

«УТВЕРЖДАЮ»

Заместитель генерального директора  
по научной работе  
ГНЦ РФ АО «НПО «ЦНИИТМАШ», д.т.н.

Косырев К.Л.

«20» июля 2020г.



ведущей организации на диссертационную работу

**Бадикова Кирилла Андреевича**

**на тему «Оценка и прогнозирование роста усталостной трещины в алюминиевом сплаве и конструкционных сталях при нерегулярном нагружении»,** представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.02.04. «Механика деформируемого твердого тела»

### 1. Актуальность темы

Диссертационная работа Бадикова К.А. посвящена проблеме оценки продолжительности роста усталостных трещин в конструкционных материалах при нерегулярном циклическом нагружении. Современная практика подтверждает наличие трещин в деталях машин и конструкциях в процессе их эксплуатации. Несмотря на достаточное понимание усталостных процессов в материалах под действием регулярного нагружения, поведение металлов и конструкций при нагружении, близком по характеру к эксплуатационному, все еще не изучено в полной мере.

Стремление к уточнению прогнозов касающихся продолжительности роста трещин и долговечности в общем, приводит к усложнению моделей по оценке кинетики роста трещин, многие из которых используются в современном программном обеспечении. Однако, иногда эти модели оказываются не в состоянии объяснить результаты испытаний, особенно в случаях нагрузений нерегулярного характера с переменной амплитудой, где возникают проблемы прогнозирования кинетики роста трещины из-за влияния последовательности циклов нагружения на скорость ее роста. Поскольку данная проблема все еще не решена полностью, потому исследования, особенно экспериментального характера, по разработке новых и улучшению существующих моделей весьма актуальны на сегодняшний день.

### 2. Научная новизна диссертационной работы заключается:

- в предложении оценивать характер внешнего нагружения с помощью меры нерегулярности, использующей параметры наклона среднего участка Пэриса на кинетической диаграмме усталостного разрушения (КДУР);
- в предложении использовать эффективный коэффициент интенсивности напряжений (КИН) как произведение общего размаха КИН на предложенную

меру нерегулярности и коэффициент закрытия трещины, что позволит учитывать характер переменного нагружения и явление закрытия трещины;

- в разработке модели прогнозирования роста трещины при нерегулярном нагружении на среднем участке КДУР на основании ее роста при регулярном нагружении, а также модели поциклового расчета с использованием предложенного эффективного КИН;

- в разработке методики расчета локальных напряжений в окрестности трещины и их экспериментальной взаимосвязи с пороговым КИН, которая легла в основу новой модели оценки кинетики роста усталостной трещины при нерегулярном нагружении с учетом последовательности нагружения на всех участках КДУР.

**3. Достоверность и обоснованность исследования** подтверждается использованием современного сертифицированного, калиброванного испытательного оборудования и программного обеспечения. Кроме того, хорошая воспроизводимость и высокие значения коэффициентов корреляции между расчетными и экспериментальными результатами исключают случайность полученных данных. При решении задач использовано несколько методов получения результата, что позволило их проверять на различных этапах исследования. Использованы современные методики сбора, обработки исходной информации, результатов испытаний и компьютерного моделирования.

**4. Практическая значимость** состоит в том, что предлагаемые модели могут быть использованы для оценки усталостной прочности материалов, применяющихся в авиационной и автомобильной промышленности. Предложенная модель замены нерегулярного нагружения эквивалентным регулярным, модель поциклового расчета длины трещины, расчет порогового эффективного размаха КИН, модель учета последовательности нагружения с учетом локальных напряжений могут применяться для автоматической обработки результатов циклических испытаний разных типов нагрузений, в том числе квазислучайных, что позволит сократить трудо- и времязатраты получения расчетных результатов роста усталостных трещин.

Результаты работы можно рекомендовать к использованию в инженерной практике усталостного расчета деталей машин и конструкций.

## **5. Общая характеристика работы**

Диссертационная работа изложена на 182 страницах и включает в себя введение, 4 главы, основные выводы, приложение, список литературы из 155 наименований.

**В первой главе** проанализированы литературные источники для определения существующих подходов к оценке усталостного повреждения металлов. Приведены классические модели роста усталостных трещин,

сформулированные в рамках рассматриваемого подхода исследования продолжительности роста трещин при нагружениях с переменной амплитудой; описана по стадиям КДУР и ее роль в изучении трещиностойкости материалов; эффект закрытия трещины и его роль на рост трещины; различные программные продукты для прогнозировал роста трещины; описание кривых циклического деформирования.

**Во второй главе** показана обоснованность выбора материала, а именно алюминиевого сплава и нескольких марок сталей, геометрии образцов, испытательного оборудования и программного обеспечения. Проводится моделирование квазислучайного нагружения для проведения экспериментальных исследований, характерных для условий эксплуатации конструкций. Испытания были проведены лично автором на сервогидравлической машине Biss Nano 25 kN. Рост трещины в зависимости от числа циклов регистрировался датчиком раскрытия трещины.

**В третьей главе** приведено сравнение кривых роста и кинетических диаграмм усталостного разрушения согласно проведенным испытаниям. Для верификации полученных кривых был проведен фрактографический анализ поверхностей разрушения, выполненный на базе микроскопа Versa3D DualBeam. Показаны обобщенные кривые КДУР для алюминиевого сплава и малоуглеродистых сталей, полученные с использованием эффективного КИН, что позволило сгруппировать их на одну кривую. Такой подход позволил автору описать влияние различных силовых параметров, характера нагружения и закрытие трещины.

