

На правах рукописи



Строгонова Ольга Александровна

**МЕТОДЫ ОЦЕНКИ СТАТИЧЕСКОЙ  
ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ КОНСТРУКЦИЙ МОРСКОЙ ТЕХНИКИ**

**Специальность: 05.08.01** – Теория корабля и строительная механика

**Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук**

Санкт-Петербург

2015

Работа выполнена в ФГУП «Крыловский государственный научный центр»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник ФГУП «Крыловский государственный научный центр» **Палий Олег Маркович**

Официальные оппоненты:

**Петин Сергей Владимирович**, доктор технических наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, кафедра сопротивления материалов.

**Филин Владимир Юрьевич**, кандидат технических наук, ФГУП «ЦНИИ КМ «Прометей», старший научный сотрудник 34 лаборатории.

**Ведущая организация:** Санкт-Петербургский государственный морской технический университет.

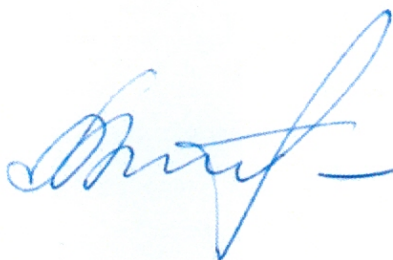
Защита состоится 17 июня 2016г в 10.00  
на заседании ученого совета Д.411.004.01 при ФГУП «Крыловский государственный научный центр» по адресу СПб, Московское шоссе, д. 44.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГУП «Крыловский государственный научный центр» и на сайте [www.krylov-center.ru](http://www.krylov-center.ru).

Автореферат разослан \_\_\_\_\_

Отзывы просим направлять в 2-х экземплярах по адресу:  
по почте – 196158, г. Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44, ФГУП «Крыловский государственный научный центр».

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
доктор технических наук



Л. И. Вишневецкий

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**АКТУАЛЬНОСТЬ ТЕМЫ.** Надежность конструкций в значительной степени определяется качеством используемого для их постройки материала, особенно в отношении противодействия развитию неизбежных при изготовлении и эксплуатации различных дефектов, что приводит к необходимости решения нескольких родственных по смыслу задач. В их числе определение допустимого размера дефекта, не ограничивающего возможность эксплуатации объекта, определение безопасного срока службы при заданных конструктивных размерах объекта и дефекта, определение срока эксплуатации с учетом выявленных дефектов после контрольной дефектации. Основой для решения данных задач является анализ процессов развития дефектов в заданных условиях эксплуатации. Для данной цели широко используются понятия и положения различных вариантов механики разрушения.

Наиболее простые варианты построения моделей основаны на допущениях линейной механики разрушения, которые корректны тогда, когда поведение материала по преимуществу упруго и разрушение хрупко. Для судовой техники характерно вязкое разрушение, и в материале до разрушения могут возникать значительные пластические деформации. В этих условиях при проведении экспериментальных исследований, используя только методы линейной механики разрушения, не удастся корректно определить параметры материала, необходимые для оценки работоспособности элемента конструкции. Кроме того, при наличии пластических деформаций факту потери работоспособности предшествует стадия устойчивого распространения трещины. Учет этой стадии позволяет более полно использовать резервы работоспособности материала.

В связи с этим интенсивно ведутся поиски в направлениях выявления параметров, характеризующих процесс вязкого разрушения конструкций при наличии дефектов, построения моделей такого разрушения и развития экспериментальных методов его оценки.

В последние годы разработаны стандарты для определения параметров, входящих в критерии прочности, сформулированные с использованием линейной и нелинейной механики разрушения. Однако, методы, принятые в данных стандартах, часто не удовлетворяют практических потребностей. Они либо требуют неприемлемо большого объема эксперимента, либо при ограниченном объеме испытаний дают надежные результаты только для умеренно пластичных металлов.

В диссертационной работе для оценки статической трещиностойкости вязких материалов разработан метод, позволяющий избежать данных недостатков. Он предполагает получение надежных результатов на основании теоретических исследований и при минимальных объемах эксперимента (например, путем испытания одного образца) как для умеренно пластичных, так и высокопластичных материалов.

**ЦЕЛЬ РАБОТЫ** заключается в создании методов оценки статической трещиностойкости при эксплуатации конструкций морской техники с корпусами из материалов различных категорий прочности.

**МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ.** В работе используются теоретические и экспериментальные методы механики твердого деформируемого тела и механики разрушения, экспериментальные методы исследования. С использованием известных теоретических разработок и проведенных экспериментальных исследований создан экспериментально-аналитический метод и программа его реализующая.

**НАУЧНАЯ НОВИЗНА** работы состоит в разработке расчетно-экспериментальной оценки характеристик статической трещиностойкости материала корпуса, описании процесса развития дефектов и порядке нормирования допустимых дефектов в конструкции.

**ДОСТОВЕРНОСТЬ** научных положений и выводов обеспечивается использованием основных положений механики деформируемого твердого тела и механики разрушения, получением корректных данных экспериментальных исследований и проведением сопоставлений результатов расчета и данных, полученных ранее другими авторами.

**ПРАКТИЧЕСКАЯ ЦЕННОСТЬ** работы заключается в возможности контролировать и обеспечивать требуемый уровень надежности основных конструкций корпусов объектов морской техники в отношении сопротивляемости развитию начальных дефектов, нормировать размеры таких дефектов в зависимости от свойств материала корпуса и нагруженности конструкций.

**РЕАЛИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ.** Результаты теоретических и экспериментальных исследований, проведенных в данной работе, вошли в научно-технические отчеты по темам: «Протоплазма», «Порошок», «Магистраль», «Эффективность», «Корпус 949 АМ-ОКК-К», «Разорение 1», «Приемка» и «Реконструкция», а также в «Руководство по техническому наблюдению за постройкой и эксплуатацией морских подводных трубопроводов» Российского Морского Регистра судоходства.

Разработаны методика ИМЯН 32–394–13МИ «Металлические материалы. Испытания при статическом нагружении. Оценка статической трещиностойкости методом упругой податливости. Методика» с программой автоматической обработки результатов испытаний на статическую трещиностойкость ИМЯН.0302.03–01 «J-R\_ELASTIC\_COMPLIANCE» и методика ИМЯН 32–440–15МИ «Металлические материалы. Испытания при статическом нагружении. Оценка статической трещиностойкости методом линейной нормализации. Методика» с программой компьютерной обработки результатов испытаний ИМЯН.0302.07-01 «J-R\_LINEAR\_NORMALIZATION». Разработана программа компьютерной обработки данных ИМЯН.0302.08-01 «CYLINDER INSTABLE CRACK EXTEN-

SION», реализующая метод оценки работоспособности цилиндрических оболочек, выполненных из высокопластичных материалов при наличии трещиноподобных дефектов, позволяющая получить количественную оценку различных стадий вязкого разрушения.

**АПРОБАЦИЯ РАБОТЫ.** Основные положения и результаты работы докладывались и обсуждались на следующих научно-технических конференциях: конференция по строительной механике корабля памяти профессора П.Ф. Папковича – 2007 и 2009 гг.; VII Международная конференция «Научно-технические проблемы прогнозирования надежности и долговечности конструкций и методы их решения» – 2008 г.; 6-я Международная конференция «Военно-морской флот и судостроение в современных условиях» – 2011 г.

**ПУБЛИКАЦИИ.** По теме диссертации опубликовано 10 работ. Из них 3 работы в личном авторстве, в 5 из них доля автора – 50 %, в остальных – 25%. В изданиях, определяемых Перечнем ВАК РФ, опубликованы 3 статьи, где доля автора в одной статье составляет 100 %, в остальных – 50 %.

**СТРУКТУРА И ОБЪЕМ РАБОТЫ.** Диссертация 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.

#### **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ:**

– разработанная процедура оценки допустимости трещиноподобных дефектов в цилиндрических оболочках, выполненная в рамках линейной механики разрушения (для конструкций из малопластичных материалов), для широкого спектра видов дефектов и их расположения в конструкции;

– разработанный новый экспериментально-аналитический метод построения  $J_R$ -кривой в условиях упруго-пластического деформирования, основанный на принципе нормализации нагрузки;

– разработанный уточненный метод построения зависимости градиента нормализованной нагрузки от приращения трещины на начальной стадии распространения трещины;

– обобщенные экспериментальные  $J_R$ -кривые для различных марок сталей с использованием различных методов получения экспериментальных зависимостей и оценки приращения глубины трещины;

– разработанный метод оценки работоспособности оболочки с дефектом, основанный на использовании экспериментальных кривых разрушения, позволяющий определить критическую величину давления, при котором трещина переходит в неустойчивое состояние.

