

ОТЗЫВ

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

Актуальность темы. Работа посвящена прогнозированию усталостного разрушения материалов — ключевой проблеме в обеспечении безопасности и долговечности инженерных конструкций. Актуальность обусловлена необходимостью снижения коэффициентов запаса прочности при повышении требований к экономической эффективности, а также внедрением принципов допускаемой повреждаемости. Инженерные конструкции и механизмы при эксплуатации как правило подвержены смешанным формам деформирования и разрушения, наиболее сложным проблемам теоретической и прикладной механики. Циклический характер нагружения при условии наличия концентраторов напряжений создают дополнительные особенности в применении инженерных подходов при оценке усталостной долговечности элементов конструкций. При этом современный уровень развития моделей процессов накопления и развития повреждений требует перехода от эмпирических соотношений усталостного разрушения к физически обоснованным, что критично для современных высоконагруженных конструкций.

Представленная А.Н. Вшивковым диссертационная работа является актуальной по выбору объекта исследований с целью разработки термодинамической подхода для прогнозирования скорости роста усталостной трещины на основе теплового потока в её вершине. Для этого разработано соотношение для прогнозирования скорости роста трещины по данным о тепловом потоке в её вершине и представлен программно-аппаратный комплекс для реализации этого метода, применимый как минимум к одноосному и двухосному типу нагружения.

Полученные в рамках указанной постановки и реализации результаты диссертации определяют её **научную новизну, а также теоретическую и практическую значимость.**

Обоснованность научных положений, выводов, рекомендаций и достоверность полученных результатов. Достоверность результатов исследования и обоснованность научных положений и выводов не вызывает сомнений. Они обеспечены корректной постановкой цели и задач, системным характером проведения исследования, применением современных экспериментальных методов и не противоречивостью полученных результатов общефизическим принципам и ранее опубликованным данным.

Структура и содержание работы

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка литературы, включающего 126 источников. Основной текст диссертации содержит 128 страниц и иллюстрирован 69 рисунками и 10 таблицами.

Во **введении** отражена актуальность диссертационной работы, уровень разработанности темы, цель и задачи, научная новизна, методология и методы исследования, положения, выносимые на защиту, достоверность результатов, личный вклад автора.

В **первой главе** представлен обзор работ по теме исследования, начиная с пионерских работ Вёлера по изучению развития усталостных трещин до широко известного закона Париса. Описаны эмпирические соотношения для уточнения закона Париса для описания определённых эффектов в вершине трещины и применимых для многоосного нагружения. Отдельно выделены альтернативные физически обоснованные законы, характеризующие распространение трещин, в частности термодинамический подход и показана его перспективность. Проведён анализ экспериментальных методов измерения их длины, способы визуализации траектории усталостной трещины и измерения теплового потока в её вершине.

Поведённый литературный обзор показал, что на несмотря на многообразие работ и подходов к изучению распространения усталостных трещин, задача по установлению универсального подхода, применимого к произвольному типу нагружения, остаётся открытой. Это позволило автору сформулировать цели и задачи работы, которые ориентированы на разработку термодинамического соотношения и экспериментального метода определения значений его параметров для прогнозирования скорости распространения усталостной трещины в металлах при одно- и двухосном нагружении.

Во **второй главе** описан разработанный программно-аппаратный комплекс для регистрации параметров диссипации тепла в вершине усталостной трещины. Показана конструктивная особенность контактного датчика теплового потока, ключевого измерительного элемента для разрабатываемого термодинамического подхода. Также описана методика калибровки датчика и проведены верификационные испытания.

Третья глава диссертации посвящена описанию результатов экспериментальных исследований по измерению скорости роста усталостной трещины и регистрации диссипации тепла в её вершине. Исследования проводили на плоских образцах из нержавеющей стали 08X18H10 и техническом титане BT1-0. Усталостные испытания проводили на образцах разной геометрии при одноосном и двухосном нагружении. Показано, что по характеру изменения теплового потока 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 уравновешивается теплоотдачей в окружающую среду. На завершающей стадии

тепловой поток значительно возрастает, что обусловлено активным развитием усталостной трещины. В завершении проведён совместный анализ результатов одноосного и двухосного испытаний и показана линейная взаимосвязь скорости роста трещины и теплового потока в её вершине.

В **четвёртой главе** диссертации приводится вывод соотношения для описания скорости роста трещины на основе диссипации тепла в её вершине. Описан аналитический подход к расчёту работы пластической деформации и как следствие диссипации тепла 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. Для оценки величины диссипации энергии использованы гипотезы:

- 1) Полная энергия пластической деформации за один цикл нагружения определяется как сумма энергий в монотонной и циклической зонах.
- 2) Полная деформация в области вершины трещины связана с упругой деформацией, полученной в результате решения линейно-упругой задачи посредством модуля упругости и секущего модуля.

