



ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЙ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ
СТАНДАРТ
РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ

ПНСТ
743—
2025

Нефтяная и газовая промышленность
СИСТЕМЫ ПОДВОДНОЙ ДОБЫЧИ
Предотвращение трещинообразования
при сооружении трубопроводов.
Общие положения

Издание официальное

Москва
Российский институт стандартизации
2025

Предисловие

- 1 РАЗРАБОТАН Обществом с ограниченной ответственностью «Газпром 335» (ООО «Газпром 335»)
- 2 ВНЕСЕН Техническим комитетом по стандартизации ТК 023 «Нефтяная и газовая промышленность»
- 3 УТВЕРЖДЕН И ВВЕДЕН В ДЕЙСТВИЕ Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 1 апреля 2025 г. № 5-пнст

Правила применения настоящего стандарта и проведения его мониторинга установлены в ГОСТ Р 1.16—2011 (разделы 5 и 6).

Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии собирает сведения о практическом применении настоящего стандарта. Данные сведения, а также замечания и предложения по содержанию стандарта можно направить не позднее чем за 4 мес до истечения срока его действия разработчику настоящего стандарта по адресу: inf@gazprom335.ru и/или в Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии по адресу: 123112 Москва, Пресненская набережная, д. 10, стр. 2.

В случае отмены настоящего стандарта соответствующая информация будет опубликована в ежемесячном информационном указателе «Национальные стандарты» и также будет размещена на официальном сайте Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии в сети Интернет (www.rst.gov.ru)

© Оформление. ФГБУ «Институт стандартизации», 2025

Настоящий стандарт не может быть полностью или частично воспроизведен, тиражирован и распространен в качестве официального издания без разрешения Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии

II

Содержание

1 Область применения	1
2 Нормативные ссылки	1
3 Термины и определения	2
4 Сокращения и обозначения	3
5 Предельное состояние усталости и разрушения	5
5.1 Общие положения	5
5.2 Категории оценки	7
5.3 Классификация сварных швов по чувствительности к усталости	9
5.4 Качество сварки для категорий оценки	9
6 Метод механики разрушения	10
6.1 Общие положения	10
6.2 Исходные данные для оценки механики разрушения	11
6.3 Несоответствия прочности сварного шва и исходного материала труб	13
7 Подходы механики разрушения	14
7.1 Общие положения	14
7.2 Категория III, общая инженерная оценка критичности дефекта	14
7.3 Категория III, специальная техническая критическая оценка ЕСА без внутреннего избыточного давления	17
7.4 Категория III, внутреннее избыточное давление	22
7.5 Категория IV, сочетающая рост усталостной трещины и разрывов	22
8 Метод конечных элементов	27
8.1 Общие положения	27
8.2 Металл сварного шва с прочностью ниже, чем у исходного металла трубы	27
8.3 Конечно-элементный метод	29
9 Испытания	30
9.1 Общие положения	30
9.2 Испытание на вязкость разрушения	31
9.3 Определение кривых сопротивления разрыву	33
9.4 Определение вязкости разрушения с одним значением	35
9.5 Испытания на растяжение	35
9.6 Определение кривых напряжения-деформации для оценок на основе деформации	37
9.7 Определение кривых напряжения-деформации для нагрузки на основе напряжений	38
9.8 Напряжение и старение	39
10 Квалификационные испытания	40
10.1 Общие положения	40
10.2 Квалификационные испытания с использованием образцов сегментов	41
Приложение А (справочное) Диаграмма оценки отказов	42
Приложение Б (справочное) Метод конечных элементов при анализе механики разрушения	43
Библиография	45

Введение

Создание и развитие отечественных технологий и техники для освоения морских нефтегазовых месторождений должно быть обеспечено современными стандартами, устанавливающими положения для проектирования, строительства и эксплуатации систем подводной добычи. Для решения данной задачи Министерством промышленности и торговли Российской Федерации и Федеральным агентством по техническому регулированию и метрологии реализуется «Программа по обеспечению нормативной документацией создания отечественной системы подводной добычи для освоения морских нефтегазовых месторождений». В объеме работ программы предусмотрена разработка национальных стандартов и предварительных национальных стандартов, областью применения которых являются системы подводной добычи углеводородов.

Целью разработки настоящего стандарта является установление методологии оценки и предотвращения трещинообразования при сооружении морских трубопроводов систем подводной добычи углеводородов.

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Нефтяная и газовая промышленность

СИСТЕМЫ ПОДВОДНОЙ ДОБЫЧИ

Предотвращение трещинообразования при сооружении трубопроводов.

Общие положения

Petroleum and natural gas industry. Subsea production systems. Prevention of cracking in pipeline construction.
General principles

Срок действия — с 2025—05—01
до 2028—05—01

1 Область применения

1.1 Настоящий стандарт устанавливает методологию анализа появления и развития усталостных трещин в морских стальных трубопроводах систем подводной добычи углеводородов в целях предотвращения трещинообразования при их сооружении.

1.2 Настоящий стандарт применяется для оценки предельного состояния усталости и разрушения основного металла труб и сварных швов морских трубопроводов.

1.3 Действие настоящего стандарта также распространяется на морские стальные райзеры систем подводной добычи углеводородов.

1.4 Положения стандарта применимы для анализа влияния трещинообразования на стадии эксплуатации морских трубопроводов систем подводной добычи углеводородов.

2 Нормативные ссылки

В настоящем стандарте использованы нормативные ссылки на следующие стандарты:

ГОСТ 16504 Система государственных испытаний продукции. Испытания и контроль качества продукции. Основные термины и определения

ГОСТ Р 54382 Нефтяная и газовая промышленность. Подводные трубопроводные системы. Общие технические требования

ГОСТ Р 55311 Нефтяная и газовая промышленность. Сооружения нефтегазопромысловые морские. Термины и определения

ГОСТ Р 58904/ISO/TR 25901-1:2016 Сварка и родственные процессы. Словарь. Часть 1. Общие термины

ГОСТ Р 59304 Нефтяная и газовая промышленность. Системы подводной добычи. Термины и определения

ГОСТ Р ИСО 17642-2 Испытания разрушающие сварных швов металлических материалов. Испытания на сопротивляемость образованию холодных трещин в сварных соединениях. Процессы дуговой сварки. Часть 2. Испытания с естественной жесткостью

Примечание — При пользовании настоящим стандартом целесообразно проверить действие ссылочных стандартов в информационной системе общего пользования — на официальном сайте Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии в сети Интернет или по ежегодному информационному указателю «Национальные стандарты», который опубликован по состоянию на 1 января текущего года, и по выпускам ежемесячного информационного указателя «Национальные стандарты» за текущий год. Если заменен ссылочный стандарт, на который дана недатированная ссылка, то рекомендуется использовать действующую версию этого

Издание официальное

1

стандарта с учетом всех внесенных в данную версию изменений. Если заменен ссылочный стандарт, на который дана датированная ссылка, то рекомендуется использовать версию этого стандарта с указанным выше годом утверждения (принятия). Если после утверждения настоящего стандарта в ссылочный стандарт, на который дана датированная ссылка, внесено изменение, затрагивающее положение, на которое дана ссылка, то это положение рекомендуется применять без учета данного изменения. Если ссылочный стандарт отменен без замены, то положение, в котором дана ссылка на него, рекомендуется применять в части, не затрагивающей эту ссылку.

3 Термины и определения

В настоящем стандарте применены термины по ГОСТ 16504, ГОСТ Р 55311, ГОСТ Р 58904, ГОСТ Р 59304, а также следующие термины с соответствующими определениями:

3.1 действительная деформация (true strain): Скорость мгновенного увеличения мгновенной измеренной длины.

3.2 дефект (defect): Каждое отдельное несоответствие объекта или его элемента.

Примечания

1 Может быть обнаружен при неразрушающем контроле.

2 Размеры дефектов учитываются при инженерной оценке критичности дефекта (ECA) для определения их приемлемости.

3.3 деформационное упрочнение (strain hardening): Увеличение напряжения, необходимого для дальнейшего увеличения деформации.

3.4 истинное напряжение (true stress): Напряжение, определяемое мгновенной силой, действующей на мгновенную площадь поперечного сечения.

3.5 критический дефект (critical defect): Дефект, при котором функционирование объекта или его элемента по назначению невозможно или недопустимо.

3.6 линия сплавления (fusion line, FL): Граница металла сварного шва и основного металла трубы.

3.7

малоцикловая усталость (low-cycle fatigue): Усталость материала, при которой усталостное повреждение или разрушение происходит в основном при упруго-пластическом деформировании.

[Адаптировано из ГОСТ 23207—78, статья 9]

3.8

многоцикловая усталость (high-cycle fatigue): Усталость материала, при которой усталостное повреждение или разрушение происходит в основном при упругом деформировании.

[ГОСТ 23207—78, статья 10]

3.9 пластическая деформация (plastic strain): Деформация, при которой деформированное тело не возвращается к своему первоначальному размеру и форме после снятия вызвавшей ее нагрузки.

3.10 правило Нейбера (the Neuber rule): Правило оценки локальных полей напряжений и деформаций, обусловленных концентрацией напряжений.