#### **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во *введении* сформулированы цели исследования, приведен краткий обзор существующих методов оценки допустимости дефектов в металлических конструкциях. Обос-

нована актуальность поставленной задачи, указано, что результаты диссертационной работы предоставляют специалисту по прочности конструкций простые для использования решения задач механики разрушения для цилиндрических оболочек с дефектами. Сформулированы результаты, обладающие научной новизной, приведены обоснования достоверности научных положений и выводов и указана практическая ценность работы.

В *первой главе* диссертации разработан метод оценки статической трещиностойкости цилиндрических оболочек с размерениями, характерными для различных объектов морской техники, в зависимости от уровня нагруженности конструкции и характеристик материала с заданной степенью риска возникновения отказа. В работе выполнен анализ имеющихся отдельных частных решений и объединение их в единую систему, при этом построенная модель охватывает весь необходимый диапазон изменения параметров исходных дефектов.

Рассмотрен круговой цилиндр с внутренним радиусом  $R$  и толщиной стенки  $t$  под действием внутреннего давления  $p$ . Исследованы плоские осевые и окружные трещиноподобные дефекты – поверхностные, имеющие полуэллиптическую форму и расположенные как на внутренней, так и на наружной поверхности цилиндра, и подповерхностные, имеющие эллиптическую форму.

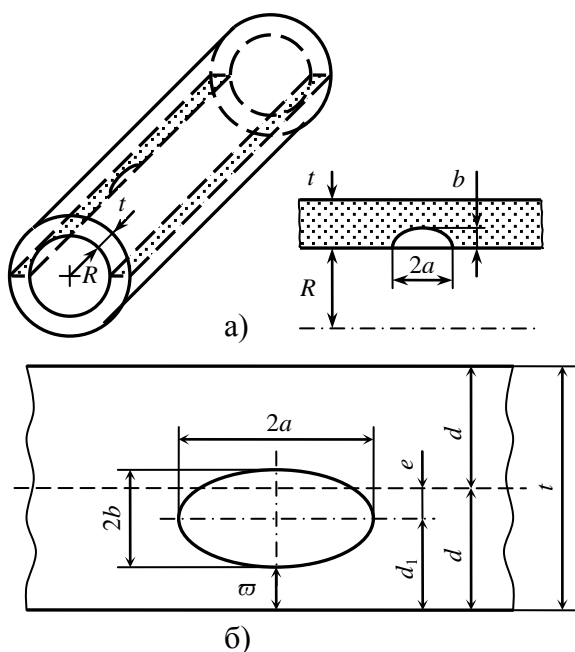


Рис. 1. Схемы поверхностного (а) и подповерхностного (б) дефектов

На рис. 1 представлены схемы расположения поверхностного и подповерхностного дефектов и даны обозначения их геометрических характеристик.

Для оценки работоспособности конструкции с дефектом заданного размера в качестве силовой характеристики использован параметр  $A = \frac{K_I}{\sigma\sqrt{\pi b}}$ , где  $\sigma$  – напряжение, нормальное по отношению к плоскости, в которой расположена трещина;  $K_I$  – максимальное значение коэффициента интенсивности напряжений на фронте трещины. В качестве критерия разрушения принято достижение величиной  $K_I$  критического для данного материала значения  $K_{Ic}$ .

В зависимости от размеров, типа дефекта и уровня напряжений могут реализовываться следующие варианты поведения конструкции:

- максимальный коэффициент интенсивности напряжений  $K_I$  меньше критического  $K_{Ic}$ , трещина не распространяется;
- максимальный коэффициент интенсивности напряжений  $K_I$  больше критического  $K_{Ic}$ , тогда трещина распространяется и становится сквозной (в случае поверхностной трещины) или поверхностной (в случае подповерхностной трещины).

Принято, что поверхностная трещина становится сквозной трещиной длиной  $2a$  после достижения ею глубины 0,8 от толщины цилиндра. Относительно подповерхностных трещин принято, что если величина лигамента  $\varpi$  (рис. 1б) менее одной восьмой поперечного размера дефекта ( $\varpi < 0,25b$ ), трещина считается поверхностной, имеющей глубину  $2,25b$ . В каждом из этих случаев для образовавшихся трещин нового типа (подповерхностная  $\rightarrow$  поверхностная  $\rightarrow$  сквозная) должна быть проведена оценка их опасности путем сравнения соответствующего коэффициента интенсивности напряжений  $K_I$  с критическим значением  $K_{Ic}$ . Если размер образовавшейся сквозной трещины не является критическим, то ее наличие приведет к возникновению течи и снижению внутреннего давления, но не вызовет неконтролируемое распространение. Чтобы установить, какая из этих возможностей будет реализована, в диссертации проведен расчет коэффициента интенсивности напряжений на фронте сквозной трещины, который затем должен быть сопоставлен с его критическим значением.

Оценка допустимости обнаруженного дефекта проводится следующим образом:

- задаются входящие геометрические параметры: внутренний радиус  $R$  и толщина стенки цилиндрической оболочки  $t$ ; глубина трещины  $b$  (для поверхностных дефектов) или половина поперечного размера трещины  $b$  и расстояние от ближайшей поверхности цилиндра  $\varpi$  (для подповерхностных дефектов); половина длины трещины  $a$ ;
- задается окружное напряжение в случае осевой трещины и осевое напряжение в случае окружной трещины; если плоскость дефекта не совпадает ни с продольным, ни с поперечным направлением, то используется то направление, в котором имеют место максимально возможные значения напряжения;
- задается полученное экспериментально критическое значение коэффициента интенсивности напряжений для данного материала  $K_{Ic}$ ;
- вычисляется параметр  $A_{кр} = \frac{0,7 K_{Ic}}{\sigma \sqrt{\pi b}}$  (принят коэффициент запаса 0,7);
- для геометрических параметров дефекта  $R/t$ ,  $b/t$  и  $b/a$  по таблице (графику или с помощью аппроксимирующего полинома), приведенных в Приложениях к диссертации, определяется параметр  $A = \frac{K_I}{\sigma \sqrt{\pi b}}$ ;

– сравниваются значения  $A_{кр}$  и  $A$ : если  $A < A_{кр}$ , то конструкция с дефектом работоспособна; если  $A \geq A_{кр}$ , то подповерхностный дефект превращается в поверхностный и требует новой оценки; поверхностный дефект превращается в сквозной и также требует новой оценки.

Разработанные таблицы были включены в «Руководство по техническому наблюдению за постройкой и эксплуатацией морских подводных трубопроводов» Российского Морского Регистра Судоходства.

Во *второй главе* диссертации представлен экспериментально-аналитический метод получения характеристик статической трещиностойкости материала с учетом его пластических свойств. В качестве основного параметра, характеризующего работоспособность конструкции с трещиной, используется  $J_R$ -кривая. При построении  $J_R$ -кривой, представляющей собой полученную на образце экспериментальную зависимость между значениями  $J$ -интеграла и приращением глубины трещины  $\Delta a$ , основная трудность состоит в достоверном определении приращения глубины трещины в процессе ее распространения при испытании образцов.

В **2.1** на основе анализа имеющихся литературных данных показано, что при вычислении  $J$ -интеграла существует два основных подхода: с учетом и без учета приращения глубины трещины.

В **2.2** рассмотрены традиционные методы определения глубины трещины. В настоящее время используются два подхода: испытание серии образцов (многообразцовый метод) и метод упругой податливости (однообразцовый метод). Рассматриваются преимущества и недостатки указанных методов.

В многообразцовом методе каждый образец серии с начальной трещиной глубиной  $a_0$  однократно нагружается и затем разгружается с целью получить после испытаний всей серии двух массивов данных: массив значений нагрузки  $P$ , соответствующих началу разгрузки, и массив значений пластической составляющей перемещения  $v_{pl}$ . После разгрузки на каждом образце фиксируется глубина трещины  $a$  и получается третий массив данных – массив значений приращения глубины трещины  $\Delta a = a - a_0$ . Для получения каждой точки на  $J_R$ -кривой необходимо испытать образец, поэтому недостатком этого метода является его трудоемкость – большое количество образцов.

Метод упругой податливости является существенно менее трудоемким способом. Используется один образец, который многократно частично разгружается и снова нагружается для продолжения испытания. По мере роста глубины трещины наклон диаграммы на участке разгрузка-нагрузка уменьшается. Величина этого наклона позволяет, используя математический аппарат линейной механики разрушения, определить глубину трещины в



каждой точке разгрузки. Данный метод дает надежные результаты только для умеренно пластичных материалов, для которых использование линейной механики разрушения не приводит к существенной погрешности.

