

На правах рукописи



Вшивков Алексей Николаевич

**РАСЧЁТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ МЕТОД
ПОСТРОЕНИЯ УРАВНЕНИЯ РОСТА УСТАЛОСТНОЙ
ТРЕЩИНЫ В МЕТАЛЛАХ НА ОСНОВЕ ОЦЕНКИ
ДИССИПАЦИИ ЭНЕРГИИ В ЕЁ ВЕРШИНЕ**

1.1.8 – Механика деформируемого твёрдого тела

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Пермь – 2025

Работа выполнена в Институте механики сплошных сред УрО РАН – филиале Федерального государственного бюджетного учреждения науки Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук.

Научный руководитель: **Плехов Олег Анатольевич**, доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН.

Официальные оппоненты: **Кузькин Виталий Андреевич**, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории дискретных моделей механики ФГБУН "Институт проблем машиноведения РАН", г. Санкт-Петербург;

Панин Сергей Викторович, доктор технических наук, заведующий лабораторией механики полимерных композиционных материалов ФГБУН "Институт физики прочности и материаловедения СО РАН", г. Томск.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки "Институт машиноведения имени Э.С.Горкунова УрО РАН", г. Екатеринбург.

Защита состоится **22 мая 2025 г.** в 14:00 часов на заседании диссертационного совета Д 004.036.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки "Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук" (филиал – Институт механики сплошных сред УрО РАН) по адресу: 614013, г. Пермь, ул. Академика Королёва, 1; тел: (342) 237-84-61; факс: (342) 237-84-87; сайт: www.icmm.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Института механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук.

Автореферат разослан « ___ » апреля 2025 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор физико-математических наук, доцент

 / А.Л. Зуев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Прогнозирование разрушения под действием циклических напряжений с амплитудой существенно меньшей предела прочности материала (далее – усталость) является актуальной научной и инженерной задачей на протяжении последних двухсот лет. Несмотря на значительные успехи в понимании физической природы усталости, достигнутые в пионерских работах А. Вёлера, О. Баскина, В. Вейбулла, И. Баушингера, Д.К. Чернова и их последователей, вопросы прогнозирования эксплуатационного ресурса и предотвращения аварийных ситуаций, вызванных усталостным разрушением, остаются актуальными.

Значительное число моделей и соотношений, используемых в инженерной практике, продолжают носить эмпирический характер. При этом повышение требований к безопасности и экономической эффективности инженерных конструкций требует физически обоснованного снижения коэффициентов запаса. Это диктует необходимость продолжения научных исследований процесса разрушения при циклическом деформировании с применением современных экспериментальных методов и методов математического моделирования.

Широкое внедрение в инженерную практику принципа допускаемой повреждаемости («damage tolerance») повышает требования к построению точных, физически обоснованных моделей развития начальных повреждений, в том числе усталостных трещин в условиях сложного напряжённого состояния. Разработка энергетически обоснованных моделей в сочетании с прямыми экспериментальными методами измерения входящих в них физических величин позволяет получить новые результаты как при детектировании, так и при прогнозировании скорости распространения усталостных трещин в условиях многоосного деформирования.

Представленная диссертация направлена на разработку оригинальных экспериментальных подходов к измерению теплового потока в области вершины усталостной трещины, которые, в сочетании с методами инфракрасной термографии и корреляции цифровых изображений, позволяют получить новые научные результаты в области исследования особенностей пластического деформирования в вершине усталостной трещины в металлах. В работе предложено соотношение для прогнозирования скорости усталостных трещин в условиях одноосного и многоосного деформирования. Актуальность темы исследования определяются возможностью построения экспериментально-теоретического подхода, описывающего процесс распространения усталостной трещины, применимого для широкого спектра условий эксплуатации.

Степень разработанности темы исследования. Первые исследования процессов разрушения при циклическом деформировании цепей для крепления подводных мин и рудничных подъёмных устройств датированы 1823 годом. Понимание процесса усталостного разрушения как многостадийного явления, включающего в себя стадии накопления повреждений (инкубационный период), период развития субмикроскопических трещин до размеров микротрещин и

период развития микротрещин, формировалось последовательно на основе результатов Л.Ф. Коффина, С.С. Менсона, А. Пальмгрена, А. Майнера, И.А. Одингга, С.В. Серенсена, Н.Н. Давиденкова, Я.Б. Фридмана, В.В. Болотина, В.Г. Трощенко и др.

К 1911 году был сделан вывод о высокой, по сравнению со статическими испытаниями, чувствительности усталости металлов к поверхностным дефектам. В 1921 году одновременно в работах А.А. Гриффитса и А.Ф. Иоффе процесс разрушения хрупких материалов (стёкол) связывается с процессом развития трещин от начальных поверхностных дефектов. В последующих работах Е. Орована, Д. Ирвина, И.Н. Фридляндера, Х. Нейбера, П.Ф. Попковича, С.А. Христиановича, Н.И. Мухелишвили, Х.М. Вестергарда, М.Л. Вильямса, М.Я. Леонова, Д.С. Дакдейла, В.В. Панасюка, В.М. Пестриков, Г.И. Баренблатта, Н.Ф. Морозова, Е.М. Морозова, Л.М. Качанова, Ю.Н. Работнова, Р.Л. Салганика, Н.Ф. Мотта, В.В. Новожилова, Л.Р. Ботвиной, Д.В. Хатчинсона, Д.Р. Райса, С. Сареша, Р.О. Ритчи, З.П. Базанта и многих других авторов развиты подходы к анализу процесса развития трещин в металлах.

В 1963 году П. Парис предложил простое эмпирическое соотношение, описывающие процесс распространения трещин при циклическом деформировании. Закон Париса многократно анализировался и усложнялся в работах Ю. Мураками, Н.Е. Фроста, Г.П. Черепанова, В. Элбера, Н.А. Махутова, Р. Сундера, Ю.Г. Матвиенко, В.Н. Шлянникова, Л.В. Степановой, Р.В. Гольдштейна, А. Карпинтери и многих других.

Одновременно развивались подходы, направленные на замену использованной Парисом теории Ирвина для прогнозирования скорости распространения трещин. Среди них можно отметить работы В.Т. Трощенко, В.В. Федорова, Y. Izumi, А. Чудновского, J.S. Short, К.Р. Liaw, N. Rajic, N. Ranganathan и других.