Примечание — Правило Нейбера заключается в предположении, что при превышении предела текучести в малой зоне концентрации напряжений нагрузка перераспределяется на окружающие участки, работающие в пределах упругости, то есть разрушения конструкции не происходит, а деформации в месте превышения предела текучести продолжают изменяться пропорционально нагрузке.

3.11 предел прочности на растяжение (ultimate tensile strength, UTS): Максимальное растягивающее напряжение, которое способен выдержать материал при растяжении.

3.12 разрыв (tearing): Расширение трещины, оцененное с учетом условий нагружения и кривой сопротивления разрыву материалов или стабильного удлинения трещины, измеренного при испытаниях на разрушение.

3.13 старение (aging): Процесс накопления необратимых изменений свойств материалов в результате воздействия одного или совокупности эксплуатационных факторов, приводящих к растяжениям материалов с течением времени (деформация).

3.14 эффект Баушингера (Bauschinger effect): Явление, при котором пределы пропорциональности, упругости и текучести материалов снижаются в результате изменения знака нагружения, если первоначальная нагрузка вызвала пластические деформации.

4 Сокращения и обозначения

4.1 В настоящем стандарте применены следующие сокращения:

АУЗК	— автоматизированный ультразвуковой контроль (automated ultrasonic testing);
НК	— неразрушающий контроль (non-destructive testing);
УЗК	— ультразвуковой контроль (ultrasonic testing);
CDF	— движущая сила трещины (crack driving force);
CRA	— коррозионно-стойкий сплав (corrosion resistant alloy);
CTOD	— раскрытие в вершине трещины (crack tip opening displacement);
DFF	— расчетный коэффициент усталости (design fatigue factor);
EDM	— электроэрозионная обработка (electric discharge machining);
ECA	— инженерная оценка критичности дефекта (engineering critical assessment);
FAD	— диаграмма оценки отказов (failure assessment diagram);
FCG	— рост усталостной трещины (fatigue crack growth);
FEM	— метод конечных элементов (finite element method);
FL	— линия сплавления (fusion line);
HAZ	— зона термического влияния (heat affected zone);
SCF	— коэффициент концентрации напряжений (stress concentration factor);
SENB	— образец для испытаний на трещиностойкость при изгибе (single-edge notched bending (test));
SENT	— образец для испытаний на трещиностойкость при растяжении (single edge notched tension specimen);
SMYS	— нормативный предел текучести основного металла (specified minimum yield stress);
SMTS	— нормативный предел прочности основного металла (specified minimum tensile strength);
UTS	— предел прочности на растяжение (ultimate tensile strength);
YS	— предел текучести при растяжении (yield stress).

4.2 В настоящем стандарте применены следующие обозначения.

4.2.1 Латинские обозначения:

A_{gt}	— равномерное удлинение, мм;
a	— прогнозируемая высота дефекта, поверхностный дефект, мм;
a_0	— средняя исходная высота трещины, мм;
A_0	— исходная площадь поперечного сечения, мм ² ;
A_t	— относительное удлинение при разрыве, мм;
A_e	— длина площадки текучести, мм;
B	— толщина образца по механике разрушения или толщина модели компонента конструкции/механики разрушения, мм;
D	— наружный диаметр трубы, мм;
d	— внутренний диаметр трубы, мм;
D_{fat}	— усталостное повреждение $S-N$;
$D_{fat, TOT}$	— общее усталостное повреждение $S-N$, где все отдельные случаи нагрузки, способствующие усталости, суммируются;
E	— модуль упругости (модуль Юнга), МПа;
e	— действительная деформация (или логарифмическая деформация);
f_y	— характеристический предел текучести;

h	— высота надреза (тип дефекта сварного шва), мм;
J -интеграл	— параметр механики разрушения, контролирующий напряженно-деформированное состояние вблизи вершины трещины при упругопластическом деформировании материала;
J_{app} , $CTOD_{app}$	— значение J -интеграла или $CTOD$ при примененной нагрузке (мера для CDF);
J_{mat} , $CTOD_{mat}$	— параметр вязкости разрушения материала (значение $J/CTOD$ из-за сопротивления материала) либо J_c , J_u или J_m или $CTOD_c$, $CTOD_u$ или $CTOD_m$;
J_c , $CTOD_c$	— определенное значение J_{mat} , $CTOD_{mat}$, критические $J/CTOD$. Начало распространения хрупких трещин, когда Δa менее 0,2 мм;
J_m , $CTOD_m$	— определенное значение J_{mat} , $CTOD_{mat}$. Значение $J/CTOD$ при первом достижении максимума площадки напряжений при пластической деформации;
J_u , $CTOD_u$	— определенное значение J_{mat} , $CTOD_{mat}$. Значение $J/CTOD$ в начале расширения или появления хрупкой трещины, когда событию предшествует Δa , равный или превышающий 0,2 мм;
K , ΔK	— коэффициент интенсивности напряжений (SIF), диапазон коэффициентов интенсивности напряжений;
K_{mat}	— отношение разрушения прикладываемого упругого значения K к K_{mat} ;
K_r	— диаметр отверстия муфты/втулки, мм;
L_r	— отношение приложенной нагрузки к нагрузке текущего момента;
$L_{r,max}$, $L_{r, cut-off}$	— предел (отсечка) L_r , определенный в FAD. Значение, которое должно предотвратить пластическое разрушение оставшейся связки;
M_k	— геометрическая функция, обусловленная корнем сварного шва, коэффициентом увеличения интенсивности напряжений;
N	— количество циклов до отказа, шт.;
ρ	— высота связи, расстояние от врезанной вершины дефекта до ближайшей поверхности (внутренней или внешней поверхности), мм;
R	— отношение напряжения, относящееся к испытаниям/оценкам на усталость, определяемое как отношение минимальной нагрузки к максимальной нагрузке или отношение минимального напряжения к максимальному напряжению;
r_i	— внутренний радиус трубы, мм;
R_m	— предел прочности, МПа;
$R_{t0,5}$	— предел текучести, определенный как значение напряжения при общей деформации 0,5 %, МПа;
$R_{p0,2}$	— предел текучести, определенный как значение напряжения при общей деформации 0,2 %, МПа;
s	— истинное напряжение;
$S-N$, $S-N$ curve	— графическое представление зависимости усталостной долговечности (N) от усталостной прочности (S (диапазон напряжений));
Specific ECA	— максимально допустимые размеры дефектов определяются на основе специальных оценок механики разрушения;
t_{corr}	— допуск на коррозию, мм;
t_{nom}	— номинальная толщина стенки (без учета производственных и коррозионных допусков), мм;
t_{fab}	— производственные допуски на толщину стенки, мм;
V	— V-образное смещение отверстия (испытание на вязкость разрушения);
W	— толщина образца механики разрушения или ширина структурного компонента/модели механики разрушения, мм;

2с — длина дефекта, мм.

4.2.2 Греческие обозначения:

- δ — смещение кромок сварного шва, мм;
- Δa — среднее расширение трещины, рост трещины, приращение или из-за усталостной нагрузки или движущей силы трещины, достаточно большой, чтобы увеличилась трещина (также используется термин «разрыв»), мм;
- Δa_f — рост трещины из-за усталостной нагрузки, мм;
- Δa_t — рост трещины от разрыва, мм;
- ΔK — диапазон коэффициента интенсивности напряжений;
- $\Delta \sigma$ — диапазон напряжений (разница между максимальным и минимальным напряжениями в цикле напряжений);
- ϵ — продольная деформация (отношение общей деформации к начальному размеру материала тела, в котором действуют силы);
- $\epsilon_{l,nom}$ — общая номинальная продольная деформация;
- σ — условное напряжение (нагрузка делится на исходную площадь поперечного сечения), МПа;
- σ_{ref} — эталонное напряжение для рассматриваемого дефекта и геометрии при приложенном напряжении ($P_m + P_b$), МПа.

5 Предельное состояние усталости и разрушения

5.1 Общие положения

5.1.1 Нарушение герметичности трубопровода, образовавшееся в результате развития усталостных трещин, рекомендуется оценивать с использованием критериев $S-N$. Дополнительная информация о методике расчета ресурса конструкций с использованием $S-N$ критериев усталости материалов представлена в [1], [2]. Характеристика сопротивления должна быть представлена в виде кривых $S-N$, то есть диапазонов напряжений в зависимости от количества циклов до отказа N .

5.1.2 На рисунке 1 представлены кривые растяжения-деформации, которые необходимо использовать при анализе механики разрушений элементов конструкций.