В **2.3** на примере испытаний образцов на трехточечный изгиб приведены соотношения для вычисления  $J$ -интеграла при обработке экспериментальных результатов.

Величина  $J$ -интеграла представляется в виде суммы упругой  $J_{el}$  и пластической  $J_{pl}$  составляющей. При вычислении упругой составляющей  $J$ -интеграла используются соотношения линейной механики разрушения. Для вычисления пластической составляющей  $J$ -интеграла используется экспериментальная зависимость «Нагрузка  $P$ – перемещение по линии нагружения  $v_{LL}$ » («Нагрузка  $P$  – пластическая составляющая перемещения  $v_{pl}$ »).

Обработка экспериментальной диаграммы «Нагрузка – перемещение по линии нагружения» приведена в **2.4**.

В **2.5** предложен экспериментально-аналитический метод построения  $J_R$ -кривых.

В **2.5.1** описана история вопроса. В 90-х годах Дж. Ландесом было положено начало развития метода построения  $J_R$ -кривой, не требующего специального экспериментального оборудования для автоматического измерения глубины трещины под нагрузкой в процессе испытания. В основу метода положен принцип разделения нагрузки, а именно, нагрузка представляется в виде произведения двух функций, одна из которых зависит только от глубины трещины, а вторая – только от пластической составляющей перемещения. Было введено понятие нормализованной нагрузки  $P_N$ . Метод получил название метода линейной нормализации.

Следующий шаг сделан в работе Е. Риса и К. Швальбе, которые ввели понятие градиента нормализованной нагрузки и на основании большого экспериментального материала показали, что между градиентом нормализованной нагрузки и приращением глубины трещины имеет место линейная зависимость.

Развитие метода линейной нормализации описано в **2.5.2**. В диссертации предложен и обоснован новый экспериментально-аналитический метод определения приращения глубины трещины при испытаниях образцов различной геометрии. Процедура испытаний состоит в нагружении образца с начальной трещиной  $a_0$  до максимальной нагрузки  $P_{max}$ , последующего снижения нагрузки до значения  $P_f$  и разгрузки с последующим замером конечной глубины трещины  $a_f$ . Производится запись диаграммы «Нагрузка – перемещение по линии нагружения  $v_{LL}$ ». Результатом расчета является аналитическая зависимость «Нагрузка – приращение глубины трещины» во всем диапазоне изменения нагрузки. Последующая обработка данных и построение  $J_R$ -кривой проводится по специально разработанной программе.

В работе Ландеса разработан принцип разделения нагрузки, согласно которому нагрузка  $P$  может быть записана как произведение двух функций, одна из которых зависит только от относительной глубины трещины  $a/W$ , а вторая – только от относительной пластической составляющей перемещения по линии нагружения  $v_{pl}/W$

$$P = G(a/W)H(v_{pl}/W). \quad (1)$$

Функция  $G(a/W)$  принята в виде (Шаробим и Ландес)

$$G\left(\frac{a}{W}\right) = BW\left(1 - \frac{a}{W}\right)^{\eta_{pl}}, \quad (2)$$

причем  $\eta_{pl}$  не зависит от размера трещины. В указанной работе экспериментально получены значения  $\eta_{pl}$  для некоторых геометрических конфигураций образцов, используемых при исследовании трещиностойкости ( $\eta_{pl} = 1,94$  – трехточечный изгиб;  $\eta_{pl} = 2,13$  – растяжение и  $\eta_{pl} = 0,96$  – компактный образец).

Исходными данными метода является экспериментальная диаграмма «Нагрузка  $P$  – перемещение по линии нагружения  $v_{LL}$ ». При этом разгрузка должна быть произведена после достижения нагрузкой своего максимального значения и некоторого ее снижения до значения  $P_f$ . Значения начальной  $a_0$  и конечной  $a_f$  глубины трещины должны быть определены на разрушенных образцах после проведения испытания.

В результате испытания образца получается экспериментальная диаграмма  $P = P(a, v_{pl})$ , в каждой точке которой трещина имеет неизвестную глубину  $a$ , которая подлежит определению.

Нормализованная нагрузка  $P_N$  вводится по формуле

$$P_N = \frac{P}{G(a/W)}. \quad (3)$$

Градиент нормализованной нагрузки  $\Delta P_N(\Delta a)$  дается зависимостью

$$\Delta P_N(\Delta a) = P_N(a_0 + \Delta a) - P_N(a_0). \quad (4)$$

Рис и Швальбе экспериментально установили, что между градиентом нормализованной нагрузки  $\Delta P_N$  и приращением глубины трещины  $\Delta a$  имеет место линейная зависимость. В этой работе для фиксированного значения начальной глубины трещины  $a_0$  и ряда фиксированных значений нагрузки  $P$  на основании (4) строится серия кривых  $\widetilde{\Delta P_N} = \widetilde{\Delta P_N}(\Delta a)$ . Искомая прямая на плоскости  $(\Delta a, \Delta P_N)$  проходит через точку  $(\Delta a_f, \Delta P_N(\Delta a_f))$  и касается кривой  $\widetilde{\Delta P_N} = \widetilde{\Delta P_N}(\Delta a)$ , соответствующей нагрузке  $P = P_{max}$ . Это построение позволяет для каждого значения нагрузки определить соответствующие одно или два значения  $\Delta a$  и построить искомую зависимость  $P = P(\Delta a)$ .

В диссертационной работе гипотеза линейности зависимости  $\Delta P_N = \Delta P_N(\Delta a)$  была экспериментально проверена на всех исследованных материалах и получила полное подтверждение. Зависимость между градиентом нормализованной нагрузки  $\Delta P_N$  и приращением глубины трещины  $\Delta a$  была представлена в виде

$$\Delta P_N(\Delta a) = \Delta P_N(\Delta a_f) + (\Delta P_N)' \Big|_{\substack{P=P_{\max} \\ \Delta a|_{P=P_{\max}}}} (\Delta a - \Delta a_f) = k\Delta a + c, \quad (5)$$

где  $k = (\Delta P_N)' \Big|_{\substack{P=P_{\max} \\ \Delta a|_{P=P_{\max}}}}$  – угол наклона касательной к кривой, соответствующей  $P = P_{\max}$ ;

$\Delta P_N(\Delta a_f)$  определяется по формуле (4) подстановкой  $P = P_f$  и  $\Delta a = \Delta a_f$ .

Соотношения (2) – (5) позволяют получить трансцендентное уравнение для определения приращения глубины трещины при максимальной нагрузке  $\Delta a|_{P=P_{\max}} = \Delta a_{P_{\max}}$ , которое решается численно. Зная значение приращения глубины трещины при максимальной нагрузке  $\Delta a_{P_{\max}}$ , находим угол наклона касательной  $k$ . Для произвольного приращения глубины трещины  $\Delta a \leq \Delta a_f$  определяем  $\Delta P_N(\Delta a)$ , после чего нагрузка  $P$  на экспериментальной диаграмме «Нагрузка  $P$  – перемещение по линии нагружения  $v_{LL}$ » определяется по формуле

$$\frac{P}{BW} = \frac{\Delta P_N(\Delta a)}{1 - \frac{1}{\left(1 - \frac{a_0 + \Delta a}{W}\right)^{\eta_{pl}}} - \frac{1}{\left(1 - \frac{a_0}{W}\right)^{\eta_{pl}}}} \quad (6)$$

В диссертации для оценки статической трещиностойкости используются образцы на трехточечный изгиб SENB. В этом частном случае на основании обобщения экспериментальных данных было принято  $\eta_{pl} = 2$ . При таком значении  $\eta_{pl}$  указанное трансцендентное уравнение сводится к алгебраическому уравнению 3-ей степени относительно величины

$z = 1 / \left(1 - \left(\frac{a_0 + \Delta a_{P_{\max}}}{W}\right)\right)$ . Выражение для приращения глубины трещины при максимальной нагрузке записывается в виде

$$\Delta a_{P_{\max}} = W \left(1 - \frac{a_0}{W} - \left(1 - \frac{a_f}{W}\right) / \left(\frac{1}{2} + \cos \beta\right)\right), \quad (7)$$

где

$$\cos \beta = \cos \left\{ \frac{2\pi}{3} - \frac{1}{3} \arccos \left[ 2 \left(1 - \frac{P_f}{P_{\max}}\right) \left(1 - \left(\frac{1 - \frac{a_f}{W}}{1 - \frac{a_0}{W}}\right)^2\right) - 1 \right] \right\}.$$

$$\text{Далее определяется } (\Delta P_N)' \Big|_{\substack{P=P_{\max} \\ \Delta a|_{P=P_{\max}}} = k = \frac{2P_{\max}}{BW^2 \left( 1 - \left( \frac{a_0 + \Delta a_{P_{\max}}}{W} \right) \right)^3} \text{ и } c = \Delta P_N (\Delta a_f) - k \Delta a_f$$

и строится зависимость  $\Delta P_N(\Delta a)$ . При известной зависимости градиента нормализованной нагрузки от приращения глубины трещины формула (6) дает зависимость нагрузки  $P$  от приращения глубины трещины  $\Delta a$  во всем диапазоне изменения приращения  $[0, a_f - a_0]$ , при чем функция (6) возрастает до  $P = P_{\max}$ , а затем убывает до  $P = P_f$ .