Энергетические соотношения для прогнозирования скорости распространения усталостных трещин, берущие своё начало в гипотезе Дж. Ламберта (1779) об энергетическом подобии процессов плавления и разрушения, могут рассматриваться как развитие структурно-энергетической теории разрушения, развитой в работах В.С. Ивановой. В работах А. Чудновского было показано, что скорость распространения трещины является функцией работы пластической деформации, скорости диссипации тепла, потока упругой энергии в вершину трещины при её распространении (J-интеграла) и сопротивления материала зарождению дефектов. В разных моделях данные величины вводились различными способами, но основные трудности были связаны со сложностью их экспериментального определения.

Активное развитие методов экспериментальной механики позволило получить значительный объём фактической информации об особенностях развития пластической деформации в вершине трещины. Среди них можно отметить работы М.Е. Файна, Дж.П. Шелдона, Н.Е. Доулинга, Д.В. Нелсона, А.А. Шанявского, Т. Палин-Люка. Современный этап развития методов экспериментальной механики позволил, в рамках данной работы, предложить

простые подходы к измерению скорости диссипации энергии в вершине трещины и разработать соотношения для прогнозирования скорости распространения усталостных трещин в металлах в сложных условиях нагружения.

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

Для достижения поставленной цели были решены следующие **задачи**:

1. Определены ключевые термодинамические параметры и разработан метод их измерения (путём создания аппаратно-программного комплекса для непрерывной регистрации теплового потока в процессе роста усталостной трещины) на основании анализа существующих экспериментальных методов исследования термодинамики процесса развития усталостной трещины в металлах.

2. Определены численные значения кинетических и термодинамических характеристик распространения усталостной трещины путём проведения усталостных испытаний на плоских металлических образцах с концентратором напряжений, изготовленных из нержавеющей стали 08X18H10 и технического титана BT1-0.

3. Разработано энергетическое соотношение для прогнозирования скорости распространения усталостной трещины в металлах, учитывающее экспериментально определённые особенности зависимости теплового потока от времени в вершине усталостной трещины, на примере нержавеющей стали 08X18H10 и технического титана BT1-0.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

1. 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 (п.13 паспорта специальности МДТТ: Экспериментальные методы исследования процессов деформирования, повреждения и разрушения материалов, в том числе объектов, испытывающих фазовые структурные превращения при внешних воздействиях).

2. Экспериментально выявлены закономерности взаимосвязи эволюции поля пластической деформации и теплового потока в вершине усталостной трещины при её распространении в стали 08X18H10 и техническом титане BT1-0. Показан линейный характер зависимости скорости распространения усталостной трещины от теплового потока в её вершине при многоосном нагружении (п.1 паспорта специальности МДТТ: Законы деформирования, повреждения и разрушения материалов, в том числе природных, искусственных и вновь создаваемых).

3. Предложена теоретическая модель, основанная на экспериментально устанавливаемой взаимосвязи скорости распространения усталостной трещины и интенсивности теплового потока в её вершине, позволяющая прогнозировать

усталостную долговечность металлов при одноосном и двухосном нагружении (п.10 паспорта специальности МДТТ: Прочность при сложных режимах нагружения. Теория накопления повреждений. Механика разрушения твёрдых тел).

Теоретическая и практическая значимость работы. 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.

Проведена серия экспериментов по изучению теплового потока в процессе распространения усталостной трещины в металлах при одноосном и двухосном циклическом деформировании. Получены новые данные о кинетике и термодинамике распространения усталостной трещины в металлах при одноосном и двухосном циклическом деформировании. Предложена методика для оценки и прогнозирования скорости роста трещины на основе данных о потоке тепла в области вершины усталостной трещины при многоосном циклическом деформировании.

Методология, принятая в работе, основана на фундаментальных положениях механики и термодинамики деформируемого твёрдого тела, современной экспериментальной механике. В работе использовались классические и разработанные в «ИМСС УрО РАН» методики проведения циклических испытаний на рост 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.

Положения, выносимые на защиту:

1. Разработанный программно-аппаратный комплекс для измерения теплового потока в области распространения усталостной трещины, принцип действия которого основан на эффект Зеебека, позволяющий по изменению теплового потока обеспечивать точность измерения 0.1 Вт в диапазоне скоростей роста трещин от 10^{-7} до 10^{-3} м/цикл при проведении испытаний при нормальных условиях (п.13. паспорта специальности МДТТ: Экспериментальные методы исследования процессов деформирования, повреждения и разрушения материалов, в том числе объектов, испытывающих фазовые структурные превращения при внешних воздействиях).

2. С использованием методики измерения теплового потока при распространении усталостной трещины в стали 08X18H10 и техническом титане BT1-0 определено, что её рост в режиме Париса характеризуется наличием как минимум двух стадий, различающихся интенсивностью теплового потока (п.1 паспорта специальности МДТТ: Законы деформирования, повреждения и разрушения материалов, в том числе природных, искусственных и вновь создаваемых).

3. Экспериментально подтвержденная линейная зависимость скорости роста трещины от теплового потока в ее вершине позволяет использовать разработанную модель усталостного разрушения и разработанный способ оценки теплового потока для прогнозирования усталостной долговечности при одноосном и двухосном нагружении (п.10 паспорта специальности МДТТ: Прочность при сложных режимах нагружения. Теория накопления повреждений. Механика разрушения твёрдых тел).

Достоверность экспериментальных исследований обеспечивается соблюдением методологии проведения эксперимента, использованием поверенного метрологического оборудования, повторяемостью результатов и соответствием установленных закономерностей с частными результатами других авторов.

Личный вклад автора заключается в анализе современного состояния исследований по теме работы, в проведении и подготовке испытаний по циклическому деформированию образцов для развития усталостной трещины, в обработке и анализе экспериментальных данных. Разработке и проверке теоретических положений работы. Автор лично реализовывал средства измерения, использованные в работе.

Реализация работы. Результаты получены в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024).

Апробация работы. Основные результаты исследований, представленные в диссертационной работе, докладывались и обсуждались на международных и российских научных конференциях: The 5th International Conference on “Crack Paths” (Ferrara, Italy, 2015), 22nd European Conference on Fracture (Belgrade, Serbia, 2018), 4th International Conference on Structural Integrity ICSI2021 (Funchal, Madeira, Portugal, 2021), 29th International Workshop on Computational Mechanics of Materials (Dubrovnik, Croatia, 2019), 25th International Conference on Fracture and Structural Integrity (Catania, Italy, 2019), XI Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики” (Казань, 2015), XII Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики 19-24 августа (Уфа, 2019), XIII Всероссийский съезд по теоретической и прикладной механике (Санкт-Петербург, 2023), XXII Петербургские чтения по проблемам прочности (Санкт-Петербург, 2016), XXII Зимняя школа по механике сплошных сред (Пермь, 2021), XII Международная конференция «механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций (Екатеринбург, 2018), LXIV Международная конференция «Актуальные проблемы прочности» (Екатеринбург, 2022), Международная конференция Перспективные материалы с иерархической структурой для новых технологий и надёжных конструкций (Томск, 2017).

