

УТВЕРЖДАЮ

И.о. ректора СПбГМТУ,

доктор технических наук, профессор

Е.М. Апполонов

2016 г.



## ОТЗЫВ

ведущей организации Санкт–Петербургского государственного морского  
технического университета (СПбГМТУ)

на диссертационную работу **Строгоновой Ольги Александровны**  
по теме **«Методы оценки статической трещиностойкости конструкций  
морской техники»**,

представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук  
по специальности 05.08.01 – Теория корабля и строительная механика

### Актуальность

Опыт постройки и эксплуатации высоконагруженных конструкций показывает, что создать материалы, а также изготовить конструкцию без дефектов типа трещин практически невозможно. В настоящее время методы оценки трещиностойкости металлов разбились на две группы. К первой группе относятся исследования, основанные на использовании положений линейной упругой механики разрушения и ее основного параметра – критического значения коэффициента интенсивности напряжений  $K_{Ic}$ . Однако для современных материалов с высокой пластичностью должны применяться более сложные концепции упруго-пластической механики разрушения. Распространенным параметром упруго-пластической вязкости разрушения является

критическое значение  $J$  – интеграла, характеризующего локальное поле напряжений и деформаций вокруг фронта трещины. В настоящее время разработаны отечественные и зарубежные стандарты для экспериментального определения этой величины.

Разработка методов оценки статической трещиностойкости конструкций подводной морской техники, обоснованных и подтвержденных теоретическими и экспериментальными исследованиями, является **актуальной задачей**, решение которой позволит определить допустимый размер дефекта, произвести расчет отсутствия страгивания трещины или стабильности ее распространения.

**Основные научные результаты** состоят в следующем: (1) представлен новый расчетно-экспериментальный метод построения  $J_R$ -кривой, позволяющий получать надежные результаты при ограниченном объеме испытаний; (2) представлен расчетный метод оценки трещиностойкости конструкций, выполненных из высокопластичных металлов; расчет дает количественную оценку стадий вязкого разрушения и позволяет в полной мере использовать работоспособность материала.

### **Обоснованность научных положений и выводов диссертации**

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

Представленная на отзыв диссертация Строгоновой О.А. состоит из введения, 3 глав и заключения, списка литературы из 53 наименований, 3 приложений, 34 рисунков, 11 таблиц. Общий объем основного текста с иллюстрациями составляет 104 страницы.

Одна из основных задач автора диссертации – дифференцированно подойти к оценке работоспособности материала в зависимости от его прочно-

сти и пластичности, а именно, использовать линейную механику разрушения для высокопрочных материалов с низкой пластичностью и упруго-пластическую механику для материалов с высокой вязкостью разрушения. Этой цели соответствует структура диссертации: первая глава посвящена задачам линейной механики разрушения, во второй главе изложен новый разработанный метод оценки трещиностойкости материала при наличии пластических деформаций, в третьей главе представлен расчет распространения трещины в цилиндрической оболочке, выполненный на основании данных, полученных в первой и во второй главах.

**В первой главе** диссертации рассмотрена круговая цилиндрическая оболочка под действием внутреннего давления; плоскость трещины расположена перпендикулярно поверхности оболочки, трещина имеет полуэллиптическую или эллиптическую форму; она может быть расположена на его внутренней, наружной поверхности и под поверхностью; исследуются осевые и окружные трещины. В качестве основного параметра, характеризующего геометрию трещины, используется коэффициент интенсивности  $K_I$  в вершине малой полуоси эллипса. При проведении расчетов используются опубликованные в литературе решения задач зарубежных и отечественных авторов, посвященные отдельным видам относительной глубины, соотношений полуосей, формы и расположения трещины. Оценка допустимости обнаруженного дефекта проводится путем сравнения с параметром разрушения, который экспериментально определяется для материала, из которого изготовлена оболочка.

Результаты проведенных исследований представлены в виде таблиц и графиков. Рассмотрен переход от подповерхностной трещины к поверхностной и далее к сквозной. В каждом из этих случаев для образовавшейся трещины нового типа проводится оценка их опасности путем сравнения соответствующего коэффициента интенсивности напряжений  $K_I$  с критическим

значением  $K_{Ic}$ . Рассмотрен случай, когда образование сквозной трещины приводит к течи и снижению внутреннего давления, но не вызывает ее неконтролируемое распространение. Результаты первой главы вошли в «Руководство по техническому наблюдению за постройкой и эксплуатацией морских подводных трубопроводов» Российского Морского Регистра судоходства.