В диссертационной работе предложенный метод использовался для оценки свойств следующих материалов: сталей F690W, X80, сталей А и В с пределом текучести 1000 МПа, экономнолегированной стали и нержавеющей стали. Основные свойства исследованных материалов, габаритные размеры образцов и параметры трещины приведены в таблице 1. Кроме того, приводятся данные для стали НУ-80, взятые из работы Джойса.

Таблица 1 – Основные свойства материалов, габаритные размеры образцов

Материал	Предел текучести $\sigma_{0,2}$ , МПа	Габариты образца, мм		Параметры трещины, мм			Финальная нагрузка $P_f$ , Н	Максимальная нагрузка $P_{\max}$ , Н	$\frac{P_f}{P_{\max}}$
		Высота $W$	Толщина $B$	Начальная глубина $a_0$	Конечная глубина $a_f$	Приращение глубины $\Delta a_f$			
F690W	720	58,20	34,80	29,30	33,50	4,20	122200	141500	0,86
X80	558	50,10	25,55	25,70	30,50	4,80	58600	72600	0,81
сталь А	1000	90,25	63,90	46,10	54,95	8,85	234400	292400	0,80
сталь В	1000	45,30	34,90	23,80	27,50	3,70	89100	107900	0,83
экономно-легированная сталь	940	70,35	34,90	35,60	40,15	4,55	160900	191500	0,84
нержавеющая сталь	750	66,20	33,00	35,45	41,15	5,70	117800	130900	0,90
НУ-80	610	25,38	50,75	25,38				58760	

На рис. 2 приведены зависимости градиента нормализованной нагрузки от приращения глубины трещины  $\Delta P_N = k \Delta a + c$  для рассмотренных материалов. Там же для сопоставления приводятся дискретные значения, полученные другими методами (метод упругой податливости и многообразцовый метод).

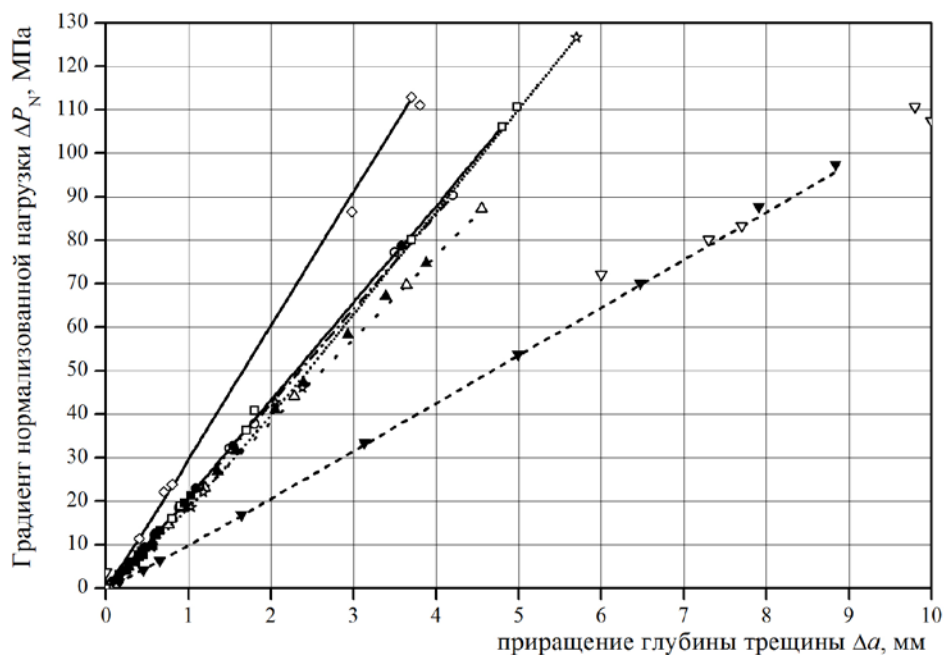


Рис. 2 – Зависимости «Градиент нормализованной нагрузки  $\Delta P_N$  – приращение глубины трещины  $\Delta a$ » для различных марок сталей

Метод линейной нормализации:			Многообразовый метод:			Метод упругой податливости:		
————	— Сталь X-80	□	— Сталь X-80	■	— Сталь X-80			
— — — —	— Сталь В	◇	— Сталь В	▼	— Сталь А			
- - - - -	— Сталь А	▽	— Сталь А	●	— Сталь F690W			
- . . . . -	— Сталь F690W	○	— Сталь F690W	▲	— Эконом. сталь			
. . . . .	— Эконом. сталь	△	— Эконом. сталь					
.....	— Нержавеющая сталь	☆	— Нержавеющая сталь					

Построение зависимости  $\Delta P_N(\Delta a)$  для широкого круга материалов показало, что экспериментальная прямая не проходит через начало координат. Это не позволяет прямо использовать полученные результаты при малых значениях  $\Delta a$ . В диссертационной работе предложено уточненное представление зависимости  $\Delta P_N(\Delta a)$ : нелинейное до достижения максимальной нагрузки  $P_{max}$  и линейное – после ее достижения. Таким образом, интервал изменения приращения трещины разбивается на два участка:  $0 \leq \Delta a \leq \Delta a_{P_{max}}$  и  $\Delta a_{P_{max}} \leq \Delta a \leq \Delta a_f$ . Тогда градиент нормализованной нагрузки можно представить в виде

$$\Delta P_N(\Delta a) = \begin{cases} A_1 \Delta a + A_2 (\Delta a)^n, & \text{при } 0 \leq \Delta a \leq \Delta a_{P_{max}} \\ k \Delta a + c, & \text{при } \Delta a_{P_{max}} \leq \Delta a \leq \Delta a_f \end{cases} \quad (8)$$

Коэффициенты  $A_1$  и  $A_2$  определяются из условия непрерывности на границе участков  $\Delta a = \Delta a_{P_{max}}$  функции  $\Delta P_N(\Delta a)$  и ее производной по  $\Delta a$  и записываются следующим образом

$$A_1 = k + \frac{nc}{(n-1)\Delta a_{P_{max}}}; \quad A_2 = -\frac{c}{(n-1)(\Delta a_{P_{max}})^n} \quad (9)$$

Для нахождения параметра  $n$  проводится аналогичное испытание дополнительного образца, причем величина  $P_{f0}$  должна быть выбрана таким образом, что приращение глубины трещины  $\Delta a_{f0} \ll \Delta a_{P_{max}}$ . В результате испытания должны быть получены значения

нагрузки  $P_{f0}$  и приращения глубины трещины  $\Delta a_{f0}$ . Величина  $n$  определяется численно из уравнения

$$\Delta P_N(\Delta a_{f0}) = k\Delta a_{f0} + \frac{c}{(n-1)} \left[ n \frac{\Delta a_{f0}}{\Delta a_{P_{\max}}} - \left( \frac{\Delta a_{f0}}{\Delta a_{P_{\max}}} \right)^n \right]. \quad (10)$$

Диаграмма « $P - \Delta a$ » строится по формуле

$$P = \begin{cases} \frac{[A_1\Delta a + A_2(\Delta a)^n]BW}{\left[ \frac{1}{1 - \left(\frac{a_0 + \Delta a}{W}\right)^2} - \frac{1}{1 - \left(\frac{a_0}{W}\right)^2} \right]}, & \text{при } 0 \leq \Delta a \leq \Delta a_{P_{\max}} \\ \frac{[k\Delta a + c]BW}{\left[ \frac{1}{1 - \left(\frac{a_0 + \Delta a}{W}\right)^2} - \frac{1}{1 - \left(\frac{a_0}{W}\right)^2} \right]}, & \text{при } \Delta a_{P_{\max}} \leq \Delta a \leq \Delta a_f \end{cases}. \quad (11)$$

В таблице 2 приведены значение приращения трещины, соответствующего максимальной нагрузке, значения параметров  $k$  и  $c$  линейного участка и параметров  $A_1$ ,  $A_2$  и  $n$  нелинейного участка зависимости « $\Delta P_N - \Delta a$ ».

