

В диссертационный совет Д 002.075.01  
на базе ФГБУН Институт проблем  
машиноведения Российской Академии  
наук (ИПМаш РАН) по адресу:  
199178, Санкт-Петербург,  
Васильевский остров,  
Большой проспект, д. 61

## ОТЗЫВ

официального оппонента, доктора технических наук,  
профессора Панина Сергея Викторовича на диссертационную работу  
Бадикова Кирилла Андреевича «Оценка и прогнозирование роста усталостной  
трещины в алюминиевом сплаве и конструкционных сталях при нерегулярном  
нагружении», представленной на соискание ученой степени кандидата технических  
наук по специальности 01.02.04 «Механика деформируемого твердого тела»

**1. Актуальность работы.** Тема диссертации Бадикова Кирилла Андреевича представляется актуальной в связи с необходимостью получения оценки истории нагружения на долговечность конструкционных материалов, используемых в различных областях техники. Актуальность темы дополнительно определяется еще и тем, что подобных исследований, включающих изучение влияния нерегулярной последовательности нагружения, в особенности спектральных типов, почти нет в публикациях российских авторов. Это обусловлено необходимостью наличия высокочастотных усталостных машин с системой измерения трещины и возможностью использования программного нагружения.

В задачи исследования входил анализ подходов к оценке скорости роста усталостной трещины, проведение испытаний для построения кинетических диаграмм усталостного разрушения (КДУР) алюминиевого сплава и четырех марок сталей при различных режимах нерегулярного нагружения; разработка моделей оценки роста усталостных трещин с учетом закрытия трещины, характера и последовательности нагружения, и также с учетом локальных напряжения в устье трещины; сравнение результатов эксперимента с данными расчета по предложенным моделям усталостного разрушения.

**2. Научная новизна и научная значимость** работы заключается в следующем: Бадиковым К.А. предложены новые модели а) роста усталостной трещины, учитывающих историю и характер нагружения, б) явления закрытия с помощью предложенного эффективного КИН, а также в) оценке остаточных локальных напряжений на удалении от трещины. Новизну представляют и данные, характеризующие зависимости скорости роста трещины алюминиевого сплава и малоуглеродистых сталей от асимметрии цикла, уровня возмущающего воздействия и истории нагружения.

**3. Практическая значимость** работы состоит в разработке методики оценки сложного переменного нагружения через меру нерегулярности. При определении эффективного КИН предложено учитывать не только эффект

закрытия трещины, но и характер нагружения. Развиты модели роста усталостных трещин позволяют сократить трудоемкость получения расчетных результатов и могут быть использованы для разработки дальнейших теоретических методов оценки развития трещин.

#### **4. Обоснованность и достоверность полученных результатов.**

Достоверность исследования не вызывает сомнений, поскольку испытания проведены на современном и сертифицированном оборудовании, анализ результатов был выполнен по данным, включающим оценку характеристик механики разрушения, а также фрактографический анализ и компьютерное моделирование. Полученные результаты не противоречат литературным данным.

#### **5. Структура и содержание работы:**

Работа изложена на 182 страницах, состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 155 источников, содержит 82 рисунка и 11 таблиц.

**Во введении** обоснована актуальность выбранной темы исследования, сформулированы цели и задачи, выделены положения, указывающие на научную новизну и практическую значимость диссертационной работы; представлены сведения об апробации работы на международных и всероссийских научных конференциях, научных семинарах; изложено краткое содержание основной части исследования.

**В первой главе** представлены современные представления о зарождении и распространении трещин при циклическом нагружении с постоянной и переменной амплитудой, о моделях, используемых для оценки долговечности материала; проанализированы факторы, влияющие на рост усталостных трещин в металлах; рассмотрены программные продукты оценки трещиностойкости материалов. Результаты обзора позволили автору обосновать задачи дальнейших исследований по теме диссертации.

