

Минобрнауки России
Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки
ИНСТИТУТ МАШИНОВЕДЕНИЯ
ИМЕНИ Э.С. ГОРКУНОВА
Уральского отделения
Российской академии наук
(ИМАШ УрО РАН)

Комсомольская ул., 34, г. Екатеринбург, 620049
Тел.: (343) 374-47-25, факс: (343) 374-53-30
E-mail: ges@imach.uran.ru; http://www.imach.uran.ru
ОКПО 04538044, ОГРН 1036603482992
ИНН/КПП 6660005260/667001001

05.05.2025 г. № 16347/01-2171-47

на № _____ от _____

УТВЕРЖДАЮ

Директор ФГБУН

"Институт машиноведения им. Э.С.

Горкунова Уральского отделения

Российской академии наук"

доктор технических наук, доцент

Швейкин Владимир Павлович

«25» апреля 2025 г.



ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт машиноведения имени Э.С. Горкунова Уральского отделения Российской академии наук»

на диссертацию Вшивкова Алексея Николаевича «Расчётно-экспериментальный метод построения уравнения роста усталостной трещины в металлах на основе оценки диссипации энергии в её вершине», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.8 – Механика деформируемого твердого тела

Актуальность диссертационной работы А.Н. Вшивкова определяется постоянным повышением требований, предъявляемым к безопасности, экономической эффективности инженерных конструкций, снижению их энергоёмкости и массы, что вызывает необходимость обоснованного снижения коэффициентов запаса прочности на основе применения современных экспериментальных методов и методов математического моделирования. Внедрение в инженерную практику принципа допускаемой повреждаемости повышает требования к построению точных, физически обоснованных моделей развития начальных повреждений, в том числе усталостных трещин в условиях сложного напряжённого состояния.

Целью диссертации является разработка термодинамического соотношения и экспериментального метода определения значений его параметров для прогнозирования скорости распространения усталостной трещины в металлах при многоосном нагружении.

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы (126 наименований). Работа содержит 69 рисунков, 10 таблиц. Общий объём диссертации составляет 128 страниц.

Во введении сформирована сформулирована цель исследования и задачи, которые необходимо решить для ее достижения.

В первой главе приведен подробный аналитический обзор современных представлений и научных достижений в области проблемы, связанной с теоретическими и

экспериментальными оценками кинетики роста усталостных трещин. Наиболее подробно рассмотрены вопросы кинетических соотношений для описания роста усталостной трещины, термодинамических соотношений, описывающих распространение усталостных трещин, описания кинетики роста усталостных трещин при смешанном нагружении, экспериментальных методов исследования распространения усталостной трещины.

Вторая глава диссертации посвящена разработке программно-аппаратного комплекса для регистрации диссипации тепла в вершине усталостной трещины. В этой главе автор описывает разработку необходимого для применения теоретической модели экспериментального оборудования, описан физический принцип, на котором основана работа датчика теплового потока, показана конструкция датчика и принципиальная измерительная схема. Измерение теплового потока основано на эффекте Зеебека. Конструкция датчика защищена патентом РФ. Особенностью конструкции датчика является активная термостабилизация измерительного элемента, что позволило повысить точность и стабильность показаний при длительном циклическом деформировании образцов. Описана методика калибровки датчика.

Третья глава диссертации посвящена экспериментальному исследованию процесса распространения усталостной трещины и регистрации теплового потока в её вершине с использованием разработанного экспериментального оборудования. Исследования проводились на плоских образцах с концентраторами напряжения из нержавеющей стали 08X18H10 и технического титана Вt1-0 в условиях одноосного и двухосного нагружения. Проведённые эксперименты по циклическому деформированию образцов с концентраторами напряжений показали возможность использования разработанного контактного датчика тепла в усталостных испытаниях. Во всех проведённых экспериментах тепловой поток в вершине усталостной трещины имел двухстадийный характер. Линейная зависимость между скоростью роста усталостной трещины и диссипацией тепла в её вершине наблюдается для обоих исследованных материалов и различных условий нагружения. Сделан вывод, что использование теплового потока как параметра процесса является более содержательным, чем такой классический параметр механики усталостного разрушения как коэффициент интенсивности напряжений, и позволяет гипотетически выделить два источника диссипации тепла, определяющих процесс распространения усталостной трещины в режиме Париса.

В четвёртой главе диссертации предложено аналитическое соотношение для описания скорости роста трещины на основе данных о тепловом потоке в области её вершины. На основании анализа данных инфракрасной термографии предложен теоретический подход для оценки мощности диссипации энергии в вершине трещины и разделение источника диссипации на две составляющих от зон монотонной и циклической деформаций. Использование гипотезы Диксона позволило обосновать вид аппроксимационного соотношения, связывающего процесс диссипации энергии в вершине трещины и скорость её распространения. Наличие двух составляющих в источнике диссипации позволило сформулировать гипотезу о связи составляющих диссипации с процессами, происходящими в зонах циклической и монотонной пластической деформации у вершины трещины. Показано, что конкуренция введённых составляющих потока тепла, генерируемого в вершине трещины, удовлетворительно описывает двухстадийный характер диссипации энергии. Для проверки основной гипотезы, заложенной в теоретическую модель, экспериментально исследованы поля деформации в вершине трещины методом цифровой корреляции изображений и показана возможность применения гипотезы Диксона для анализа усталостных трещин в металлах. На основе предложенного аппроксимационного соотношения исследован процесс

распространения усталостных трещин и диссипации энергии в образцах, изготовленных из нержавеющей стали 08X18H10 и технического титана ВТ1-0. Экспериментальные данные теплового потока в условиях нагружения показали удовлетворительную корреляцию с рассчитанными значениями. Это позволяет говорить о возможности расширения применимости предложенного соотношения на случай двухосного нагружения.