Таблица 2 – Коэффициенты линейного и нелинейного участка зависимости «Градиент нормализованной нагрузки  $\Delta P_N$  – приращение глубины трещины  $\Delta a$ »

Материал	Максимальная нагрузка $P_{\max}$ , Н	Приращение трещины, соответствующее максимальной нагрузке, $\Delta a_{P_{\max}}$ , мм	Коэффициенты линейного участка « $\Delta P_N - \Delta a$ »		Коэффициенты нелинейного участка « $\Delta P_N - \Delta a$ »		
			$k$ , Н/мм <sup>3</sup>	$c$ , Н/мм <sup>2</sup>	$A_1$ , Н/мм <sup>3</sup>	$A_2$ , Н/мм <sup>(2+n)</sup>	$n$
F690W	141500	0,98	21,8	-1,08	18,5	2,21	1,49
X80	72570	1,08	22,4	-1,58	18,0	2,82	1,50
сталь А	292400	1,94	11,0	-1,38	8,8	1,02	1,51
сталь В	107900	0,75	30,8	-1,17	26,1	3,65	1,50
экономнолегированная сталь	191500	0,47	19,2	-0,18	10,1	8,92	1,05
нержавеющая сталь	130930	2,60	23,5	-7,55	16,1	2,49	1,64

На рис. 3 и 4 для стали F690W представлены зависимости градиента нормализованной нагрузки и приведенной нагрузки  $\bar{P} = P / \left( BW \left( 1 - \left( a_0 / W \right) \right)^2 \right)$  от приращения глубины трещины, соответственно. Зависимости представлены в двух вариантах: с использованием нелинейной (сплошная линия), предложенной автором, и линейной зависимости (пунктирная линия)  $\Delta P_N$  от приращения глубины трещины  $\Delta a$ . На рисунках приведены дискретные значения, полученные традиционными методами.

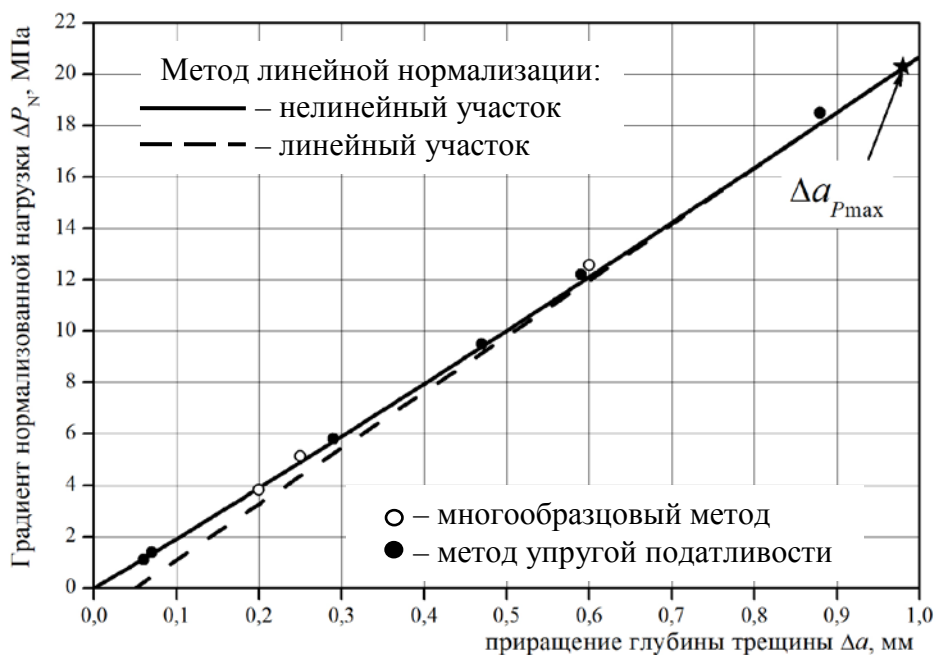


Рис. 3. Зависимость «Градиент нормализованной нагрузки  $\Delta P_N$  – приращение глубины трещины  $\Delta a$ » для стали F690W

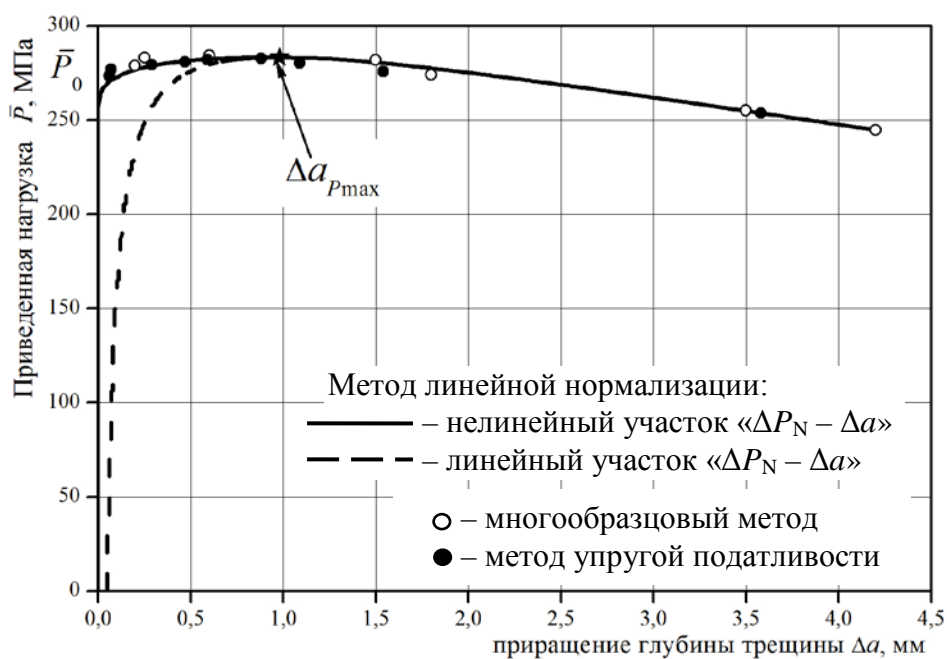


Рис. 4. Зависимость «Приведенная нагрузка  $\bar{P}$  – приращение глубины трещины  $\Delta a$ » для стали F690W

Как следует из рис. 4, использование линейной зависимости « $\Delta P_N - \Delta a$ » на начальной стадии распространения трещины приводит к некорректным результатам, т.к. при отсутствии нагрузки уже имеет место приращение трещины, что противоречит физическому смыслу.

На рис. 5 представлены зависимости «Нормализованная нагрузка  $P_N$  – приращение глубины трещины  $\Delta a$ » для всех исследованных марок сталей. В тех случаях, когда наряду

с методом линейной нормализации были использованы другие методы измерения глубины трещины, они также приведены на рис. 5.

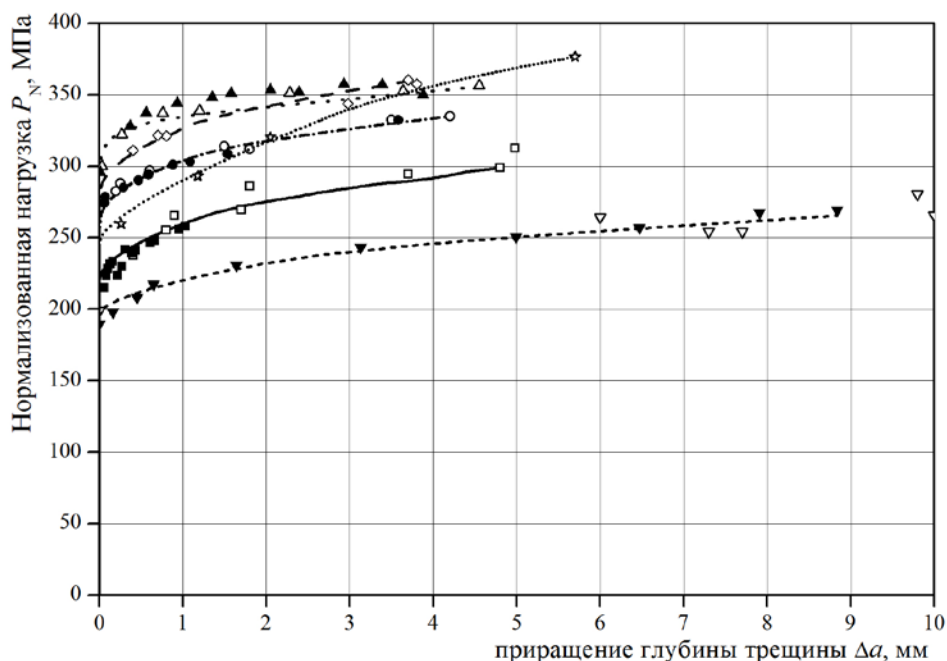


Рис. 5 – Зависимости «Нормализованная нагрузка  $P_N$  – приращение глубины трещины  $\Delta a$ » для различных марок стали

