

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Гучинского Руслана Валерьевича «Прогнозирование развития трещин усталости на основе численного моделирования накопления повреждений», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела

Актуальность

Усталость конструкционных материалов остается одной из главных причин аварийных разрушений и отказов машин, аппаратов и сооружений. Усталостное разрушение связано с возникновением и распространением трещин. При оценке циклического ресурса конструкции важной проблемой является выбор начального размера усталостной трещины, так как его величина определяет переход процесса накопления повреждений в стадию распространения трещины. В настоящее время нет четко сформулированного критерия перехода от расчета процесса накопления повреждений к расчету процесса распространения конкретной трещины. Таким образом, разработка методики моделирования процесса усталости от начала переменного нагружения до наступления критического состояния элемента конструкции является важным этапом исследований прочности и долговечности элементов конструкций при усталостном нагружении.

Основные научные результаты состоят в следующем: разработан способ прогнозирования эволюции криволинейного фронта трещины и долговечности элементов конструкции на основании данных испытаний стандартных образцов; учтен эффект раскрытия трещины и неоднородность структуры материала; разработан алгоритм численной реализации процедуры моделирования развития трещины; эффективность разработанного метода проверена путем сопоставления с экспериментальными данными, полученными для трещин сложной формы в сварном соединении.

Обоснованность научных положений и выводов диссертации

Представленные в работе научные положения и сформулированные выводы в достаточной степени обоснованы в соответствующих главах диссертации.

Новизна научных положений

Несмотря на известные попытки создания объединенного подхода к оценке усталости для фаз образования и развития трещины, представленная в работе методика, направленная на решение такой задачи, обладает новизной. Способ моделирования известного из литературы эффекта ЗТ (закрытия трещины) для трещины, полученной удалением элементов, предложен впервые. Также новыми являются результаты моделирования плоских трещин усталости в областях значительных пластических деформаций.

Достоверность результатов исследования

Достоверность полученных результатов обеспечивается использованием основных положений механики деформируемого твердого тела и механики разрушения и применением строгих численных методов. Достоверность также подтверждается при сравнении результатов моделирования развития трещин с экспериментальными данными и данными, полученными при использовании альтернативных методов.

Практическая значимость работы

Результаты диссертационной работы позволяют произвести расчет процесса усталости от начала нагружения до критического состояния элемента конструкции и учесть в расчетах прочности изменение свойств материала при технологических операциях. Использование полученных результатов позволит произвести обоснованную корректировку предельно допустимых уровней напряжений и количества циклов нагрузления.

Содержание и структура диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованной литературы и одного приложения. Список литературы включает 179 наименований. Работа изложена на 162 страницах машинописного текста, содержит 56 рисунков и 2 таблицы.

В первой главе диссертации изложены существующие критерии усталостного разрушения, основанные на описании подрастания трещин и накопления повреждений. Указаны основные факторы, ограничивающие возможности существующих методов оценки усталости: необходимость в задании размера и формы начальной трещины, предположение об эллиптической форме трещины, необходимость учета накопленного повреждения в ходе ис-

тории нагружения. Сформулирована цель работы, состоящая в разработке методики моделирования процесса усталости от начала переменного нагружения до наступления критического состояния элемента конструкции, для применения которой не требуется начальный размер трещины и предположение о сингулярности напряжений у ее вершины.

Во второй главе представлена схема конечно-элементного моделирования зарождения и распространения плоских трещин усталости, основанная на описании процесса накопления повреждений. Предложенный подход объединяет фазы зарождения и распространения трещины усталости, рассматривая их как единый процесс накопления повреждений. В критерии разрушения учитывается фактор закрытия трещины, наличие которого влияет на размах деформации в окрестности фронта трещины.

В третьей главе представлен следующий этап исследований, а именно, на примере развития разрушения в цилиндрических образцах проведено моделирование трещины усталости при отсутствии начального надреза. Согласно предлагаемой методике моделирования развития разрушения любой элемент в течение каждого цикла нагружения получает повреждение, определяемое размахом циклической деформации в направлении, перпендикулярном плоскости фронта трещины. Процесс развития трещины усталости заключается в последовательном удалении элементов материала в соответствии с законом накопления повреждений и выбранным критерием разрушения. Разрушение элемента материала моделируется путем искусственного уменьшения его жесткости на несколько порядков по сравнению с окружающим материалом. Размер элемента определяет шаг приращения трещины в конкретной точке фронта. Для проведения многошагового упругопластического расчета в программе ANSYS используется опция мультилинейного кинематического упрочнения (MKIN), учитывающая эффект Баушингера. Выбор вида упрочнения объясняется тем, что он хорошо описывает циклическое поведение материалов, для которых справедлив критерий пластиичности Мизеса. Однако предложенный подход не исключает возможности использования при моделировании изотропной или комбинированной модели поведения материала и других критериев пластиичности. В качестве причины возникновения трещины использована неоднородность микроструктуры, причем тре-

щина зарождалась в скоплении элементов с низким циклическим пределом пропорциональности. Результаты моделирования хорошо согласуются с экспериментальными данными по долговечности для наибольшей и наименьшей амплитуд напряжения.

