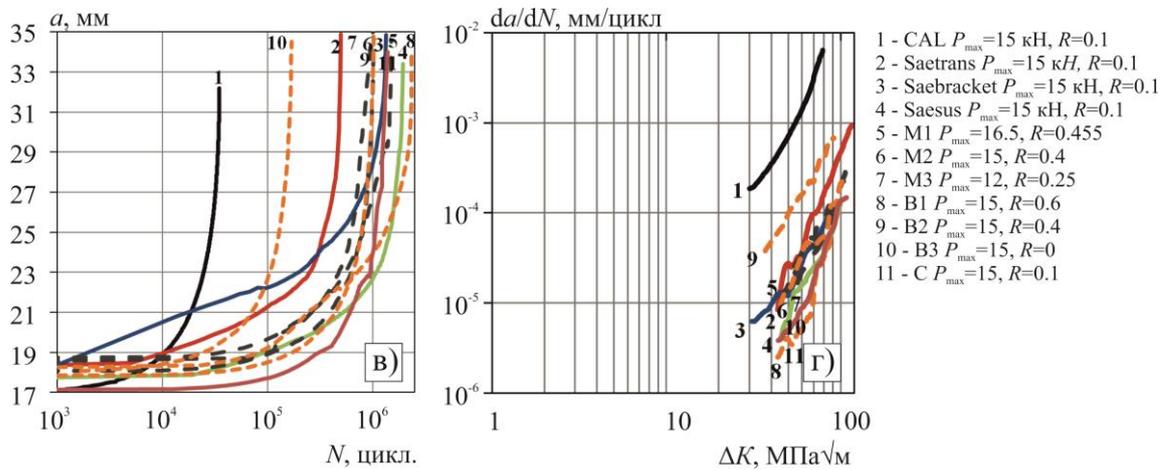


Рис. 4. – Экспериментальные кривые роста трещин и КДУР для испытаний с алюминиевым сплавом AL 2024-T3 (а, б) и сталью AISI 4030 (в, г)

Для верификации полученных кинетических диаграмм усталостного разрушения для некоторых образцов был проведен фрактографический анализ поверхностей разрушения на базе микроскопа Versa 3D DualBeam, позволивший оценить скорость роста трещин по маркирующим признакам.

На основе полученных данных фрактографии было проанализировано воздействие возмущающего характера при переменной перегрузке за блок нагружения (рис. 2з) на скорость роста трещины на примере алюминиевого сплава AL 2024-T3, которое показано на рис. 5а.

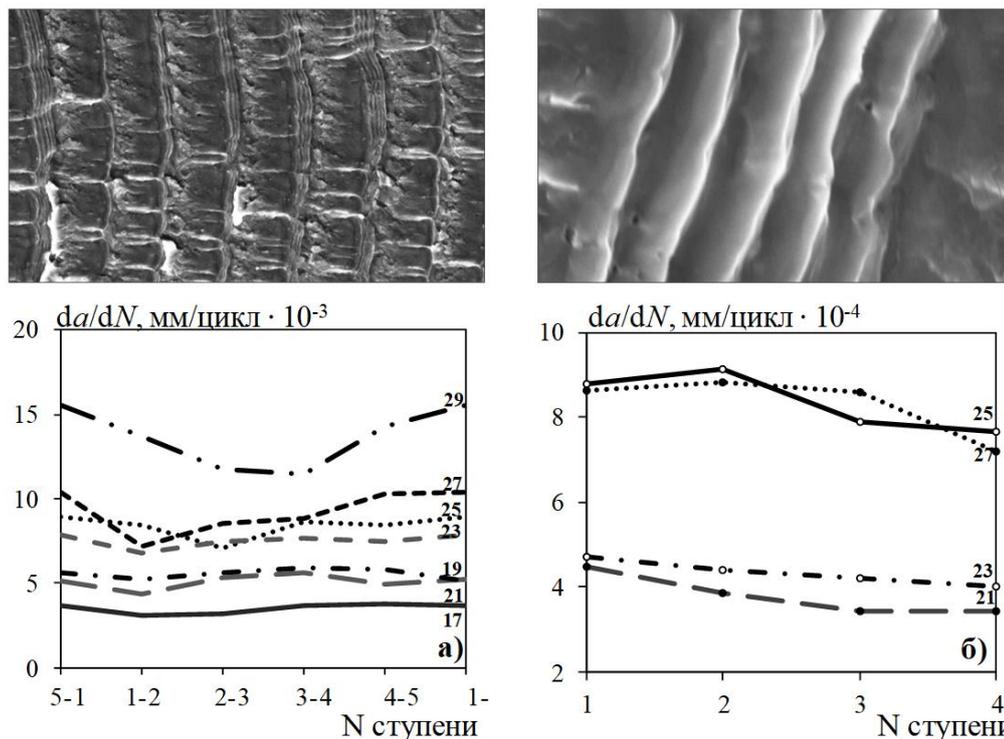


Рис. 5 – Изменение скорости роста трещины за блок (а) и цикл (б) нагружения при различных величинах трещины в блоке с переменной перегрузкой от 1 до 5

После последовательной перегрузки 5х, наблюдается постепенное снижение локальной скорости роста трещины (рис. 5а). Интенсивность ее снижения зависит от интегральной величины скорости трещины. При малых значениях трещины 17-23 мм это снижение незначительно и заканчивается на 2-3 перегрузке (наблюдается колебательный процесс). При более развитой усталостной трещине 25-29 мм уменьшение ее скорости более значительно, но в конце блока нагружения интегральная скорость роста пересиливает возмущающие воздействия, и скорость становится близкой к интегральной. После перегрузки 5х процесс повторяется.

Также было проведено исследование последовательной перегрузки 5х (рис. 2з) на скорость роста трещины за цикл (рис. 5б). По мере увеличения количества перегрузок скорость роста трещины постоянно уменьшается и после окончания последней перегрузки сохраняет эту тенденцию. Можно предположить, что пластическая зона в устье трещины при перегрузке 5х более значительна, чем после 1х-3х перегрузок и требуется больше энергии на ее преодоление.