Метод линейной нормализации:	Многообразцовый метод:	Метод упругой податливости:
————— Сталь X-80	□ – Сталь X-80	■ – Сталь X-80
— — — — — Сталь В	◇ – Сталь В	▼ – Сталь А
- - - - - Сталь А	▽ – Сталь А	● – Сталь F690W
- . . . . - Сталь F690W	○ – Сталь F690W	▲ – Эконом. сталь
. . . . . Эконом. сталь	△ – Эконом. сталь	
..... Нержавеющая сталь	☆ – Нержавеющая сталь	

Полученные зависимости « $P_N - \Delta a$ » в сочетании с экспериментальными кривыми « $P_N - v_{pl}/W$ », полностью решают вопрос о построении  $J_R$ -кривых: каждому значению нагрузки соответствует значение приращения глубины трещины  $\Delta a$  и значение  $J$ -интеграла.

В 2.6 представлены  $J_R$ -кривые, полученные разработанным в диссертации экспериментально-аналитическим методом, для всех рассмотренных марок сталей. Эти результаты приведены на рисунке 6. Для сравнения представлены также результаты, полученные другими методами. Как следует из рисунка 6,  $J_R$ -кривые позволяют дать объективную оценку статической трещиностойкости материала. На исследованных материалах трещиностойкость изменяется в широком диапазоне: на материалах F690W, X80 и нержавеющей стали имеют место высокие значения  $J$ -интеграла; на материалах с пределом текучести 1000 МПа (стали А и В) трещиностойкость существенно ниже.



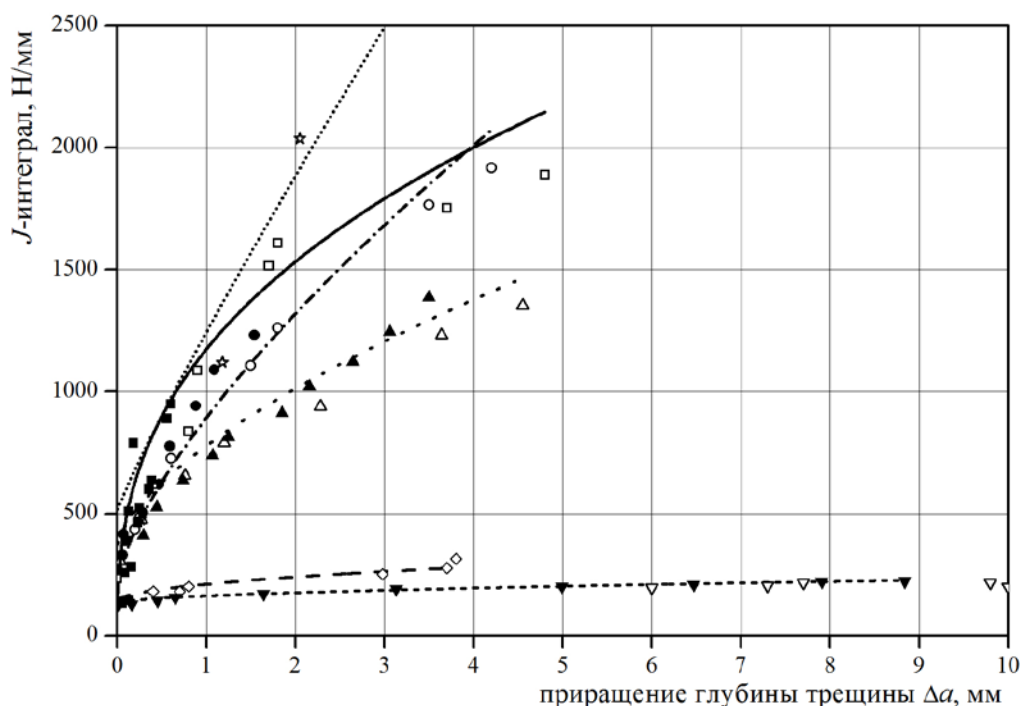


Рис. 6 –  $J_R$ -кривые для различных марок сталей

Метод линейной нормализации: Многообразный метод: Метод упругой податливости:		
—————	□ – Сталь X-80	■ – Сталь X-80
- - - - -	◇ – Сталь В	▼ – Сталь А
- - - - -	▽ – Сталь А	● – Сталь F690W
- . - . - .	○ – Сталь F690W	▲ – Эконом. сталь
. . . . .	△ – Эконом. сталь	
.....	☆ – Нержавеющая сталь	

В *третьей главе* рассмотрено использование  $J_R$ -кривых для расчета распространения трещины в элементах конструкций.

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, т.е. с  $J_R$ -кривой, определяемой экспериментально. 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  $p$ . Задача решается в рамках нелинейной механики разрушения.

В качестве характеристики деформированного материала используется соотношение Ремберга-Осгуда:

$$\varepsilon/\varepsilon_0 = \sigma/\sigma_0 + \alpha (\sigma/\sigma_0)^n, \quad (12)$$

где  $\alpha$ ,  $\sigma_0$ ,  $\varepsilon_0$  и  $n$  – постоянные. Напряжение  $\sigma_0$  (предел текучести с допуском 0,2 %) связано с  $\varepsilon_0$  соотношением  $\sigma_0/\varepsilon_0 = E$ , где  $E$  – модуль нормальной упругости.

Выражение для  $J$ -интеграла для цилиндрической оболочки, находящейся под внутренним давлением  $p$  и имеющей на внутренней поверхности протяженную осевую трещину, записывается в виде

$$J = \frac{\pi t \sigma_h^2}{E'} f\left(\frac{R}{t}, \frac{a}{t}, n\right) + \alpha \sigma_0 \varepsilon_0 t \left(\frac{\sigma_h}{\sigma_0}\right)^{n+1} H_1\left(\frac{R}{t}, \frac{a}{t}, n\right), \quad (13)$$

где  $\sigma_h = \frac{2pR_o^2}{R_o^2 - R^2}$ ;  $R$  – внутренний радиус цилиндра;  $R_o$  – наружный радиус цилиндра;  $t$  –

толщина стенки цилиндрической оболочки. Таблицы для функции  $H_1$  приведены в работе Захура. В диссертации выполнена аппроксимация и интерполяция табличных данных для функции  $H_1$ , необходимых для проведения расчетов.

В качестве материалов, из которых выполнена цилиндрическая оболочка, рассмотрены сталь X80 и сталь А с пределом текучести 1000 МПа.

В таблице 3 приведены значения постоянных  $\alpha$ ,  $\sigma_0$ ,  $\varepsilon_0$  и  $n$  для данных сталей.

Таблица 3 – Значения постоянных  $\alpha$ ,  $\sigma_0$ ,  $\varepsilon_0$  и  $n$

Материал	Модуль упругости $E$ , МПа	Предел текучести $\sigma_0$ , МПа	Деформация $\varepsilon_0$	$\alpha$	$n$
Сталь X80	209000	558	0,0027	4,21	9,3
Сталь А	196140	1000	0,005	1,14	19,2

Цилиндрическая оболочка имеет следующие параметры: внутренний радиус  $R = 554$  мм, толщина стенки  $t = 27,7$  мм; начальная глубина трещины  $a_0 = 11,08$  мм.

Рассмотрены два подхода оценки работоспособности конструкции с дефектом: с использованием аппарата линейной механики разрушения (глава 1) и с использованием аппарата нелинейной механики разрушения (глава 2).

1. Линейная механика разрушения. В главе 1 оценка работоспособности конструкции проводится с использованием аппарата линейной механики, и наличие пластической области в окрестности вершины трещины не учитывается. Общий подход к нормированию максимального опасного размера трещины при статическом нагружении состоит в сопоставлении коэффициента интенсивности напряжений  $K_I$  в вершине трещины с критическим значением коэффициента интенсивности напряжений  $K_{Ic}$ , определяемым экспериментально.

