

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на кандидатскую диссертацию *ЗАХАРОВА АЛЕКСАНДРА ПАВЛОВИЧА*
«ХАРАКТЕРИСТИКИ ЦИКЛИЧЕСКОЙ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ КОНСТРУКЦИОННЫХ
МАТЕРИАЛОВ ПРИ СМЕШАННЫХ ФОРМАХ ДВУХОСНОГО НАГРУЖЕНИЯ»,
представленную по специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела

Многолетние исследования процессов развития разрушения в элементах конструкций показывают, что в случаях зарождения и роста трещин в ответственных деталях решающее значение в определении причины разрушения, а также в определении периодичности их осмотров имеет оценка напряжённого состояния материала в зонах реализованного разрушения. Этому вопросу уделяется все большее внимание. Число работ в этом направлении возрастает в связи с тем, что проблема в оценке сложного напряжённого состояния включает в себя, как решение задач в рамках представлений об однородной среде, так и требует учёта поведения материала, как реальной среды, в которой протекает процесс роста трещины. Более того, форма фронта распространяющейся усталостной трещины, ориентированная разнообразно по отношению к ориентировке векторов главных напряжений, может меняться, и её вид отражает реальную картину распределения напряжений перед вершиной трещины. Поэтому проблема, рассматриваемая в рамках представленной диссертационной работы, является актуальной, научно важной, а её результаты необходимыми для практического использования.

ВВЕДЕНИЕ

Во введении дано обоснование необходимости проведения исследования в рамках упругопластической постановки решения задачи в анализе напряжённого деформированного состояния среды, сформулированы цели и задачи исследования, указана теоретическая и практическая значимость работы, научная новизна, а также перечислены положения и достижения работы, которые вынесены на защиту.

Замечаний по этому разделу нет.

В главе 1, «Характеристики циклической трещиностойкости при смешанных формах двухосного нагружения», автор рассматривает основные вопросы, касающиеся современных представлений о распространении трещины в полях напряжений при разной их ориентации. Подчёркивается, что траектория трещин существенно зависит от возникающего в пластине поля напряжений. Рассмотрены теоретические решения в описании поля напряжений при смешанных модах нагружения. Подчёркнуто, что при сложном, многокомпонентном

нагружении необходимо учитывать, так называемый T - несингулярный второй член в разложении при определении поле напряжений перед вершиной трещины или T -напряжение.

В случае упругопластического решения рассмотрен двухпараметрический критерий Бетегона и Хэнкока, который положил начало исследований эффектов стеснения в условиях многопараметрического воздействия. Далее, автор переходит к рассмотрению J -интеграла, который в течение длительного времени используют для описания упругопластического состояния материала в вершине трещины.

Далее проведён анализ граничных условий и критериев для определения условий роста трещины, в частности, подчёркивается, что, несмотря на сложное поле реализуемого напряжённого состояния при смешанных модах деформирования, решающее значение имеет факт роста трещины под действием нормального напряжения. Этот критерий отражает реальное развитие процесса разрушения в элементах конструкций, как это многократно было установлено рецензентом.

Особое внимание уделено критерию S_i - коэффициент плотности энергии деформации. Он включает в себя все три компоненты деформирования и позволяет определять траекторию трещины в плоскости, где достигается минимум по величине этого критерия.

Представлено понимание автора о том, что в условиях внешнего двухосного нагружения, когда речь идёт о компонентах, лежащих в одной плоскости, распространение усталостных трещин в большей части реализуется в условиях нормального отрыва и кинетические параметры описывают поведение материала в рамках представлений об эквивалентных характеристиках.

Важно, что в этой главе приведены сведения о реализуемых напряжённых состояниях для разных элементов конструкций, после чего приведены сведения о реализуемом напряжённом состоянии в насадных дисках паровых турбин. Это тот объект, который рассматривается далее, в рамках представленной диссертационной работы.

В последней части обзора приведены существующие кинетические уравнения, которые предложены для описания скорости роста усталостных трещин при смешанных условиях нагружения материала.

На основе представленного анализа автор приходит к заключению об ограниченных возможностях воспроизведения эффектов влияния геометрии и условий нагружения при смешанных формах нелинейного деформирования. Поэтому автором сформулирована цель исследования и поставлены задачи для её решения.