**Вторая глава** посвящена обоснованию выбора материалов и методов исследования, а также моделированию квазислучайного нагружения, характерного для условий эксплуатации конструкций. В качестве материалов были использованы: алюминиевый сплав 2024-T3 – термоупрочняемый сплав системы легирования Al-Cu-Mg, использующийся в аэрокосмической технике; стали; стали четырех марок: AISI 4030, 09Г2, 40 и 40Х, применяемые в различных отраслях промышленности. В главе приводится описание используемых в исследовании образцов и испытательного оборудования для получения экспериментальных данных, приведен химический состав и механические свойства исследуемых материалов.

**В третьей главе** представлены результаты экспериментальных исследований алюминиевого сплава и сталей при нагружении регулярным, регулярным с перегрузками и недогрузками, блочным и спектральным типами нагружения с разной асимметрией и максимальным значением нагрузки.

Автором предлагается оценивать различие нерегулярного нагружения с использованием модифицированной меры нерегулярности блока нагружения. Показано изменение данной меры в зависимости от типа нагружения.

Рассмотрено влияние явления «закрытия трещины» в алюминиевом сплаве и сталях, а также произведен учет этого явления с помощью коэффициента закрытия трещины. Совместное использование коэффициента закрытия и предложенной

меры нерегулярности позволило перестроить КДУР и сгруппировать их для разных типов испытаний на одну кривую, характерную для регулярного нагружения с разной асимметрией с помощью эффективного коэффициента интенсивности напряжений (КИН). На взгляд оппонента, получен интересный результат, который свидетельствует о том, что данный эффективный КИН может описывать влияние силовых параметров, характер нагружения и закрытие трещины.

Проведенный фрактографический анализ поверхностей разрушения некоторых образцов позволил оценить скорость роста трещины по маркирующим признакам, наносимых недогрузками и перегрузками в зависимости от длины трещины и количества возмущающих воздействий в блоке нагружения.

**В четвертой главе** диссертации обосновываются предложенные автором модели роста усталостной трещины. Первый тип представляет собой полуфеноменологические модели, одна из которых базируется на предложении рассматривать кинетику роста трещины при переменном нагружении на основании ее роста при регулярном нагружении. Учет характера нагружения при этом выполняется с помощью меры нерегулярности. Другая – использует поцикловой метод расчета по формуле Формана-Мэтту с учетом предложенного эффективного КИН. Второй тип именуется как модель пластичности, в основе которой лежит методика расчета локальных напряжений в окрестности вершины трещины и их связь с пороговым КИН, которая позволяет учитывать последовательность нагружения. Показана эффективность предложенных моделей, которая позволяет оценивать продолжительность роста усталостной трещины как при испытаниях с перегрузками и недогрузками, так и при квазислучайном нагружении, имитирующем условия эксплуатации.

Предложены аналитические зависимости для оценки изменения порогового значения КИН для разных материалов в зависимости от остаточных локальных напряжений в устье трещины. Результаты, изложенные в данной главе, представляет интерес, как для науки, так и для практического использования.

Все главы завершаются частными выводами.

**Заключение** содержит описание общих результатов и выводы по диссертации.

В **Приложении** содержится информацию о типах испытаний, значений продолжительности роста трещин по маркам используемых материалов.

Проведенное исследование относится к числу междисциплинарных, поскольку автор использовал разные методы механики и физики разрушения.

## 6. Замечания по диссертационной работе

1. В качестве 4-й задачи исследований по диссертационной работе автор предлагает «определить эффект области применения модели». Указанную формулировку следует считать не очень удачной. Также не совсем удачным следует считать выражение, использованное в Главе 3, «интегральная скорость роста пересиливает возмущающее воздействие».

2. Исследования проводилось в рамках, в том числе международного сотрудничества, однако в работе не указано, в рамках каких проектов и грантов она была поддержана.

3. В разделе Основные результаты и выводы п. 1 носит констатирующий характер, резюмируя проведенные испытания. Было бы целесообразно эту информацию завершить неким обобщением.