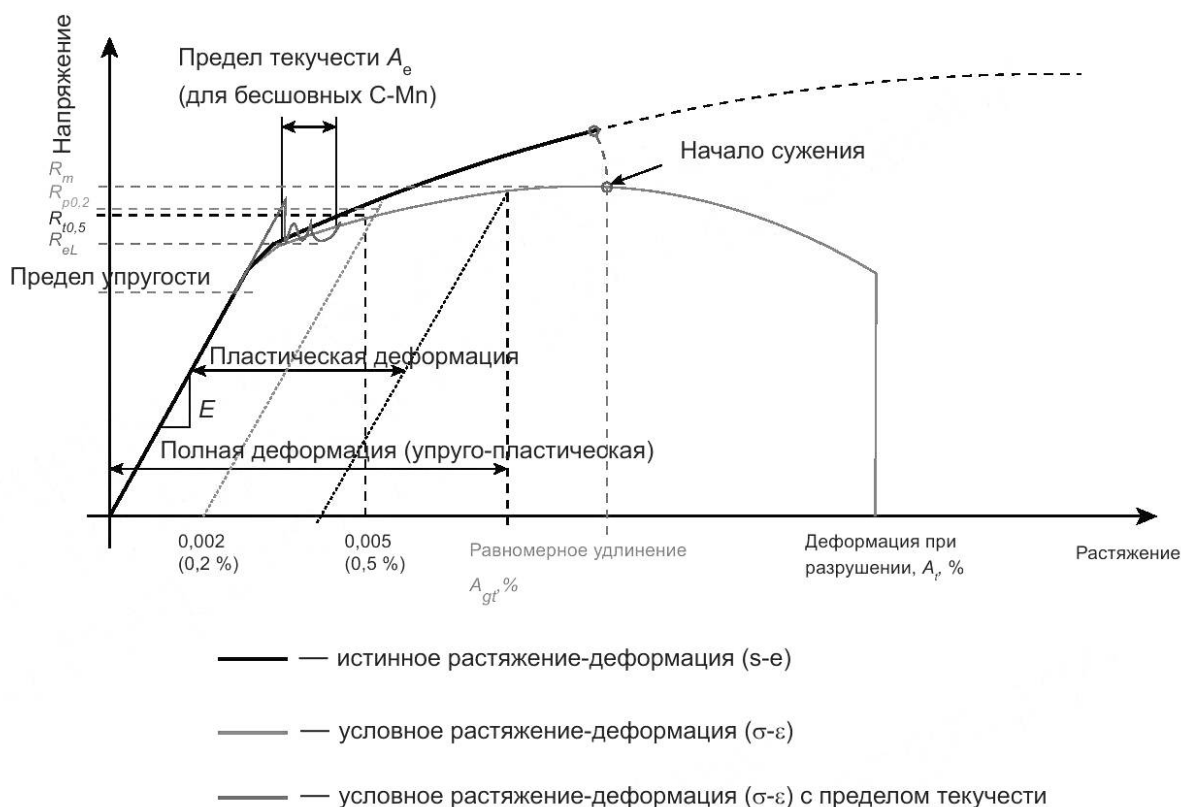


Рисунок 1 — Кривые растяжения-деформации

5.1.3 Действительная деформация e до R_m (см. рисунок 1) определяется по следующей формуле:

$$e = \ln(1 + \epsilon), \quad (1)$$

где ϵ — отношение общей деформации к начальному размеру материала.

5.1.4 Истинные напряжения s до R_m (см. рисунок 1) определяются по следующей формуле:

$$s = \sigma \cdot (1 + \epsilon), \quad (2)$$

где σ — условное напряжение (нагрузка, деленная на исходную площадь поперечного сечения), МПа.

5.1.5 Для определения максимально допустимых размеров дефектов в сварных швах необходимо использовать подход механики разрушения.

5.1.6 Анализ усталости на основе кривых $S-N$ необходимо использовать при оценке усталости от сварного шва или других геометрических концентраций напряжений, которые включены в фактическую кривую $S-N$. Кривые $S-N$, используемые для кольцевых сварных швов трубопровода и райзера, применимы для сварных швов без существенных дефектов разрушения поверхности. В оценках роста усталостной трещины, основанных на механике разрушения, предполагаются значительные дефекты разрушения поверхности. Таким образом, усталостная долговечность, оцененная с помощью анализа роста усталостных трещин, значительно короче усталостной долговечности, рассчитанной с использованием подхода $S-N$. Различия между двумя подходами показаны на рисунке 2.

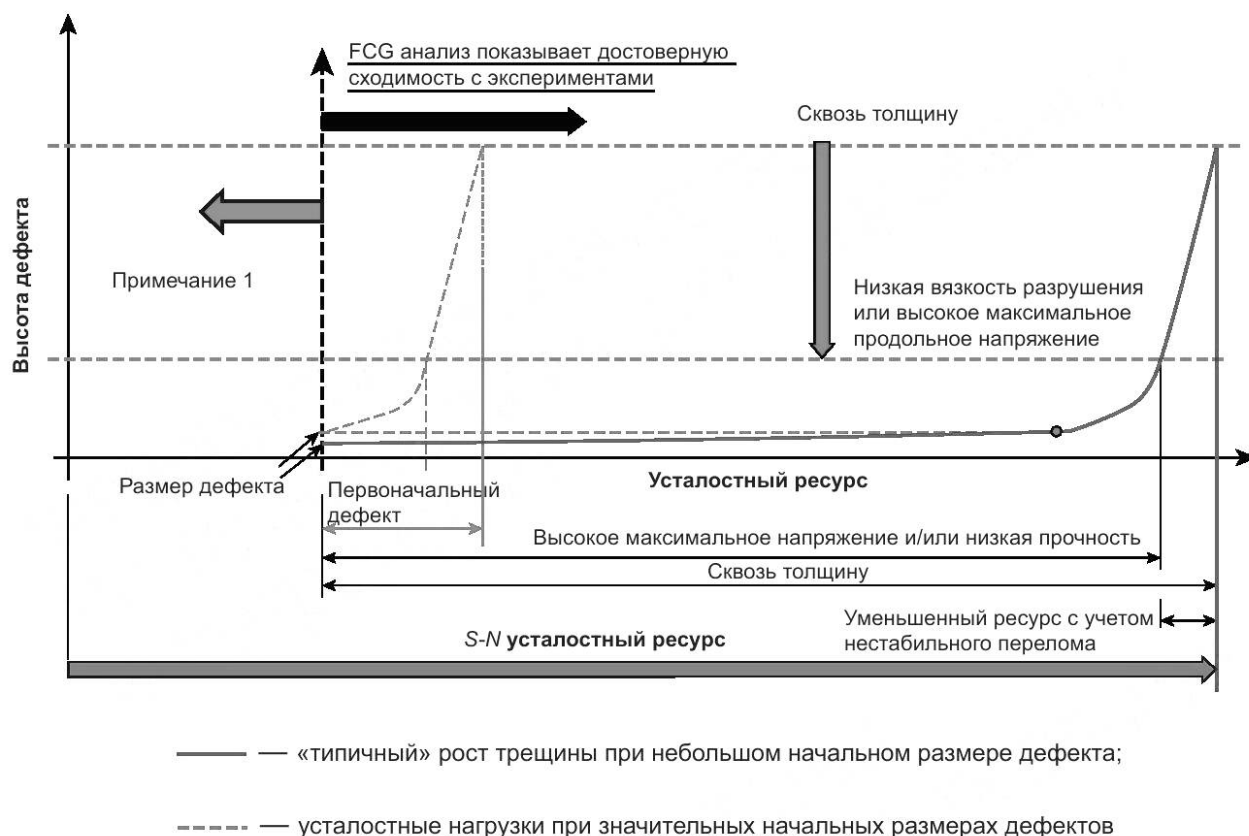


Рисунок 2 — Схематичное изображение роста усталостных трещин и взаимосвязи между оценочными подходами S-N и FCG

5.1.7 Нагрузка может значительно варьироваться для разных сварных швов трубопровода или райзера, и допустимо разделить трубопровод или райзер на зоны с различными сварными швами и критериями приемлемости дефектов.

5.1.8 Все типы статических и динамических нагрузок, относящихся к кольцевым сварным швам трубопровода или райзера, должны учитываться для предельного состояния усталости и разрушения:

- максимальные нагрузки при установке на технологическом судне для монтажа (S-образная, намоточная, J-образная и т. д.) с контролируемым смещением, с указанными максимальными уровнями деформации или с нагрузкой, с указанием максимально допустимых уровней продольного напряжения;
- динамические нагрузки, когда трубопровод или райзер не поддерживается между технологическим судном и местом касания;
- максимальное продольное напряжение или деформация при прогибе;
- динамические нагрузки во временных фазах перед запуском производства (свободные пролеты и т. д.);
- динамические нагрузки на стадии эксплуатации (свободные пролеты, боковые пряжки/петли расширения и т. д.);
- максимальное продольное напряжение при эксплуатации.

5.2 Категории оценки

5.2.1 Необходимо оценить предельное состояние и выбрать подход к оценке, выполнив следующие шаги:

- 1) определить максимальные уровни продольной деформации $\varepsilon_{l,nom}$;
- 2) необходимо разделить кольцевые сварные швы на следующие группы: чувствительные к усталости и нечувствительные к усталости (см. подробно в 5.3);
- 3) необходимо разделить трубопровод или райзер на зоны с различной максимальной продольной деформацией, если сварные швы классифицируются как чувствительные к усталости или нечувствительные к усталости;

- 4) необходимо определить категорию оценки согласно таблице 1;
 5) установить положения, определяющие приемлемое качество сварного шва (критерии приемлемости НК) согласно 5.4.