Замечания главе 1

1. Справедливо уделяя внимание расчётам коэффициента интенсивности напряжений при смешанных модах нагружения, автор не уделил внимание расчёту эффективного коэффициента интенсивности напряжений. В частности, МакЛанг показал, что введённый им подход численного моделирования при разных условиях двухосного нагружения позволяет свести кинетические кривые роста усталостных трещин к одной. Тем более, что известная программа моделирования роста усталостных трещин NASGROWTH основана на расчёте эффективного коэффициента интенсивности напряжений. Правда, речь не идёт о наклонных трещинах, которые рассмотрены в представленной к защите диссертации.

2. Было бы нагляднее в обзоре поместить для сравнения хотя бы несколько кинетических кривых, особенно это касается результатов, моделирующих траекторию трещин.

В главе 2, «Методика исследования характеристик циклической трещиностойкости при смешанных формах двухосного нагружения», автор приводит сведения о комплексе установок, видах образцов и расчётных методов для оценки поля напряжённого состояния испытанных образцов, а также об измерительном комплексе, использованном для слежения за ростом трещин.

Первоначально дано обоснование выбора двух типов крестообразных образцов постоянной толщины и с уменьшенной по толщине рабочей частью образцов. Проведена оптимизация геометрии образцов для реализации однородного поля двухосного напряжённого состояния за счёт варьирования радиуса сопряжения между лепестками. Выбран оптимальный вариант по геометрии образца на основании расчётного определения поля напряжений по осям нагружения.

Далее, проведена оптимизация образца с утонённой центральной частью методом конечных элементов и представлена расчётная связь параметров внешнего нагружения по осям с напряжённым состоянием в центре образца, а также указана величина получаемого коэффициента двухосности.

Основное внимание уделено методам анализа поведения материала при смешанных модах нагружения. Даны формулы для определения T -напряжения и на основе представлений, введённых Райсом, рассмотрены способы его определения через узловыe компоненты действующих перемещений или напряжений. На основе сопоставления результатов оценки T -напряжения показано, что метод перемещений оказывается наиболее приемлемым по получаемым данным о напряжённом состоянии образца.

Для получения в дальнейшем кинетических кривых осуществлены K -тарировки для последующего определения коэффициента интенсивности напряжений (далее, КИН). В связи с этим рассматривается пластический КИН, как новая характеристика поведения материала. Важным достижением в использовании этого параметра является его чувствительность к пластическим свойствам материала. Его величина связана с J -интегралом и получается из решения уравнения для его описания на основе подхода Хатчинсона. Это принципиально новый подход в описании поведения материала с усталостной трещиной, что является важнейшим достижением представленной к защите диссертационной работы.

Рассмотрены поля напряжений и перемещений в случае смешанных мод деформирования с учётом смещений берегов трещины для получения окончательного решения задачи по определению пластического КИН. Важно отметить, что для описания поведения материала учтён поворот, возникающий в вершине трещине при пластическом перемещении вдоль горизонтальной оси.

После этого представлен комплекс испытательного оборудования, включая устройства для слежения за распространением усталостной трещины в поле двухосного нагружения плоских крестообразных моделей. Подчёркивается особенность проведения испытаний в связи с тем, что при задании разной начальной ориентации надреза рост трещины происходит не в той же плоскости, что и надрез. Это методически рассмотрено с точки зрения оценки точности получаемых результатов измерения с применением микроскопа МБС-1.

В заключительной части рассмотрены уравнения, описывающие кинетические кривые на основе двух параметров – плотности энергии деформации, предложенного Си, и пластического КИН.

Замечания по главе 1

1. К сожалению, в методической главе не нашли отражение сведения о материалах и их характеристиках, которые исследовал автор, что было бы вполне логично.

2. На рис. 2.6 и 2.7 представлена шкала в «мм». Однако, как кажется рецензенту, это не так. Согласно шкалы, на расстоянии 0.015мм начинается заметное уменьшение напряжений. При этом в тексте написано, что «...на удалении от центра образца на 50 мм наблюдается максимальное падение нормальных напряжений σ_{yy} на 38 %». На горизонтальной шкале указанных графиков такой величины, 50 мм, нет. Видимо, речь идёт о метрах.

3. В формуле 2.18 указано, что «...интенсивность напряжений, нормированная на предел текучести», но приведена величина σ_0 . Возможно, что это описка, т.к. нужно вместо «0» написать «0.2».

4. Формулы 2.15 и 2.20 характеризуют один и тот же пластический КИН. Однако обозначения использованы разные. Как кажется, нужно было пояснить, что речь идёт о численном моделировании по формуле 2.20, но, на самом деле, это тот же самый параметр, что и представлен в формуле 2.15. Термин «численное значение», как кажется, не совсем верен.

