

ОТЗЫВ
официального оппонента

на диссертационную работу Завойчинской Элеоноры Борисовны
«Усталостное масштабнo-структурное разрушение и долговечность
конструкций при пропорциональных процессах нагружения»,
представленную на соискание ученой степени доктора физико-
математических наук по специальности 01.02.04 – “Механика
деформируемого твердого тела”.

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, приложения, заключения, списка публикаций автора по теме диссертации и библиографического списка из 281 наименований. Работа изложена на 303 страницах, включая 71 рисунок и 18 таблиц. Автореферат диссертации на 36 страницах включает список из основных публикаций по теме диссертации, опубликовано 94 работы из них 42 в рецензируемых журналах из перечня ВАК РФ. Остальные статьи в сборниках трудов и материалов конференций и докладов.

Актуальность темы диссертации заключается в следующем. Проблема усталости возникла более ста пятидесяти лет тому назад и была связана с разрушением осей подвижного состава на железнодорожном транспорте. Первые исследования по этой проблеме были выполнены Велером в Германии в середине девятнадцатого века. Проблема является чрезвычайно актуальной и в настоящее время. Согласно статистическим данным основные разрушения в инженерной практике (до 80 процентов от общего числа разрушений) происходят по причине усталости. Проблема исследуется методами физики, механики и металловедения. При классическом подходе, следуя Велеру, строятся кривые амплитуда напряжения – число циклов до разрушения (кривая Велера) для ограниченного числа цикла нагружения. В настоящее время, в связи с аварийными разрушениями осей высокоскоростных поездов особое внимание уделяется области гигацикловой усталости. В литературе по проблеме усталости в основном рассматриваются эмпирические критерии разрушения, описывающие экспериментальные

ОБЩИЙ ОТДЕЛ МАИ

Вх. № 07 09 2018

кривые усталости. Проблема изучается интенсивно методами физики материалов, включая тонкие структурные исследования на различных масштабных уровнях. В отмеченных работах применяется, в основном, детерминированный подход. В то же время в опытах наблюдается значительный разброс экспериментальных кривых усталости, который определяется различными внутренними (случайные распределения по объему дефектов) и внешними факторами (влияние агрессивных воздействий). В связи с этим обстоятельствами становится актуальным приложения вероятностных методов для описания усталостных разрушений.

Научная новизна диссертационной работы.

Комплексное рассмотрение проблемы усталости с привлечением достижений физики прочности и пластичности, механики разрушения и вероятностных методов в общем виде в настоящее время довольно проблематично. В то же время любые новые исследования в этом направлении желательны и весьма актуальны. Такие исследования выполнены в диссертационной работе, в которой объединены методы физики прочности и пластичности, механики деформируемого твердого тела, теории вероятности и методов вычислительного эксперимента и сформулирована феноменологическая теории усталостной прочности. При этом учитывается стадийность достижения дефектами каждого уровня определенных предельных состояний и образования дефектов последующих уровней методами механики деформируемого твердого тела и вероятностными методами с учетом процессов на различных масштабно-структурных уровнях. Такой подход дает возможность описать экспериментальные кривые усталости различных металлических материалов по определенному уровню накопленных дефектов.

Отметим основные результаты диссертационной работы. Разработана теория усталостного разрушения металлических материалов при сложном напряженном состоянии и пропорциональных нагружениях, учитывающая процессы последовательного образования, развития и слияния дефектов на

характерных масштабно-структурных уровнях разрушения. Теория описывает вероятность хрупкого разрушения на каждом уровне системой рекуррентных определяющих соотношений. Рассмотрены три базовые случаи плоского напряженного состояния: симметричных одноосного и двухосного равномерного нагружений и сдвига. В качестве переменной выбирается амплитуда максимального главного напряжения. Используются результаты стандартных усталостных испытаний для определения базовых констант модели. Формулируются определяющие соотношения для одноосного и двухосного равномерного нагружения и сдвига с несимметричным циклом напряжения. Материальные функции модели определяются по данным стандартных усталостных испытаний в условиях симметричных нагружений. Для трехмерных пропорциональных нагружений материальные функции учитывают отношение главных напряжений и параметр асимметрии цикла в соответствии с известными теориями усталостной прочности. Формулируется условие для определения начального момента развития дефектов каждого уровня и долговечности металла по дефектам мезоуровня. Получена кривая усталости для трехмерных нагружений, как результат эволюции микро- и мезодефектов. На основе предложенной теории поэтапного разрушения разработан метод оценки сроков безопасной эксплуатации и остаточной долговечности участков магистральных газо- и нефтепроводов. В общем виде сформулирован критерий безопасной эксплуатации конструкций, как обобщение известных подходов, используемых в расчетной практике.