По экспериментальной диаграмме «Нагрузка  $P$  – раскрытие трещины  $v_z$ », полученной при испытании на трехточечный изгиб образца, выполненного из стали X80, определено расчетное значение нагрузки  $P_Q = 91,8$  кН (методом 5%-ной секущей) и значение максимальной нагрузки  $P_{\max} = 212,5$  кН. По излому образца после окончания испытания измерена начальная глубина трещины  $a_0^{\text{обп}} = 77,20$  мм. Критерий  $P_{\max}/P_Q \leq 1,1$  не выполнен, величина  $K_Q = 3070$  Н/мм<sup>3/2</sup> не может быть принята за величину критического значения коэффициента интенсивности напряжений  $K_{Ic}$ .

По экспериментальной диаграмме «Нагрузка  $P$  – раскрытие трещины  $v_z$ », полученной при испытании на трехточечный изгиб образца, выполненного из стали А, определено расчетное значение нагрузки  $P_Q = 236$  кН (методом 5%-ной секущей) и значение максимальной нагрузки  $P_{\max} = 273$  кН. По излому образца после окончания испытания измерена начальная глубина трещины  $a_0^{\text{обп}} = 47,40$  мм. Критерий  $P_{\max}/P_Q \leq 1,1$  выполнен, величина  $K_Q = 4590$  Н/мм<sup>3/2</sup> может быть принята за величину критического значения коэффициента интенсивности напряжений  $K_{Ic}$ .

Воспользовавшись таблицей А.2 Приложения А (при  $R/t = 20$ ;  $b/t = a_0/t = 0,4$ ; трещина протяженная), получим параметр  $A = \frac{K_I}{\sigma \sqrt{\pi b}} = 2,24$ , где  $\sigma = \frac{P_{\text{кр1}} R}{t}$ . В случае стали X80  $K_I = K_Q = 3070$  Н/мм<sup>3/2</sup>, получаем  $p_{\text{кр1}} = 11,6$  МПа. В случае стали А  $K_I = K_{Ic} = 4590$  Н/мм<sup>3/2</sup>, получаем  $p_{\text{кр2}} = 17,4$  МПа.

2. Нелинейная механика разрушения. Расчет проведен с использованием нелинейной механики разрушения, т.е. возможно устойчивое приращение размера исходного дефекта, прежде чем он перейдет в стадию неустойчивого распространения.

На рис. 7 представлена  $J_R$ -кривая для стали X80. Начало  $J_R$ -кривой помещено в точку, соответствующую начальной глубине трещины  $a_0 = 11,08$  мм. На этом же рисунке для цилиндрической оболочки приведены зависимости  $J(a)$ . Данные зависимости построены для четырех значений внутреннего давления  $p$ , действующего на цилиндрическую оболочку:  $p_1 = 18,6$  МПа,  $p_2 = 19,35$  МПа,  $p_3 = 19,95$  МПа,  $p_4 = 20,3$  МПа.

Кривая нагружения  $p_1$  пересекает  $J_R$ -кривую в точке  $J = J_1$ , что означает, что при этом давлении имеет место распространение трещины и трещина достигает значения  $a = a_1$ . После этого зависимость  $J(a)$  попадает в область ниже  $J_R$ -кривой и дальнейшего распространения не происходит. Кривая нагружения  $p = p_3$  касается  $J_R$ -кривой в точке  $a_3 = a_{\text{неуст}} = 11,82$  мм, что соответствует переходу к неустойчивому состоянию. Это означает, что при данной нагрузке, начиная со значения  $\Delta a = a_3 - a_0 \approx 0,74$  мм, происходит неконтролируемое распространение трещины. Критическое значение давления, при котором трещина переходит к неустойчивому состоянию,  $p_{\text{кр2}} = 19,95$  МПа, а  $J = 1047$  Н/мм.

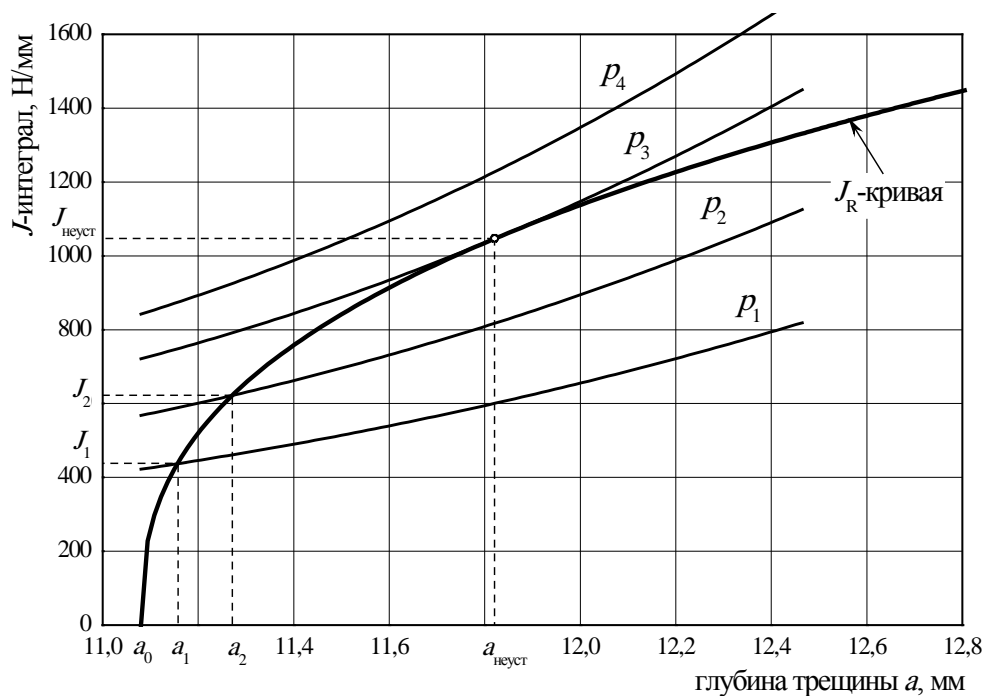


Рис. 7. – Оценка работоспособности цилиндрической оболочки, выполненной из стали X80, с протяженной осевой трещиной на внутренней поверхности

$J_R$ -кривая – экспериментальная характеристика материала;

$p_1 < p_2 < p_3 < p_4$  – расчетные зависимости  $J(a)$  для элемента конструкции

Для случая цилиндрической оболочки, выполненной из стали А, результат представлен на рис. 8.

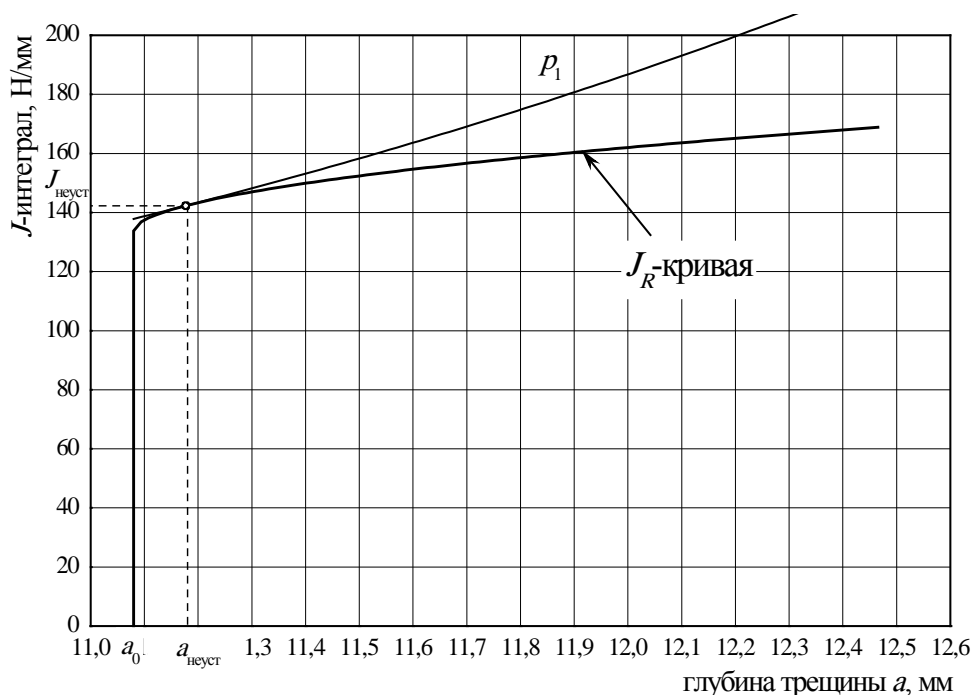


Рис. 8. – Оценка работоспособности цилиндрической оболочки, выполненной из стали А, с протяженной осевой трещиной на внутренней поверхности

$J_R$ -кривая – экспериментальная характеристика материала;

$p_1$  – расчетная зависимость  $J(a)$  для элемента конструкции

Кривая нагружения  $p = p_1$  касается  $J_R$ -кривой в точке  $a_1 = a_{неуст} = 11,18$  мм, что соответствует переходу к неустойчивому состоянию. Получаем, что критическое значение

давления  $p_{кр2}$ , при котором трещина переходит к неустойчивому состоянию, равно 17,45 МПа, а значение  $J$ -интеграла равно 142 Н/мм.