Публикации. По теме диссертации опубликовано **одиннадцать научных статей**, проиндексированных в международных системах цитирования и входящих в список журналов, рекомендованных ВАК. По результатам работы получен **один патент**.

Основное содержание работы

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

В первой главе диссертации приведён обзор теоретических моделей для прогнозирования скорости роста усталостных трещин в металлах, основанных как на силовых, так и энергетических параметрах процесса. Рассмотрено их обобщение на случай смешанного типа нагружения. Проведён анализ экспериментальных методов измерения длины, визуализации траектории усталостной трещины и измерения теплового потока в её вершине. Показана перспективность использования термодинамических моделей для прогнозирования процесса распространения усталостных трещин. Проанализированы основные проблемы, возникающие при использовании термодинамического подхода, и определено основное направление исследования — разработка модели распространения усталостной трещины на основе теплового потока в её вершине по данным оригинального контактного датчика, позволяющего в течение всего усталостного эксперимента измерять необходимые параметры процесса.

Вторая глава диссертации описывает детали разработки необходимого для применения теоретической модели экспериментального оборудования. В разделе 2.1 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 № 2015129783. Особенностью конструкции датчика является активная термостабилизация измерительного элемента, что позволило повысить точность и стабильность показаний при длительном циклическом деформировании образцов.

На рисунке 1а представлена принципиальная схема датчика и оборудования для проведения измерений. На рисунке 1б представлена фотография прототипа конструкции датчика.

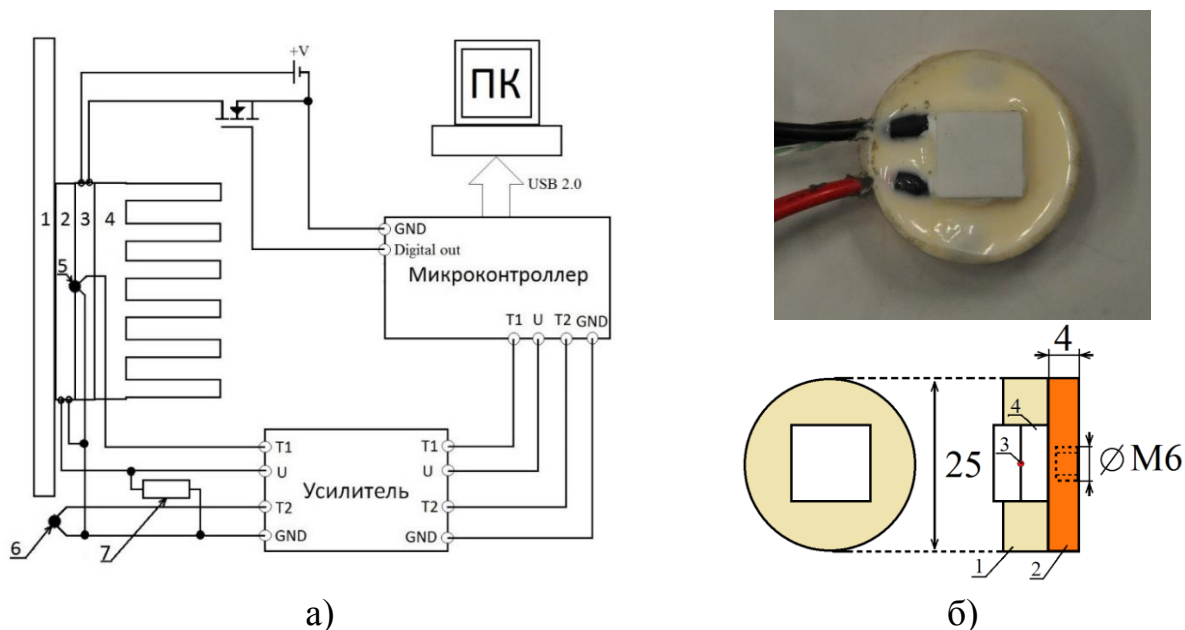


Рис. 1. Конструкция датчика теплового потока (а):- 1 – испытуемый образец; 2 – измерительный элемент Пельтье; 3 – термостабилизирующий элемент Пельтье; 4 – радиатор; 5, 6 – термопары; 7 – резистор. Пример реализации (б)

К испытуемому образцу (1) с использованием термопасты плотно прижат датчик теплового потока, измерительным элементов которого является элемент Пельтье (2). Термостабилизация измерительного элемента осуществляется пассивно — металлическим радиатором или активно — дополнительным элементом Пельтье (3) с микроконтроллером. Активная термостабилизация осуществляется по показаниям термопары (5), закреплённой на «свободной» поверхности измерительного элемента, и термопары (6), регистрирующей температуру окружающей среды. По данным двух термопар (5, 6) в микроконтроллере вычисляется напряжение питания $U_{пит}$ «охлаждающего» элемента Пельтье и посредством широтной импульсной модуляции через полевой транзистор подаётся эквивалентное напряжение. Применение активной термостабилизации позволяет повысить точность и стабильность измерений. При появлении теплового потока через элемент, в нём возникает электрический ток, который измеряется по разности потенциалов на контактах резистора. Измеряемый сигнал с резистора регистрируется аналого-цифровым преобразователем микроконтроллера. Данные с микроконтроллера передаются в персональный компьютер для дальнейшей обработки.

В разделе 2.2 описана методика калибровки датчика. Первично датчиком регистрируется напряжение на резисторе в электрической цепи. Для генерации эталонного теплового потока использован программируемый источник теплового потока FAHRENHEIT THERMICAR. Калибровочный график представлен на рисунке 2.

Для проверки корректности измеряемых значений теплового потока параллельно проведены сопоставления показаний датчика со значением теплового потока, определённого по данным инфракрасной термографии

(рисунок 3). Оба метода позволяют достоверно измерить значение теплового потока, при этом датчик обладает меньшей инерцией измерений.