Т а б л и ц а 1 — Классификация категорий оценки

Категория оценки	Исходное допущение	Применимость
I	$\varepsilon_{l,nom} < 0,4 \%$ и нечувствительные к усталости сварные швы	Используется метод оценки усталостного повреждения <i>S-N</i> . Положения, определяющие качество сварки, указаны в таблице 2. Анализ механики разрушения может использоваться для определения качества сварного шва
II	$\varepsilon_{l,nom} < 0,4 \%$ и чувствительные к усталости сварные швы	То же, что и для категории I, но с более строгими критериями приемлемости дефектов сварки
III статическая ЕСА	$\varepsilon_{l,nom} > 0,4 \%$ и нечувствительные к усталости сварные швы	Необходим анализ механики разрушения, см. подразделы 7.2—7.4. Анализ усталостного повреждения с помощью кривых <i>S-N</i>
IV усталость ЕСА	$\varepsilon_{l,nom} > 0,4 \%$ и чувствительные к усталости сварные швы	Необходим анализ механики разрушения (см. раздел 8). Анализ усталостного повреждения <i>S-N</i> . Методы оценки разрывного или нестабильного разрушения идентичны категории оценки III, но необходимо дополнительно включить анализ роста усталостных трещин
V окружающая среда	Номинальное продольное напряжение больше f_y и/или чувствительные к усталости сварные швы в условиях окружающей среды, которые уменьшат сопротивление по сравнению с FCG	Эта категория оценки рекомендуется, если параметры роста усталостной трещины или кривые <i>S-N</i> не являются репрезентативными из-за агрессивной среды и/или если ожидается, что вязкость разрушения будет значительно ниже, чем в воздушной среде, см. 9.9

5.2.2 Категории оценки с I по IV (см. таблицу 1) не применимы для кислых сред или других условий, в которых скорость роста усталостной трещины может увеличиться или вязкость разрушения может ухудшиться из-за окружающей среды, если не доказано, что материал является невосприимчивым.

5.2.3 Для сварных швов, которые имеют более низкие или частично более низкие свойства растяжения, чем у исходного материала, рекомендуется использовать анализ механики разрушения FEM (см. 6.2.3).

5.2.4 Если кольцевые сварные швы имеют более низкие или частично более низкие характеристики растяжения, чем у исходного материала, и предел деформации $\varepsilon_{l,nom}$ равен 0,4 %, то для проведения анализа рекомендуется использовать метод механики разрушения.

5.2.5 Если напряжения в кольцевом сварном шве определены с учетом возможного несоответствия прочности, применяются подходы к росту *S-N* и усталостной трещины.

5.2.6 Категория оценки V (см. таблицу 1) рекомендуется для сварных швов, где условия окружающей среды могут влиять на вязкость разрушения или сопротивление усталости. Усталость и сопротивление разрушению сварного шва могут считаться невосприимчивыми к окружающей среде, если выполняются следующие два условия:

- минимум два теста по ГОСТ Р ИСО 17642-2 на усталостную трещину для металла шва выполняются в репрезентативной среде после четырех дней выдержки в той же среде. Результаты показывают более низкую скорость роста усталостной трещины, чем средние параметры роста трещины для морской среды (для обоих тестов минус 1100 мВ и минус 850 мВ). Дополнительная информация представлена в [3];

- три испытания на трещиностойкость металла сварного шва SENB выполняются в репрезентативной среде после четырех дней выдержки в той же среде. Скорость нагружения не должна превышать 0,5 МПа (м)^{0,5}/с (0,0158 Н/мм^{3/2}/с) в пределах области линейной упругости. Все значения CTOD превышают 0,15 мм.

5.2.7 Подходы I—IV применимы в том случае, если сварные швы будут подвергаться пластической деформации во время монтажа. Испытания следует проводить в напряженном и состаренном состоянии согласно 9.9. Дополнительная информация по испытаниям в различных средах представлена в [3].

5.2.8 В том случае, если трубопровод или райзер рассматриваются как одна зона, а максимальная продольная деформация любого из сварных швов и максимальные циклические напряжения для любого из сварных швов предполагаются репрезентативными для всех кольцевых сварных швов, то подход может быть консервативным. Такая стратегия не рекомендуется для категории IV или V, так как для кольцевых сварных швов могут быть указаны излишне строгие и сложные критерии приемлемости НК.

5.3 Классификация сварных швов по чувствительности к усталости

5.3.1 Сварные швы классифицируются на две группы:

- чувствительные к усталости;
- нечувствительные к усталости.

5.3.2 При классификации сварных швов, как указано в 5.3.1, следует учитывать следующее:

- насколько вероятно, что кольцевые сварные швы в соответствующей зоне подвергаются указанным циклическим напряжениям;
- какое качество сварного шва принято;
- количественную оценку от влияния циклических напряжений.

5.3.3 Для оценки чувствительности сварных швов к усталости необходимо использовать следующие предположения:

- достаточно низкий уровень усталостных повреждений. Это может быть, например, $D_{fat, TOT} \cdot DFF_{S-N}$ ниже согласованного уровня с использованием класса S-N F1 для морской среды и DFF_{S-N} . Дополнительная информация о DFF_{S-N} приведена в [1];

- достаточно низкий рост усталостных трещин. Рост усталостной трещины для максимального предполагаемого дефекта сварного шва происходит после проверки и ремонта ниже согласованного уровня для соответствующего случая нагрузки или накапливается с учетом всех соответствующих циклических нагрузок;

- сочетание достаточно низкого уровня усталостных повреждений или роста усталостных трещин и оценки вероятности возникновения нагрузок. Это будет определенный предел $D_{fat, TOT} \cdot DFF_{S-N}$ (или альтернативно Δa) в сочетании с аргументами о том, насколько вероятна циклическая нагрузка (например, сколько сварных швов в зоне, которые, вероятно, подвергаются циклическим воздействиям);

- сварные швы могут быть классифицированы как нечувствительные к усталости, если метод S-N является приемлемым.

5.4 Качество сварки для категорий оценки

5.4.1 В зависимости от категории, в которой классифицируются кольцевые сварные швы в зоне, для оценки качества сварных швов рекомендуется применять положения, приведенные в таблице 2. Положения для оценки качества сварных швов следует применять для областей A, B и C в кольцевых сварных швах, как показано на рисунке 3.

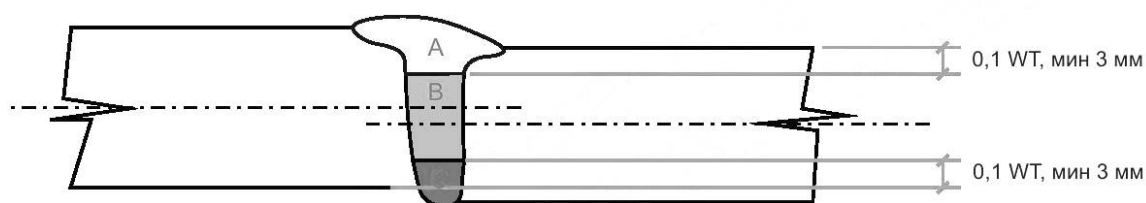


Рисунок 3 — Схематичное изображение различных областей в кольцевых сварных швах

5.4.2 Необходимо ограничивать максимальные размеры дефектов, устанавливая строгие критерии приемлемости АУЗК. Положения для НК приведены в ГОСТ Р 54382, дополнительная информация представлена в [1].

5.4.3 Внутренние дефекты, обнаруженные в областях А и С (см. рисунок 3) во время проверки, должны быть перекалифицированы в дефекты поверхностного разрушения, если высота дефекта не менее чем вдвое превышает высоту оставшейся связки. Если перекалифицированный дефект превышает критерии приемлемости НК, дефект должен быть устранен.

5.4.4 Допустимо применять подход механики разрушения для корректировки критериев приемлемости неразрушающего контроля для категорий I и II, но не рекомендуется использовать анализ механики разрушения для снижения качества сварного шва.

