

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Иштырякова Ивана Сергеевича «РАЗВИТИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ ДЕФЕКТОВ В УСЛОВИЯХ СЛОЖНОГО НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ПРИ ОТРИЦАТЕЛЬНОЙ, НОРМАЛЬНОЙ И ПОВЫШЕННОЙ ТЕМПЕРАТУРАХ», представленную по специальности 1.1.8. (01.02.04) – механика деформируемого твёрдого тела, на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук.

Многочисленные исследования отказавшей авиационной техники в эксплуатации убеждают в том, что для многих элементов конструкций, по крайней мере, начальная стадия распространения усталостных трещин реализуется с поверхности. В частности, это типичная ситуация для развития усталостных трещин в дисках компрессоров, изготавливаемых из титановых сплавов. Поэтому рассмотрение закономерностей накопления и развития повреждений в условиях формирования (создания) поверхностных дефектов является актуальной и своевременной задачей научного исследования, которое нацелено на практическую значимость.

Тем более, что реальное напряжённое состояние элемента конструкции связано с большим разнообразием типов и видов сложного напряжённого состояния. В условиях эксплуатации, когда температурно-силовые условия меняются по режимам полёта, когда продолжительность действия этих режимов зависит от маршрута воздушного судна, неоспорима необходимость комплексного, многофакторного, а именно, синергетического рассмотрения реализуемых условий эксплуатации. Именно этой сложной комплексной проблеме оценки поведения материалов с поверхностными дефектами посвящена оппонируемая работа.

В **первой главе** диссертации сделан обзор исследований по теме диссертации и показано, что несмотря на глубину, многообразие и важность выполненных работ, комплексный подход в анализе поведения металлов с поверхностными дефектами отсутствует.

Вместе с тем, автор анализирует предложенные подходы в описании сложного напряжённого состояния металлов. Проведён анализ существующих и широко используемых методов оценки усталостной прочности элементов конструкций при сложном напряжённом состоянии. Последовательно автор диссертации рассматривает в качестве важного параметра в оценке сложного напряжённого состояния, так называемый T -член, введённый в рассмотрение Райсом.

Наконец автор демонстрирует необходимость перехода к новой характеристике описания поведения материала и делает свой выбор в пользу

ранее предложенного Шлянниковым В.Н. с сотрудниками пластического коэффициента интенсивности напряжений для анализа поведения материалов в условиях смешанных форм малоциклового деформирования с учётом девиации поверхностной трещины.

Далее подробно рассмотрены различные подходы и процедуры в моделировании траектории трещин в поле сложного напряжённого состояния, что необходимо для разработки общей модели описания поведения материала как в терминах полной долговечности, так и в терминах периода роста трещины. Тем более, что применительно к области малоциклового усталости период роста трещины составляет не менее 50% от общей долговечности.

Весь указанный выше подробный анализ проведённых исследований позволил автору диссертации обосновать сформулированные в работе цель и задачи исследования.

Замечаний по первой главе диссертации нет.

Во **второй главе** рассмотрены методические аспекты проводимого исследования. В табличной форме представлены основные виды испытаний при разных температурах и виды образцов: цилиндрической формы (полые цилиндры) и компактные. Указаны виды материалов – алюминиевые сплавы и титановый сплав ВТЗ-1, наиболее широко применяемых в авиационных конструкциях.

Цилиндрические образцы использованы для воспроизведения двухосного нагружения в условиях растяжения-скручивания. Для создания поверхностных дефектов использованы круглые образцы с кольцевой выточкой. Программным обеспечением проведена оптимизация формы образцов и оценено их напряжённое состояние. В полых образцах вводился продольный и поперечный надрез полуэллиптической формы для задания процесса развития разрушения в виде трещины требуемой формы. Диапазон изменения выбранных температур составил от -60°C до $+250^{\circ}\text{C}$.

Представленное в этом разделе оборудование и его оснастка вызывают восхищение у оппонента и убеждают в том, что полученные в работе результаты экспериментальных исследований являются качественными, важными и, безусловно, достоверными.

Для оценки скорости роста трещины не только по поверхности образца, но и на удалении от поверхности, в зоне максимального удаления фронта от очага разрушения применён метод маркерных режимов нагружения с изменением асимметрии цикла с 0.1 на основном режиме к 0.5 при маркерном режиме нагружения.

Описано получение пластического коэффициента интенсивности напряжения (далее, КИН) и приведены формулы для расчёта эквивалентного КИН при смешанных модах нагружения.

Приведён алгоритм программы расчёта КИН и скорости роста трещины в компактных образцах при внецентренном растяжении. Обработка данных по эквивалентному КИН и построение кинетических кривых проведена с применением формулы Париса.