5. При проведении измерений длины трещины на начальном этапе всегда существует субъективный фактор выявления трещины. Это особенно проявляется в случае вибрирующего образца. Хотелось бы уточнить, с какого размера надёжно выявлялась и фиксировалась трещина.

В главе 3, «Вычислительные аспекты определения характеристик трещиностойкости при смешанных формах двухосного нагружения», представлен комплекс алгоритмов программ, с помощью которых автор получал характеристики трещиностойкости исследованных материалов.

Последовательно, на основе программного пакета «ANSIS», рассмотрено распределение полей напряжений в вершине трещины применительно к крестообразным моделям в случае смешанных видов нагружения по двум осям с разным соотношением компонент напряжений. Даны таблицы по углам ориентации трещины и относительным длинам трещин, рассмотрены значения T -напряжений, приведены их относительные величины в функции расстояния от вершины трещины, а также получены K – тарировки в полях смешанных видов нагружения.

Важное значение имеет представленный анализ определения пластического КИН, как новой, используемой автором работы, характеристики поведения материала. Ключевым вопросом в его определении является оценка параметра I_n в приложении к типовым геометриям экспериментальных образцов. Представлены формулы, на основе решений Шлянникова В.Н. и Туманова, с помощью которых задача об определении указанного параметра решается численными методами расчетов упругопластических полей напряжений и перемещений в области вершины трещины в крестообразных моделях обеих рассматриваемых геометрий.

Важно отметить, что рассмотренные корректирующие параметры в расчёте КИН отнесены к условию нормального отрыва, как определяющего процесс деформирования и разрушения материала.

Для оценки параметра I_n рассмотрен необходимый в расчёте параметр смешанности, который учитывает отношение окружной и сдвиговой компонент напряжений на продолжении плоскости расположения исходной трещины.

Проведённый комплекс численного определения характеристик, входящих в параметр I_n позволил продемонстрировать его интегральную характеристику от всех переменных применительно к двум зонам фронта трещины в середине образца и на его поверхности.

Вполне логично, что автор обращается к непосредственно свойствам материала, которые должны продемонстрировать необходимость столь детального анализа напряженного состояния материала в вершине трещины и рассмотреть пластический КИН. С этой целью изучены два состояния стали 3ХНЗМА в исходном состоянии и после её закалки с отпуском. Показано, что в условиях параметра смешанности мод деформирования более 0.3 имеется существенное различие в параметре I_n , характеризующем поведение материала при расчёте пластического КИН.

Замечания по главе 3

1. На рис. 3.10 и 3.11 представлена зависимость величины T -напряжений, а на шкале указана относительная его величина. Сказано «Распределения упругих T -напряжений для смешанных форм двухосного деформирования в плоском образце», однако приведена зависимость от угла наклона начального надреза.

2. На стр. 101 написано – «Известно, что в вершине наклонной трещины при плоском напряженном состоянии реализуются две формы разрушения. В этом случае для интерпретации скорости роста трещины следует использовать эквивалентный параметр, который учитывает вклад каждой моды деформирования». Как кажется, наклон трещины не однозначно характеризует две или более форм разрушения. Для этого нужно провести анализ рельефа излома. Опыт исследования разрушенных элементов конструкций и крестообразных моделей после испытаний в лаборатории убеждает в обратном – доминирует всегда один вид разрушения, связанных с нормальным отрывом. Это также подчёркнуто и в самой работе, т.к. представлены корректирующие расчёт параметры в условиях нормального отрыва. Что касается эквивалентного КИН, то это не вызывает сомнения, т.к. затраты энергии на рост трещины разные при разных видах нагружения.

3. В обзоре, глава 1, представлены выражения для определения плотности энергии деформирования по СИ – (1.14) и (1.15). В данном разделе опять приводится та же формула, но со ссылкой (3.6), причём коэффициенты формулы имеет другие значения. Почему?

4. К сожалению, только на стр. 104 появились первые сведения о материале образцов – сталь 3, сталь 34ХНЗНА. Однако сведений о том, почему именно выбраны эти материалы, не представлено. Считаю, что все эти сведения должны были быть представлены во второй главе.

5. На стр. 105 сказано: «Условно принимаем, что на свободной поверхности образца реализуются условия ПНС, а в середине толщины – условия ПД». Далее приведены графики, на которых показано распределение параметра I_n с утверждением, что распределение напряжений именно при разном напряжённом состоянии. Как кажется, правильнее было бы сохранить указание на место определения полей изменения параметров относительно фронта трещины, поскольку вдоль фронта трещины распределение напряжений меняется и, следовательно, меняется напряжённое состояние. Тем более что, далее, на рис. 3.18 и 3.19 автор так и поступает.

