

УТВЕРЖДАЮ

Начальник 3 отделения
ФГУП «Крыловский государственный
научный центр»



В.М. Шапошников

«26» октябрь 2015 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

3 отделения ФГУП «Крыловский государственный научный центр»

по диссертационной работе, представленной О.А. Строгоновой на соискание ученой степени кандидата технических наук, на тему: «Разработка методов оценки статической трещиностойкости конструкций морской техники»

1 Актуальность темы

Надежность конструкций в значительной степени определяется качеством используемого для ее постройки материала, включая способность материала противодействовать возникновению и развитию неизбежных при изготовлении и эксплуатации дефектов. Особенно важна такая способность для сооружений с длительным сроком службы, высокими требованиями к надежности конструкции и затрудненным мониторингом состояния конструкции сооружения. К числу таких объектов относятся глубоководные аппараты и морские трубопроводы.

Проектирование такого вида конструкций в настоящее время основано на использовании концепции допустимого дефекта. Несмотря на интенсивное развитие этого направления, ряд важных принципиальных вопросов остается нерешенным. Так, например, не отработана надежная и эффективная методика определения оценки одного из основных показателей (J -интеграла) вязкого разрушения материала, отсутствует четкое разделение областей использования линейной и нелинейной механики разрушения, нет надежных критериев определения опасных состояний конструкции в зависимости от свойств материала и нагруженности сооружения.

Актуальность диссертационной работы О.А. Строгоновой связана с развитием методов испытания материалов на статическую трещиностойкость в условиях, моделирующих эксплуатацию реальных объектов, с выявлением резервов работоспособности высокопластичных и высокопрочных материалов. Выполненные исследования позволили вскрыть имеющиеся дополнительные запасы работоспособности конструкций из высокопластичных материалов, расши-

рить область использования материалов высокой прочности, уточнить требования к допустимым дефектам.

С этих позиций актуальность темы диссертационной работы не вызывает сомнений.

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник 3 отделения ФГУП «Крыловский государственный научный центр» Олег Маркович Палий.

2 Цель работы

Создание методов оценки статической трещиностойкости при эксплуатации конструкции морской техники с корпусами из материалов различной категории прочности на основе:

- определения областей возможного использования решений линейной и нелинейной механики разрушения;
- анализа видов трещиноподобных дефектов конструкции; выявления и классификации наиболее опасных видов дефектов;
- анализа и обобщения существующих методов оценки влияния трещиноподобных дефектов на характеристики прочности и надежности различных объектов морской техники;
- разработки процедуры оценки допустимости трещиноподобных дефектов в цилиндрических оболочках в области линейной механики разрушения для широкого спектра видов дефектов и их расположения в конструкции;
- разработки нового экспериментально-аналитического метода построения J_R -кривой, основанного на методе линейной нормализации, при исследовании трещиностойкости материала в условиях упруго-пластического деформирования;
- экспериментально полученных характеристик статической трещиностойкости (K_I , J -интеграл и J_R -кривые) для материалов различной категории прочности (на сталях в диапазоне пределов текучести $600 \div 1000$ МПа); представленного сопоставления с известными ранее результатами и оценки преимущества нового разработанного метода;
- разработки метода расчета статической трещиностойкости цилиндрической оболочки в упруго-пластической области, позволяющего оценить критическую величину внутреннего давления, при котором трещина переходит в неустойчивое состояние, а также разработки программы компьютерной обработки данных «CYLINDER INSTABLE CRACK EXTENSION», позволяющей реализовать данный метод.

3 Краткая характеристика содержания, обоснованность выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и трех приложений.

Во **введении** сформулированы цели исследования, приведен краткий обзор существующих методов оценки допустимости дефектов в металлических конструкциях. Обоснована актуальность поставленной задачи, указано, что результаты диссертационной работы предоставляют специалисту по прочности конструкций простые для использования решения задач механики разрушения для цилиндрических оболочек при наличии в них дефектов. Сформулированы результаты, обладающие научной новизной, приведены обоснования достоверности научных положений и выводов и указана практическая ценность работы.