В данной главе рассматривается учет явления «закрытия» трещины, имеющем место при асимметриях цикла  $R$  менее 0.6-0.7, и снижающем скорость роста трещины за счет уменьшения размаха  $\Delta K$ . Для полученных экспериментальных данных вводится коэффициент закрытия трещины  $U$ , предложенный Я. Схайве, описывающий закрытие трещины с асимметрией  $0.1 \leq R \leq 0.7$  на алюминиевом сплаве AL 2024-T3 и определяемый по формуле 3:

$$U = 0.55 + 0.33 \cdot R + 0.12 \cdot R^2 \quad (3)$$

Для сталей используется выражение (4) экспериментально определенное Емельяновым О.В.:

$$U = 0.568 + 0.157 \cdot R + 0.531 \cdot R^2 - 0.427 \cdot R^3 - 2.583 \cdot R^4 + 6.154 \cdot R^5 - 3.13 \cdot R^6 \quad (4)$$

В работе вводится эффективный размах коэффициента интенсивности напряжений в устье трещины при нерегулярном нагружении в следующем виде:

$$\Delta K_{\text{эфф}} = K \cdot U \cdot V \quad (5)$$

Учитывается влияние «закрытия» трещины через асимметрию цикла нагружения  $R$ , а также характер переменного нагружения через меру нерегулярности  $V(1)$ .

Было проведено перестроение кривых КДУР с учетом эффективного КИН  $\Delta K_{\text{эфф}}$  (5). Кривые КДУР при различных силовых параметрах стремятся сгруппироваться на одну кривую. Результат такого подхода показан на рис. 6, где совмещены кривые КДУР для всех проведенных исследований. Он свидетельствует о том, что параметр  $\Delta K_{\text{эфф}}$  однозначно может описывать влияние различных силовых параметров, характер нагружения и закрытие трещины на интенсивность напряжений в устье растущей усталостной трещины.

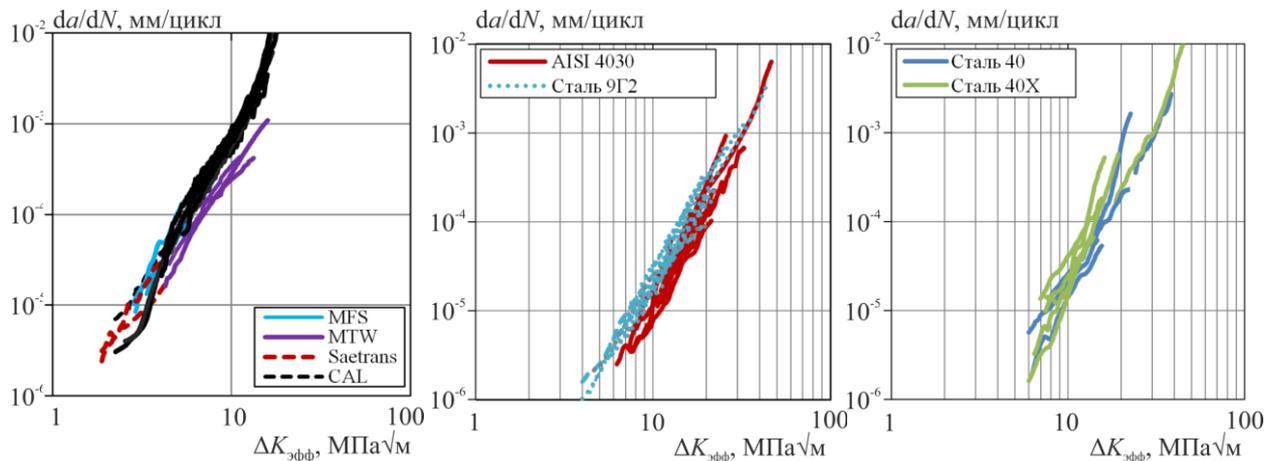


Рис. 6 – Обобщенные кривые КДУР с учетом  $\Delta K_{эфф}$  для AL 2024-T3 и сталей AISI 4030, 09Г2, 40, 40X при регулярном и нерегулярном нагружении

В четвертой главе производится оценка расчетных и экспериментальных данных при регулярном нагружении с возмущающими перегрузочными и недогрузочными воздействиями постоянного или переменного количества на алюминиевом сплаве AL 2024-T3 и блочного нагружения на стали AISI 4030 по моделям программного комплекса NASGRO и их сравнением с экспериментальными результатами. Была выявлена нечувствительность использованных моделей NASGRO к последовательностям с недогрузочными режимами нагружения, поэтому возникает необходимость в разработке модели, которая позволяла бы прогнозировать продолжительность роста усталостных трещин с учетом типа нагружения и последовательности нагрузок, в том числе как регулярного, так и нерегулярного, представленных блочным и квазислучайным нагружениями.

Дальнейшая часть главы посвящена описанию разработанных методов прогнозирования усталостных трещин. Первый метод по оценке продолжительности роста трещины был получен на основании принципа эквивалентности. Он базируется на предложении рассматривать кинетику роста трещины при переменном нагружении на основании ее роста при регулярном нагружении  $N_{CAL}$ . При этом учитывается характер переменного нагружения через меру нерегулярности  $V$ . Продолжительность роста трещин  $N_{VAL}$  по данному подходу предлагается описывать формулой:

$$N_{VAL} = N_{CAL} \cdot Q, \text{ где } Q = 10^{(1+Algn) \cdot (1-V)}, \quad (6)$$

где  $A$  – нормирующий параметр зависящий от марки материала и определяемый минимум по двум испытаниям при блочном нагружении,  $Q$  – коэффициент увеличения продолжительности роста усталостной трещины при спектральном нагружении по сравнению с регулярным циклическом нагружении с теми же силовыми параметрами  $P_{max}$  и  $R$ ;  $n$  – коэффициент наклона среднего участка КДУР при регулярном нагружении. Для алюминиевого сплава было принято  $A=1.8$ , а для сталей – 2.

На рис. 7 показана зависимость в двойных логарифмических координатах экспериментальной продолжительности роста трещины  $N_{Э}$  от расчетной, определенной по принципу эквивалентности  $N_{VAL}$  для алюминиевого сплава AL

2024-T3 (а) и сталей (б). Для оценки полученных результатов был определен коэффициент корреляции  $r$ , который показан на рисунке.

При известных входящих в уравнение (6) данных использование меры нерегулярности  $V$  при прогнозировании роста трещины позволяет получить достоверные значения продолжительности роста усталостной трещины.