Рассмотрены предварительные результаты по оценке соотношений полуосей распространяющихся трещин, а также указаны некоторые закономерности определения кинетики роста трещины с использованием раскрытия берегов трещины.

Замечания по второй главе.

1. Всегда представляет интерес выбор тех или иных параметров нагружения образцов. Для алюминиевых сплавов, как кажется оппоненту, температурный диапазон понятен – температура на обшивке в крейсерском режиме, а также разогрев материала, когда осуществляется полёт со сверхзвуковой скоростью. Однако хотелось бы именно от автора работы услышать обоснование выбора параметров цикла нагружения образцов.
2. Также не совсем понятно, какой продолжительности выбирались маркерные режимы для оценки скорости роста трещин при разных условиях нагружения образцов.
3. В условиях растяжения и скручивания работает, например, крыло самолёта или лонжерон лопасти. Однако соотношения этих компонент могут значительно меняться, например, вдоль оси этих узлов. Поэтому выбранные соотношения для сложного напряжённого состояния также следовало бы связать с каким-нибудь конструктивным элементом.
4. В компактном образце нет поверхностного дефекта. Поэтому в рамках представленной работы хотелось бы получить уточнение, какова именно роль такой формы образца и условий его нагружения в рамках заявленной темы диссертации.

В **третьей главе** автор переходит к результатам проведённого исследования и их анализу.

Автор подробно приводит механические и физические характеристики исследуемых материалов, а также условия и режимы нагружения образцов

разной геометрии. Представлены расчётные данные по номинальным напряжениям в образцах.

Подробно рассмотрен подход к описанию роста трещин с учётом пластического КИН, введённого в работах Шлянникова и Туманова. Далее, автор переходит к рассмотрению вопроса об определении зоны процесса, что позволяет описать поведение материала с трещиной в условиях сложного (многопараметрического) циклического нагружения. Приведены соотношения для определения плотности энергии деформации через эквивалентный коэффициент интенсивности напряжения. Приведено уравнение 3.2.24 для определения эквивалентного КИН в случае многокомпонентного нагружения.

Далее автор приводит расчётные схемы и результаты самих расчётов круглых и компактных образцов со сквозными трещинами. Приведены модели образцов с сеткой конечных элементов и результаты самих расчётов. Представлены также результаты расчётов в виде распределения напряжённо-деформированного состояния (НДС) в использованных в исследовании образцов. В итоге в табличной форме представлены значения максимального напряжения на фронте трещины при разных условия нагружения.

Представлены результаты распределения упругих и упругопластических КИН для исследованных материалов в условиях одноосного растяжения цилиндрических образцов и при внутреннем давлении с разным расположением дефекта, а также при разной температуре.

Аналогичные сведения даны для компактных образцов, изготовленных из титанового сплава ВТЗ-1.

Проанализировано изменение формы и размера зоны процесса при многопараметрическом нагружении.

Получены функции аппроксимации соотношений полуосей трещин в полых образцах из алюминиевых сплавов, которые представлены в табличной форме.

Аналогичным образом в табличной форме представлены K-тарировки, а также расчётные функции для разных мод при определении КИН.

Замечания по третьей главе.

1. В таблице 3.7.1 представлены выражения для соотношения полуосей для точек «А» и «Б» для двух разных материалов. Как кажется оппоненту, эта информация относится ко всем исследованным образцам. Вместе с тем, далее приведена таблица, в которой расчётные функции представлены для точек «А» и «Б» применительно к одному и тому же материалу, но почему-то указаны

номера образцов. Хотелось бы получить пояснения, зачем это сделано.

2. Как кажется оппоненту, выражение «безразмерное эквивалентное напряжение» не передаёт тот смысл, который заложен авторами в эту характеристику.

В **четвёртой главе** автор приводит результаты выполненных им экспериментов и полученные кинетические кривые при различных условиях проведённых испытаний. Это насыщенная экспериментальная часть проведённого исследования.

В таблице 4.2.4. приведены изломы полученных в испытаниях образцов. Они интересны и вызывают множество вопросов, которые, возможно, не совсем напрямую относятся к работе. Они даны после рассмотрения четвёртой главы. Показано очевидное различие в поведении алюминиевых сплавов при сопоставлении кинетических кривых в разных условиях нагружения по температуре. Автор связывает этот эффект с различием в упругопластических характеристиках материалов, с чем вполне можно согласиться.

Показано различие во влиянии внутреннего давления на кинетику трещин при растяжении и скручивании полых образцов. Этот вопрос представляет особый интерес, т.к. согласуется с видом полученных изломов, по которым можно предположить о возникновении эффекта контактного взаимодействия берегов трещины, сквозь который не может осуществляться воздействие на вершину трещины другим фактором.