6. На стр. 106 появляется параметр смешанности, представленный через \arctang , тогда как во втором разделе приведена формула 2.17 для определения этого параметра через \tan^{-1} . Наверное, правильнее было сослаться на уже написанную форму, что многократно сделал автор в других разделах работы.

В главе 4, «Экспериментальное исследование характеристик циклической трещиностойкости сталей 34ХН3МА и ст3», представлены результаты обширных экспериментов и продемонстрированы закономерности роста трещин при разных начальных положениях надрезов в центральной части образцов.

Экспериментально показано, что по мере изменения коэффициента двухосности нагружения в плоском образце скорость роста трещины увеличивается от двухосного растяжения-сжатия к равно двухосному растяжению. Для крестообразного образца с утонением в рабочей зоне установлен противоположный характер влияния вида двухосного нагружения на скорость роста трещины.

Далее показано, что между наибольшим коэффициентов плотности энергии деформации при скорости роста трещины 10^{-4} мм/цикл и коэффициентов двухосности реализуется устойчивая связь.

После этого рассмотрены условия нагружения, когда трещина стартует от разно ориентированного надреза. Фактически при одинаковом внешнем виде одноосного или двухосного нагружения существенно менялось распределение напряжений перед вершиной надреза, что приводила к существенному проявлению компоненты сдвига.

Показано, что упруго-пластический коэффициент интенсивности напряжений является чувствительным к типу геометрии образца и описывает различия в напряженно-деформированном состоянии в диапазоне от плоского напряженного состояния до плоской деформации.

На основе полученных закономерностей предложено описание закономерностей роста трещины в разных по геометрии образцах с единых позиций, вводя безразмерные

характеристики через пороговые параметры КИН, что позволило получить единое описание роста трещины для разных значений коэффициента двухосности. Это, безусловно, очень важное достижение работы. Оно завершается подробным рассмотрением алгоритма программы для получения сведения о закономерностях роста трещины по параметрам механики разрушения и свойствам материала.

Замечания по главе 4

1. Полученные показатели степени для кинетических кривых при разном коэффициенте двухосности при статистической обработке дают близкие значения, исключая одноосное нагружение. В этом случае получено меньшее значение показателя степени. Как кажется рецензенту, этот результат не отражает поведения материала. Очевидно, что кривые смещаются, практически, эквидистантно. Это скорее погрешности эксперимента или обработки данных испытаний.

2. К сожалению, автор приводит формулу для порогового КИН (4.5) не давая обоснования того, каким образом она получена. Например, не понятно, почему предельное напряжение составляет 1.9 от предела прочности, а не другую величину.

3. Не совсем ясно, как получен минимальный пороговый КИН, если речь идёт о расчёте, а не об экспериментальной оценке. Это обычный КИН или пластический КИН, как предложено в работе рассматривать описание роста трещин?

В главе 5, «Прогнозирование остаточной долговечности насадного диска паровой турбины» представлены данные по практическому использованию разработанных алгоритмов программ и методов анализа напряжённого состояния материала применительно к натурному изделию.

Представлены сведения об объекте исследования, сборный ротор паровой турбины. Приведены модели лопаток и диска турбины для описания их напряжённого состояния численными методами. Выявлены зоны наиболее напряжённого состояния материала и показано, что в условиях эксплуатации имен в этих зонах – радиус перехода в зоне шпоночного паза и отверстия в полотне диска, происходит образование трещин.

Затем осуществлено моделирование напряжённо-деформированного состояния материала дисков по мере распространения уголкового трещин. Приведено уравнение (5), полученное на основе решений Хатчинсона-Розенгрена-Райса, которое использовано для описания полей напряжений вдоль контура трещины.

В результате преобразования глобальной системы координат в локальную проведено определение упругих и пластических КИН. Получено немонотонное распределение упругих КИН вдоль фронта трещины в диске. Аналогичный результат продемонстрирован для Ин-интеграла, входящего в уравнение для определения пластического КИН.

В результате выполненного численного моделирования и оценки напряжённого состояния вдоль фронта трещины был установлен критический размер повреждения в диске паровой турбины.

Наконец, автор переходит к расчёту остаточной долговечности диска по критерию допущения предельного размера развивающейся трещины. Для этого представлены автором последовательно уравнения, которые позволили достичь поставленной цели. Важно подчеркнуть, что при одном и том же уровне напряжений в диске паровой турбины использование пластического КИН в уравнении (5.16) даёт более высокие значения по скорости роста трещины. Следовательно, оценки предельного состояния идут в запас и являются безопасными.