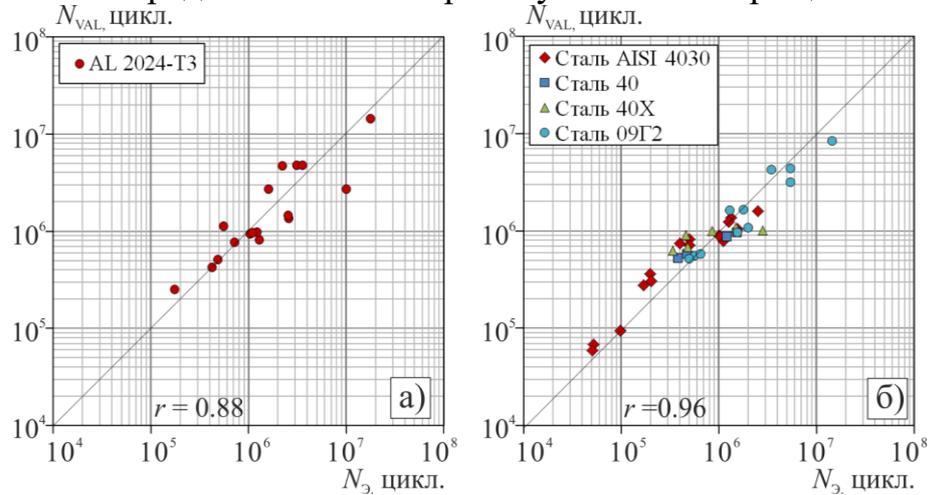


Рис. 7 – Расчет продолжительности роста трещины по принципу эквивалентности

В работе разработан также альтернативный подход по оценке продолжительности роста трещины базирующийся на поцикловом методе расчета с учетом эффективного размаха КИН (5):

$$N_{ц} = \int_{a_0}^{a_{кр}} \frac{1}{C \Delta K_{эфф}^n} da, \quad (7)$$

где  $a_0, a_{кр}$  – начальная и критическая длина трещины.

Метод основан на уравнениях Пэриса (8) и Формана-Мэтту (9). Уравнение (8) описывает КДУР на всех трех участках изменения скоростей роста усталостной трещины. Величины коэффициента  $p$ ,  $q$ , вязкости разрушения  $K_c$ , порогового значения  $\Delta K_{th}$  приняты постоянными в зависимости от свойств материала:

$$\frac{da}{dN} = C \Delta K_{эфф}^n, \quad (8)$$

$$\frac{da}{dN} = C \Delta K_{эфф}^n \cdot \left(1 - \frac{\Delta K_{th}}{\Delta K_{эфф}}\right)^p / \left(1 - \frac{K_{max}}{K_c}\right)^q, \quad (9)$$

Суммирование приращений длин трещин на каждом цикле или в результате каждого повторения блока последовательности нагружения позволяет определить долговечность:

$$N_f = \frac{a_f - a_0}{\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n \left(\frac{da}{dN}\right)_{ij}}, \quad (9)$$

где  $a_f$  – критическая длина трещины;  $a_0$  – начальная длина трещины;  $n$  – число циклов истории нагружения;  $m$  – число повторений блока истории нагружения;  $(da/dN)_{ij}$  – скорость роста трещины и приращение на  $i$  цикле  $j$  повторения блока истории нагружения. Для того чтобы воспользоваться поцикловым методом на базе формулы Пэриса необходимо провести несколько

испытаний (минимум 2) для определения коэффициента  $n$  и  $C$ . А по уравнению Формана-Мэтту дополнительно необходимы испытания для определения  $\Delta K_{th}$  и  $K_c$ .

Взаимосвязь экспериментальных значений продолжительности роста усталостных трещин и расчетных, полученных описанными выше методами цикл-за-цикл, показана на рис. 8 и 9 по формулам (7,8). Регулярное нагружение выделено отдельными фигурами в виде «крестиков». В диссертации приведена методика определения полученной долговечности материалов (в частности алюминиевого и стальных сплавов), используемых в двух предложенных подходах.

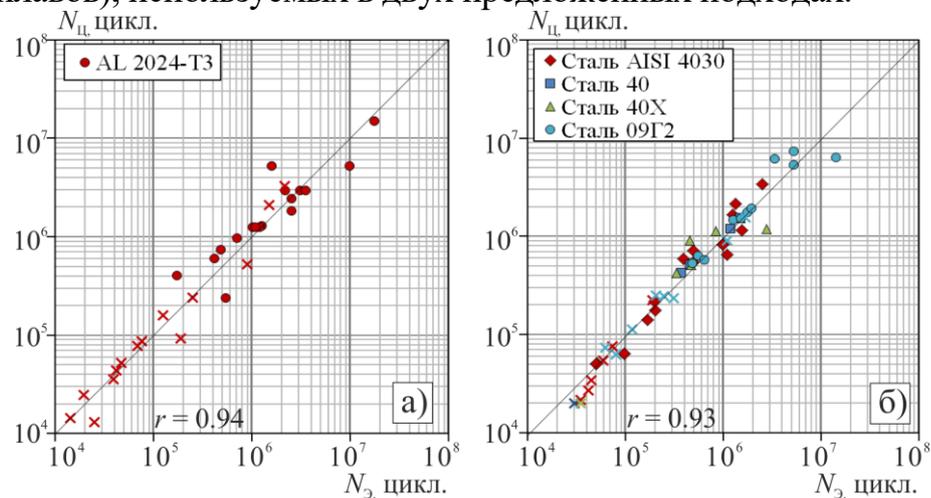


Рис. 8 – Расчет продолжительности роста трещины методом «цикл-за-цикл» по формуле Пэриса

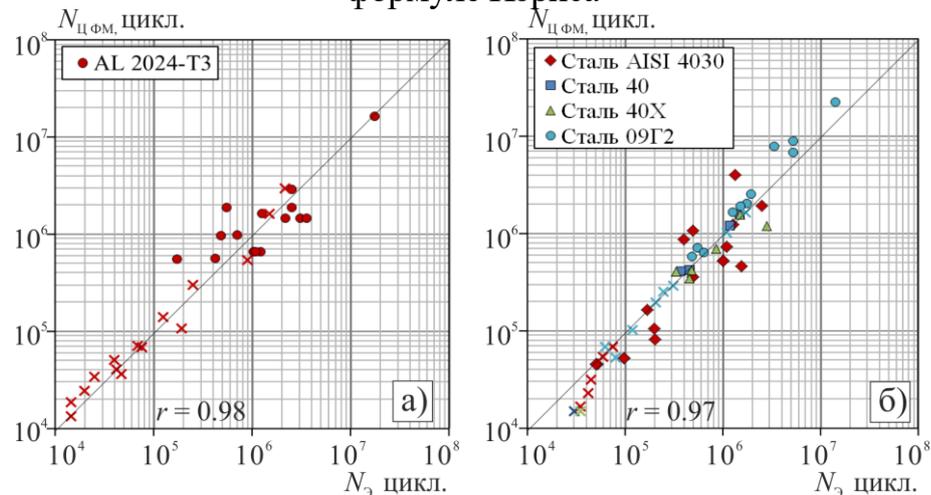


Рис. 9 – Расчет продолжительности роста трещины методом «цикл-за-цикл» по модифицированной формуле Формана-Мэтту

Полученные коэффициенты корреляции довольно высоки, что свидетельствует о том, что введение параметра  $\Delta K_{эфф}$  в данные модели однозначно может описывать влияние различных силовых параметров и характер нерегулярного нагружения на интенсивность напряжений в устье растущей усталостной трещины.