**В четвертой главе** описано несколько предлагаемых автором моделей оценки кинетики роста усталостных трещин, а также представлен сравнительный анализ экспериментальных и расчетных значений продолжительности роста трещины в металлах для нагружений различного характера и спектров, близких к эксплуатационным, по каждой модели. Эффективность моделей подтверждена сравнениями расчетов по моделям с соответствующими экспериментами по каждому материалу с определением коэффициента корреляции.

Первая представленная автором модель является полуфеноменологической и основана на эквивалентности нерегулярного нагружения регулярному с использованием предложенной меры для оценки характера нагружения. Другая базируется на поцикловом расчете с использованием эффективного КИН, расчет скорости роста трещины предлагается проводить по формуле Формана-Мэтту. Обе эти модели можно отнести к экспресс-методам по оценке кинетики роста трещины. Третья модель основана на учете последовательности циклов в истории нагружения. Автор работы предлагает производить учет этого влияния с помощью методики определения локальных напряжения в окрестности трещины, которые изменяются на каждом цикле, это позволит определять продолжительность роста на всех участках КДУР.

## **6. Публикации и соответствие автореферата диссертационной работе**

Автором было опубликовано 39 печатных 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.

Содержание автореферата соответствует предъявляемым требованиям и достаточно полно отражает основные положения диссертации.

Работа написана грамотно, существенных замечаний по оформлению диссертации нет. Автореферат в полной мере соответствует содержанию диссертации.

## **7. В качестве замечаний по работе можно указать следующее:**

1) Большой объем диссертации затрудняет понимание изложенного в ней материала. Хотя внимание автора к деталям и наличие приложения с программой испытаний и результатами расчета по представленным моделям увеличивает воспроизводимость этапов и данных исследования.

2) В описании образцов не указано было ли произведено плакирование листового материала, из которого были изготовлены образцы для испытаний, что для таких листов обычно, но на темп усталости толщина слоя сильно влияет. Неясно образцы были изготовлены из листов металла с направлением проката перпендикулярным развитию трещины в процессе испытания или нет.

3) В работе не указано как и каких образом предложенные автором модели могут быть использованы при изучении кинетики роста усталостных трещин в деталях или конструкциях, отличающихся по геометрии от используемых образцов.

4) Не указано есть ли возможность в представленной модели пластичности произвести учет температурных факторов, т.к. влияние высокой или низкой температуры оказывает другой эффект на распространение трещины чем при комнатной температуре.

5) Из диссертации неясно почему для исследования были выбраны именно эти материалы. И какие изменения произойдут в моделях, если использовать другие марки металлов.

## **8. Рекомендации по применению результатов работы**

Разработанные методики прогнозирования кинетики роста усталостных трещин в конструкционных материалах при нерегулярном циклическом нагружении рекомендуются для использования в практике для оценки трещиностойкости материалов, анализа разрушений конструкций машин, в частности в авиационном и транспортном машиностроении. Эти подходы целесообразно включить в курсы технических университетов по направлениям механика деформированного твердого тела, динамика и прочность машин, обработка результатов эксперимента и др.

## 9. Заключение

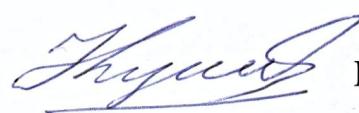
Диссертационная работа Бадикова К.А. является законченной научно-квалификационной работой, в которой дано решение важной прикладной задачи прогнозирования продолжительности роста усталостных трещин в конструкционных материалах и технических объектах с трещинами при нерегулярном циклическом нагружении, имеющем существенное значение для развития механики деформируемого твердого тела, и, таким образом, соответствует требованиям п. 9 ВАК «Положения о присуждении ученых степеней». Результаты проведенных автором научных изысканий можно характеризовать как теоретически и экспериментально обоснованные разработки, представляющие большой интерес для специалистов в указанной области.

Новые научные результаты, полученные диссидентом, имеют существенное значение для разделов механики деформируемого твердого тела, связанного с экспериментальным исследованием усталостного поведения материалов, анализа процессов циклического нагружения и их прогнозирования. Выводы и рекомендации, сделанные в работе, являются обоснованными.

ГНЦ РФ АО «НПО «Центральный научно-исследовательский институт технологии машиностроения» (ЦНИИТМАШ) считает, что диссертация отвечает требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденным Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. №842, предъявляемым ВАК к кандидатским диссертациям, а ее автор, Бадиков Кирилл Андреевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по научной специальности 01.02.04 – «Механика деформируемого твердого тела».

Диссертация и автореферат рассматривались на заседании института материаловедения АО «НПО «ЦНИИТМАШ», отзыв заслушан и одобрен – Протокол заседания №3 от 16 июля 2020 г.

Главный научный сотрудник  
ГНЦ РФ АО «НПО «ЦНИИТМАШ»  
к.т.н., доцент



Кунавин С. А.

Подпись заверяю:  
ученый секретарь ГНЦ РФ АО «НПО «ЦНИИТМАШ»  
Бараненко М.А.

### Справочная информация:

Государственный научный центр Российской Федерации Акционерное общество «Научно-производственное объединение «Центральный научно-исследовательский институт технологии машиностроения» (АО «НПО «ЦНИИТМАШ»), 109088, Москва, ул. Шарикоподшипниковская, дом 4; Тел.: +7 (495) 675-83-02; Факс: +7 (495) 674-21-96  
e-mail: cniitmash@cniitmash.com