В таблице 4 приведены результаты расчета работоспособности цилиндрической оболочки с протяженной осевой трещиной на внутренней поверхности, выполненной из стали Х80 и стали А. Расчет работоспособности конструкции с дефектом выполнен в рамках линейной и нелинейной механики разрушения. Кроме того, в таблице приведено значение давления  $p_{кр}$  в оболочке без дефекта, при котором окружное напряжение в оболочке имеет значение, равное пределу текучести материала.

Таблица 4 – Результаты расчета работоспособности конструкции с дефектом

Материал	Предел текучести $\sigma_{0,2}$ , МПа	Давление $p_{кр}$ , МПа	Критические значения					$\frac{p_{кр2}}{p_{кр}}$
			Линейная механика разрушения		Нелинейная механика разрушения			
			Коэффициент интенсивности напряжений $K_I$ , Н/мм <sup>3/2</sup>	Давление $p_{кр1}$ , МПа	$J$ -интеграл, Н/мм	Давление $p_{кр2}$ , МПа	Приращение глубины трещины $\Delta a_{неуст}$ , мм	
Сталь Х80	558	27,9	3070 <sup>*)</sup>	11,6	1047	19,95	0,74	0,72
Сталь А	1000	50,0	4590 <sup>**)</sup>	17,4	142	17,45	0,10	0,35

<sup>\*)</sup>  $K_I = K_Q$ ;

<sup>\*\*)</sup>  $K_I = K_{Ic}$

Проведенный расчет показал:

- учет наличия дефекта в цилиндрической оболочке существенно снижает критическое давление, однако это снижение зависит от пластических свойств материала; при наличии дефекта величины критического давления для оболочек, изготовленных из стали Х80 и сталь А, незначительно различаются, несмотря на значительное различие их пределов текучести; высокие пластические свойства стали Х80 тормозят развитие дефекта;

- использование при 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;

- для высокопрочных материалов с низкой вязкостью использование линейной механики разрушения дает корректные результаты.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты работы заключаются в следующем:

1. Разработана расчетная модель и метод оценки работоспособности конструкций, выполненных из высокопластичных материалов, с размерениями, характерными для объектов морской техники, при наличии трещиноподобных дефектов. Показано, что для материала с высокой вязкостью наличие пластических деформаций существенно повышает его способность сопротивляться распространению дефекта и увеличивает значение разрушающих давлений. 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.

2. 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. Гипотеза положена в основу нового экспериментально-аналитического метода построения  $J_R$ -кривой.

3. 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 на всем пути распространения трещины (нелинейная зависимость до достижения нагрузкой максимального значения и линейная зависимость – после достижения максимальной нагрузки при испытании образцов), позволяющий получить корректные значения глубины трещины в процессе всего ее распространения.

Разработанный метод позволяет определить нагрузку и значение  $J$ -интеграла, соответствующие моменту страгивания трещины.

4. 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. Метод позволяет аналитически (без трудоемкого прямого измерения) определить приращение глубины трещины при максимальной нагрузке, используя понятия нормализованной нагрузки и ее градиента.

Разработанный метод существенно повышает информативность полученных экспериментальных данных.

5. Разработан пакет программ компьютерной обработки данных испытаний на вязкость разрушения, позволяющий реализовать как предложенный в диссертации новый

экспериментально-аналитический метод построения  $J_R$ -кривых, так и традиционные методы.

6. На основании интерполяции и экстраполяции известных литературных сведений и собственных дополнительных исследований обобщены данные по расчетам конструкций с трещиноподобными дефектами, выполненным в рамках линейной механики разрушения, и разработана расчетная процедура оценки допустимости трещиноподобного дефекта в цилиндрических оболочках, изготовленных из малопластичных материалов.

Уточнены критерии областей использования решений линейной и нелинейной механики разрушения.

Разработанная процедура позволяет значительно сократить ограничения и расширить диапазон параметров дефектов при использовании таких методов оценки работоспособности цилиндрической оболочки с дефектом, выполненных в рамках линейной механики разрушения.

Результаты исследований реализованы в «Руководстве по техническому наблюдению за постройкой и эксплуатацией морских подводных трубопроводов» Российского Морского Регистра судоходства.

7. Экспериментально получены основные характеристики вязкости разрушения, включая определение  $K_I$ ,  $J$  и построение  $J_R$ -кривых, для основных классов судостроительных материалов, и представлено сопоставление полученных характеристик с известными ранее результатами.

8. Разработан пакет программ, который позволяет реализовать методы оценки работоспособности конструкций с трещиноподобными дефектами, выполненными из материалов различных категорий прочности.

Разработанные методы расчета работоспособности элементов конструкции, содержащих дефекты, позволяют дифференцированно подходить к оценке работоспособности материала в зависимости от его категории прочности, используя линейную механику разрушения для высокопрочных материалов с низкой пластичностью и упруго-пластическую механику для материалов с высокой вязкостью разрушения. Методы также позволяют оптимизировать процедуры проведения неразрушающего контроля конструкций, устанавливая параметры материала, размеры и положение дефектов, которые должны быть признаны опасными.

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### В журналах, рекомендованных перечнем ВАК РФ:

1. Строгонова О.А., Рыбакина О.Г. Построение  $J_R$ -кривой с использованием аналитического метода линейной нормализации// ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова, СПб, вып. 56 (340), 2010, с. 87-97 (автор – 50 %).
2. Строгонова О.А. Экспериментальное исследование трещиностойкости металлических материалов// ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова, СПб, вып. 60 (344), 2011, с. 105-118 (автор – 100 %).
3. Строгонова О.А., Рыбакина О.Г. Использование  $J$ -интеграла и модуля разрушения для оценки устойчивости распространения трещины// Крыловский государственный научный центр, СПб, вып. 75 (359), 2013, с. 89-96 (автор – 50 %).

### В других изданиях:

4. Строгонова О.А., Тимофеев О.Я., Рыбакина О.Г. Нормирование допустимости эксплуатационных дефектов морских подводных трубопроводов// Тезисы докладов конференции по строительной механике корабля памяти П.Ф. Папковича, ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова, СПб, 2007, с. 128-129 (автор – 50 %).
5. Strogonova O.A., Rybakina O.G. Evaluation of pipeline crack resistance// Proceedings of the international conference «Assessment of Reliability of Materials and Structures: Problems and Solutions», Polytechnic University Publishing, SPb, 2008, p. 303-308 (автор – 50 %).
6. Строгонова О.А. Построение  $J_R$ -кривой с использованием метода линейной нормализации// Сборник научных трудов I Всероссийского конкурса молодых ученых, Механика и процессы управления, Екатеринбург, 2009, с. 85-95 (автор – 100 %).
7. Строгонова О.А., Рыбакина О.Г. Построение  $J_R$ -кривой с использованием метода линейной нормализации// Тезисы докладов конференции по строительной механике корабля памяти П.Ф. Папковича, ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова, СПб, 2009, с. 110-112 (автор – 50 %).
8. Строгонова О.А., Тимофеев О.Я., Ярцев Б.А., Балагура С.В., Авдонкин А.С., Рыбакина О.Г., Чернов В.Г., Инженерные основы норм Российского морского регистра по проектированию, строительству и эксплуатации морских подводных трубопроводов// Трубопроводный транспорт. Теория и практика, № 4 (20), 2010, с. 4-10 (автор 25 %).
9. Строгонова О.А. Расчет начальных приращений глубины трещины при использовании метода линейной нормализации// Сборник материалов XXXV Всероссийской конференции, посвященной 70-летию Победы, Наука и технологии, том 3, Москва, 2015, с. 69-78 (автор – 100 %).
10. Строгонова О.А., Михайлов Э.Ю., Нигматуллин В.И., Рыбакина О.Г. Влияние фактора времени на трещиностойкость конструкционных материалов в условиях воздействия коррозионной среды// Сборник материалов XXXV Всероссийской конференции, посвященной 70-летию Победы, Наука и технологии, том 3, Москва, 2015, с. 69-78 (автор – 25 %).