

Федеральное государственное унитарное предприятие  
“Центральный научно-исследовательский институт конструкционных материалов



# “ПРОМЕТЕЙ”



Государственный научный центр



УТВЕРЖДАЮ

на № 03-18/34-525 от 2016 г.

Генеральный директор  
ФГУП «ЦНИИ КМ «Прометей»

д.т.н., доцент

*Орышенко А.С.*

20.05

2016 г.

*Орышенко А.С.*

20.05

2016 г.

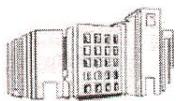
## ОТЗЫВ

ведущей организации - Федерального государственного унитарного предприятия «Центральный научно-исследовательский институт конструкционных материалов «Прометей», г. Санкт-Петербург, на диссертационную работу «Прогнозирование развития трещин усталости на основе численного моделирования накопления повреждений» соискателя ученой степени кандидата технических наук Гучинского Руслана Валерьевича по специальности 01.02.04 «Механика деформируемого твердого тела»

### Актуальность работы

В настоящее время расчетные оценки усталостной прочности являются обязательной составной частью обеспечения эксплуатационной надежности конструкций ответственного назначения: судов и морских технических сооружений, самолетов, сосудов давления, атомной энергетики и др. При этом сформировалось три принципиально отличные подходы, в той или иной степени присутствующие в нормативных документах различных отраслей промышленности:

1. Подход, основанный на обобщении экспериментальных данных по усталостной прочности образцов-прототипов конструктивных элементов. При таком подходе, как правило, не уточняется предельное состояние, используемое в расчетах прочности (обычно- полное разрушение), различие образца и конструктивных элементов по масштабу, условиям нагружения и др. учитывается набором полуэмпирических коэффициентов. Примером такого подхода является широко используемый в зарубежных стандартах метод S-N-кривых для оценки циклической прочности сварных соединений.



ФГУП «ЦНИИ КМ «Прометей» 191015, Россия, Санкт-Петербург, улица Шпалерная, дом 49  
Телефон (812) 274-37-96, Факс (812) 710-37-56, mail@crism.ru, www.crism-prometey.ru  
ОКПО 07516250, ОГРН 1037843061376, ИНН 7815021340/ КПП 783450001

2. Подход, основанный на использовании деформационного критерия для оценки долговечности до появления усталостной трещины. Используется для малоцикловой области нагружения, например, в атомной энергетике; известно также его развитие в виде т.н. «Notch Stress Analysis» (NSA) для многоцикловой области, по сути, использующее представления об эффективном коэффициенте концентрации напряжений. Предельным состоянием считается момент появления трещины усталости.

3. Подход, основанный на применении механики разрушения – интегрирование зависимости скорости роста трещины от параметров нагрузки в ее вершине (размаха и максимального значения коэффициента интенсивности напряжений, КИН). Базовая зависимость – диаграмма циклической трещиностойкости, определяется экспериментально или выбирается по рекомендациям стандартов. Оценки стадии роста усталостной трещины до некоторого предельного размера (устанавливаемого исходя из критериев разрушения при статической или динамической нагрузке) могут быть выполнены только применительно к некоторому начальному размеру макротрещины.

Второй и третий подходы к расчету усталостной прочности имеют определенное физическое обоснование и потенциальную возможность в аналитическом или численном виде количественно учитывать весь комплекс конструктивных и технологических факторов, влияющих на ресурс конструкции. Однако проблема их «стыковки», связанная с необходимостью непрерывного описания процесса усталости от стадии формирования микротрещины в отдельном зерне металла до стадии ее превращения в макротрещину, описываемую подходами механики разрушения, остается не решенной. Это делает практически целесообразным до сих пор применять первый, чисто эмпирический подход, часто приводящий к неверным результатам.

**Важность и актуальность** диссертационной работы Гучинского Р.В., обусловлена тем, что именно в этой области им решены важные задачи, направленные на повышение прогнозной способности оценок циклического ресурса, а именно, разработана методика физического моделирования процесса развития усталостного повреждения на всех его стадиях, основанная на расчетах циклической повреждаемости с использованием деформационного критерия и ориентированная на применение численных расчетов МКЭ. Данный подход позволяет рассматривать ряд проблем, для которых применение известных процедур механики разрушения оказывается недостаточным. К их числу относятся: учет трансформации фронта усталостных трещин в трехмерной постановке с учетом влияния поверхностей, моделирование влияния структурных характеристик материала на его усталостную прочность, прогнозирование долговечностей сварных соединений с конструктивными дефектами, имеющими ненулевой радиус концентратора, выполнение

оценок при нагрузках, превышающих границы корректности линейной механики разрушения.

Формулировка задач работы выполнена автором на основе достаточно полного анализа современного состояния проблемы. В результате выполненных исследований получены следующие результаты, обладающие явной **научной новизной**:

1. Разработана физическая модель развития усталостной трещины, применимая и при ее исходно нулевой длине, основанная на расчетах циклической повреждаемости в элементах сеточных аппроксимаций МКЭ рассматриваемых конструкций или образцов.
2. Получены теоретические оценки влияния структурной неоднородности металла на циклическую долговечность при малоцикловой и многоцикловой усталости.
3. Предложен метод прогнозирования нагрузок закрытия трещины, приемлемый для анализа нестационарных режимов нагружения.
4. Получены данные, характеризующие кинетику усталостных трещин с учетом трансформации формы фронта усталостных трещин.

