

В диссертационный совет Д 212.125.05  
при ФГБОУ ВПО "Московский  
авиационный институт (национальный  
исследовательский университет)" МАИ  
125993, г. Москва, А-80, ГСП-3,  
Волоколамское шоссе, д. 4

## ОТЗЫВ

**официального оппонента на диссертацию Тараканова Павла Владимировича  
"Разработка методики оценки влияния водородсодержащей среды на  
скорость роста трещин при статическом и циклическом нагружении",  
представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по  
специальности 01.02.04 – "Механика деформируемого твердого тела"**

Известно, что эксплуатация промышленных объектов в условиях воздействия агрессивных сред приводит к снижению долговечности и предела выносливости материала конструкции. Водородное охрупчивание приводит к ускоренному истощению ресурса конструкций, что особенно характерно в случаях развития процессов накопления повреждений, локализованных вблизи различных дефектов структуры металла (инородных включений, пор, непроваров, развивающихся трещин и т.п.).

Разработка математических моделей и методов исследования роста трещин при наличии водородсодержащей среды и циклического нагружения является актуальной задачей и представляет значительный теоретический и практический интерес.

Диссертация состоит из введения и четырех глав, выводов и списка использованных источников. Во введении описана актуальность работы, цель работы, достоверность, научная и практическая значимость результатов работы, приведены сведения о публикациях и докладах автора на российских и зарубежных конференциях.

ОБЩИЙ ОТДЕЛ МАИ

Вх. № 21 08 2019 г.

**В первой главе** на основе систематизации и анализа научно-технической литературы приведены общие сведения из теории коррозионных процессов металлических материалов, рассмотрены причины и механизмы водородного охрупчивания металлов и сплавов, методы защиты от коррозии. Рассмотрено влияние водорода на различные материалы, с точки зрения развития трещин. Приведены экспериментальные данные, характеризующие влияние водорода на механические характеристики конструкционных сталей. Также рассмотрена стадийность развития роста трещин в условиях воздействия газообразного водорода, влияние типа кристаллической решетки металла на растворимость водорода.

В результате проведенного обзора, автором сформулированы соответствующие выводы по главе и поставлены цели исследования и задачи, которые необходимо решить при выполнении диссертационной работы.

**Во второй главе** приведено подробное описание модели распространения магистральных трещин в элементах конструкций, находящихся под влиянием водородсодержащей среды при статическом нагружении. Даны сведения о допущениях, использованных при построении модели.

Автором принимается, что рост трещины происходит дискретно, когда встречная микротрещина соединяется с магистральной трещиной. При этом рассматривается и инкубационная стадия процесса, на которой в зоне предразрушения накапливается необходимое для подрастания трещины количество водорода. Размер области предразрушения охватывает все большую область с ростом трещины. Приведено подробное описание и проиллюстрировано диаграммами процесс роста магистральной трещины в конструкции при действии статической нагрузки и влиянии водорода.

Перенос водорода в область предразрушения определяется процессом однонаправленной диффузии с учетом начального распределения водорода в металле.

Проведено тестирование разработанной модели с использованием кинетических кривых разрушения сталей (экспериментальные данные получены

другими авторами), при варьировании различных исходных данных модели (характеристик материала, свойств среды). Выполнен анализ полученных результатов, проведена оценка адекватности разработанной модели.

**В третьей главе** приведены сведения из теории роста трещин коррозионной усталости, использованные при построении модели. Разработаны положения методики оценки долговечности элементов конструкций, находящихся в условиях водородсодержащей среды при циклическом нагружении. Выполнены расчетные исследования, в результате которых были выявлены области доминирования различных механизмов разрушения в процессе роста трещин в элементах конструкций в условиях воздействия водородсодержащей среды при циклической нагрузке. Отмечено, что может иметь место взаимовлияние процессов накопления повреждений: вблизи вершины трещины из-за механического воздействия (циклического нагружения) и вследствие водородного охрупчивания материала (воздействия агрессивной среды).

С помощью разработанного подхода автором получены кривые роста трещин и проведена оценка влияния водородсодержащей среды на долговечность исследуемого элемента конструкции при варьировании параметров модели (различные начальные длины трещин, размахи напряжений, частота нагружения). Проведенные исследования позволили выявить доминирующие механизмы воздействия при росте трещин.