Т а б л и ц а 2 — Рекомендации к качеству сварных швов для категорий оценки согласно таблице 1

Категория оценки	Качество кольцевых сварных швов в репрезентативной зоне
I	Качество сварки должно соответствовать ГОСТ Р 54382. В качестве альтернативы критерии приемлемости НК могут быть определены или расширены на более длинные дефекты с использованием метода механики разрушения (см. 5.2), но это не рекомендуется
II	Области А, В и С (см. рисунок 3): качество сварки должно соответствовать ГОСТ Р 54382. В качестве альтернативы критерии приемлемости НК могут быть определены или расширены на более длинные дефекты с использованием метода механики разрушения (см. 7.5), но это не рекомендуется
III статическая ЕСА	Области А и С: критерии приемлемости дефектов сварки должны быть определены или проверены в соответствии с подходом механики разрушения категории III (см. 7.2—7.4). Область В: можно использовать те же критерии приемлемости, что и для областей А и С, но допускается определение максимального размера внутренних дефектов с характерной высотой связки (положение в толщине стенки, т. е. расстояние от внешней или внутренней поверхности)
IV усталость ЕСА	Области А и С: критерии приемлемости дефектов сварки должны быть определены или проверены в соответствии с подходом механики разрушения категории IV (см. 7.5). Область В: могут использоваться те же критерии приемки, что и для областей А и С, или могут определяться специальные критерии в соответствии с подходом механики разрушения IV категории (см. 7.5)
V окружающая среда	Максимально допустимые размеры дефектов должны оцениваться с использованием репрезентативных свойств вязкости разрушения и характерных параметров роста усталостных трещин в тех случаях, когда применяется категория оценки III либо IV

6 Метод механики разрушения

6.1 Общие положения

6.1.1 Для определения предельного состояния усталости и разрушения необходимо определить максимально допустимые размеры дефектов или оценить критичность известных дефектов. Эти оценки основаны на принципах механики разрушения, а ЕСА по правилам [4] используется для оценки нестабильных трещин, вязкого разрыва и роста усталостных трещин в сварных швах морских трубопроводов.

6.1.2 Все статические и динамические нагрузки, которые могут способствовать росту трещины, должны рассматриваться в общем случае, если используется подход, основанный на механике разрушения. Рост трещин, вызванный разрывом, рост усталостной трещины и нестабильный перелом следует оценивать как релевантные.

6.1.3 Рост усталостной трещины представляет собой зависящий от времени механизм деградации, вероятность возникновения разрушения постепенно увеличивается, и годовая вероятность выхода из строя относится к последнему году в течение срока службы.

6.1.4 Не следует использовать метод механики разрушения для оценки скорости снижения прочностных характеристик сварного шва. Для этого необходимо применять следующие оценки механики разрушения с учетом положений [4]:

а) определение максимально допустимых размеров дефектов сварного шва (допускаемые соотношения геометрических параметров дефекта);

б) оценка пригодности сварного шва с допустимыми дефектами к применению с учетом предельного состояния усталости и разрушения:

- анализ изменения размеров допустимых дефектов сварного шва под действием нагрузок, возникающих при укладке морского трубопровода на дно;
- анализ изменения размеров допустимых дефектов сварного шва под действием нагрузок, возникающих при эксплуатации морского трубопровода;
- анализ изменения размеров допустимых дефектов сварного шва и появления новых трещин под действием термообработки в целях ее исключения для толстостенных сварных соединений, склонных к термическому растрескиванию.

6.1.5 Максимально допустимые размеры дефектов могут быть скорректированы с учетом вероятности обнаружения и погрешности определения размеров дефектов в соответствующем методе НК по [1].

6.1.6 Все ограничения по деформациям для кольцевых сварных швов определяются как общая номинальная деформация (упругость плюс пластик) $\varepsilon_{l,nom}$ в продольном направлении трубы.

6.1.7 Сварные швы между секциями с различной жесткостью из-за сдвига номинальной толщины стенки, встречной расточки, разницы в среднем пределе текучести между соседними трубами более 100 МПа и т. д. могут привести к значительным концентрациям деформаций, которые также влияют на сварной шов.

6.1.8 Необходимо учитывать/анализировать нарушение соосности кромок свариваемых труб по окружности в соответствии с методологией, представленной в настоящем стандарте.

6.1.9 Рекомендуемая процедура должна включать только оценку максимально допустимых дефектов внешней поверхности и использовать эти результаты для критериев приемлемости АУЗК в отношении разрушения внутренней поверхности и встроенных дефектов, если условия окружающей среды являются репрезентативными.

6.1.10 Допустимо определение максимально допустимых размеров внутренних дефектов с соответствующей минимально допустимой высотой связки согласно 7.5.

6.2 Исходные данные для оценки механики разрушения

6.2.1 Для оценки механики разрушения необходимы следующие исходные данные:

- размеры трубы, размеры сварных швов и допуски на размеры;
- свойства при растяжении в виде полных кривых напряжения-деформации для исходного материала трубы и свидетельство того, что кривая напряжения-деформации металла шва пересекает кривую напряжения-деформации основной трубы (см. 6.3);
- вязкость разрушения, кривая сопротивления разрыву или критическая вязкость разрушения для образцов с выемками, расположенными как внутри металла сварного шва, так и на FL/HAZ с учетом [1];
- значение $L_{r,max}$ (отсечка L_r) согласно таблице 3 и 7.3;
- максимально допустимый разрыв (стабильное расширение/рост трещины) согласно 7.3;
- данные по деформациям во время фазы монтажа и вторичным напряжениям (например, остаточные напряжения в процессе сварки или монтажа);
- повышенные местные напряжения из-за возможного смещения (несоосности) сварного шва для всех соответствующих случаев нагрузки;
- приложенное максимальное продольное расчетное напряжение-деформация на временной и эксплуатационной стадиях (в конце срока службы);
- архивные данные по циклическим напряжениям, воздействующим на трубопровод или райзер во время прокладки и в течение всего срока эксплуатации;
- параметры роста усталостной трещины для разных стадий.

6.2.2 Необходимые исходные данные и рекомендации о том, как определить и установить исходные данные, указаны в таблице 3.

6.2.3 Допустимо проводить оценку целостности сварных швов с использованием анализа методом конечных элементов согласно разделу 8.

Таблица 3 — Исходные данные и рекомендуемые определения для оценки деформаций

Исходные данные	Значение/определение	Примечание
Дефект разрушения внешней поверхности ¹⁾	Коэффициент интенсивности напряжений (см. [5]), решение для пластин М.4.1, где $W = \pi \cdot (D - t_c)$ или $W = \pi \cdot (d + t_c)$, $B = t_c$. Справочные решения по напряжениям: а) решение для цилиндра, Р.10.4 (см. [5]); б) решение для пластин, Р.6.1 (см. [5])	Решение опорного цилиндра для определения напряжений рассматривается в качестве основного подхода
Внутренний дефект ²⁾	Рекомендуется оценивать наравне с внешними дефектами поверхности. Во время осмотра следует использовать правило повторной характеристики ²⁾	Разрывы и критические размеры внутренних дефектов рекомендуется устанавливать равными поверхностным дефектам
Дефект разрушения внутренней поверхности	Допустимо использовать результаты с внешней поверхности, недостатки для внутренних дефектов поверхности, если указанные свойства материала являются репрезентативными. Решение коэффициента интенсивности напряжений: а) решение для пластин М.4.1 (см. [5]); б) дефект внутренней поверхности в цилиндре, М.7.3.2 (см. [5]). Справочные решения по напряжениям: а) решение для цилиндра, Р.10.2 (см. [5]); б) решение для пластин, Р.6.1 (см. [5])	Решение коэффициента интенсивности напряжений для внутренних дефектов поверхности в цилиндрах имеет геометрические ограничения, что затрудняет его использование
Кривая напряжения-деформации, используемая в FAD	Кривая истинного напряжения-деформации, преобразованная из высокотехнологичной кривой напряжения-деформации согласно 9.6	Кривая условного напряжения-деформации используется для определения приложенных напряжений, а преобразованная кривая истинного напряжения-деформации используется для определения FAD
Первичное мембранное напряжение P_m	Следует использовать высокоинженерную одноосную кривую напряжения-деформации согласно подразделу 9.6. P_m — значение условного напряжения при указанном приложенном напряжении	—
Первичный изгибающий момент P_b	SCF рассчитывается, как указано в 7.3. P_b определяют, используя правило Нейбера, согласно 7.3	—
Определение остаточного напряжения в сварном шве	Если используется решение напряжений для цилиндров: для первого приращения деформации $Q_m = YS$ для кривой высоких напряжений-деформаций, представляющей свойства сварки, допустима релаксация (см. 7.3). Следующие нагрузки $Q_m = 0,4 \cdot YS$, такие же YS , как и для первого приращения деформации. Если используется решение напряжений для пластин: P_m также извлекается из характеристической условной кривой напряжения-деформации (см. 9.6), но приложенная деформация увеличивается с YS/E , где YS представляет собой кривую напряжений-деформаций, определенную для условий сварки. Увеличение деформации используется для всех последующих случаев нагрузки (дальнейшая релаксация не допускается)	—

Окончание таблицы 3

Исходные данные	Значение/определение	Примечание
Использование увеличения коэффициента интенсивности напряжений для сварного шва M_k	Не требуется для ситуаций, связанных с напряжением	—
$L_{r,max}$ (отсечка L_r)	Если используется справочная формула напряжения для цилиндра $L_{r,max} = \frac{UTS}{YS}$ Если используется справочная формула напряжения для плиты $L_{r,max} = \frac{(1 + \epsilon_{UTS}) \cdot UTS}{(1 + \epsilon_{YS}) \cdot YS}$ где ϵ_{UTS} — условное напряжение на UTS (равномерное удлинение); ϵ_{YS} — условная нагрузка на YS	—
Кривая сопротивления разрушению	Рекомендуется один из следующих подходов: - метод нескольких образцов: нижняя граница R-кривой на основе шести достоверных результатов для каждой соответствующей микроструктуры (см. [6]); - метод с единичными образцами: испытывается не менее трех образцов и устанавливается нижняя граничная кривая, представляющая все испытания (см. раздел 7); - кривая сопротивления разрыву, скорректированная для начала разрыва (см. раздел 7), не относится к первому приращению деформации	Если продольная деформация ниже 0,4 %, допустимо определять вязкость разрушения как удельную (одноточечную) вязкость разрушения (CTOD _{C, u} или m или $J_{C, u}$ в зависимости от ситуации)

6.3 Несоответствия прочности сварного шва и исходного материала труб

6.3.1 В данном подразделе рассматриваются два допустимых варианта несоответствия:

- прочность кольцевого сварного шва не менее прочности исходного материала труб;
- прочность кольцевого сварного шва частично меньше, чем прочность исходного материала труб.