Первая глава диссертационной работы посвящена разработке метода оценки статической трещиностойкости (допустимости трещиноподобных дефектов) цилиндрических оболочек с размерениями, характерными для различных объектов морской техники (морские трубопроводы, гидро- и барокамеры, баллоны высокого давления, корпуса глубоководных аппаратов и др.), в рамках линейной механики разрушения без учета наличия пластической области в окрестности вершины трещины.

В работе выполнено обобщение имеющихся в литературе данных по расчету работоспособности цилиндрических оболочек с дефектами (опубликованные работы рассматривают лишь отдельные виды дефектов, при этом не охватывая необходимый диапазон изменения параметров дефекта) и проведена их обработка, позволившая представить результаты в удобной для использования форме. В диссертации О.А. Строгоновой предложен общий подход к нормированию максимального опасного размера дефекта при статическом нагружении, который состоит в сопоставлении коэффициента интенсивности напряжений K_I в вершине трещины с критическим (допускаемым) значением коэффициента интенсивности напряжений K_{Ic} , которое должно быть определено экспериментально для рассматриваемого материала.

Полученные в **первой главе** диссертационной работы результаты имеют важное значение при оценке допустимости обнаруженных дефектов в цилиндрических оболочках из высокопрочных материалов.

Во **второй главе** диссертационной работы разработан и обоснован новый экспериментально-аналитический метод построения J_R -кривой с использованием линейной нормализации.

Наиболее распространенными параметрами, используемыми в нелинейной механике разрушения, являются J -интеграл, характеризующий уменьшение потенциальной энергии с ростом трещины, и СТOD (Crack Tip Open Displacement) – раскрытие в вершине трещины. В диссертационной работе в качестве основного параметра, характеризующего работоспособность конструкции с трещиной, используется J -интеграл.

О.А. Строгоновой разработан и обоснован экспериментально-аналитический метод построения J_R -кривой. Метод основан на принципе нормализации нагрузки и линейной зависимости между градиентом нормализованной нагрузки и приращением глубины трещины и реализуется в аналитической форме. Принятые гипотезы в диссертационной работе экспериментально подтверждены на материалах различной категории прочности.

На ранней стадии распространения трещины в диссертации предложена и подтверждена экспериментально уточненная нелинейная зависимость градиента нормализованной нагрузки ΔP_N от приращения глубины трещины Δa .

С использованием разработанного метода получены J_R -кривые для материалов различной категории прочности, которые хорошо согласуются с имеющимися результатами существующих стандартов. Разработанный метод позволяет получать J_R -кривые в удобной для практического использования аналитической форме и требует минимального количества образцов при проведении испытаний.

В **третьей главе** представлен расчет распространения трещины в элементах конструкций с использованием полученных экспериментально J_R -кривых. Расчет разрушения тела с трещиной включает в себя вычисление значения J -интеграла, соответствующего трещине заданной величины, расположенной в конструкции заданной геометрии при заданной системе внешних сил. На основании этого расчета строится зависимость значений J -интеграла от приращения глубины трещины. Полученная кривая сравнивается с сопротивляемостью материала росту трещины (J_R -кривой). Это сравнение позволяет получить параметры (нагрузку, приращение глубины трещины), соответствующие стагнации трещины, ее устойчивому росту и началу неустойчивого распространения.

Использование J -интеграла для расчета роста трещины в условиях устойчивого распространения и ее перехода в состояние неустойчивости рассмотрено на примере цилиндрической оболочки, на внутренней поверхности которой имеется протяженная осевая трещина. На цилиндрическую оболочку действует внутреннее давление p . В качестве материалов, из которых выполнена конструкция, рассмотрены сталь X80 с пределом текучести 558 МПа и сталь А с пределом текучести 1000 МПа. В результате расчета получено, что учет наличия дефекта в цилиндрической оболочке может существенно снижать критическое давление. Степень этого снижения зависит от пластических свойств материала; так, величины критического давления для оболочек, изготовленных из сталей с пределом текучести 558 МПа и 1000 МПа, различаются незначительно, несмотря на значительное различие их пределов текучести, так как высокие пластические свойства менее прочной стали тормозят развитие дефекта. Показано, что использование в расчете линейной механики разрушения применительно к материалу с высокой пластичностью дает заниженную оценку работоспособности материала; для таких материалов

необходимо проводить расчет с использованием нелинейной механики разрушения.