**Во второй главе** диссертации кратко изложены существующие методы экспериментального построения  $J_R$ -кривой, представляющей собой полученную на образце экспериментальную зависимость между значением  $J$ -интеграла и приращением глубины трещины  $\Delta a$ , и указаны основные проблемы. Основная трудность состоит в достоверном определении приращения глубины трещины в процессе ее распространения при испытании образца. Наиболее простой, но при этом затратный и трудоемкий способ – это определение значения  $J$ -интеграла для каждого значения  $\Delta a$  на отдельном образце (многообразцовый метод). Наиболее распространенный в настоящее время – метод упругой податливости, при использовании которого глубина трещины выражается через ее раскрытие на поверхности образца. Для того чтобы воспользоваться математическим аппаратом линейной механики разрушения, в процессе испытаний по распространению трещины необходимо производить разгрузки и последующие упругие нагрузки, измеряя раскрытие с помощью соответствующей аппаратуры. Этот метод широко применяется, однако, значительные пластические деформации и, соответственно, большие раскрытия трещины, приводят к погрешности измерений, что недопустимо при определении глубины трещины.

В основе развитого в диссертации подхода лежит метод нормализации (Дж. Ландес), а именно, принцип представления нагрузки в виде произведения двух функций, одна из которых зависит только от глубины трещины, а другая – только от составляющей перемещения точки приложения силы.

Функция, зависящая от глубины трещины, имеет специальный вид и содержит параметр пластичности  $\eta_{pl}$ , который экспериментально получен для некоторых геометрических конфигураций образцов, используемых при исследовании трещиностойкости.

Далее Е. Рис и К. Швальбе ввели понятие градиента нормализованной нагрузки  $\Delta P_N(\Delta a)$  и на основании большого объема экспериментальных данных установили, что между градиентом нормализованной нагрузки и приращением глубины трещины имеет место линейная зависимость. Эти результаты легли в основу метода, предложенного в диссертации.

В диссертации проведена экспериментальная проверка указанной линейной зависимости на сталях с пределом текучести 500, 700, 1000 МПа, экономно-легированной и нержавеющей стали и получено подтверждение указанной линейной зависимости.

Процедура построения  $J_R$ -кривой состоит в следующем. Проводится испытание одного образца с записью диаграммы «Нагрузка – перемещение по линии действия силы». Нагружение должно производиться до достижения максимальной нагрузки  $P_{max}$  и ее последующего снижения до величины  $P_f$ . Значения начальной глубины трещины  $a_0$  и конечной глубины  $a_f$  после проведения испытаний определяются на разрушенном образце. Использование указанной выше линейной зависимости между градиентом нормализованной нагрузки и приращением глубины трещины позволило диссертанту получить трансцендентное уравнение для определения глубины трещины  $\Delta a_{P_{max}}$ , соответствующей максимальной нагрузке  $P_{max}$ . Это уравнение необходимо решать численно. После того как  $\Delta a_{P_{max}}$  найдено, не составляет труда построить зависимость «Нагрузка – приращение глубины трещины» для всей диаграммы нагружения от  $P = 0$  до  $P = P_f$ . Подчеркнем, что для этого используется

один образец и в процессе испытаний не производится никаких измерений, для определения глубины трещины.

Для оценки статической трещиностойкости в диссертации были использованы испытания образцов на трехточечный изгиб SENB. В этом случае параметр пластичности  $\eta_{pl}$  на основании экспериментальных данных имеет значение  $\eta_{pl} = 2$ . При таком значении параметра пластичности трансцендентное уравнение для определения приращения глубины трещины при максимальной нагрузке сводится к алгебраическому уравнению 3-ей степени. Как уже сказано выше, при известном значении глубины трещины при максимальной нагрузке  $\Delta a_{P_{max}}$  легко строится зависимость между нагрузкой и приращением глубины трещины в остальных точках. Все необходимые формулы в диссертации приведены.

Экспериментальное построение зависимости  $\Delta P_N(\Delta a)$  для широкого круга материалов, представленное в диссертации, показало, что экспериментальная прямая не проходит через начало координат, что не позволяет прямо использовать полученные результаты при малых значениях  $\Delta a$ . В диссертации предложено уточненное представление зависимости  $\Delta P_N(\Delta a)$ : нелинейное до достижения максимальной нагрузки  $P_{max}$  и линейное – после ее достижения.