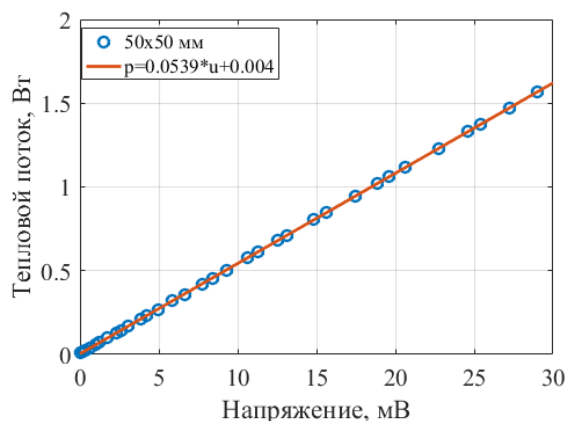


Рис. 2. Калибровочный график элемента Пельтье

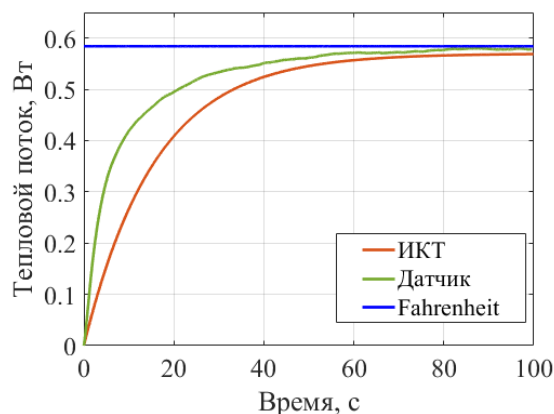


Рис. 3. Характерные измерения теплового потока при калибровке датчика

В разделе 2.3 приведён анализ влияния условий контакта датчика и образца на точность измерения теплового потока. Показания датчика тестировались для различных условий контакта при циклическом деформировании металлического образца в упругой области.

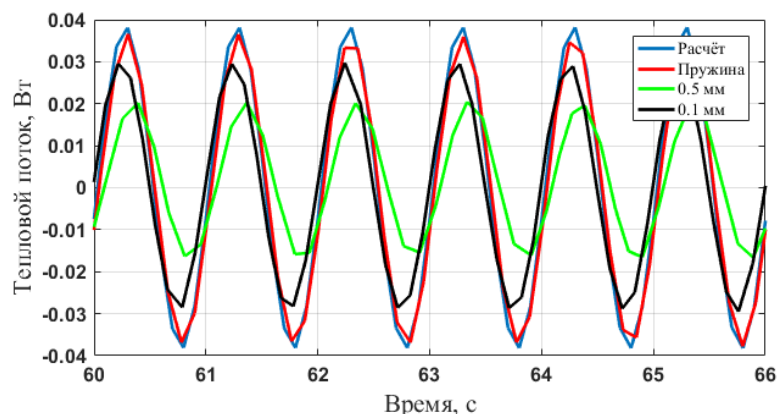


Рис. 4. Тепловой поток при циклическом деформировании металлического образца в упругой области

На рисунке 4 представлены характерные зависимости теплового потока от времени для трёх вариантов крепления датчика к образцу: прижатие пружиной, жесткая фиксация на кронштейне на расстоянии 0.5 мм от образца и на расстоянии 0.1 мм от образца. В результате исследования было показано, что трение не оказывает существенного влияния, и вариант крепления датчика к образцу простым прижатием даёт достоверные результаты.

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 ВТ1-0. На рисунке 5 представлены геометрии испытываемых образцов.

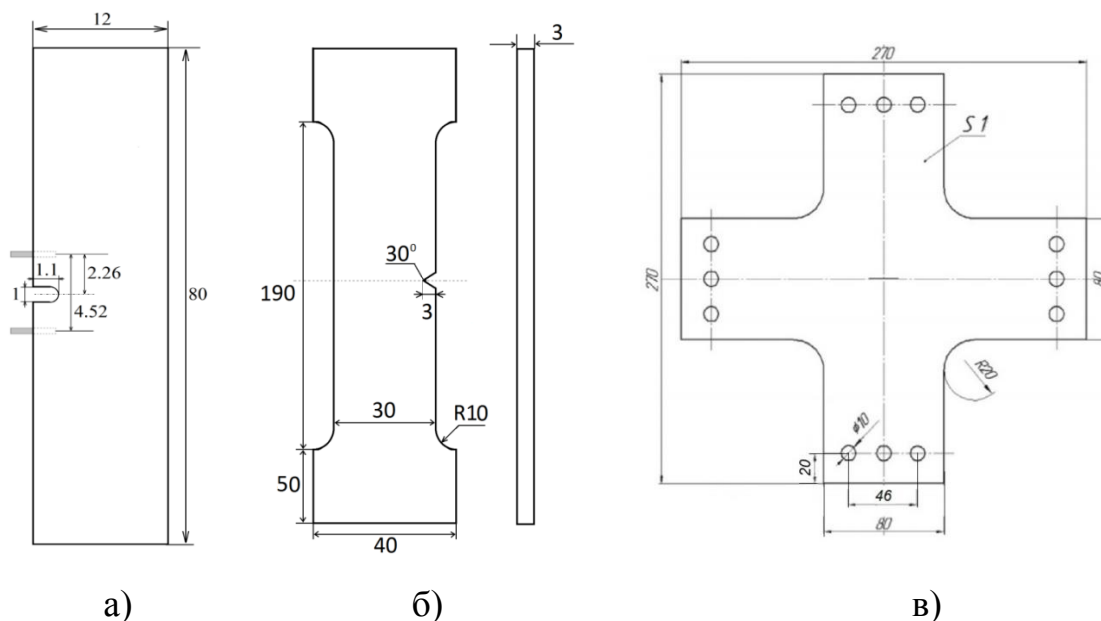


Рис.5. Геометрия образцов: для одноосных испытаний, тип 1 (а), тип 2 (б) и двухосных испытаний (в)

В разделах 3.1 и 3.2 описаны условия эксперимента и результаты циклических испытаний для образцов из нержавеющей стали 08X18H10 для одноосного и двухосного нагружений, соответственно. В разделах 3.3. и 3.4. описаны условия эксперимента и результаты циклических испытаний для образцов из технического титана ВТ1-0 для одноосного и двухосного нагружений, соответственно. Циклическое нагружение производилось с постоянной амплитудой приложенного напряжения, для двухосных испытаний варьировался коэффициент двухосности. На рисунках 6, 7 представлены экспериментальные измерения теплового потока в области вершины усталостной трещины для нержавеющей стали 08X18H10 и технического титана ВТ1-0, соответственно.