6.3.2 Для подтверждения соответствия прочности кольцевого сварного шва и исходного материала труб должны быть выполнены следующие условия:

- наименьший YS при испытаниях на растяжение металла сварного шва (минимум три испытания) должен быть выше, чем соответствующий YS исходных труб, определенный в соответствии с 9.6;
- наименьший UTS при испытаниях на растяжение металла сварного шва (минимум три испытания) должен быть выше, чем UTS исходного материала;
- условия должны быть выполнены согласно ГОСТ Р 54382 применительно к трубопроводам и сварным швам;
- во время испытаний для анализа механики разрушения, производства или квалификации должно быть подтверждено, что кривая напряжения-деформации для кольцевых сварных швов не располагается ниже или частично ниже по сравнению с кривой напряжения-деформации исходных труб.

6.3.3 Если в результате одного из испытаний на растяжение металла сварного шва обнаруживается, что наименьшее значение YS или наименьшее значение UTS не совпадают с результатами других образцов, допустимо не обращать внимания на этот результат, если будут проведены два дополнительных испытания на растяжение металла шва.

6.3.4 Если металл сварного шва имеет кривую напряжения-деформации, которая частично ниже кривой напряжения-деформации исходного материала, движущая сила трещины может возрасти по сравнению с кривой напряженно-деформированного металла сварного шва. В таких случаях необходимо следить за тем, чтобы движущая сила трещины не была занижена. Возможные решения для указанного варианта могут быть следующими:

- выполняют анализ механики разрушения твердого 3D FEM, как описано в разделе 8 и приложениях А и Б;
- необходимо подтвердить, что CDF равен или выше, чем CDF, оцененный в результате анализа механики разрушения твердых 3D FEM;
- необходимо откорректировать исходные данные, чтобы CDF был выше, чем CDF, оцененный с помощью анализа механики разрушения твердого 3D FEM;
- необходимо выполнить сплошной 3D FEM анализ механики разрушения, который показывают более высокую движущую силу трещины для ситуации равномерного совпадения прочности, чем анализы, в которых указаны характерные кривые напряжения-деформации для металла сварного шва.

7 Подходы механики разрушения

7.1 Общие положения

В зависимости от уровня монотонных и циклических деформаций оценки подразделяются на следующие категории:

а) категория III, оценки механики разрушения сварных швов (см. [4]), классифицированных как нечувствительные к усталости — ECA-статические. ECA-статические могут быть далее разделены на следующие категории:

- общая $\epsilon_{l,nom}$ до 2,25 %, если оцениваемый случай нагрузки не включает внутреннее давление (обычно при монтаже), а максимально допустимые размеры дефектов определяются в соответствии с 7.2;
- специальная, включающая кольцевые сварные швы, подвергающиеся определенной деформации, когда трубопровод или райзер не находится под давлением и максимально допустимые размеры дефектов определяются в соответствии с 7.3;
- внутреннее избыточное давление, сценарии нагрузок, при которых трубопровод или райзер находится под избыточным давлением, превышающим $0,15 \cdot f_y$ от окружного напряжения;

б) категория IV, выполняют комбинированные оценки роста усталостной трещины, усталость ECA (см. 7.5).

7.2 Категория III, общая инженерная оценка критичности дефекта

7.2.1 Максимально допустимые размеры дефектов, указанные в таблицах 5—7, соответствующим образом скорректированные с учетом точности размеров, рекомендуется использовать для окончательных критериев приемки дефектов сварного шва в случае выполнения положений настоящего раздела.

7.2.2 Рекомендуемое количество испытаний на вязкость разрушения и растяжение указано в таблице 4 и в разделе 9.

7.2.3 Общая ECA основана на предварительно выполненных анализах разрыва в соответствии с подходом, описанным в 7.3.

7.2.4 В рамках АУЗК необходимо придерживаться правила переквалификации дефектов вблизи поверхности (см. также [1]).

7.2.5 Указанный общий подход ECA не применим в следующих ситуациях:

- плакированные или облицованные трубопроводы (выполняют анализ с учетом проникновения в слой CRA);
- трубопроводы, подверженные сочетанию внутреннего избыточного давления, превышающего $0,15 \cdot f_y$ окружного напряжения и $\epsilon_{l,nom}$, больше 0,4 % (см. 7.4);
- кольцевые сварные швы имеют несоответствующую прочность по сравнению с основной трубой (см. 6.3.3);
- при более пяти циклах растяжения (пластический изгиб трубы в одном направлении до пяти раз);
- кольцевые сварные швы не испытаны в соответствии с таблицей 4, разделом 9 и ГОСТ Р 54382;
- трубопроводы не были испытаны и спроектированы в соответствии с ГОСТ Р 54382;
- экспериментально определенные значения J не соответствуют положениям, указанным в таблицах 4—8 и на рисунке 4. Для CTOD аналогичные таблицы не определены. Однако допустимо преобразовать значения J_{mat} в значения CTOD_{mat}, используя формулы в 9.2;

- значительный всплеск или нестабильные трещины происходят до максимальной нагрузки во время испытаний на вязкость разрушения;
- геометрия, приложенная деформация, вязкость разрушения и максимальное смещение не соответствуют ограничениям, принятым в таблицах 4—8;
- соотношение YS/UTS при производственных квалификационных испытаниях или при испытаниях на растяжение основной трубы согласно таблице 7 не соблюдается:
 - YS/UTS не более 0,90 — для C-Mn с SMYS не более 555 МПа;
 - YS/UTS не более 0,85 — для 13Cr.

7.2.6 Если какое-либо из условий 7.2.5 не выполняется, следует выполнить специальную ЕСА в соответствии с 7.3 и 7.5.

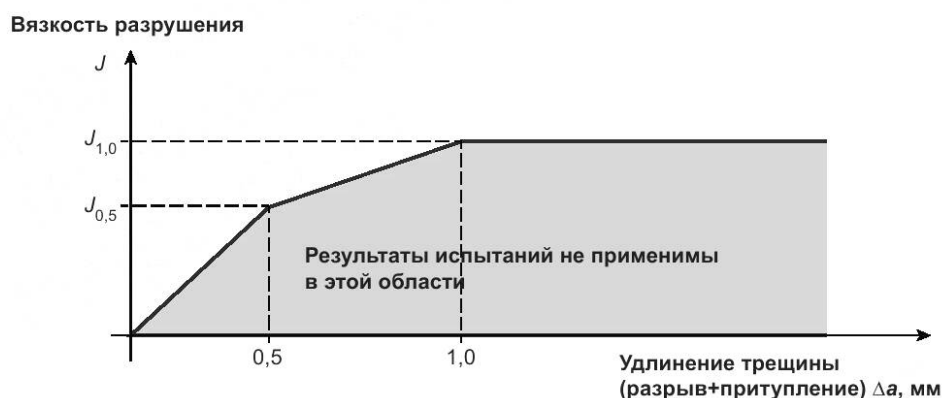


Рисунок 4 — Результаты испытаний $J_{mat} - \Delta a$

Таблица 4 — Испытания, необходимые для применения подхода общего ЕСА в условиях деформации, равной или превышающей 0,4 %^{*,**}

Вид испытаний	Местоположение/процедура сварки	Количество циклов испытаний
Испытания на растяжение металла сварного шва ^{1), 2)}	Кольцевой сварной шов	3
Испытания на растяжение исходной трубы ^{1), 2)}	Исходная труба, продольно	5
R испытание образцов SENT ^{2), 3)}	Главная линия	Три образца, если используется подход с несколькими образцами, или два, если подход с одним образцом используется для каждой позиции надреза (см. [1])
R испытание образцов SENT ^{2), 3)}	Двухтрубная плетть	
R испытание образцов SENT ^{2), 3)}	Сквозь толщину ремонта	
R испытание образцов SENT ^{2), 3)}	Частичный ремонт ⁴⁾	
R испытание образцов SENT ^{2), 3)}	Сквозной сварочный шов ⁴⁾	
1) Если испытания на растяжение при производстве выполняются при температуре оценки и устанавливаются полные кривые напряжения-деформации, дополнительные испытания на растяжение не выполняют. 2) Определение геометрии образца и рекомендации по проведению испытаний — см. [1]. 3) Притупление должно быть включено в длину удлинения трещины (удлинение трещины равно притупление плюс разрыв). 4) Если процедура сварки и подвод тепла равны тем, которые использовались в процедуре ремонта по всей толщине, это испытание может быть опущено. Если повторный ремонт разрешен или согласован, соответствующие микроструктуры должны быть испытаны.		