В диссертации представлены  $J_R$ -кривые, полученные разработанным в диссертации экспериментально-аналитическим методом, для всех рассмотренных марок сталей. Для сравнения представлены результаты, полученные многообразцовым методом (каждой точке соответствует отдельный образец) и методом упругой податливости (каждой точке соответствует разгрузка и последующая нагрузка, сопровождающиеся измерением раскрытия трещины). Имеет место близкое соответствие полученных результатов. Данные охватывают диапазон изменения предела текучести сталей  $500 \div 1000$  МПа.

В третьей главе рассмотрено использование линейной и упруго-пластической механики разрушения на примере цилиндрической оболочки, на внутренней поверхности которой имеется протяженная осевая трещина. Для вычисления  $J$ -интеграла используются известные из литературы формулы и таблицы, причем диссертантом выполнены необходимые аппроксимации и интерполяции этих данных. Для возможности сопоставления применения линейной и нелинейной механики разрушения рассмотрены сталь X80 с пределом текучести 500 МПа и сталь А с пределом текучести 1000 МПа.

Для каждой марки стали проведен расчет по формулам линейной и нелинейной механики разрушения.

(1) В случае стали X80 с высокими пластическими свойствами критическое давление, полученное в рамках линейной механики разрушения, существенно занижено; для корректной оценки работоспособности материала необходимо учитывать пластические деформации. В работе получено значение давления, при котором трещина распространяется устойчиво, и давление, соответствующее переходу в неустойчивое состояние.

(2) В случае менее пластичной стали А значения критических давлений, полученные без учета и с учетом пластических деформаций, практически совпадают.

В работе также приведены значения давлений, при которых в бездефектной оболочке окружные напряжения достигают предела текучести.

Проведенный расчет показал: учет наличия дефекта существенно снижает критическое давление, однако это снижение зависит от пластических свойств материала; при проведении расчета применительно к материалам с высокой пластичностью необходимо использовать упруго-пластическую механику разрушения. В диссертации разработана программа расчета статической трещиностойкости цилиндрической оболочки «CYLINDER INSTABLE CRACK EXTENSION», позволяющая оценить критическую величину внут-

ренного давления, при котором трещина переходит в неустойчивое состояние.

По диссертации необходимо сделать следующие **замечания**.

1. При оценке влияния дефекта на работоспособность элемента конструкции автор рассматривает дефекты различной геометрии, используя экспериментальные данные, полученные на стандартных образцах. Поскольку в стандартных образцах имеют место сквозные трещины, такой подход приводит к ошибке в безопасную сторону, но оценка вносимой таким образом погрешности представляет большой интерес.

2. Неудачен рисунок 19. Этот рисунок имеет важное значение, так как представляет основную схему предложенного метода. Было необходимо отдельно в увеличенном виде показать построение всех закономерностей в окрестности приращения глубины трещины при максимальной нагрузке  $\Delta a_{p_{\max}}$ .

Несмотря на сделанные замечания **научная значимость** выполненной работы не вызывает сомнений и является рекомендацией для дальнейших исследований. Результаты теоретических и экспериментальных исследований, проведенных в работе, вошли в тематические научно-исследовательские работы и в «Руководство по техническому наблюдению за постройкой и эксплуатацией морских подводных трубопроводов» Российского Морского Регистра судоходства.

Основные научные результаты диссертации опубликованы автором в тематических журналах, в том числе 3 работы в изданиях, рекомендованных перечнем ВАК.

**Считаем, что диссертационная работа Строгоновой Ольги Александровны выполнена на современном научном уровне и соответствует критериям, установленным «Положением о присуждении ученых степеней», (утвержденным Постановлением Правительства Российской Феде-**



рации от 24 сентября 2013 г. № 842), а ее автор Строгонова Ольга Александровна заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.08.01 – «Теория корабля и строительная механика».

Автореферат правильно отражает содержание диссертации.

Отзыв рассмотрен и утвержден на заседании 24.05.2016 протокол № 05/16-2015/2016 (190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, д.3, +7(812) 714-07-61, [office@smtu.ru](mailto:office@smtu.ru))

Доцент кафедры строительной  
механики корабля СПбГМТУ,  
кандидат технических наук



В.А. Манухин

Заведующий кафедрой строительной  
механики корабля СПбГМТУ,  
доктор технических наук, профессор



А.А. Родионов