4. В работе не обсуждается, почему в модели на основе поциклового метода расчета применяется именно уравнение Формана-Мэтту? В литературе получили распространение и другие уравнения для определения скорости роста трещин.

Приведенные замечания имеют частный характер и не влияют на суть выводов и положений, выносимых на защиту, а также на общую, однозначно положительную оценку диссертационного исследования.

**7. Оформление диссертации.** Диссертация оформлена в соответствии с требованиями ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям (ГОСТ Р 7.0.11-2011). Материал диссертации изложен последовательно и логично грамотным техническим языком. **Автореферат** диссертации соответствует её содержанию.

**8. Публикации по работе.** Результаты исследований полностью отражены в публикациях автора (39 публикаций), среди которых 15 статей в изданиях, входящих в перечень ВАК, 8 статей – в зарубежных журналах Scopus, 6 – Web of Science. Получено 7 свидетельств о регистрации программ для ЭВМ. Результаты широко обсуждены и апробированы на российских и международных конференциях, симпозиумах, конкурсах.

## **9. Общая характеристика работы**

В работе четко сформулирована цель и задачи, а само исследование выполнено на высоком научном уровне. Прослеживается логическая взаимосвязь между главами, анализ литературных данных позволил автору, основываясь на парадигме механики деформируемого твердого тела, правильно выбрать методику и пути исследования. Предложенные модели роста усталостных трещин в дальнейшем могут быть использованы для разработки методов оценки развития трещин при различных типах нерегулярного нагружения, в том числе и спектральных для более широкого круга конструкционных материалов. Разработанные подходы и программы для вычислений защищены в форме Свидетельств о регистрации программ для ЭВМ.

## **10. Заключение**

Оценивая диссертацию в целом, следует отметить, что по совокупности полученных результатов она является завершенным научным исследованием. Основные выводы исследования базируются на обобщении большого объема расчетных и экспериментальных данных и применении адекватных задаче методов исследований. Автореферат и публикации достаточно полно и объективно отражают содержание диссертации. В работе получен ряд новых в научном и практическом отношении важных результатов.

По актуальности избранной темы, степени обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, их достоверности и новизне, а также значимости для науки и практики диссертация Бадикова К.А. «Оценка и прогнозирование роста усталостной трещины в алюминиевом сплаве и конструкционных сталях при нерегулярном нагружении» представляет собой завершенную научно-исследовательскую работу, соответствующую поставленным целям и задачам и отличающуюся тем, что ее результаты могут быть интересны и полезны для широкого круга научных и инженерных работников, и использованы при обеспечении безопасности

эксплуатации различных конструкций, в том числе, авиационной и автомобильной техники. Она соответствует требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела.

Диссертация отвечает требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденным Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. №842, предъявляемым ВАК к кандидатским диссертациям, ее автор, Бадиков Кирилл Андреевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по научной специальности 01.02.04 – «Механика деформируемого твердого тела».

На обработку персональных данных согласен.

Официальный оппонент  
доктор технических наук, профессор  
Панин Сергей Викторович,

ученая степень: доктор технических наук,  
шифр научной специальности: 01.02.04 –  
Механика деформируемого твердого тела,  
ученое звание: профессор по специальности  
МДТТ, профессор РАН

должность: заведующий лабораторией  
механики полимерных композиционный  
материалов Федерального государственного  
бюджетного учреждения науки Институт  
физики прочности и материаловедения  
Сибирского отделения Российской академии  
наук (ИФПМ СО РАН),

адрес: 634055, г. Томск, пр-т Академический,  
д. 2/4,

Телефон: +7 (3822) 49-18-81,

E-mail: root@ispms.tomsk.ru

подпись С.В. Панина заверяю,  
Ученый секретарь ИФПМ СО РАН  
Кандидат физико-математических наук

Н.Ю. Матолыгина