Замечания по главе 5

1. Автор указывает, и это замечательное достижение работы, что установлен критический размер дефекта в диске турбины. При этом даётся ссылка на рис. 5.15в. Во-первых, почему только на 5.15в, а не тоже и на 5.15г? Ведь размер дефекта указан и там и там. Во-вторых, сам-то автор как считает, какой размер?

2. Почему-то рис. 5.17, 5.19, рис.5.20 все «в английском». Хотелось бы всё читать и видеть в работе по-русски.

3. К сожалению, форма фронта распространяющейся трещины может меняться в связи с изменением структурного состояния материала, а также проявлением не одного, а смешанных механизмов разрушения. Поэтому следовало бы оговорить те граничные условия, для которых реализовано моделирование предельного состояния диска.

4. Автор исследовал поведение материала на образцах разной геометрии и получил разную закономерность в развитии трещин с увеличением коэффициента двухосности. Не совсем ясно, для какого случая рекомендовано моделировать рост трещин в дисках, тем более, что форма фронта трещины уголкового.

Заключение

Представленная диссертационная работа является законченным научным трудом, в её рамках решена проблема описания поведения материала в области упруго-пластического поведения металла в условиях двухосного нагружения и при смешанных модах деформации, благодаря введению новой характеристики – пластический коэффициент интенсивности напряжения. Введено описание роста трещин на основе коэффициента плотности энергии и проведено сопоставление кинетических закономерностей на основе обоих критериев.

Впервые предложено описание и получена обобщенная кинетическая кривая, которая в относительных координатах представляет новые закономерности накопления повреждений в металле при разных видах реализуемого двухосного нагружения. Разработан алгоритм программы и проведено определение закономерностей роста трещины в дисках паровых турбин с оценкой допустимого предельного состояния в эксплуатации.

Автор использовал современное испытательное оборудование, рассмотрел процессы эволюции в поведении металла с позиций современного научного направления – численное моделирование напряжённого состояния, ввел новую характеристику в описании поведения материала – пластический коэффициент интенсивности напряжений, а также разработал комплекс алгоритмов и программ численного моделирования закономерностей развития усталостных трещин при двухосном нагружении и при смешанных модах деформации. Именно в результате комплексного анализа удалось сформулировать критерии и разработать методику оценки остаточного ресурса конструкций.

Работа по своему характеру исследования, использованной идеологии, методам и средствам анализа, а также по полученным результатам соответствует паспорту специальности 01.02.04 – механика деформируемого твердого тела

Выводы по главам и общие выводы по работе отражают полностью её содержание и полученные в ней результаты.

Автореферат диссертации в полном объёме отражает содержание диссертации и полученные в ней результаты.

Сделанные замечания по работе неизбежны не потому, что она несовершенна или не соответствует требованиям ВАК России, а потому, что она близка и пересекается по своей тематике с исследованиями оппонента, вызывая к ней, может быть, более глубокое внимание, чем этого требует обычное оппонирование диссертации. Они показывают высокий интерес, который был проявлен оппонентом при анализе полученных результатов и их следует рассматривать в качестве пожеланий по развитию достигнутых успехов.

Считаю, что по глубине научных исследований, охвату проблемы и её решению, использованию современных методов анализа работа Захарова Александра Павловича соответствует требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней» ВАК Минобразования и науки РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям. Автор работы, Захаров Александр Павлович, заслуживает присуждения ему искомой учёной степени кандидата физико-математических наук.

Представитель России в Европейском Обществе
Механиков и Материаловедов в комитете «Механизмы
разрушения», Заслуженный деятель науки РФ,
Профессор по кафедре «Физика» МАИ и
по кафедре «Безопасность полётов» МГТУГА,
Доктор технических наук,
Начальник отдела «Металлофизических исследований
авиационных материалов»
Федерального автономного учреждения
"Государственный центр "Безопасность полетов
на воздушном транспорте".

Андрей Андреевич Шаняевский

Почтовый адрес: 141426, Московская обл.
Химкинский р-н, а/п Шереметьево-1, а/я 54.
Юридический адрес: 124340, г. Москва,
Шереметьевское шоссе, д. 2, корп 2.

Телефон: (495) 578 - 52 - 88.
E-mail: root@flysafety.msk.ru

Подпись А.А.Шаняевского удостоверяю

Начальник отдела кадров ГосЦентра
безопасности полётов

Наталья Викторовна Кривчикова