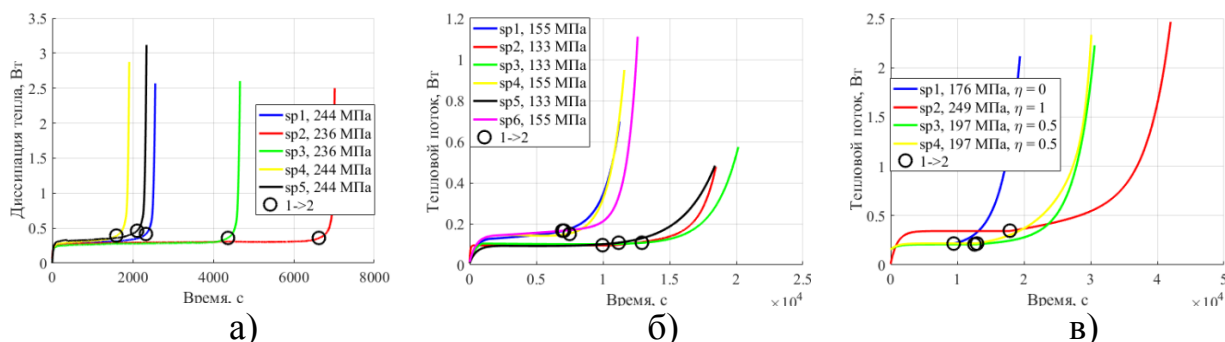


Рис. 6. Тепловой поток в процессе роста усталостной трещины в образцах из стали 08X18H10 при одноосном тип 1 (а), тип 2 (б) и двухосном (в) нагружениях

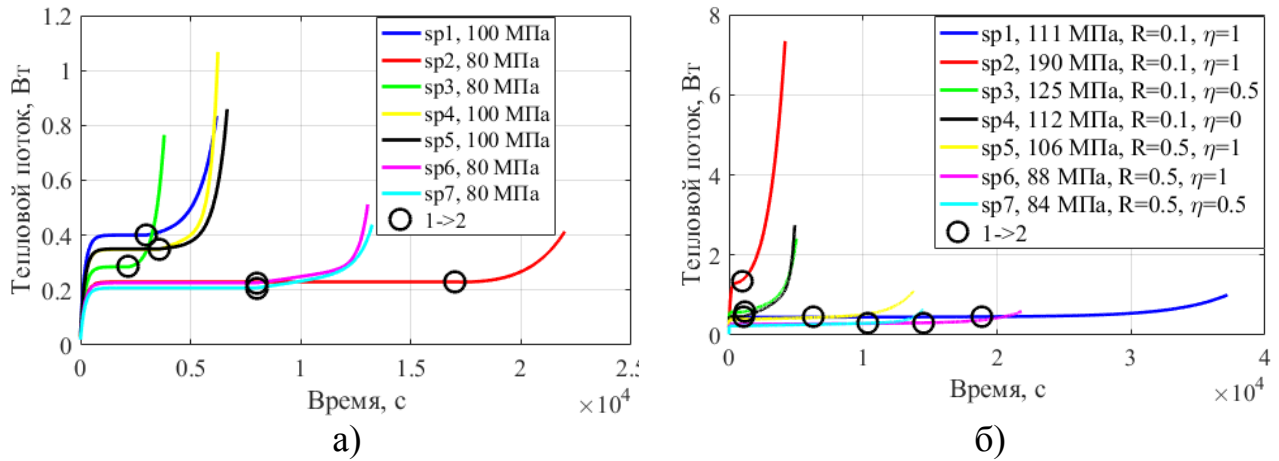


Рис. 7. Тепловой поток в процессе роста усталостной трещины в образцах из технического титана ВТ1-0 при одноосном (а) и двухосном (б) нагружении

По характеру изменения теплового потока в течение экспериментов, процесс зарождения и развития усталостной трещины для всех исследованных условий деформирования можно разделить на несколько стадий. В начале испытания наблюдается рост теплового потока и установление некоторого постоянного или медленно меняющегося значения. На этом этапе достигается стационарное состояние, в котором генерация тепла в вершине трещины уравнивается теплоотдачей в окружающую среду. На завершающей стадии тепловой поток значительно увеличивается, что обусловлено активным развитием усталостной трещины. Маркерами на рисунках 6-7 обозначены точки перехода от стабильного теплового потока к интенсивному росту.

В разделе 3.5 проведён совместный анализ результатов испытаний по одноосному и двухосному нагружению. На рисунке 8 представлена зависимость скорости роста трещины от теплового потока в области её вершины для всех проведённых испытаний при одноосном и двухосном нагружении образцов из нержавеющей стали 08X18H10 и технического титана ВТ1-0.

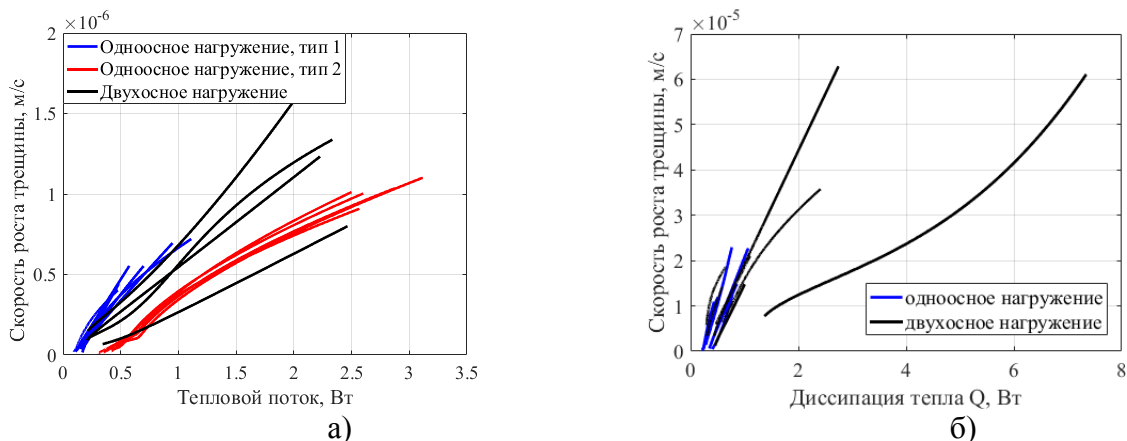


Рис. 8. Зависимость скорости роста трещины от теплового потока в области ее вершины в нержавеющей стали 08X18H10 (а), техническом титане ВТ1-0 (б) при одноосном и двухосном типах нагружения

По результатам экспериментов установлена линейная зависимость между скоростью роста трещины и тепловым потоком. Для каждого случая наблюдается свой коэффициент пропорциональности.