* Все процедуры сварки, которые имеют различные существенные переменные, должны быть проверены.

** Температура испытаний и состояние материала для испытаний должны быть такими, как указано в разделе 9.

Таблица 5 — Максимально допустимые размеры дефектов $a \times 2c$, мм, максимальная деформация $0,4 \% \leq \varepsilon_{l,nom} < 1 \%^{**}$, *** , *** трубы 8—12 дюймов

$J-\Delta a$, Н/мм	C-Mn; SMYS ≤ 450		C-Mn; SMYS = 485		C-Mn; SMYS = 555		13Cr; SMYS = 550 ¹⁾	
	$15 \leq t_c < 25$	$t_c \geq 25$	$15 \leq t_c < 25$	$t_c \geq 25$	$15 \leq t_c < 25$	$t_c \geq 25$	$15 \leq t_c < 25$	$t_c \geq 25$
$J_{0,5} = 400$ $J_{1,0} = 600$	3×25 4×20 5×15	3×55 4×25 5×20	3×25 4×15 5×15	3×40 4×25 5×20	3×20 4×15 5×10	3×30 4×20 5×15	3×30 4×20 5×15	3×60 4×35 4×25
$J_{0,5} = 600$ $J_{1,0} = 800$	3×50 4×30 5×20	3×100 4×50 5×35	3×45 4×25 5×20	3×90 4×45 5×30	3×35 4×20 5×15	3×80 4×40 5×25	3×45 4×25 5×20	3×95 4×55 5×40
$J_{0,5} = 800$ $J_{1,0} = 1000$	3×70 4×40 5×25	3×150 4×80 5×50	3×65 4×35 5×25	3×145 4×70 5×45	3×55 4×30 5×20	3×115 4×60 5×40	3×50 4×30 5×25	3×100 4×70 5×50
δ_{max} , мм ²⁾	1,8	2,5	1,8	2,5	1,8	2,5	1,8	2,5
¹⁾ Также приемлемо для трубопроводов 22Cr и 25Cr. ²⁾ δ_{max} определяется по формуле (8).								

Таблица 6 — Максимально допустимые размеры дефектов $a \times 2c$, мм, максимальная деформация $0,4 \% \leq \varepsilon_{l,nom} < 1 \%^{**}$, *** , *** , 12 дюймов $< D \leq 16$ дюймов

$J-\Delta a$, Н/мм	C-Mn; SMYS ≤ 450		C-Mn; SMYS = 485		C-Mn; SMYS = 555		13Cr; SMYS = 550 ¹⁾	
	$15 \leq t_c < 25$	$t_c \geq 25$	$15 \leq t_c < 25$	$t_c \geq 25$	$15 \leq t_c < 25$	$t_c \geq 25$	$15 \leq t_c < 25$	$t_c \geq 25$
$J_{0,5} = 400$ $J_{1,0} = 600$	3×35 4×20 5×15	3×75 4×30 5×25	3×30 4×20 5×15	3×55 4×30 5×20	3×25 4×15 5×15	3×40 4×25 5×20	3×40 4×35 5×20	3×90 4×45 5×30
$J_{0,5} = 600$ $J_{1,0} = 800$	3×65 4×35 5×25	3×150 4×75 5×45	3×60 4×30 5×20	3×135 4×65 5×40	3×50 4×25 5×20	3×115 4×50 5×30	3×65 4×35 5×25	3×145 4×80 5×50
$J_{0,5} = 800$ $J_{1,0} = 1000$	3×95 4×50 5×35	3×150 4×115 5×70	3×85 4×45 5×30	3×150 4×100 5×60	3×80 4×40 5×25	3×150 4×85 5×50	3×75 4×45 5×30	3×150 4×105 5×70
δ_{max} , мм ²⁾	1,8	2,5	1,8	2,5	1,8	2,5	1,8	2,5
¹⁾ Также приемлемо для трубопроводов 22Cr и 25Cr. ²⁾ δ_{max} определяется по формуле (8).								

* Более крупные допустимые размеры дефектов могут быть приемлемыми в зависимости от специальной ЕСА.

** Приемлемо только в том случае, если были проведены испытания, указанные в таблице 4.

*** Максимально допустимый размер дефекта $a \times 2c$ относится к высоте и длине, соответственно, как поверхностных, так и внутренних дефектов. Если внутренний дефект расположен близко к поверхности (высота связи меньше половины высоты дефекта), то высота связи между дефектом и поверхностью должна быть включена в высоту дефекта. Ошибка определения размера дефекта УЗК/АУЗК должна быть вычтена из максимально допустимой высоты дефекта, чтобы установить критерии приемлемости дефекта сварки УЗК/АУЗК (см. [1]).

Таблица 7 — Максимально допустимые размеры дефектов $a \times 2c$, мм, максимальная деформация $0,4\% \leq \varepsilon_{l,nom} < 1\%$ *, **, ***, $D > 16$ дюймов

$J-\Delta a$, Н/мм	C-Mn; SMYS ≤ 450		C-Mn; SMYS = 485		C-Mn; SMYS = 555		13Cr; SMYS = 550 ¹⁾	
	$15 \leq t_c < 25$	$t_c \geq 25$	$15 \leq t_c < 25$	$t_c \geq 25$	$15 \leq t_c < 25$	$t_c \geq 25$	$15 \leq t_c < 25$	$t_c \geq 25$
$J_{0,5} = 400$ $J_{1,0} = 600$	3×40 4×20 5×15	3×90 4×35 5×25	3×30 4×20 5×15	3×70 4×35 5×25	3×25 4×15 5×15	3×50 4×30 5×25	3×50 4×30 5×20	3×125 4×60 5×40
$J_{0,5} = 600$ $J_{1,0} = 800$	3×80 4×40 5×25	3×150 4×90 5×50	3×70 4×35 5×25	3×150 4×75 5×45	3×60 4×30 5×20	3×140 4×60 5×35	3×85 4×45 5×20	3×150 4×105 5×65
$J_{0,5} = 800$ $J_{1,0} = 1000$	3×120 4×60 5×35	3×150 4×145 5×80	3×105 4×50 5×35	3×150 4×125 5×70	3×95 4×45 5×30	3×150 4×105 5×60	3×100 4×60 5×40	3×150 4×145 5×90
δ_{max} , мм ²⁾	1,5	2,0	1,5	2,0	1,5	2,0	1,5	2,0
¹⁾ Также приемлемо для трубопроводов 22Cr и 25Cr. ²⁾ δ_{max} определяется по формуле (8).								

Таблица 8 — Максимально допустимые размеры дефектов $a \times 2c$, мм, максимальная деформация $1,0\% \leq \varepsilon_{l,nom} < 2,25\%$ *, **, ***, 8 дюймов $< D \leq 16$ дюймов

$J-\Delta a$, Н/мм	C-Mn; SMYS ≤ 450		C-Mn; SMYS = 485		C-Mn; SMYS = 555		13Cr; SMYS = 550 ¹⁾	
	$15 \leq t_c < 25$	$t_c \geq 25$	$15 \leq t_c < 25$	$t_c \geq 25$	$15 \leq t_c < 25$	$t_c \geq 25$	$15 \leq t_c < 25$	$t_c \geq 25$
$J_{0,5} = 400$ $J_{1,0} = 600$	3×20 4×15 5×10	3×35 4×20 5×15	3×20 4×15 5×10	3×30 4×20 5×15	3×15 4×10 5×10	3×25 4×15 5×10	3×15 4×10 5×10	3×25 4×20 5×15
$J_{0,5} = 600$ $J_{1,0} = 800$	3×35 4×20 5×15	3×85 4×40 5×30	3×35 4×20 5×15	3×75 4×35 5×25	3×30 4×20 5×15	3×60 4×30 5×20	3×30 4×20 5×15	3×60 4×30 5×25
$J_{0,5} = 800$ $J_{1,0} = 1000$	3×45 4×30 5×20	3×95 4×65 5×40	3×45 4×30 5×20	3×95 4×60 5×40	3×45 4×25 5×20	3×95 4×50 5×30	3×135 4×25 5×15	3×75 4×50 5×30
δ_{max} , мм ²⁾	1,5	2,0	1,5	2,0	1,5	2,0	1,5	2,0
¹⁾ Также приемлемо для трубопроводов 22Cr и 25Cr. ²⁾ δ_{max} определяется по формуле (8) в подразделе 7.3.								

7.3 Категория III, специальная техническая критическая оценка ЕСА без внутреннего избыточного давления

7.3.1 В специальном ЕСА все исходные параметры выбраны и определены для реальной ситуации.

7.3.2 Необходимо выполнить испытания, указанные в таблице 9, для специального ЕСА.

* Более крупные допустимые размеры дефектов могут быть приемлемыми в зависимости от специальной ЕСА.