Несомненная **практическая значимость** выполненной работы заключается в разработках методов, процедур и алгоритмов расчета, имеющих широкий диапазон применимости для циклически нагружаемых конструкций различного назначения, позволяющих учитывать структурную разнородность используемых материалов и прогнозировать статистический разброс оценок ресурса, повышая тем самым надежность оценок.

### **Общая характеристика работы.**

Диссертационная работа изложена на 162 стр. машинописного текста, состоит из введения, пяти глав, заключения и приложения – программного кода разработанного автором для моделирования развития трещины с криволинейным контуром фронта.

*В первой главе* соискатель рассматривает существующие к настоящему времени количественные описания процесса усталостного разрушения. Рассматривается трансформация подходов к описанию кинетики макротрещин, концепция «эффективного» коэффициента интенсивности напряжений (КИН), применения МКЭ к оценке условий закрытия трещины. Анализируются различные методы отслеживания кинетики формоизменения трещины. Обращено внимание на падение эффективного КИН у поверхности, что должно учитываться при моделировании продвижения трещины, представлены данные по различию раскрытия трещины при плоской деформации и плоском напряженном состоянии. Указываются основные проблемы анализа кинетики трещины.

В связи с тем, что основной идеей работы является оценка повреждаемости материала при последовательном моделировании всех стадий процесса усталости, особое

внимание уделяется существующим принципам суммирования повреждений. На основе литературного обзора формулируются конкретные задачи исследования.

*Во второй главе* рассматриваются известные работы в области применения деформационного критерия к описанию скорости роста трещины и формулируются основные постулаты предлагаемого автором подхода. Продвижение трещины моделируется назначением низкого модуля в элементах, для которых повреждаемость, определенная по закону линейного суммирования, достигает единицы. Используется принцип Мазинга для описания циклической диаграммы деформирования и формула Мэнсона для связи числа циклов до разрушения с амплитудой упругой и пластической составляющей деформации как критерий разрушения. Предполагалось, что материал является циклически стабильным. При выборе размера элемента было принято, что он должен, с одной стороны, быть существенно большим размера зерна, с другой – в пластической зоне вершины трещины должно помещаться несколько элементов. Модель поведения материала – мультилинейное кинематическое упрочнение. Повреждаемость определялась как функция компоненты деформации, перпендикулярной плоскости трещины. Описывается алгоритм разработанной автором программы развития усталостного повреждения, написанной на языке параметрического моделирования ADPL. При оценках повреждаемости принималось, что вклад в повреждение вносят пластические деформации, превышающие  $10^{-6}$ . Отмечается, что деформирование какой-либо структурной составляющей происходит при возрастающей интенсивности деформаций, поэтому принцип линейного суммирования может быть корректным. Закрытие трещины определялось по смене знака напряжений в узлах в вершине трещины с прямоугольной формой

*В третьей главе* представлены примеры компьютерного моделирования процесса усталостного повреждения структурно-неоднородного материала. Использовались результаты испытаний цилиндрических гладких образцов из стали типа 45 с феррито-перлитной структурой, со средним размером зерна перлита 30 мкм и содержанием феррита 16%. Перед моделированием циклизации производилась генерация случайного распределения элементов со свойствами, моделирующими перлит и феррит, в соответствии с металлографией. Выполнялись численные эксперименты с различными размерами элементов и процентного содержания структурных составляющих. Получаемые картины разрушений нельзя признать соответствующими реальным, однако такие численные эксперименты дают возможность проследить влияние отдельных факторов на разброс данных, наблюдаемый в реальном эксперименте. Описывается экспериментально наблюдаемые снижение рассеяния данных и снижение количества возникших трещин при возрастании нагрузки.

*В четвертой главе* описываются процедуры и результаты использования численного моделирования для прогнозирования развития эллиптических трещин. Для экспериментальной проверки корректности численного моделирования были изготовлены и испытаны образцы – пластины из алюминиевого сплава 7075-T651 с центральным отверстием и исходным угловым электроискровым надрезом. Для определения трансформации формы трещины использовались маркирующие разгрузки. Выполнялись также эксперименты с развитием полуэллиптической трещины в компактном образце, в которых определялся параметр раскрытия трещины. К наиболее значимым результатам, описанным в разделе, относятся данные по изменению интервала раскрытия трещины по фронту полуэллиптической трещины – максимальному на максимальной глубине, минимальному – у поверхности.

*В главе 5 «Оценка долговечности сварных соединений»* анализируется возможность разрушения таврового сварного соединения от конструктивного непровара. Из обзора следует, что применимость ЛМР для прогнозов ограничена невысокими уровнями эксплуатационных нагрузок. В этом случае применяемый соискателем подходщен ограничений. В качестве экспериментальных данных для сопоставления использовались данные других авторов. Исследовалось также влияние на разброс данных по кинетике трещины наличия неоднородностей металла.