Эксперименты показали, что наибольшая погрешность получается при регулярном нагружении с возмущающими воздействиями в околороговой области роста трещины. Это требует разработки модели, вмещающей в себя как эффект закрытия трещины, так и влияние остаточных напряжений в устье трещины для учета последовательности нагрузок в истории нагружения, на что

представленные модели продолжительности роста трещин, показанные выше, неспособны. Обобщив результаты испытаний разных авторов и собственные, в том числе в глубоком вакууме и различных окружающих средах, Р. Сундер сформулировал качественную теорию хрупкого разрушения. Эта теория объясняет природу замедления трещины процессами в поверхности вблизи ее кончика, а именно поглощением активных частиц кислорода и водорода, выделяющихся в результате химических реакций атмосферной влаги и поверхности около кончика трещины с образованием оксидов и гидроксидов. Доминирующую роль в микроразрушении играет поглощенный водород, а влияние кислорода в нормальных условиях незначительно, однако присутствие кислорода в разрушенных слоях позволяет судить о присутствии водорода. Теория связала величину порогового размаха КИН  $\Delta K_{th}$  и местные напряжения вблизи вершины трещины  $r^*$ , наводимые перегрузками, и постулировала, что эффект перегрузки в околопороговом регионе скоростей роста вызывается и местными напряжениями.  $r^*$  определялся на уровне предела прочности, чтобы оценить напряжение вблизи кончика трещины. Характерное расстояние  $r^*$  является минимально возможным удалением от вершины трещины, т. к. при  $r < r^*$  местное напряжение начинает превышать местное напряжение разрушения  $\sigma > \sigma_f$ , что является естественным ограничением предлагаемой модели. На настоящий момент теория Сундера позволяет проводить расчет кинетики роста усталостной трещины при регулярном нагружении с серией перегрузок и недогрузок в различных комбинациях на алюминиевом сплаве AL 2024-T3.

Для использования этих идей была разработана новая модель кинетики роста усталостной трещины, именуемая моделью пластичности. В основе модели лежит методика расчета локальных напряжений в окрестности трещины и их экспериментально установленная связь с пороговым КИН  $\Delta K_{th} = f(\sigma^*)$ . Таким образом,  $\Delta K_{th}$  определяется на каждом цикле нагружения и зависит от последовательности приложенных нагрузок. Кинетика роста трещин при этом определяется уравнением Формана-Мэтту (8), где  $\Delta K_{th}$  пересчитывается на каждом возрастающем цикле нагружения. Расчет по этой модели проводится цикл-за-цикл, поэтому учет характера циклического нагружения  $V$  не проводился, а значение эффективного КИН определялось как  $\Delta K_{эфф}' = \Delta K_i \cdot U_i$ .

Сундером получена экспериментальная кривая взаимосвязи размаха  $\Delta K_{th}$  от местного напряжения  $\sigma^*$  для алюминиевого сплава AL 2024-T3 и различных перегрузок-недогрузок при регулярном нагружении.

Было проведено аналитическое описание этой кривой в виде полиномов второй степени с распространением данного подхода на другие конструкционные материалы. При построении этих кривых был заложен принцип их подобия, а постоянные полинома определялись на основании полученных аналогичных экспериментов для исследуемых материалов.

На рис. 10 показаны графики зависимости размаха  $\Delta K_{th}$  от местного напряжения  $\sigma^*$  на удалении от вершины трещины  $r^*$ , на примере алюминиевого сплава AL 2024-T3 (а) и стали AISI 4030 (б), которые аналитически представлены в виде системы уравнений (10) с переменными коэффициентами А, В и С. Значения

коэффициентов для остальных сталей были приняты аналогично стали AISI 4030. Эти коэффициенты показаны в таблице 1.

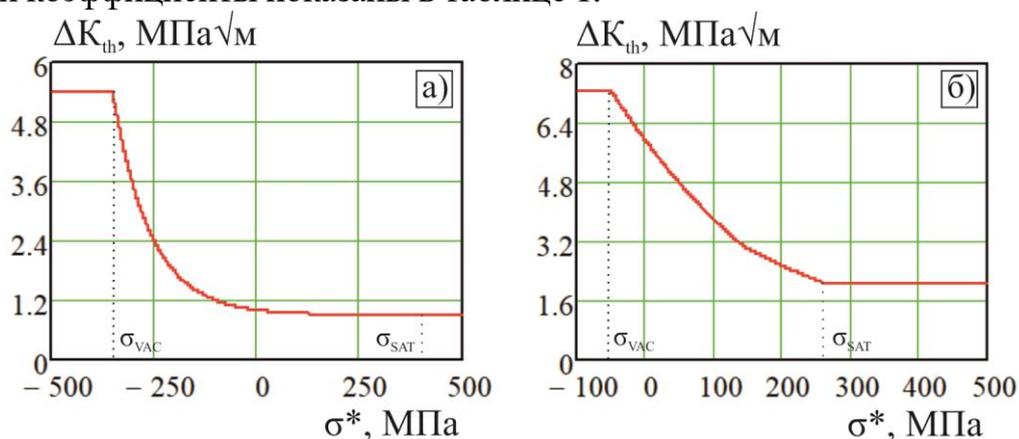


Рис. 10 – Взаимосвязь размаха  $\Delta K_{th}$  с местным напряжением  $\sigma^*$  для AL 2024-T3 (а) и AISI 4030 (б)

Зависимость порогового значения  $\Delta K_{th}$  от  $\sigma^*$  описывается системой уравнений в виде полиномов второй степени:

$$\Delta K_{th} = \begin{cases} A_1 \cdot (\sigma^*)^2 - B_1 \cdot (\sigma^*) + C_1, & \text{если } \sigma_{VAC} < \sigma^* < h \\ A_2 \cdot (\sigma^*)^2 - B_2 \cdot (\sigma^*) + C_2, & \text{если } h < \sigma^* < \sigma_{SAT} \end{cases} \quad (10)$$

где  $\sigma_{VAC}$  – напряжения, соответствующие максимальному значению  $\Delta K_{th}$ ;  $\sigma_{SAT}$  – напряжения, соответствующие минимальному значению  $\Delta K_{th}$ ;  $h$  – координата пересечения уравнений (10) друг с другом.