Применение второй гипотезы позволило автору использовать упругое решение в области вершины усталостной трещины, для которого существует аналитические соотношения при произвольном виде нагружения и получить соотношение, связывающее скорость роста усталостной трещины и диссипацию тепла в её вершине. Оно содержит два слагаемых, одно из которых не зависит от скорости роста трещины, а определяется только условиями нагружения. Анализ соотношения позволил сделать предположение, что на начальном этапе интенсивность тепловыделения определяется процессами, происходящими в зоне циклической пластической деформации. С ростом зоны монотонной пластической деформации наблюдается появление линейной корреляции между скоростью распространения трещины и тепловым потоком в области её вершины.

В разделе 4.2 проведена проверка основополагающей гипотезы (2) на основе анализа экспериментальных и теоретических полей деформации в области вершины трещины. Показано качественно удовлетворительное соответствие оценки размера зоны пластической деформации на основе использованной гипотезы и экспериментальных значений величины области пластических деформаций, полученной методом корреляции цифровых изображений.

По экспериментальным данным, полученным при одноосном нагружении исследуемых материалов, автор определил константы, входящие в предлагаемое соотношение для скорости роста трещины.

В заключительном разделе главы автор провел верификацию предложенного соотношения по экспериментальным данным о скорости роста трещины и диссипации тепла при двухосном нагружении.

Замечания по диссертационной работе

1. В постановке цели работы упоминается многоосное нагружение, в то время как в научной новизне обсуждаются эффекты, развивающиеся при одно- и двуосном нагружении. Не совсем понятно, следует ли двухосную схему испытаний относить к многоосным (с. 6-7 текста диссертации).
2. При описании принципа работы датчика теплового потока автор указывает: «по данным двух термодпар (5, 6) в микроконтроллере вычисляется напряжение питания $U_{пит}$ «охлаждающего» элемента Пельтье и посредством широтной импульсной модуляции через полевой транзистор подаётся эквивалентное напряжение». Как правило, в радиоэлектронной технике питающее напряжение является постоянной величиной; по всей видимости автор неудачно выбрал термин для обозначения «управляющего напряжения». Также автор на стр. 34 отмечает, что «для повышения точности и стабильности измерений в предлагаемой схеме используется активная термостабилизация с использованием аналогичного элемента Пельтье (3), который управляется микроконтроллером». К сожалению, термостабилизация не может повысить точность измерений, она позволяет лишь снизить дрейф показаний. Кроме того, на стр. 35 указано, что «измеряемый сигнал с резистора проходит через усилитель и регистрируется аналого-цифровым преобразователем (АЦП) микроконтроллера». АЦП не является запоминающим устройством, а предназначено лишь для преобразования сигналов из аналогового формата в цифровой.
3. На стр. 40 автор указывает: «Это вызвано тем, что заданное значение определяется по косвенным признакам, а именно по значению напряжения и потребляемого тока, что может не соответствовать реальному значению мощности на медной шине источника теплового потока в связи с тепловой инерционностью медной шины». Формулировку следует считать неудачной, поскольку речь идет методе измерения физических величин. То же касается формулировки на стр. 45 текста диссертации: «из графиков видно, что трение не оказывает существенного влияния, и вариант с прижатием датчика к образцу даёт достоверные результаты». Не понятно, что означает «достоверные результаты», и что является критерием их достоверности? Там же указано: «на рисунке 14 синяя линия отображает тепловой поток, рассчитанный аналитически, красная линия соответствует случаю измерения тепла с прижатием датчика с помощью пружины, чёрная и зелёная линии – датчик расположен на расстоянии 0.5 и 0.1 мм от образца, соответственно. Измеренный тепловой поток с учётом погрешности соответствует значению, вычисленному аналитически». Здесь следует отметить, что в работе не приведен расчет погрешности измерений. Наконец, на стр. 46 автор указывает: «отличие измеренного значения теплового потока от теоретического при внешнем приложенном напряжении 150 МПа связано с тем, что при такой величине нагрузки возникает пластическая деформация, в этих условиях уравнение Кельвина не применимо». При такой постановке не совсем понятно, как автор в

дальнейшей работе, где оценивается именно нагрев вследствие работы пластической деформации, может достоверно оценивать тепловой поток?