В заключительном разделе диссертационной работы представлены основные научные выводы и результаты.

В целом работа выполнена на высоком научно-техническом уровне с применением методов линейной и нелинейной механики разрушения. Теоретический анализ органично сочетается с экспериментальными исследованиями. Диссертация и автореферат имеют четкое логическое построение, написаны хорошим языком, лаконично и с полным охватом принципиальных вопросов. Основные положения и выводы хорошо обоснованы.

4 Степень новизны результатов

При выполнении диссертационной работы получены следующие результаты, обладающие научной новизной:

- разработан метод оценки работоспособности конструкций, выполненных из высокопластичных материалов при наличии трещиноподобных дефектов. Метод дает количественную оценку различных стадий вязкого разрушения (стабильный рост трещины и переход в неустойчивое состояние) и позволяет вскрыть и реализовать дополнительные резервы работоспособности материала;

- экспериментально подтверждена на материалах различной категории прочности ранее выдвинутая гипотеза о линейной зависимости между градиентом нормализованной нагрузки и приращением глубины трещины на стадии интенсивного распространения трещины;

- выявлен нелинейный характер зависимости градиента нормализованной нагрузки от приращения глубины трещины на начальной стадии распространения трещины. Разработан уточненный метод построения зависимости градиента нормализованной нагрузки от приращения глубины трещины, позволяющий получить корректные значения глубины трещины в процессе всего ее распространения;

- разработан новый экспериментально-аналитический метод построения J_R -кривой в условиях упруго-пластического деформирования материала, позволивший существенно снизить объем испытаний и повысить надежность получаемых характеристик трещиностойкости материала;

- разработана расчетная процедура оценки допустимости трещиноподобного дефекта в цилиндрических оболочках, изготовленных из малопластичных материалов, которая расширяет представленный в литературе диапазон типов и параметров исходных дефектов (поверхностные, подповерхностные и сквозные трещины различной ориентации);

- получены для широкого круга конструкционных сталей экспериментальные диаграммы разрушения (J_R -кривые), которые позволяют перейти от консервативных оценок статической трещиностойкости к всесторонней проверке пригодности к эксплуатации неразрушающими методами, использующими технику обнаружения и измерения дефектов на критических участках.

5 Замечания по работе

5.1 В работе исследован плоский дефект, расположенный перпендикулярно поверхности конструкции. Применение полученных результатов к другому расположению трещин приводит к ошибке в безопасную сторону, но оставляет вне рассмотрения возможное влияние сжатия, поперечного и продольного сдвига.

5.2 На трещиностойкость материала могут оказывать существенное влияние окружающая среда, скорость нагружения и время нахождения под нагрузкой. Для учета влияния этих факторов требуются дальнейшие экспериментальные исследования и построение соответствующих моделей.

Представленные замечания не изменяют общую положительную оценку диссертационной работы.

6 Личный вклад автора в получение научных результатов

Представленная диссертационная работа является самостоятельным творческим исследованием автора. Экспериментальные данные получены лично автором. В диссертации даны требуемые ссылки на работы других авторов, использованные в исследовании.