В четвёртой главе диссертации предложено аналитическое соотношение для описания скорости роста трещины на основе данных о тепловом потоке в области её вершины. В разделе 4.1 описан аналитический подход к оценке работы пластической деформации и, как следствие, теплового потока в области вершины усталостной трещины для произвольного нагружения. Тепловой поток в области вершины трещины имеет два физических источника: монотонная зона пластических деформаций и циклическая зона пластических деформаций (Клевцов, Raju). Для оценки величины диссипации энергии будем основываться на следующих гипотезах:

- 1) Полная энергия пластической деформации за один цикл нагружения определяется как сумма энергий в монотонной и циклической зонах:

$$U_p^{tot} = U_p^{cyc} + U_p^{mon}. \quad (1)$$

- 2) Полная деформация в области вершины трещины связана с упругой деформацией, полученной в результате решения линейно-упругой задачи посредством модуля упругости и секущего модуля:

$$\varepsilon^{ef} = \left(\frac{E}{E_s} \right)^{\frac{1}{2}} \varepsilon^{el} \quad (2)$$

где E – модуль Юнга, E_s – секущий пластический модуль, индексы ef и el соответствуют значениям полных и упругих деформаций, полученных в результате решения задачи о бесконечно тонком разрезе в упругой сплошной среде.

Энергию в монотонной и циклических зонах пластической деформации за один цикл нагружения можно записать следующим образом:

$$U_p^{cyc} = \int_0^\pi \int_0^\pi 3\tau_{ec}^2 (G_s^{-1} - G^{-1}) (\tau_{oct,c} / \tau_{ec} - 1) r dr d\theta \quad (3)$$

$$U_p^{mon} = 3\tau_e \left(\frac{1}{G_s} - \frac{1}{G} \right) \int_{s_1}^\pi \int_0^\pi \tau_{oct} \frac{d\tau_{oct}}{d\tau_{oct}^{el}} \frac{d\tau_{oct}^{el}}{dN} r dr d\theta \quad (4)$$

проведя интегрирование по соответствующим областям, получим энергию пластической деформации за один цикл нагружения в области вершины трещины. В работе Raju K.N. (1972) получено соотношение для работы пластической деформации за один цикл:

$$U_p^{tot} = \frac{3.0173}{(\lambda-1)^3 \xi_0^2} \left[\xi_0^4 - 2\xi_0^3(1+\lambda) + \xi_0^2(1+\lambda)(1+\lambda+\lambda^2) - 2\xi_0\lambda^2(1+\lambda) + \lambda^3 - 2\lambda(\lambda-1)\xi_0^2 \lg \xi_0 \right] + \frac{2.589}{\lambda(1-R)^2} (\lambda-1) \frac{da}{dN} \ln \left\{ \frac{\lambda-1}{2} \left[\left(1 + \frac{4\gamma^2\lambda}{(1+R)^2(\lambda-1)^2} \right)^{1/2} - 1 \right] \right\} = W_1(\sigma) + W_1(\sigma) \frac{da}{dN} \quad (5)$$

Соотношение (5) содержит два слагаемых, одно из которых не зависит от скорости роста трещины, а определяется только условиями нагружения. Из этого следует, что на начальном этапе интенсивность тепловыделения определяется процессами, происходящими в зоне циклической пластической деформации. При росте зоны монотонной пластической деформации наблюдается появление линейной корреляции между скоростью распространения трещины и тепловым потоком в области её вершины.

В разделе 4.2 для проверки основополагающей гипотезы (2) представлен экспериментальный и теоретический анализ поля деформации в области вершины трещины. Для проверки гипотезы использовался метод корреляции цифровых изображений. Запись изображений производилась оптической камерой Basler acA2440-75uc с объективом TC23007 OptoEngineering для достижения пространственного разрешения не менее 3 мкм. Обработка полученных данных проводилась на основе программного обеспечения Lavision.

Измерение поля деформации производилось на плоских образцах из технического титана ВТ1-0 (рисунок 5б). На рисунке 9 представлено сравнение размера зоны пластической деформации в области вершины трещины, полученное в эксперименте и рассчитанное аналитически на основе решения задачи линейной теории упругости (ось OX направлена вдоль направления распространения трещины). Представлены результаты измерений для трёх величин длины трещины.

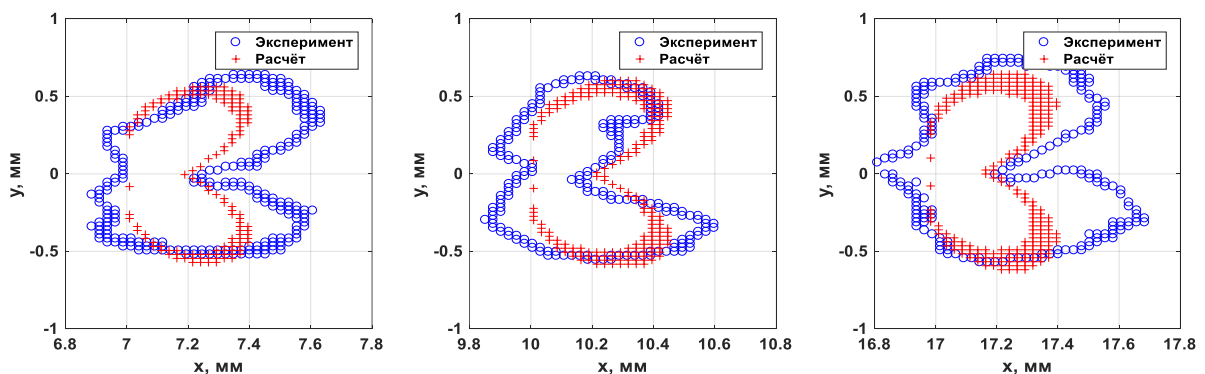


Рис. 9. Характерный размер зоны пластических деформаций для длин трещины 7 мм (8.9×10^4 циклов) (а), 12 мм (9.7×10^4 циклов) (б), 17 мм (10^5 циклов) (в)

В таблице 1 представлены экспериментальные и аналитические значения размера зоны пластической деформации в области вершины трещины. Под размером области пластической деформации понимается диаметр окружности, в

которую вписывается изолиния деформации, соответствующая пределу пропорциональности.