Сильное впечатление производит эксперимент с проведением испытаний на внутреннее давление с продольной трещиной. Автор специально уделает этому внимание, поскольку потребовалась специальная доработка испытательной машины для выполнения эксперимента.

Большой интерес вызывают результаты сопоставления поведения алюминиевых сплавов с точки зрения роста усталостных трещины в терминах упругих и пластических КИН. Сплав В95 значительно уступает сплаву Д16, т.к. его кинетические кривые располагаются существенно выше по оси скорости в том же диапазоне изменения КИН.

Интересен результат сопоставления кинетики трещин для сплава Д16 в середине и по боковой поверхности при разных температурах. Во-первых, как кажется оппоненту, со снижением температуры кривые роста трещины приходят в припороговую область, но более важно, что они отличаются в середине по фронту трещины и по боковой поверхности (см. рис. 4.5.2). Это наглядный пример того факта, что нельзя только по поверхности характеризовать поведение материала вдоль всего фронта трещины.

На рис. 4.5.7 представлен интересный сравнительный эксперимент в поведении сплавов В95 и Д16Т. Очевидно, что при температуре -60°C на поверхности нет явной пластической деформации материала и скоростной диапазон уходит в припороговую область. Хотелось бы заглянуть в излом при большом увеличении и проанализировать кинетику трещин вдоль всего фронта с отличиями в механизмах разрушения. Конечно, это тема будущих исследований диссертанта. Возможно даже, что само понятие о пластическом КИН нужно изменить и ввести соответствующие поправки. Однако прошу прощения, это дело будущих размышлений автора диссертации (оппонент проявил излишнюю заинтересованность в результатах представленной работы). Кстати, на переход в припороговую область указывают очень высокие значения показателя степени при КИН в уравнении Париса, которые представлены в таблице 4.5.2.

Любопытна представленная характеристика оценки влияния температуры на поведение материала в уравнении 4.5.2.

Замечания по четвёртой главе.

1. В таблице 4.2.1 представлены изломы с маркерными режимами и без них. Это приведено для сравнения того, как растёт трещина в разных условиях испытаний? Далее, в этой же таблице трещины растут при одном и том же виде нагружения симметрично и несимметрично. Естественен вопрос: почему?
2. Более того, при низкой температуре изломы для двух сопоставляемых материалов разные. Наверное, правда, далее будет приведён соответствующий комментарий.
3. В расчётах фигурирует величина N_0 , что, как кажется оппоненту, отражает длительность испытаний до зарождения трещины. Однако нигде не сказано, для какого размера начальной трещины эта характеристика получена.
4. Оппонент хотел увидеть номера образцов, которые указаны в таблице предыдущего раздела, но так и не обнаружил.
5. При аппроксимации кинетических кривых говорится о линейном участке диаграммы. Однако, чтобы понять на каком именно участке кинетической кривой проведено определение констант уравнения Париса, следовало бы указать границы по уровню КИН или скорости роста трещины.
6. Значения показателя степени в уравнении Париса около 46 и 37 свидетельствует о том, что это не участок Париса, а припороговая область скоростей роста трещины. Аналогичное понимание следует и из таблицы 4.5.2.

В пятой главе диссертации рассмотрен вопрос о переходе к оценке ресурса элементов конструкции с поверхностными трещинами (или дефектами) и особое внимание уделено дискам компрессора двигателя, которые изготавливаются из титановых сплавов. Приведены численные расчёты с указанием распределения напряжений в диске газотурбинного двигателя (ГТД) и указана зона пластической деформации в зоне радиуса паза.

На втором этапе расчётов приведены данные о развитии поверхностных трещин в дисках и оценена в этом случае долговечность на основе выполненных в предыдущих разделах исследований в рамках диссертационной работы. Расчёты проведены для разной угловой скорости вращения диска, которая соответствует реализуемым условиям эксплуатации.

Интересный результат представлен на рис. 5.2.9 для эквивалентного упругого КИН при разной температуре и скорости вращения диска. Правда, появляется средний фронт трещины, который никак не закоординирован соотношением осей.

Аналогичные сведения приведены и для пластического КИН на рис. 5.2.10 и рис. 5.2.11 с учётом смешанных мод деформирования материала, на основе выполненных в предыдущем разделе расчётов напряжённо-деформированного состояния диска.

Далее автор приводит использованные им уравнения для оценки скорости роста трещины с учётом полученных расчётных характеристик для упругого и пластического КИН.