7 Реализация работы

Реализацией диссертационной работы являются разработанные на основе полученных теоретических и экспериментальных данных:

– методика ИМЯН 32-394-13МИ «Металлические материалы. Испытания при статическом нагружении. Оценка статической трещиностойкости методом упругой податливости. Методика», которая вошла в состав НИР «Приемка» («Разработка технологии проведения аттестационных испытаний высокопрочных металлических и композиционных конструкционных материалов для подводного и надводного кораблестроения»);

– программа автоматической обработки результатов испытаний на статическую трещиностойкость методом упругой податливости ИМЯН.0302.03-01 «J-R_ELASTIC_COMPLIANCE»;

– методика по оценке работоспособности цилиндрических оболочек, содержащая таблицы для определения уровня допустимых дефектов и включенная в «Руководство по техническому наблюдению за постройкой и эксплуатацией морских подводных трубопроводов» Российского Морского Регистра судоходства;

– методика «Металлические материалы. Испытания при статическом нагружении. Оценка статической трещиностойкости методом линейной нормализации. Методика» и программа компьютерной обработки результатов испытаний ИМЯН.0302.07-01 «J-R_LINEAR_NORMALIZATION»;

– программа компьютерной обработки данных ИМЯН.0302.08-01 «CYLINDER INSTABLE CRACK EXTENSION», реализующая метод оценки работоспособности цилиндри-

ческих оболочек, выполненных из высокопластичных материалов при наличии трещиноподобных дефектов, позволяющая получить количественную оценку различных стадий вязкого разрушения.

Результаты проведенных в данной работе теоретических и экспериментальных исследований вошли в научно-технические отчеты по темам «Протоплазма», «Порошок», «Магистраль», «Эффективность», «Корпус 949 АМ-ОКК-К», «Разорение 1» и «Реконструкция».

Основные положения диссертационной работы докладывались и получили положительную оценку на 4-х научно-технических конференциях. По теме диссертации опубликовано 10 научно-технических статей (из них 7 в соавторстве); в том числе опубликованы следующие статьи в изданиях, входящих в перечень учитываемых ВАК РФ при рассмотрении диссертационных работ:

1. Рыбакина О.Г., Строгонова О.А. Построение J_R -кривой с использованием аналитического метода линейной нормализации // Труды Центрального научно-исследовательского института им. акад. А.Н. Крылова, СПб, вып. 56 (340), 2010, с. 87-97.

2. Строгонова О.А. Экспериментальное исследование трещиностойкости металлических материалов // Труды Центрального научно-исследовательского института им. акад. А.Н. Крылова, СПб, вып. 60 (344), 2011, с. 105-118.

3. Рыбакина О.Г., Строгонова О.А. Использование J -интеграла и модуля разрушения для оценки устойчивости распространения трещины // Труды Крыловского государственного научного центра, СПб, вып. 75 (359), 2013, с. 89-96.

8 Рекомендации к защите

Учитывая научную и практическую значимость представленной работы, 3 отделение рекомендует диссертацию Строгоновой О.А. к защите в диссертационном Совете при ФГУП «Крыловский государственный научный центр» по специальности 05.08.01 – «Теория корабля и строительная механика».

3 отделение рекомендует:

1. Пригласить в качестве официальных оппонентов:

- доктора технических наук С.В. Петина, профессора кафедры сопротивления материалов, СПбГПУ;

- кандидата технических наук В.Ю. Филина, старшего научного сотрудника ФГУП «ЦНИИ КМ «Прометей».

2. Ведущей организацией назначить Санкт-Петербургский государственный морской технический университет.

3. В список рассылки автореферата включить:

- ФГУП «ЦНИИ КМ «Прометей»;

- ФГБОУ ВПО ПГУПС;
- ОАО «СПМБМ «Малахит»;
- ОАО «ЦКБ МТ «Рубин»;
- ОАО «ЦТСС»;
- ОАО «ЦМКБ «Алмаз»;
- ВУНЦ ВМФ «Военно - морская академия»;
- ОАО «Адмиралтейские верфи»;
- ОАО «Балтийский завод судостроение»;
- РМРС;
- БГТУ "ВОЕНМЕХ" им. Д.Ф. Устинова;
- 1 ЦНИИ МО РФ.

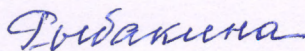
Настоящее Заключение составлено по результатам рассмотрения диссертации в присутствии ведущих специалистов 3 отделения.

Начальник 32 лаборатории, к.т.н.



Г.А. Тумашик

ст. н. с. 324 сектора, к.т.н.



О.Г. Рыбакина