Таблица 1 – Значения коэффициентов для уравнения (10)

Материал	Параметры								
	$A_1$	$A_2$	$B_1$	$B_2$	$C_1$	$C_2$	$\sigma_{VAC}$	$\sigma_{SAT}$	$h$
AISI 4030, 09Г2, 40, 40X	$3.495 \cdot 10^{-5}$	$1.163 \cdot 10^{-5}$	$2.498 \cdot 10^{-2}$	$1.307 \cdot 10^{-2}$	5.95	4.7	-50	260	150
AL 2024-T3	$5.782 \cdot 10^{-5}$	$7.525 \cdot 10^{-7}$	$2.262 \cdot 10^{-3}$	$1.650 \cdot 10^{-3}$	1.5	1.5	-350	460	0

Ввиду наличия сингулярности напряжений у вершины трещины определять местное напряжение вблизи ее вершины необходимо на некотором удалении  $r^*$  (рис. 11), причем это расстояние должно быть минимально возможным. Величина напряжений в точке, лежащей на линии, совпадающей с направлением роста трещины и находящейся на удалении от вершины трещины на удалении  $r^*$ , определяется формулой:

$$\sigma_f = \frac{K_c}{\sqrt{2 \cdot \pi \cdot r^*}} \quad (11)$$

где  $\sigma_f$  – местное напряжение разрушения;  $K_c$  – вязкость разрушения.

Справедливо выражение:

$$\frac{K_c}{\sqrt{2 \cdot \pi \cdot r^*}} = \sqrt{\sigma_f \cdot \varepsilon_f \cdot E} \quad (12)$$

Тогда характерное расстояние  $r^*$  можно определить:

$$r^* = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \left( \frac{K_c^2}{\sigma_f \cdot \varepsilon_f \cdot E} \right). \quad (13)$$

где  $\varepsilon_f$  – местная деформация разрушения.

Материальная точка, соответствующая расстоянию  $r^*$  попадает в циклическую область окрестности трещины.

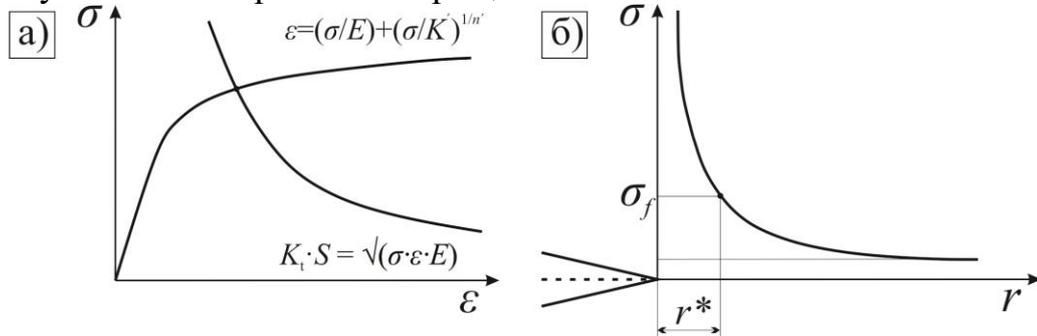


Рис. 11 – Иллюстрация правила Нойбера (а); местное напряжение вблизи вершины трещины на некотором удалении от нее (б)

В данной работе используется линейное правило определения деформаций в окрестности трещины, то есть, приращение полной деформации считается равным его упругой части, которую можно определять по формуле линейной механики разрушения:

$$\Delta \varepsilon_{n+1}^* = \frac{\Delta K_{n+1}}{\sqrt{2 \cdot \pi \cdot r^* \cdot E}} \quad (14)$$

Традиционно для теории пластичности подразумевается аддитивное разложение полной деформации на упругую и пластическую составляющие вида:

$$\Delta \varepsilon^* = \Delta \varepsilon_e^* + \Delta \varepsilon_p^* \quad (15)$$

где  $\Delta \varepsilon_e^*$  – приращение упругой деформации;  $\Delta \varepsilon_p^*$  – приращение пластической деформации.

В данной работе предлагается использовать вариант комбинированной модели упрочнения в рамках критерия Мизеса:

$$f = \left| \sigma^* - \alpha \right| - \sigma_T(\varepsilon_p^*) \leq 0, \quad (16)$$

Смещение поверхности нагружения основано на правиле суммирования смещений Кадашевича – Шабоши. При этом каждое из суммирований подчиняется кинематическому упрочнению Фредерика – Армстронга.

$$\alpha = \sum_i \alpha_i \quad \Delta \alpha_i = (C_i - \gamma_i \alpha_i \psi) \cdot \Delta \varepsilon_p^*, \quad (17)$$

где  $\alpha$  – суммарное смещение поверхности нагружения;  $\alpha_i$  – индивидуальные смещения;  $C_i, \gamma_i$  – константы материала;  $\psi$  – параметр нагружения («-1» — сжатие, «+1» — растяжение).

Изотропное расширение/сужение поверхности нагружения определяется на основе следующего соотношения:

$$\sigma_T(\varepsilon_p^*) = \sigma_T^0 + (\sigma_T^\infty - \sigma_T^0) \cdot (1 - \exp(-b \cdot \varepsilon_p^*)), \quad (18)$$

где  $\sigma_T^0$  — начальный предел текучести;  $\sigma_T^\infty$  — асимптотический предел текучести;  $b$  — константа материала.

Константы материала  $C_i, \gamma_i, b$  определяются экспериментально при инкрементальном испытании с циклическим нагружением по жесткому циклу. В течение такого испытания происходит постепенное увеличение амплитуды нагружения при сохранении асимметрии цикла постоянной  $R = -1$  вплоть до разрушения.

Определение приращения напряжений представляет собой процедуру проецирования на поверхность нагружения (циклическую диаграмму). После определения по формуле (18) приращения полной деформаций необходимо определить его упругую часть. Для этого на первом этапе (*упругое приближение*) предполагаем, что вся деформация упругая:

$$\begin{aligned} \text{tr} \sigma^* &= \text{tr} \sigma_n^* + E \cdot \Delta \varepsilon_{n+1}^*, \\ \text{tr} \alpha &= \alpha_n, \quad \text{tr} \varepsilon_p^* = (\varepsilon_p^*)_n. \end{aligned} \quad (19)$$

при этом если условие текучести выполняется,  $f_{n+1} = \left| \text{tr} \sigma^* - \text{tr} \alpha \right| - (\sigma_T)_{n+1} \leq 0$ , то есть напряженное состояние не вышло за пределы диаграммы, значит первый этап становится окончательным:

$$\sigma_{n+1}^* = \text{tr} \sigma^*, \quad \alpha_{n+1} = \text{tr} \alpha, \quad (\varepsilon_p^*)_{n+1} = \text{tr} \varepsilon_p^* \quad (20)$$