Разработанная в диссертации модель усталостного разрушения использовалась в расчетах долговечности конструктивных элементов нефте- и газопроводов с учетом их дефектного состояния. Метод оценки долговечности включен в ряд нормативных документов для проектных организаций ПАО «Газпром» в том числе, в «Методику оценки сроков службы газопроводов» (М.: ИРЦ Газпром, 1997. 100с.), «Рекомендации по оценке безопасности магистрального газопровода при проектировании» (М.:

ОАО «Газпром», 2000. 105с.), «Рекомендации по оценке безопасности и долговечности газопроводов при проектировании» (М.: ОАО «Газпром», 2002. 160с.), «Методические рекомендации по срокам эксплуатации газопроводов» (М.: ООО «ВНИИгаз», 2005. 100с.).

Полученные научные и практические результаты вошли в специальные курсы кафедры теории упругости механико-математического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова «Физико-механические критерии прочности и разрушения и их приложения к оценке долговечности конструкций» и «Физико-механические основы прочности и разрушения» для студентов, бакалавров, магистров и аспирантов. По этим материалам подготовлены учебные пособия: «Введение в теорию процессов разрушения твердых тел. Учебное пособие. М.: Изд-во МГУ. 2004. 168с.», «Современные теории разрушения при сложном нагружении. Учебно-методическое пособие к специальному курсу кафедры теории упругости "Прочность и разрушение материалов и элементов конструкций" М.: Изд-во МГУ, 2008. 63с.».

Можно выделить основные результаты содержания диссертационной работы. Во введении обоснована актуальность проблемы усталости, сформулированы цели исследования, показана его научная и практическая значимость, перечислены основные результаты, составляющие новизну работы, и положения, выносимые на защиту.

В первой главе выполнены обзорные исследования по результатам многочисленных экспериментальных исследований и современных теорий усталостного разрушения над образцами из углеродистых, легированных, нержавеющих, коррозионностойких, аустенитно-мартенситных сталей; черных и цветных металлов; чугунов; никелевых, алюминиевых, титановых сплавов. Согласно этим работам в диссертации выделяются четыре стадии, определяющие механику хрупкого усталостного разрушения. Первая стадия обусловлена процессами эволюции дефектных структур и микроструктур на микромасштабном уровне. На второй стадии происходит последовательное зарождение и развитие макротрещин на мезоуровне ансамблей зерен. Эти

стадии исследованы довольно подробно экспериментально и теоретически методами физики твердого тела и металловедения. На третьей стадии развиваются единичные хрупкие макротрещины на макро-масштабном уровне. Четвертая стадия характеризуется возникновением и развитием магистральных трещин, и полным разрушением. Эти стадии исследуются методами механики разрушения.

Выделяются шесть масштабно-структурных уровней разрушения, отвечающих разным стадиям развития хрупкого разрушения по разным физическим механизмам. Дефекты каждого уровня разрушения характеризуются определенным линейным размером и плотностью в представительном объеме материала на некотором интервале времени нагружения. При достижении линейных размеров и плотности дефектов критической величины происходит переход на следующий масштабно-структурный уровень. Размеры дефектов разного уровня оцениваются в среднем по результатам физических измерений. В диссертации отражены возможные причины образования и кинетики развития дефектов на каждом уровне разрушения, включая последовательное зарождение и развитие макротрещин на мезоуровне ансамблей зерен. Эти стадии изучаются экспериментально-теоретическими методами физики твердого тела и металловедения. Третья стадия включает развитие единичных хрупких макротрещин на макро-масштабном уровне. Четвертая стадия характеризуется возникновением и ростом магистральных трещин, приводящих к разрушению. Эти стадии изучаются методами механики разрушения.

Вторая глава посвящена математическому моделированию процессов хрупкого разрушения металлов и сплавов на разных структурно масштабных уровнях при одноосном и двухосном равномерном нагружении и сдвиге с симметричными и асимметричными циклами напряжений. Модель строится для металлов и сплавов, первоначально имеющих дефекты металлургического и технологического происхождения, но не имеющих

макротрещин в областях многоциклового и гигациклового усталости с числом циклов при $N_f \in [5 \cdot 10^3, 10^{10}]$.

Результаты главы 2 используются в главе 3 при формулировке определяющих соотношений при сложном напряженно-деформированном состоянии в условиях пропорциональных одночастотных нагружений с симметричным и несимметричными циклами напряжений. В качестве переменной выбирается амплитуда максимального главного напряжения. Материальные параметры модели определяются по результатам известных усталостных испытаний. Эти данные используются для построения кривой усталости как результат последовательного зарождения, развития и слияния хрупких дефектов в условиях сложного напряженного состояния. Дано сравнение с результатами опытов для ряда конструкционных сталей, алюминиевых, магниевых и титановых сплавов при различных плоских напряженных состояниях.