В четвертой главе представлены результаты моделирования развития плоских трещин усталости от начальных электроэрозионных надрезов. Полученная эволюция контура фронта трещины хорошо согласуется с экспериментальными данными. Предложенная методика существенно расширяет возможности описания роста усталостной трещины при значительных пластических деформациях и позволяет моделировать ее рост вплоть до выхода на боковые поверхности.

В пятой главе представлено моделирование пространственной трещины от внутренней полости непровара в неоднородно нагруженном тавровом сварном соединении. Результаты моделирования эволюции фронта трещины и полученная долговечность соединения при разных уровнях нагрузки хорошо согласуются с имеющимися экспериментальными данными.

Содержание работы **соответствует специальности** 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела. Диссертация оформлена в соответствии с требованиями ВАК и представляет собой законченное научное исследование.

Автореферат диссертации отражает содержание диссертации, формулировка основных результатов и выводов соответствует изложенным в диссертации.

По диссертационной работе считаю нужным сделать следующие **замечания:**

1. В разработанной методике в отличие от линейной механики разрушения для описания критического состояния не используется длина трещины как необходимый линейный размер. Вместе с тем, в основу расчета положены экспериментальные деформационные критерии разрушения, в которых одним из основных параметров является число циклов до появления макротрещины, устанавливаемое по искажению петель гистерезиса. Таким образом, критический линейный размер неявно присутствует в последующих рас-

четах. При проведении всех расчетов автор получил в полном объеме необходимый материал для поцикловой оценки всех основных параметров усталостной трещиностойкости: размеры трещины, коэффициент интенсивности напряжений на ее фронте, скорость ее роста. Было бы целесообразно использовать эти данные для построения диаграммы усталостного разрушения в постановке линейной механики разрушения (т.е. построить зависимость скорости роста усталостной трещины от размаха коэффициента интенсивности напряжений) и ответить на вопрос о размере начальной макротрещины, начиная с которого допустимо использование ее основных соотношений.

2. На стр. 29 диссертации автор ставит под сомнение физическую обоснованность уравнения Пэриса в связи с проблемой размерностей входящих в него констант. Действительно, при записи уравнения Пэриса необходимо указывать размерности входящих в него величин – коэффициента интенсивности напряжений ΔK и скорости роста трещин da / dN , которые были использованы при вычислении входящих в него постоянных величин. Такая ситуация возникает часто, в частности, соотношения Коффина и Менсона также требуют указания размерностей входящих в них параметров. Это обстоятельство не является недостатком этих экспериментальных соотношений.

Приведенные замечания не снижают научной и практической ценности полученных результатов и диссертационной работы в целом.

Основные результаты, полученные в работе, представлены в 13 научных **публикациях**, из них 5 в изданиях, рекомендованных ВАК РФ. Результаты апробированы на научных конференциях.

Р.В. Гучинский продемонстрировал высокую научную квалификацию и владение методами численного моделирования. Полученные результаты можно квалифицировать как новые и имеющие большое практическое значение.

Представленную работу оцениваю как завершенную научно-квалификационную работу, в которой изложены новые научно обоснованные технические решения, вносящие большой вклад в развитие методологии прогнозирования усталостного разрушения.

Считаю, что рецензируемая диссертационная работа удовлетворяет всем критериям, установленным для кандидатских диссертаций п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней» № 842, утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. Ее автор Гучинский Руслан Валерьевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела.

Официальный оппонент –
старший научный сотрудник
отделения прочности и надежности конструкций
Федерального государственного унитарного предприятия
«Крыловский государственный научный центр»,

кандидат технических наук *Рыбакина* Рыбакина Оксана Григорьевна
11.05.2016

Почтовый адрес:
196158, Санкт-Петербург,
Московское шоссе, д.44.
Раб. тел.: 8 (812) 415-46-07
E-mail: rybakina37@mail.ru

Верно:
начальник отдела кадров Н.В. Мещерякова