В целом постановка диссертационной работы и ее основные этапы, описываемые в 5и главах диссертации, объединены общей логикой, вытекающей из необходимости последовательного решения поставленных задач. Не вызывает сомнений соответствие используемых методик численных исследований и математического моделирования современным требованиям и мировому уровню подобных работ.

Диссертационная работа написана в отличном хорошем научном стиле, в ней практически полностью отсутствуют ошибки и опечатки, выводы по каждой главе и по работе в целом логичны и обоснованы. Содержание диссертации полностью соответствует заявленной специальности. Необходимо особенно отметить высокий уровень проработки предшествующей литературы по рассматриваемым вопросам, хорошую библиографию, включающую большое количество ссылок на современные зарубежные и отечественные публикации.

Работа прошла широкую апробацию на российских и международных семинарах и конференциях. Основное содержание работы опубликовано в 13и печатных работах, из них, по крайней мере, 5 публикаций в рецензируемых журналах ВАК имеют большой объем, представляющий полученные результаты.

Автореферат полностью и корректно отражает основное содержание диссертации в кратком изложении.

Личный вклад автора четко выделен в диссертации и автореферате, он заключается в разработке модели распространения разрушения, ее реализации в виде алгоритма и программы на языке ADPL, проведении численных исследований применительно к анализу результатов экспериментов, проведении испытаний образцов на внецентренное растяжение.

#### **Замечания по диссертационной работе.**

1. Неудачен термин «грубое пластическое деформирование» (стр.40).
- . 2. При использовании формулы Мэнсона (вторая глава) предполагается, что «макроупругая деформация тождественна микропластической». Далее в модели принимается, что повреждения вносят пластические деформации величиной более  $10^{-6}$ . Остается неясным, речь идет о микропластических (то есть упругих) деформациях, или же собственно пластических?
3. Терминология при описании структуры не соответствует принятой в металловедении. Вместо «16,16% ферритовой фракции в поперечном сечении» должно быть «ферритной фазы», или просто «феррита». Вряд ли ее содержание может быть определено с такой точностью.
4. При определении области применения предлагаемого соискателем подхода необходимо высказать следующие соображения. Фактически используемая модель не в состоянии описывать многие особенности начальной стадии усталостного повреждения: резко выраженное влияние свободной поверхности на процесс образования микротрещин, особенности развития т.н. "физически коротких" трещин в плоскостях максимальных сдвигов, изменение влияния асимметрии цикла по мере роста микротрещины. В связи с этим при дальнейшем развитии подхода необходимо определить, каким образом в его рамках могут быть учтены такие значимые факторы как наличие коррозионно-активной среды, асимметрия цикла нагрузки в многоцикловой области, влияние состояния поверхности.

#### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Диссертационная работа Гучинского Руслана Валерьевича «Прогнозирование развития трещин усталости на основе численного моделирования накопления повреждений» представляет собой целостную и законченную научно-квалификационную работу, выполненную на высоком научном уровне. Она способствует решению актуальных для безопасной эксплуатации циклически нагружаемых конструкций задач прогнозирования их циклического ресурса в ситуациях, не поддающихся простейшим схематизациям механики разрушения: при развитии существенно трехмерных трещин, разрушений, инициируемых нетрещиноподобными дефектами, при нестационарных нагрузках.

Перечисленные в отзыве замечания не снижают научной и практической ценности выполненной работы, а также ее высокой оценки. Диссертация может рассматриваться как законченная научная квалификационная работа, имеющая практическое и теоретическое значение, в которой изложены научно обоснованные технические решения в области прогнозирования ресурса безопасной эксплуатации конструкций. В качестве пожелания отметим, что в дальнейшем целесообразно продолжать работы по моделированию влияния структурного состояния металла на его сопротивление усталостному разрушению.

По актуальности, научной новизне и практической значимости полученных результатов диссертационная работа полностью соответствует п.9 Положения о порядке присуждения ученых степеней (Постановление Правительства РФ от 24.09.2013 г. № 842), а ее автор – Гучинский Р.В. заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности по специальности 01.02.04 «Механика деформируемого твердого тела»

Отзыв на диссертацию Гучинского Р.В. рассмотрен и одобрен на заседании НТС-3 ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей», протокол № 4 от 18.05.2016 г.

Председатель НТС-3

д.т.н., доцент



А.В.Ильин

Ученый секретарь НТС-3

д.т.н., профессор



Е.И.Хлусова

Ильин Алексей Витальевич,

заместитель генерального директора – начальник НПК-3

ФГУП «ЦНИИ КМ «Прометей», доктор технических наук, доцент.

Хлусова Елена Игоревна,

заместитель начальника НПК-3 по научной работе, начальник лаборатории 32

НПК-3 ФГУП «ЦНИИ КМ «Прометей», доктор технических наук, профессор.

Почтовый адрес: 191015, Санкт-Петербург, улица Шпалерная, дом 49

Телефон: (812) 274-18-22

E-mail: npk3@crism.ru