В противном случае  $f_{n+1} = \left| \text{tr} \sigma^* - \text{tr} \alpha \right| - (\sigma_T)_{n+1} > 0$ , его необходимо скорректировать с учетом накопленной пластической деформации (*проецирование*):

$$\begin{aligned} \sigma_{n+1}^* &= \text{tr} \sigma^* - E \cdot \Delta \varepsilon_{n+1}^p, \\ \alpha_{n+1} &= \text{tr} \alpha + \sum_{i=1} (C_i - \gamma_i \alpha_i \psi) \cdot \Delta \varepsilon_{n+1}^p, \quad \varepsilon_{n+1}^p = \varepsilon_n^p + \Delta \varepsilon_{n+1}^p. \end{aligned} \quad (21)$$

При этом пластическая доля деформации определяется из решения нелинейного уравнения, выражающего условие принадлежности напряженного состояния циклической диаграмме:

$$\begin{aligned} f_{n+1} &= \left| \text{tr} \sigma - \text{tr} \alpha \right| + \left( E + \sum_i (C_i - \gamma_i \alpha_i \psi) \right) \cdot \Delta \varepsilon_{n+1}^p - \\ &\quad - \left( \sigma_T^0 + (\sigma_T^\infty - \sigma_T^0) \cdot (1 - \exp(-b \cdot \varepsilon_{n+1}^p)) \right) > 0 \end{aligned} \quad (22)$$

Окончательные выражения для скорректированного значения локального напряжения  $\sigma_{n+1}^*$  на текущем шаге нагружения, а для центра кривой циклического деформирования и накопленной пластической деформации примет следующий вид

$$\begin{aligned} \sigma_{n+1}^* &= \text{tr} \sigma^* - E \cdot (\Delta \varepsilon_p^*)_{n+1}, \\ \alpha_{n+1} &= \text{tr} \alpha + \sum_i (C_i - \gamma_i \alpha_i \psi) \cdot (\Delta \varepsilon_p^*)_{n+1}, \quad (\varepsilon_p^*)_{n+1} = (\varepsilon_p^*)_n + (\Delta \varepsilon_p^*)_{n+1}. \end{aligned} \quad (23)$$

Далее на рис. 12 представлен пример определения напряжений в окрестности трещины согласно представленной модели на примере AL 2024-T3. Типы используемых для примера нагружений: недогрузка-перегрузка (а) и перегрузка с последующей недогрузкой (б).

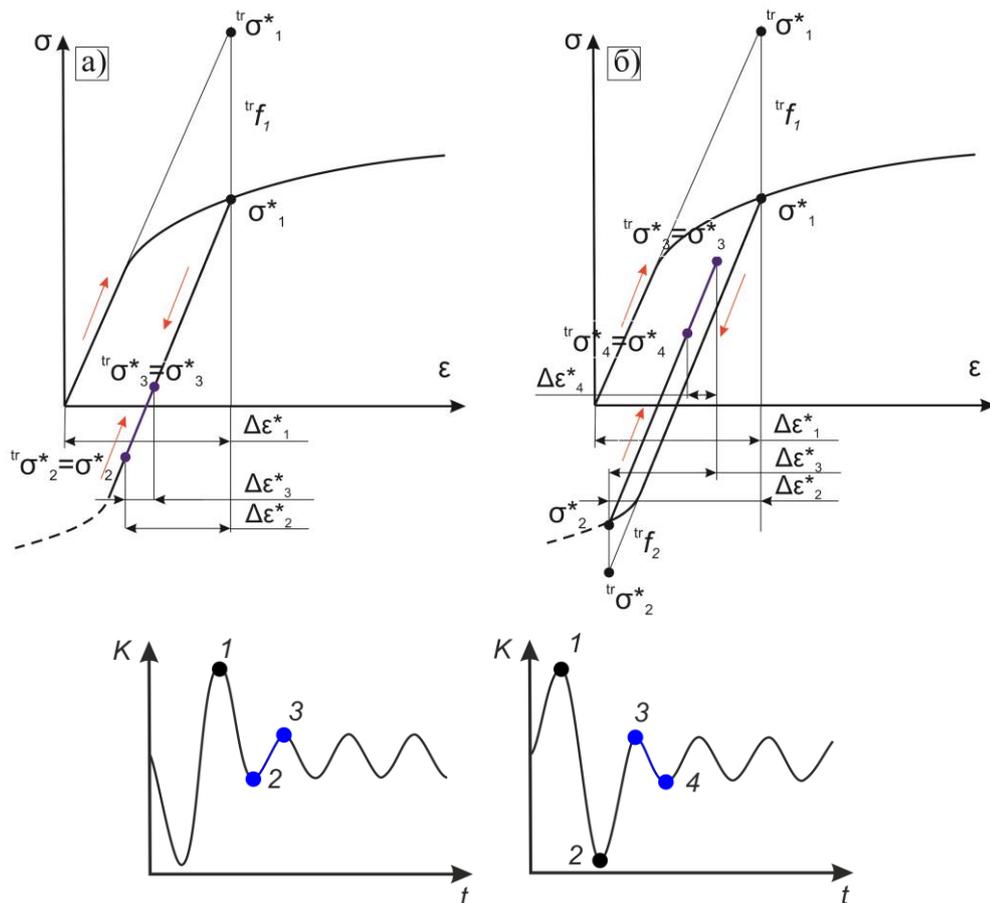


Рис. 12 – Графическая интерпретация методики определения напряжений в окрестности трещины при различных последовательностях нагружений: недогрузка – перегрузка (а); перегрузка – недогрузка (б)

Экспериментальные исследования по продолжительности роста усталостных трещин по предлагаемой модели с учетом локальных напряжений можно разделить на несколько блоков:

- испытания на компактных образцах с регулярным нагружением и однократными перегрузками/недогрузками с целью определения констант, входящих в уравнение (8) и установления зависимости  $\Delta K_{th} = f(\sigma^*)$ ;
- определение кривой циклического деформирования на гладких образцах при ступенчатом нагружении;
- верификация разработанной модели на эксплуатационных спектрах.

Долговечность определялась на основе интегрирования уравнения (9). Особенностью использования разработанной модели является определение асимметрии каждого полуцикла циклического нагружения и закрытия трещины  $U$  в зависимости от случайных значений локальных напряжений вблизи вершины трещины и значений порогового значения КИН  $\Delta K_{th}$ , используемые в уравнении.

Взаимосвязь результатов применения предложенной модели пластичности по оценке продолжительности роста усталостной трещины с учетом локальных напряжений в устье трещины  $N_{BA}$  с полученными экспериментальными данными  $N_3$  приведены на рис. 13 а и б.