Четвёртая глава посвящена определению вероятности разрушения конструкции (конструкционного риска) по вероятности разрушения большого количества однотипных конструктивных элементов. На основе предложенной модели срок службы конструктивного элемента определяется по результатам анализа вероятности разрушения по определенному уровню накопленных дефектов. С учетом предположения о том, что вероятность разрушения конструкции не должна превышать заданного значения (критерий конструктивной надежности), определяется условие для нахождения срока службы конструкции в целом.

В приложении к диссертации предложенный критерий конструкционной надежности применяется для оценки сроков безопасной эксплуатации конструкций нефте- и газопроводов. В качестве иллюстрации приведены результаты расчетов проектных сроков службы и остаточной долговечности линейного участка подземного магистрального газопровода.

Основные результаты диссертационной работы выполнены автором и доложены на российских и международных конференциях, симпозиумах и

семинарах (более 30 докладов). Вклад автора в публикациях, выполненных в соавторстве, состоял в анализе известного экспериментально-теоретического материала, формулировке гипотез и критериев, выполнении аналитических исследований и численных расчетов. При использовании результатов других исследований даются ссылки на источники информации.

Содержание автореферата полностью соответствует содержанию диссертации.

Замечания:

1. Выделяются шесть масштабных-структурных уровней разрушения. Дефектное состояние каждого уровня характеризуется линейным размером и плотностью в представительном объеме материала. Предельное состояние дефекта каждого уровня определяется предельным линейным размером и предельной плотностью. Не понятно, зачем надо вводить две характеристики каждого дефектного состояния – длина и плотность. Не сформулированы кинетические уравнения развития плотности дефектного состояния в зависимости от амплитуды напряжения.
2. Вводится дополнительно понятия поврежденности для каждого уровня. Не понятно, как они связаны с плотностью дефектов.
3. В функции вероятности разрушения входит число циклов начала образования дефектов i – го уровня. Не понятно, как в опыте можно определить их величины.
4. Функции размеров дефектов и величины параметров поврежденности определяются в шкале реального времени. В то же время в диссертации рассматриваются проблема усталости при циклических нагружениях, а не проблема статической усталости (ползучести). Соответственно, не указана процедура перехода от времени к числу циклов нагружения. В этом случае нужно учитывать частоту нагружения. В диссертации не учитываются эффекты влияния

частоты нагружения на усталостную прочность, которые, как показывают опыты, могут быть значительны.

5. В четвертой главе проблема усталости не рассматривается. Она посвящена формулировке условий безотказной эксплуатации протяженных конструкций. При этом все рассматриваемые функции (поврежденность, функция распределения, вероятность разрушения) записываются в шкале реального времени. В то же время используются результаты глав 2 и 3, посвященные проблеме усталости металлов.

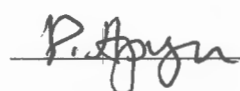
6. Отмечается, что основная идея работы – хрупкое усталостное разрушение металлов и сплавов. В то же время в области малоциклового усталости для большинства металлов и сплавов разрушение является вязким и наступает, когда суммарная пластическая деформация достигает критической величины (критерий Коффина). Чисто хрупкое разрушение возможно при двух случаях. Первое при разрушении образца с трещиной и второе в области сверхмногоциклового усталости при относительно малой величине амплитуды напряжения. В этом случае процессы повреждаемости не являются многоэтапными и определяются малыми трещинами, образующимся, в том числе, вокруг частиц включений и материал разрушается хрупко при достижении дефектов критической величины. Число циклов до разрушения в основном определяется этими процессами, а не ростом магистральной трещины.

Указанные замечания не влияют на общую оценку диссертационной работы.

Заключение. Диссертационная работа Завойчинской Элеоноры Борисовны «Усталостное масштабно-структурное разрушение и долговечность конструкций при пропорциональных процессах нагружения», является законченным научным исследованием, имеющим научное и практическое значение. Диссертация соответствует требованиям «Положения

о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук, а ее автор Завойчинская Элеонора Борисовна заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.04 – «Механика деформируемого твердого тела».

Официальный оппонент,
доктор физ.-мат. наук,
старший научный сотрудник,
профессор кафедры теории упругости
математико-механического факультета
Санкт-Петербургского государственного
университета,
Иностранный член НАН
Республики Армения

 / Р.А. Арутюнян

06.09.2018



Документ подготовлен
в порядке исполнения
трудовых обязанностей