Таблица 1. Размер зоны пластической деформации в области вершины трещины

Длина трещина, мм	Эксперимент, мм	Расчёт, мм	Ошибка, %
7	1.22	1.15	5.74
10	1.27	1.20	5.51
17	1.33	1.28	3.76

Показано качественно удовлетворительное соответствие оценки размера зоны пластической деформации на основе гипотезы (2) и экспериментальных значений величины области пластических деформаций, полученной методом корреляции цифровых изображений.

С учетом гипотезы о том, что бóльшая часть энергии пластической деформации переходит в тепловую энергию, и на основании соотношения (5) в разделе 4.3 предложена аппроксимация, связывающая тепловой поток и скорость роста трещины, учитывающая условия нагружения.

$$Q \approx U_p^{tot} = W_1(\sigma^2) + W_2(\sigma^2) \frac{dl}{dN} = A(1-R)\sigma^2 + B(1-R)\sigma^2 \frac{dl}{dN}, \quad (6)$$

где Q – тепловой поток в области вершины усталостной трещины, σ – амплитуда приложенного циклического нагружения, R – коэффициент асимметрии цикла нагружения, A, B — константы.

По экспериментальным данным, полученным при одноосном нагружении исследуемых материалов, определены константы A, B из соотношения (6). Значения констант для нержавеющей стали 08X18H10 и технического титана BT1-0 представлены в таблице 2.

Таблица 2. Значения констант для нержавеющей стали 08X18H10 и технического титана BT1-0

Материал	$A, \text{Вт}/(\text{Па}^2)$	$\Delta A, \text{Вт}/(\text{Па}^2)$	$\delta A, \%$	$B, \text{Вт}/(\text{Па}^2 \times \text{м}/\text{цикл})$	$\Delta B, \text{Вт}/(\text{Па}^2 \times \text{м}/\text{цикл})$	$\delta B, \%$
08X18H10	5.66×10^{-18}	0.27×10^{-18}	4.72	4.34×10^{-11}	0.30×10^{-11}	6.97
BT1-0	3.60×10^{-17}	0.12×10^{-17}	3.55	3.32×10^{-12}	0.10×10^{-12}	3.10

На основе соотношения (6) и полученных констант A и B рассчитан тепловой поток в вершине усталостной трещины при двухосном нагружении образцов из исследуемых материалов. Сравнение расчётных и измеренных значений теплового потока в процессе деформирования представлено на рисунке 10.

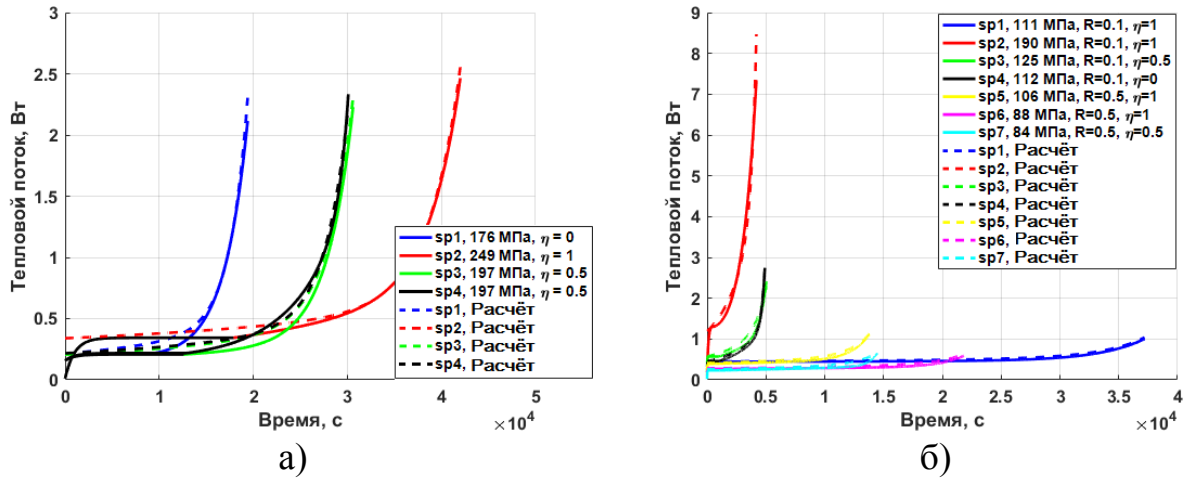


Рис. 10. Сравнение рассчитанного и измеренного теплового потока в области вершины усталостной трещины при двухосном нагружении для нержавеющей стали 08X18H10 (а) и технического титана Вt1-0 (б)

Графики на рисунке 10 показывают удовлетворительное соответствие расчётных и измеренных значений. Для демонстрации универсальности предложенного соотношения построена зависимость скорости роста трещины от нормированного теплового потока Q^* (рисунок 11), определяемого как:

$$Q^* = \frac{Q}{(1-R)^2 \sigma^2} - A \sim \frac{da}{dN} \quad (7)$$

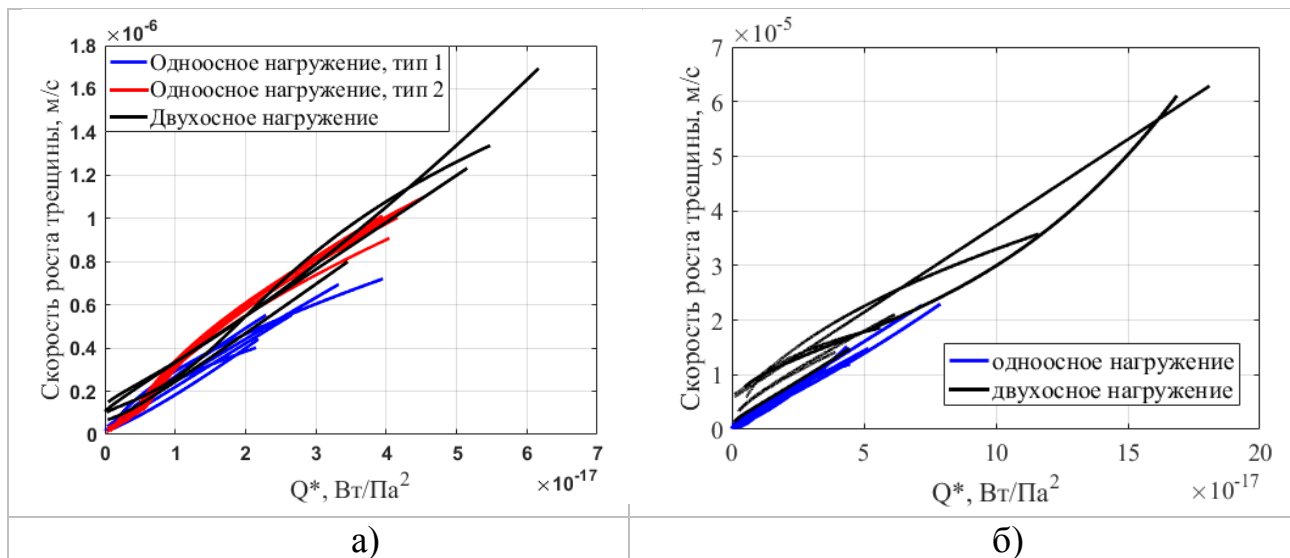


Рис. 11. Зависимость скорости роста трещины от нормированного теплового потока Q^* для нержавеющей стали 08X18H10 (а) и технического титана Вt1-0 (б)