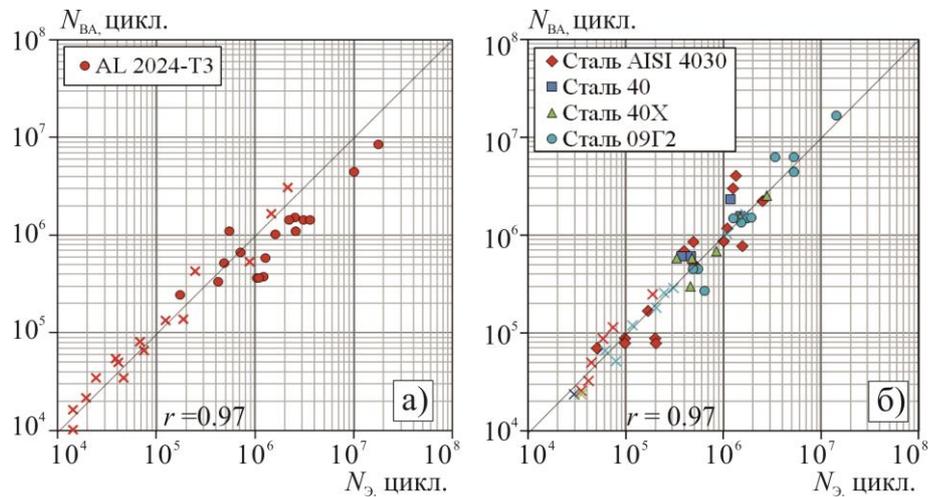


Рис. 13 – Расчет продолжительности роста трещины с учетом взаимодействия последовательности нагрузок по модели пластичности

Хорошее совпадение расчетных зависимостей развития трещины с экспериментальными результатами, наглядно подтверждают достоверность предложенной модели для описания кинетики усталостного разрушения в условиях взаимодействия последовательности нагрузок. Математическое моделирование продолжительности роста усталостной трещины, особенно в околопороговой области ее роста показало, что для исследованных конструкционных материалов выявлена чувствительность роста трещины к различным видам силового воздействия, в том числе и разному характеру квазислучайного нагружения. Коэффициент корреляции расчетных и экспериментальных данных продолжительности роста трещины для различных видов внешнего воздействия составил  $r = 0.97$  как для алюминиевого сплава, так и для сталей.

#### Основные результаты и выводы

1) Проведены испытания на трещиностойкость различных конструкционных материалов при регулярном и нерегулярном нагружениях. Нерегулярное нагружение представлено блочным с различным уровнем и количеством перегрузок или недогрузок, а также квазислучайными спектрами с разной асимметрией блока нагружения.

2) Фрактографическое исследование испытанных образцов из различных конструкционных материалов показало, что изменение скорости роста трещин при нагружении в виде перегрузки и недогрузки, полученное с помощью датчика раскрытия трещины соответствует замеру усталостных бороздок только для алюминиевого сплава. Для конструкционных сталей такое соответствие характерно для скоростей роста усталостной трещин выше  $10^{-2}$  мм/цикл.

3) На основе проведенных исследований различных видов нерегулярного нагружения введен параметр меры нерегулярности переменного нагружения  $V$  для оценки влияния внешнего нерегулярного нагружения. Найдена взаимосвязь кинетики роста трещин и характера переменного нагружения, определяемого мерой нерегулярности.

4) Предложен учет закрытия трещины и характера переменного нагружения для различных конструкционных материалов через коэффициент закрытия  $U$  и меру нерегулярности  $V$  введением эффективного КИН  $K_{эфф}$ . Такой

подход позволяет полученные кривые КДУР нерегулярного нагружения совместить на одну кривую, характерную для испытаний при регулярном нагружении.

5) Разработаны новые полуфеноменологические модели прогнозирования кинетики роста усталостных трещин: для экспресс-анализа на среднем участке КДУР на основе принципа эквивалентности нерегулярного нагружения регулярному, а также на проведении поциклового расчета на всей длине роста трещины.

6) Введены аналитические зависимости для оценки изменения порогового значения КИН для разных материалов в зависимости от остаточных локальных напряжений в устье усталостной трещины, на основе которых разработана новая модель с учетом численно-аналитической методики расчета напряжений в окрестности вершины трещины, позволяющая учитывать последовательность нагружения.

7) Проведен сравнительный анализ предложенных моделей, позволяющий выявить эффективность использования модели, учитывающей последовательность нагрузок в околопороговой области нагружения КДУР.

## **ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕТАЦИОННОЙ РАБОТЫ**

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

1) Savkin, A.N. Express analysis of fatigue crack growth life under constant and variable amplitude loading [Электронный ресурс] / А.Н. Савкин, Р. Сундер, А.А. Седов, К.А. Бадиков // AIP Conference Proceedings. Vol. 2053 : Mechanics, Resource and Diagnostics of Materials and Structures (MRDMS-2018) : Proceedings of the 12th International Conference on Mechanics, Resource and Diagnostics of Materials and Structures (Ekaterinburg, Russia, 21-25 May, 2018) / ed. by E. S. Gorkunov [et al.]. – [AIP Publishing], 2018. – 6 p. – URL : <https://aip.scitation.org/doi/pdf/10.1063/1.5084420?class=pdf>.

2) Savkin, A.N. Local near-tip stress in crack and its closure estimation [Электронный ресурс] / А.Н. Савкин, А.А. Седов, Д.С. Денисевич, К.А. Бадиков // AIP Conference Proceedings. Vol. 2051 : Proceedings of the Advanced Materials with Hierarchical Structure for New Technologies and Reliable Structures (Tomsk, Russia, 1-5 October, 2018) / ed. by V. E. Panin [et al.]. – [AIP Publishing], 2018. – 5 p. – URL : <https://aip.scitation.org/doi/pdf/10.1063/1.5083510>.

3) Savkin, A.N. Estimation of contribution of different parties of random loading spectra to damage accumulation [Электронный ресурс] / А.Н. Савкин, А.А. Седов, Г.В. Бойко, К.А. Бадиков // AIP Conference Proceedings. Vol. 1909 : Proceedings of the International Conference on Advanced Materials with Hierarchical Structure for New Technologies and Reliable Structures 2017 (AMHS'17) (Tomsk, Russia, 9-13 October 2017) / ed by V.E. Panin [et al.]. – [AIP Publishing], 2017. – P. 020187-1 – 020187-4. – URL : <http://aip.scitation.org/doi/pdf/10.1063/1.5013868>.

4) Savkin, A.N. Effect of character, value, and sequence of overloads on the fatigue crack growth in 2024-T3 aluminum alloy [Электронный ресурс] / А.Н. Савкин, А.А. Седов, Г.В. Бойко, К.А. Бадиков, Д.С. Денисевич // AIP Conference Proceedings. Vol. 1909 : Proceedings of the International Conference on Advanced Materials with Hierarchical Structure for New Technologies and Reliable Structures 2017 (AMHS'17) (Tomsk, Russia, 9-13 October

2017) / ed by V.E. Panin [et al.]. – [AIP Publishing], 2017. – P. 020188-1 – 020188-4. – URL : <http://aip.scitation.org/doi/pdf/10.1063/1.5013869>.