Выполнено сопоставление результатов, полученных с помощью разработанной модели с данными, полученными другими авторами. Отмечен удовлетворительный характер сходимости полученных оценок для скорости роста трещины при циклической нагрузке в водородсодержащей среде.

**В четвертой главе** автором продемонстрирована возможность использования разработанной методики для моделирования растрескивания элемента трубопровода, транспортирующего агрессивную водородсодержащую среду, давление которой изменяется циклически, при этом на внутренней стенкегиба имеется несквозная полуэллиптическая трещина. Получены кривые, характеризующие кинетику роста трещины. Также рассмотрен пример

моделирования разрушения болта с трещиной, расположенной в корне зуба резьбы при действии внешней, циклически изменяющейся растягивающей нагрузки и водородсодержащей среды. Для рассмотренных примеров продемонстрировано существенное ускорение роста трещины вследствие воздействия водородсодержащей среды по сравнению с инертной средой.

В главе выполнен анализ влияния на параметры зависимости (формулы Пэриса), определяющей скорость распространения усталостных трещин на участке их устойчивого роста, условий внешнего воздействия (водородсодержащей среды) на материал. Показано, что определенные автором параметры модели можно использовать для инженерных «экспресс-оценок» уровня безопасности эксплуатации элементов конструкций с трещинами в условиях воздействия водородсодержащей среды при циклическом нагружении.

Также в главе предложен подход к оценке надежности элементов конструкций при циклическом нагружении в условиях водородсодержащей среды на основе определения вероятности их безотказной работы и показана возможность его применения на модельном примере.

В результате рассмотрения материалов диссертации Тараканова Павла Владимировича можно утверждать, что разработанные модели, предложенные методики решения рассмотренных задач и полученные результаты являются новыми и представляют научную и практическую ценность.

Достоверность полученных результатов вытекает из обоснованности используемых теоретических подходов, корректности математических формулировок рассматриваемых задач, подтверждается сопоставлением с известными экспериментальными и теоретическими исследованиями других авторов.

#### **Имеются следующие замечания:**

1. В проведенном автором обзоре экспериментальных и теоретических работ отсутствует рассмотрение теории роста трещин В.В.Болотина, аналитическая постановка задачи в которой включает в том числе уравнения, описывающие массоперенос агрессивного агента в полости трещины, накопление механических

и коррозионных повреждений в материале в условиях статического и циклического нагружения, т.е. процессы аналогичные рассмотренным в диссертации. Было бы целесообразно продемонстрировать в диссертации, в чем состоят преимущества разработанной Таракановым П.В. методики.

2. Предложенная математическая модель, с одной стороны, содержит значительное количество параметров (см., например, таблицу 3.1), характеризующих пару среда-металл. С другой стороны, в качестве агрессивного агента, рассматривается только водород: в реальных условиях эксплуатации таких факторов, может быть существенно больше. Автор не дает ответ о возможности оценки параметров модели для применения разработанного им подхода в практических приложениях (различных материалов, свойств среды).

3. Автор предполагает материал линейно-упругим (стр.49). При этом, для приведенных в тексте диссертации примеров трещин (например, на рис.2.1, рис.3.5 и др.) не указывается, какие величины напряжений на фронте трещины были получены при проведении расчетных исследований. Оценке погрешности, вносимой этим предположением в диссертации не дано.

4. В главе 4.2 используется конечно-элементное моделирование для получения полей напряжений в металле элемента трубопровода (гиба), содержащего на внутренней стороне плоскую полуэллиптическую трещину. Вопросы точности полученных результатов и сходимости численного решения автором в диссертации не рассмотрены.

5. При сравнении полученных в диссертации результатов с данными экспериментальных исследований (полученных другими авторами), Тараканов П.В. ограничивается в основном, качественными оценками наблюдаемого соответствия. Количественных оценок в работе не приводится.

6. В работе практикуется использование английских слов и словосочетаний, перевод которых отсутствует (например, на рисунках 3.3, 3.9 и др.).

В целом, диссертация Тараканова П.В. выполнена на высоком научном уровне и удовлетворяет всем требованиям ВАК Минобрнауки РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям по техническим наукам.