На рисунке 11 наблюдается единая линейная зависимость скорости роста трещины от нормированного теплового потока для одноосного и двухосного нагружения. Из этого можно сделать вывод об универсальности предложенного

соотношения (6) и возможности его использования для прогнозирования распространения усталостной трещины.

В **заключении** изложены основные выводы по диссертационной работе:

1. Разработана методика измерения диссипации тепла при проведении усталостных испытаний, основанная на использовании оригинального контактного датчика теплового потока. Разработаны и реализованы методики калибровки контактного датчика теплового потока и показаны его преимущества при измерении теплового потока от образца в процессе циклического деформирования по сравнению с методом инфракрасной термографии.

2. Проведены совместные измерения теплового потока в области вершины усталостной трещины и скорости её роста в образцах из нержавеющей стали 08X18H10 и технического титана VT1-0 при одноосном и двухосном нагружении. Показано, что тепловой поток в области вершины трещины на стадии, соответствующей режиму Париса, имеет двухстадийный характер.

3. На примере нержавеющей стали 08X18H10 и технического титана VT1-0 показано, что предложенное соотношение, характеризующее взаимосвязь скорости роста усталостной трещины с тепловым потоком в области её вершины, справедливо как для одноосного, так и двухосного циклического нагружения металлов.

4. Разработанный экспериментально-теоретический метод для оценки скорости распространения усталостной трещины по данным теплового потока в области её вершины может быть использован для аттестации усталостных свойств различных конструкционных материалов и сплавов на металлической основе при разных условиях циклического нагружения.

Основные публикации по теме диссертации:

1. **Vshivkov A.**, Iziyomova A., Plekhov O., Baer J. Experimental study of heat dissipation at the crack tip during fatigue crack propagation // *Fracture and Structural Integrity*. – 2016. – V. 35. – P. 131-137. – DOI: 10.3221/IGF-ESIS.35.07

2. Baer J., **Vshivkov A.**, Plekhov O. Combined lock-in thermography and heat flow measurements for analysing heat dissipation during fatigue crack propagation // *Fracture and Structural Integrity*. – 2015. – V. 34. – P. 456-465.

3. Plekhov O., **Vshivkov A.**, Iziyomova A., Zakharov A., Shlyannikov V. The experimental study of energy dissipation during fatigue crack propagation under biaxial loading // *Fracture and Structural Integrity*. – 2019. – V. 13. – №. 48. – P. 50-57. – DOI: 10.3221/IGF-ESIS.48.07.

4. Vedernikova A., Iziyomova A., **Vshivkov A.**, Plekhov O. Three approaches to evaluate the heat dissipated during fatigue crack propagation experiments // *Fracture and Structural Integrity*. – 2020. – V. 14. – №. 51. – P. 1-8. – DOI: 10.3221/IGF-ESIS.51.01.

5. Plekhov O., **Vshivkov A.**, Iziyomova A., Venkatraman B. A model of energy dissipation at fatigue crack tip in metals // *Fracture and Structural Integrity*. – 2019. – V. 13. – №. 48. – P. 451-458. – DOI: 10.3221/IGF-ESIS.48.43.

6. Plekhov O., **Vshivkov A.**, The effect of fatigue crack rate on the heat dissipation in metals under mixed-mode loading // *Fracture and Structural Integrity*. – 2019. – V. 13. – №. 50. – P. 1-9. – DOI: 10.3221/IGF-ESIS.50.01.
7. **Vshivkov A.**, Iziyomova A., Plekhov O. Experimental investigation of fatigue crack induced energy dissipation under mixed mode loading // *Procedia Structural Integrity*. – 2020. – V. 28. – P. 1839-1845. – DOI: 10.1016/j.prostr.2020.11.007.
8. **Vshivkov A.**, Iziyomova A., Zakharov A., Shlyannikov V., Plekhov O. The experimental and theoretical study of heat dissipation at fatigue crack tip under biaxial loading // *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*. – 2019. – V. 103. – P. 102308. – DOI: 10.1016/j.tafmec.2019.102308.
9. **ВШИВКОВ А.Н.**, Изюмова А.Ю., Пантелеев И.А., Плехов О.А. О методе оценки распределения пластической деформации в области вершины усталостной трещины на основе решения задачи линейной теории упругости // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика*. – 2023. – № 6. – С. 41-49. – DOI: 10.15593/perm.mech/2023.6.04.
10. **Vshivkov A.**, Iziyomova A., Zakharov A., Shlyannikov V., Plekhov O. The experimental and theoretical study of plastic deformation in the fatigue crack tip based on method of digital image correlation // *Procedia Structural Integrity*. – 2018. – V. 13. – P. 1189-1194. – DOI: 10.1016/j.prostr.2018.12.246
11. **Vshivkov A.N.**, Iziyomova A. Yu., Panteleev I.A., Ilinykh A.V., Wildemann V.E., Plekhov O.A. The study of a fatigue crack propagation in titanium Grade 2 using analysis of energy dissipation and acoustic emission data // *Engineering Fracture Mechanics*. – 2019. – Vol. 210. – P. 312-319. – DOI: 10.1016/j.engfracmech.2018.05.012.
12. Пат. 2603939 Российская Федерация, МПК G01N 3/32 (2006.01). Способ определения скорости роста трещины в образце и устройство для этого / **А.Н. ВШИВКОВ**, А.Е. Прохоров, О.А. Плехов, Ю. Бэр (DE), Ж-К. Бацаль (FR); заявитель и патентообладатель федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук (RU) – № 2015129783/28; заявл. 20.07.2015; опубл. 10.12.2016, Бюл. №34. – 14 с.: ил. https://www1.fips.ru/Archive/PAT/2016FULL/2016.12.10/INDEX_RU.HTM