5) Savkin, A.N. Evaluation of fatigue life via stress and strain damage criterions [Электронный ресурс] / А.Н. Савкин, А.А. Седов, К.А. Бадиков // AIP Conference Proceedings. Vol. 1783 : Advanced Materials with Hierarchical Structure for New Technologies and Reliable Structures 2016 : Proceedings of the International Conference (Tomsk, Russia, 19-23 September, 2016). – [Published by the American Institute of Physics], 2016. – P. 020200-1 – 020200-4. – doi: 10.1063/1.4966494. – URL : <http://dx.doi.org/10.1063/1.4966494>.

#### **В журналах, рекомендованных ВАК:**

В центральной печати

1) Савкин, А.Н. Кинетика роста усталостной трещины в алюминиевом сплаве 2024-T3 при переменном циклическом нагружении / А.Н. Савкин, Р. Сундер, А.А. Седов, К.А. Бадиков // Деформация и разрушение материалов, 2019. – №12. – С. 37-43.

2) Савкин, А.Н. Исследование кинетики роста усталостных трещин в сталях в зависимости от характера переменного нагружения / А.Н. Савкин, А.В. Андроник, К.А. Бадиков, А.А. Седов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов, 2018. – Т. 84, № 3. – С. 43-51.

3) Савкин, А.Н. Трещиностойкость алюминиевого сплава 2024-T3 при регулярном циклическом нагружении с различными возмущающими воздействиями / А.Н. Савкин, К.А. Бадиков, А.А. Седов // Деформация и разрушение материалов, 2018. – № 6. – С. 12-19.

4) Савкин А.Н. Оценка влияния характера нагружения и силовых параметров случайного внешнего воздействия на рост усталостной трещины в низколегированной стали / А.Н. Савкин, А.В. Андроник, К.А. Бадиков, А.А. Седов // Деформация и разрушение материалов, 2017. – № 7. С. 40-45.

В сборнике научных статей «Известия ВолгГТУ»

1) Савкин, А.Н. Фрактографический анализ продвижения усталостных трещин при регулярном циклическом нагружении с перегрузками в алюминиевом сплаве 2024-T3 / А.Н. Савкин, К.А. Бадиков, А.А. Седов // Известия ВолгГТУ. Сер. Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении. Волгоград, 2018. – № 3 (213). – С. 94-101.

2) Савкин, А.Н. Влияние асимметрии на трещиностойкость алюминиевого сплава Al 2024 T3 при регулярном нагружении / А.Н. Савкин, К.А. Бадиков, А.А. Седов // Известия ВолгГТУ. Сер. Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении. - Волгоград, 2017. – № 10 (205). – С. 95-99.

3) Савкин, А.Н. Оценка кинетики роста трещины в конструкционных сталях 40 и 40Х при случайном нагружении / А.Н. Савкин, К.А. Бадиков, А.А. Седов // Известия ВолгГТУ. Сер. Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении. Волгоград, 2017. – № 6 (201). – С. 88-92.

4) Савкин, А.Н. Влияние характера переменного нагружения на кинетику и продолжительность роста усталостных трещин / А.Н. Савкин, К.А. Бадиков, А.В. Андроник, А.А. Седов // Известия ВолгГТУ. Сер. Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении. Волгоград, 2016. – № 2 (181). – С. 53-60.

5) Савкин, А.Н. Оценка влияния полноты нагружения при перегрузочных и недогрузочных режимах в низколегированной автомобильной стали / А.Н. Савкин, А.В. Андроник, К.А. Бадиков, А.А. Седов // Известия ВолгГТУ. Сер. Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении. Волгоград, 2016. – № 9 (188). – С. 79-83.

6) Савкин, А.Н. Изучение кинетики роста усталостной трещины в низколегированной стали при случайном внешнем нагружении / А.Н. Савкин, А.В. Андроник, К.А. Бадиков,

А.А. Седов // Известия ВолгГТУ. Сер. Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении. Волгоград, 2015. – № 12 (175). – С. 68-72.

7) 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.

8) 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.

9) 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.

### **Свидетельства о регистрации программы для ЭВМ**

1) Свид. о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2019662098 от 17 сентября 2019 г. Российская Федерация. Программа для расчёта продолжительности роста усталостной трещины с учётом локальных напряжений в устье усталостной трещины с учётом влияния возмущающих воздействий / А.Н. Савкин, Д.С. Денисевич, А.А. Седов, К.А. Бадиков; ВолгГТУ. – 2019.

2) Свид. о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2017619354 от 24 августа 2017 г. Российская Федерация. Программа для расчёта меры полноты регулярного нагружения с возмущающими воздействиями / А.Н. Савкин, К.А. Бадиков, А.А. Седов, А.О. Долуда; ВолгГТУ. – 2017.

3) Свид. о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2017664000 от 14 декабря 2017 г. Российская Федерация. Программа для расчёта полноты блока спектра псевдослучайного нагружения / А.Н. Савкин, К.А. Бадиков, А.А. Седов, М.А. Климов; ВолгГТУ. – 2017.

4) Свид. о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2015618880 от 19 авг. 2015 г. РФ Программа подбора коэффициентов для уравнений кривой усталостного роста трещины на основании экспериментальных данных о скорости роста трещины и размахе коэффициента интенсивности напряжений / А.Н. Савкин, А.В. Андроник, К.А. Бадиков; ВолгГТУ. – 2015.

5) Свид. о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2015612317 от 17 февр. 2015 г. РФ Программа поциклового расчёта длины трещины в С(Т) образце методом податливости на основании данных датчика раскрытия трещины из файла TestBuilder MSD / А.Н. Савкин, А.В. Андроник, К.А. Бадиков; ВолгГТУ. – 2015.

6) Свид. о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2015612096 от 11 февр. 2015 г. РФ Программа поциклового расчёта длины трещины в С(Т) образце методом податливости на основании данных датчика раскрытия трещины из файла Microsoft Excel / А.Н. Савкин, А.В. Андроник, К.А. Бадиков; ВолгГТУ. – 2015.

7) Свид. о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2015612095 от 11 февр. 2015 г. РФ Программа расчёта размаха коэффициента интенсивности напряжений и скоростей роста трещины в С(Т) образце для случаев стационарного, блочного и приближённых к ним режимов нагружений на основании эмпирических данных о длинах трещины и кол-ве циклов / А.Н. Савкин, А.В. Андроник, К.А. Бадиков; ВолгГТУ. – 2015.