4. На стр. 54 автор указывает: «на рисунке 3.2.4 можно выделить три стадии с разным характером диссипации тепла. Первые 100 секунд наблюдается рост диссипации тепла и установление некоторого постоянного значения. На этом этапе происходит процесс установления стационарного состояния циклического деформирования, который обусловлен процессом установления теплового баланса всей системы (образец, датчик, испытательная машина, окружающая среда), окончательной фиксацией образца в захватах испытательной машины при нагружении, жёсткостью испытательной машины». С другой стороны, на приведенных на рис. 2.2.8 характерных измерениях теплового потока при использовании датчика и ИК камеры (стр. 42) показано, что время выхода датчика на «установившийся» режим показаний составляет ~100 сек. Не является ли первый выявленный эффект следствием второго? Там же на стр. 54 автор указывает: «Пластическая зона в вершине трещины перемещается в материале без существенного увеличения характерного размера и интенсивности деформации». Не совсем очевидно, на каком основании делается такое заключение.
5. На стр. 57 текста диссертации автор указывает: «на рис. 3.2.7 графики демонстрируют линейную зависимость между тепловым потоком в вершине усталостной трещины и скоростью её распространения до момента неконтролируемого роста трещины». Не совсем очевидно, какой участок автор рассматривает как линейный и какое выражение это имеет с количественной точки зрения потока (например, коэффициент корреляции)? Далее на стр. 58 автор обобщает: «Следует отметить, что значительные изменения теплового потока появляются ближе к середине линейной части кривой Париса (см. рисунок 3.2.6). Можно предположить, что необратимые изменения в материале, содержащем усталостную трещину, начинаются раньше, чем это можно предположить на основании закона Париса. Эти изменения, однако, отражаются на процессе тепловыделения в вершине трещины». Хотелось бы понимать, с чем все-таки связан выявленный характер изменения теплового потока.
6. На стр. 58 автор указывает: «как видно из графиков, представленных на рисунке 3.2.8, качественно эти две характеристики (размах КИН и диссипация энергии) ведут себя схожим образом, постепенно нарастая в ходе распространения усталостной трещины, что может быть косвенным свидетельством идентичности этих параметров для описания кинетики распространения трещины». Дискуссионным является утверждение об идентичности КИН и диссипации энергии, поскольку КИН учитывает, как затраты энергии на работу деформации, так и образование новых поверхностей (развитие трещин), в то время как диссипация энергии связана лишь с трансформацией подводимой энергии в тепло.
7. Согласно приведенным на стр. 85 на рис. 4.1.1, в, е распределениям температуры в вершине трещины при циклическом деформировании на разном

уровне нагрузки в двух первых циклах нагружения, локальный нагрев в вершине трещины достигал 158- 246 °С! Не совсем понятно, каким образом за два цикла можно было добиться нагрева до столь высоких температур. Кроме того, если нагрев происходит только в малой по размеру зоне в вершине трещины, почему диссипация энергии увеличивается с ростом длины трещины?

8. На стр. 108 на рис. 4.3.4 и 3.4.5 приведены зависимость скорости роста трещины от теплового потока и нормированного теплового потока для нержавеющей стали 08X18H10 и для технического титана BT1-0. Обсуждается линейность указанных зависимостей. Однако количественной характеристики степени линейности, равно как и наблюдаемых отличий приведенных зависимостей, не приведено.

Указанные замечания носят частный характер, не касаются сути выносимых на защиту положений и выводов, а также не сказываются на высокой положительной оценке всей диссертации в целом.

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

Публикации по работе. Результаты исследований полностью отражены в 11 публикациях автора, проиндексированных в международных системах цитирования и входящих в список журналов, рекомендованных ВАК. Две статьи из которых опубликованы в журналах первого квартиля, согласно базе научного цитирования WoS. По результатам работы получен один патент.

Соответствие паспорту специальности. Оппонируемая диссертация полностью соответствует паспорту научной специальности 1.1.8. – механика деформируемого твердого тела.

Заключение. Работа А.Н. Вшивкова производит впечатление хорошо спланированной и технически грамотно реализованной, что позволило получить новые результаты экспериментального, теоретического и прикладного плана. Сформулированные положения, выносимые на защиту и выводы, обладают несомненной научной новизной и свидетельствуют о достижении цели исследования.

Диссертация А.Н. Вшивкова направлена на развитие термодинамического подхода к описанию распространения усталостных трещины в металлах при многоосном нагружении, имеющего существенное значение для машиностроения при эксплуатации и проектированию ответственных элементов конструкций и контроля их технического состояния. К практическим приложениям результатов работы А.Н. Вшивкова относится методика для детектирования процесса зарождения усталостных трещин и оценки усталостного ресурса механизмов и конструкций.

Диссертация А.Н. Вшивкова является завершённой научно-квалификационной работой, выполненной на высоком научном уровне и содержит новые научно обоснованные результаты, имеющие существенное практической

значение для развития страны. По совокупности использования современного испытательного оборудования, научных подходов и полученных результатов, работа А.Н. Вшивкова заслуживает положительной оценки.

Диссертация «Расчётно-экспериментальный метод построения уравнения роста усталостной трещины в металлах на основе оценки диссипации энергии в её вершине» отвечает требованиям «Положения о присуждении учёных степеней» П. II.9. предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук, а её автор А.Н. Вшивков заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.8. – механика деформируемого твёрдого тела.

Заведующий лабораторией «Механики полимерных композиционных материалов» Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук», доктор технических наук, профессор

Сергей Викторович Панин

« 30 » апреля 2025 г.

Подпись Панина С.В. заверяю
Ученый секретарь ИФПМ СО РАН, к.ф.м.н.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук

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

Телефон: +7 (3822) 49-18-81

Сайт: <http://www.ispms.ru>

E-mail: root@ispms.tomsk.ru



Наталья Юрьевна Матолыгина