В заключении изложены итоги выполненного исследования и сформулированы рекомендации и перспективы дальнейшей научной разработки темы.

Проведенный анализ содержания диссертации позволил сделать нижеследующие выводы.

1) Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций.

Сформулированные в диссертационной работе Вшивкова А.Н. положения, выводы и рекомендации подтверждаются обширным анализом отечественной и зарубежной научной литературы по тематике диссертационной работы, использованием фундаментальных принципов механики и термодинамики деформируемого твёрдого тела, современной экспериментальной механики, отсутствием логических противоречий в содержании исследований и выводами по диссертации, которые соответствуют положениям механики деформируемого твердого тела. В работе использовались классические и разработанные в ИМСС УрО РАН апробированные методики проведения циклических исследований роста усталостной трещины с использованием средств измерения кинетических (оптический метод, метод падения электрического потенциала) и термодинамических (инфракрасная термография, оригинальный контактный метод на основе эффекта Зеебека) характеристик процесса.

2) Научная новизна полученных результатов заключается в следующем:

- разработана экспериментальная методика измерения теплового потока в вершине усталостной трещины в металлах при проведении усталостных испытаний, основанная на применении эффекта Зеебека и использовании элемента Пельтье в качестве чувствительного элемента;

- экспериментально выявлены закономерности взаимосвязи эволюции поля пластической деформации и теплового потока в вершине усталостной трещины при её распространении в стали 08X18H10 и технически чистом титане ВТ1-0; установлен линейный характер взаимосвязи скорости распространения усталостной трещины и теплового потока в её вершине при многоосном нагружении;

- предложена теоретическая модель, основанная на экспериментально устанавливаемой взаимосвязи скорости распространения усталостной трещины и интенсивности теплового потока в её вершине.

Полученные результаты соответствуют пунктам 1, 10, 13 паспорта специальности 1.1.8 (Механика деформируемого твердого тела).

3) Научная значимость результатов исследований обусловлена тем, что предложена и экспериментально обоснована гипотеза о возможности использования подходов линейной механики разрушения для оценки поля неупругой деформации в вершине усталостной трещины в металлах. Получено аналитическое соотношение для расчёта теплового потока в вершине усталостной трещины для смешанного типа нагружения. Установлена взаимосвязь теплового потока со скоростью роста трещины.

4) Практическая значимость полученных результатов связана с получением новых данных о кинетике и термодинамике распространения усталостной трещины в металлах при одноосном и двухосном циклическом деформировании, разработкой оригинальной методики оценки и прогнозирования скорости роста трещины

на основе данных о потоке тепла в области вершины усталостной трещины при многоосном циклическом деформировании.

5) **Основные результаты диссертации отражены** в 11 публикациях в журналах, входящих в перечень рецензируемых научных изданий, установленный Минобрнауки РФ для представления результатов диссертаций по специальности 1.1.8 (Механика деформируемого твердого тела), и журналах, индексируемых в системах цитирования Web of Science и Scopus. Результаты диссертационного исследования были доложены на международных и всероссийских конференциях, а также на научных семинарах. Автореферат соответствует содержанию диссертации и позволяет составить достаточно полное представление о ней.

По содержанию диссертации имеются следующие **замечания**.

1. Выводы по главам излишне подробны и фактически представляют собой пересказ содержания глав, а не квинтэссенцию полученных результатов.

2. Не очень удачен выбор стали 08X18H10 в качестве модельного материала, так как она является деформационно нестабильной и при деформации происходит мартенситное превращение, которое сопровождается выделением тепла. Интенсивность фазового превращения зависит от степени деформации и напряженного состояния.

3. Не рассмотрен вопрос влияния размера измерительной части предложенного датчика на результаты оценки скорости распространения трещины по величине теплового потока.

4. В тексте диссертации имеются неудачные и некорректные выражения, например: «предел прочности» вместо «временное сопротивление разрыву», «предел текучести $\sigma_{0.2\%}$ » вместо «условный предел текучести $\sigma_{0.2}$ » в табл. 3.1.3.; « .. образцы ... с двумя геометриями ...» в начале раздела 3.2.; «монотонная зона деформации», «циклическая зона деформации» вместо «зона монотонной деформации» и «зона циклической деформации» в главе 4 и т.п.

Высказанные замечания не влияют на общую положительную оценку работы, которая выполнена на высоком научном уровне, содержит новые научные результаты и удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым ВАК России к диссертациям на соискание степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.8. – Механика деформируемого твердого тела, а её автор, Вшивков Алексей Николаевич, заслуживает присуждения искомой степени кандидата физико-математических наук.

Отзыв составлен доктором технических наук Смирновым Сергеем Витальевичем, рассмотрен и одобрен на научном семинаре лаборатории микромеханики 17 апреля 2025 года, утвержден на научном семинаре отдела физических проблем в машиностроении Института машиноведения Уральского отделения Российской академии наук (протокол № _289 от «24_» апреля_2025 г.)

Руководитель семинара
заведующий лабораторией микромеханики материалов,
доктор технических наук



Смирнов Сергей Витальевич

620049 Екатеринбург, ул. Комсомольская, 34
Тел. +7 (343) 374-40-76
E-mail: svsv@imach.uran.ru