Для достоверного прогнозирования скорости роста трещины автор приводит алгоритм расчёта и рассматривает поведение размера зоны процесса при разной температуре. Приведены результаты прогнозирования скорости роста трещины при разной температуре от разных характеристик КИН. Наконец представлен каскад результатов прогноза периода роста трещины (который рассматривается как ресурс) в условиях упругого и пластического КИН для разных угловых скоростей и температур испытания. Принципиально важно, что результаты прогноза по пластическому КИН дают занижение результата по длительности на 22%, 24% в зависимости от температуры, а, следовательно, для прогноза ресурса необходимо использовать пластичный КИН.

Замечания по главе пять.

1. Приведены таблицы 5.2.2 и 5.2.3 с одинаковым названием, хотя, судя по тексту, они относятся к разным положениям фронта трещины.
2. Подрисуночная подпись на рис.5.2.7 не дописана или пропущено слово. На этом же рисунке написано «plastic», однако не пояснено, что это обозначает.

3. Рассматривается начальное и конечное соотношение полуосей для фронта трещины и сказано, что из-за изменения соотношения полуосей максимум деформации смещён от свободной поверхности до внутренней поверхности замкового соединения. Поскольку приведена начальная величина соотношения 0.48, то законно спросить: до этого (меньшего) соотношения максимум деформации на поверхности? Это некоторая критическая величина соотношения?
4. Автор ссылается на уравнения 5.3.6, из которого определяется скорость роста трещины и долговечность. Однако из указанного уравнения определяется период роста трещины, а долговечность ещё в себя включает период зарождения трещины.

Проведённое исследование производит сильное впечатление в первую очередь тем, что оно органично сочетает в себе глубокое экспериментальное выявление закономерностей роста усталостных трещин в многопараметрическом пространстве внешнего воздействия на материал и серьёзнейшее аналитическое, расчётное определение реализуемого напряженного состояния образцов и элементов конструкций. В результате автору работы удалось получить новый результат в анализе кинетики трещин в сложных условиях нагружения, отражающих реальное эксплуатационное нагружение материалов.

Разработанные алгоритмы программ численного моделирования с учётом перемещения различных точек фронта трещины позволили получить комплексное представление о развитии поверхностных трещин, в том числе и при скручивании материала, в результате чего удалось представить модель прогнозирования ресурса диска ГТД на стадии распространения усталостной трещины.

Таким образом, по совокупности использования современного, уникального испытательного оборудования, методов оценки скорости роста поверхностных трещин, развитых и реализованных численных методов оценки эволюции напряженного состояния вдоль фронта трещины на стадии их роста, а также на основе разработанной модели прогнозирования ресурса диска ГТД на стадии роста трещины работа безусловно заслуживает высокой оценки и требует продолжения в части перехода к комплексному фрактографическому анализу, что является следующей масштабной научной работой, возможно, и под руководством Иштырякова И.С., как уже защитившего кандидатскую диссертацию.

Представленные оппонентом замечания по выполненной работе свидетельствуют о проявленном к ней не только внимании, но и заинтересованности, т.к. полученный в работе новый научный результат

требует скорейшего использования в научной и практической среде конструкторов, а также эксплуатантов, занимающихся оценкой, обоснованием и продлением ресурса элементов авиационных конструкций.

Автореферат в полной мере отражает содержание представленной к защите диссертационной работе.

Таким образом, оппонируемая диссертация соответствует по содержанию и достигнутым в ней результатам паспорту специальности 1.1.8. (01.02.04) – механика деформируемого твердого тела, а её автор, Иштыряков Иван Сергеевич, заслуживает присуждения ему искомой степени кандидата физико-математических наук.

Представитель России в Европейском Обществе Механиков и Материаловедов в комитете «Микромеханизмы разрушения»,

Заслуженный деятель науки РФ, профессор по кафедре «Инженерная физика» МАИ и по кафедре «Безопасность полётов» «Московский государственный технический университет гражданской авиации» (МГТУ ГА),

доктор технических наук по специальности Материаловедение в машиностроении и Динамика и прочность машин и механизмов,

начальник отдела металлофизических исследований авиационных материалов ФАУ «Авиационный регистр Российской Федерации»

Андрей Андреевич Шанявский

«23» августа 2021 г.

Подпись Шанявского А.А. заверяю

Начальник отдела кадров Авиарегистра России

Наталья Викторовна Кривчикова

Федеральное автономное учреждение «Авиационный регистр Российской Федерации» (Авиарегистр России)

141426, Московская область, Химкинский район, а/п Шереметьево-1, а/я 54.

Телефон: (495) 578 – 52 – 88

E-mail: 106otdel@mail.ru, root@flysafetv.msk.ru