** Приемлемо только в том случае, если были проведены испытания, указанные в таблице 4.

*** Максимально допустимый размер дефекта $a \times 2c$ относится к высоте и длине, соответственно, как поверхностных, так и внутренних дефектов. Если внутренний дефект расположен близко к поверхности (высота связи меньше половины высоты дефекта), то высота связи между дефектом и поверхностью должна быть включена в высоту дефекта. Ошибка определения размера дефекта УЗК/АУЗК должна быть вычтена из максимально допустимой высоты дефекта, чтобы установить критерии приемлемости дефекта сварки УЗК/АУЗК (см. [1]).

Таблица 9 — Испытания кольцевых сварных швов в трубопроводах с категорией статическая ЕСА — специальная для ЕСА^{*, **}

Вид испытаний	Местоположение/процедура сварки	Количество циклов испытаний
Испытания на растяжение металла сварного шва ^{1), 2)}	Кольцевой сварной шов (все соответствующие процедуры)	3 (необходимо построить кривые полного напряжения-деформации)
Испытания на растяжения основной трубы ^{1), 2)}	Основная труба, продольно	5 (необходимо построить кривые полного напряжения-деформации)
Испытания на сопротивление на разрыв SENT образцов ^{2), 3), 4)}	Главная линия	Одна R-кривая (минимум шесть образцов SENT) для каждой позиции надреза (см. [1], [6])
Испытания на сопротивление на разрыв SENT образцов ^{2), 3), 4)}	Двухтрубное звено	
Испытания на сопротивление на разрыв SENT образцов ^{2), 3), 4)}	Ремонт сквозного дефекта	
Испытания на сопротивление на разрыв SENT образцов ^{2), 3), 4)}	Частичный ремонт ⁵⁾	
Испытания на сопротивление на разрыв SENT образцов ^{2), 3), 4)}	Соединение ⁵⁾	
¹⁾ Если испытания на растяжение при производстве выполняются при температуре оценки и устанавливаются полные кривые напряжения-деформации, дополнительные испытания на растяжение не выполняют. ²⁾ Рекомендуемая геометрия образца и рекомендации по испытаниям приведены в [1] и [7]. ³⁾ Рекомендуется включить притупление в кривую сопротивления. Тем не менее, кривые могут начинаться с начала разрыва. ⁴⁾ Не выполняют три различных типа испытаний на вязкость разрушения для покрытия внешней поверхности, внутренней поверхности и встроенной поверхности, если результат, представляющий один тип дефекта, является репрезентативным или консервативным для другого типа дефекта. Например, испытания на вязкость разрушения на воздухе при минимальной температуре установки дает репрезентативное описание вязкости разрушения для всех типов дефектов, оцененных в ЕСА для стадии установки. Подробнее см. раздел 9. ⁵⁾ Если процедура сварки и подвод тепла равны тем, которые используются в процедуре ремонта по всей толщине, это испытание может быть опущено. Если повторный ремонт разрешен или согласован, соответствующие микроструктуры должны быть испытаны.		

7.3.3 Рекомендуется, чтобы накопленный разрыв от всех циклов деформации при установке, не включая усталость, был ограничен до 10 % от толщины стенки, но в зависимости от нагрузок, которые следует учитывать после установки, допускается увеличение разрывов. Разрыв, оцениваемый для одного приращения деформации в ЕСА, не должен превышать двух третей разрыва, связанного с максимальной нагрузкой для образцов SENT.

7.3.4 Рекомендуемое ограничение разрыва во время установки должно исключать нестабильность разрыва с некоторым запасом прочности. Тем не менее, если запас прочности является большим, основываясь на оценках (режим нагрузки, сопротивление разрыву, размер дефекта и геометрия трубы и т. д.), более значительный разрыв может быть приемлемым.

7.3.5 Кривые прочности на растяжение и напряжения-деформации для оценок механики разрушения на основе деформации должны описывать характеристическую кривую высокого напряжения-деформации с упрочнением при низкой деформации (см. подробно раздел 9).

7.3.6 В зависимости от выбранного справочного решения напряжения применяются два различных подхода или определения остаточных напряжений в сварном шве:

а) решение для цилиндра для поверхностных разрушающих дефектов. Остаточное напряжение в сварном шве определяется как равномерное вторичное мембранное напряжение Q_m , равное пределу текучести, представляющему указанную кривую напряжения-деформации (кривая высокого напряе-

* Должны быть проверены все процедуры сварки, которые имеют различные существенные переменные (см. [1]).

** Температура испытаний и состояние материала для испытаний должны быть такими, как указано в разделе 9.

ния-деформации в состоянии после сварки). Релаксация в соответствии с уравнением (3) допускается. Если уровень применяемой деформации превышает 1 %, допустимо определять остаточное напряжение в сварном шве как равное 40 % от того же предела текучести для всех последующих нагрузок. Если уровень деформации ниже, расслабленное значение Q_m , полученное с использованием уравнения (3), следует использовать для более поздних случаев нагрузки

$$Q_m = \min \left[YS' \left(1,4 - \frac{\sigma_{ref}}{\sigma'_f} \right) YS' \right], \quad (3)$$

где YS' — соответствующий предел текучести при оценочной температуре, за исключением того, что значение YS' при комнатной температуре используется для температур ниже температуры окружающей среды, МПа;

σ_{ref} — эталонное напряжение для рассматриваемого дефекта и геометрии при приложенном напряжении ($P_m + P_b$), МПа;

σ'_f — соответствующее напряжение потока (предполагается, что среднее значение предела текучести и напряжение растяжения при температуре оценки), МПа;

б) решение для пластин для поверхностных дефектов. Остаточное напряжение в сварном шве включается путем увеличения приложенной деформации с помощью YS/E таким образом, чтобы приложенное напряжение первичной мембраны P_m , извлеченное из кривой напряжение-деформация, будет увеличиваться. YS может быть определен как $SMYS$ для исходного материала (комнатная температура и без пластической деформации). Возможное дополнительное изгибающее напряжение по толщине из-за смещения учитывается на основе увеличенного P_m . Если используется эта опция, то применяемая деформация для всех последующих случаев нагрузки на основе деформации должна быть увеличена с помощью YS/E . Если более поздний случай нагрузки определяется как основанный на напряжении (контроль нагрузки), рекомендуется определить вторичное напряжение мембраны, равное 40 % от предела текучести в состоянии после сварки. Также рекомендуется увеличить максимальное значение L_f , как указано ниже.

7.3.7 Рекомендации по оценкам влияния различных эффектов на толщину стенок трубопроводов:

- при оценке следует использовать номинальную толщину стенки минус производственный допуск трубы, учитывая установку (т. е. $t_c = t_{nom} - t_{fab}$). Допустимо определять t_c на основании измерений после изготовления. Рекомендуется среднее значение минус два стандартных отклонения;

- при оценке в течение срока эксплуатации трубопровода или райзера должен быть включен соответствующий допуск на коррозию. В конце расчетного срока службы следует вычесть все допуски на коррозию (т. е. $t_c = t_{nom} - t_{fab} - t_{corr}$);

- в случае оценки пригодности к эксплуатации допустимо основывать толщину стенки на проверенных значениях.

7.3.8 Рекомендуемая процедура для определения приложенного напряженного состояния P_m и P_b следующая:

- для одноосной нагрузки номинальное напряжение должно определяться из номинальной деформации или номинальной деформации плюс предполагаемая остаточная деформация сварного шва из характерной инженерной кривой напряжения-деформации для нагрузки, основанной на деформации (высокая кривая с упрочнением при низкой деформации, см. подраздел 9.6). Это напряжение определяется как первичное мембранное напряжение P_m с учетом рекомендаций [5];

- для случаев эксплуатации с учетом комбинированного внутреннего избыточного давления и продольной деформации см. 7.4;

- не рекомендуется ослаблять приложенные напряжения, потому что предполагается локальный контроль смещения от роста трещины;

- номинальное напряжение должно быть увеличено из-за предполагаемого SCF из-за несоосности в кольцевом сварном шве. Может применяться правило Нейбера. Увеличение напряжения определяется как первичное изгибающее напряжение P_b (см. [6]).

7.3.9 SCF, используемый в расчете ECA, рассчитывается по следующим формулам:

$$SCF_{cap} = 1 + \frac{6 \cdot \delta \cdot e^{-a}}{t_c \cdot \left(1 + \left(\frac{T}{t_c} \right)^\beta \right)} \quad \text{— (применимо при } T/t_c < 2), \quad (4)$$

$$\alpha = \frac{1,82 \cdot L_{cap}}{\sqrt{D \cdot t_c} \cdot \left(1 + \left(\frac{T}{t_c}\right)^\beta\right)}, \quad (5)$$

$$\beta = 1,5 - \frac{1}{\log\left(\frac{D}{t_c}\right)} + \frac{3}{\left(\log\left(\frac{D}{t_c}\right)\right)^2}, \quad (6)$$

$$T = t_c + [h_i/l_{0cap} - h_i/l_{0root}], \quad (7)$$

где T — толщина стенки толстостенной трубы;

t_c — толщина стенки тонкостенной трубы;

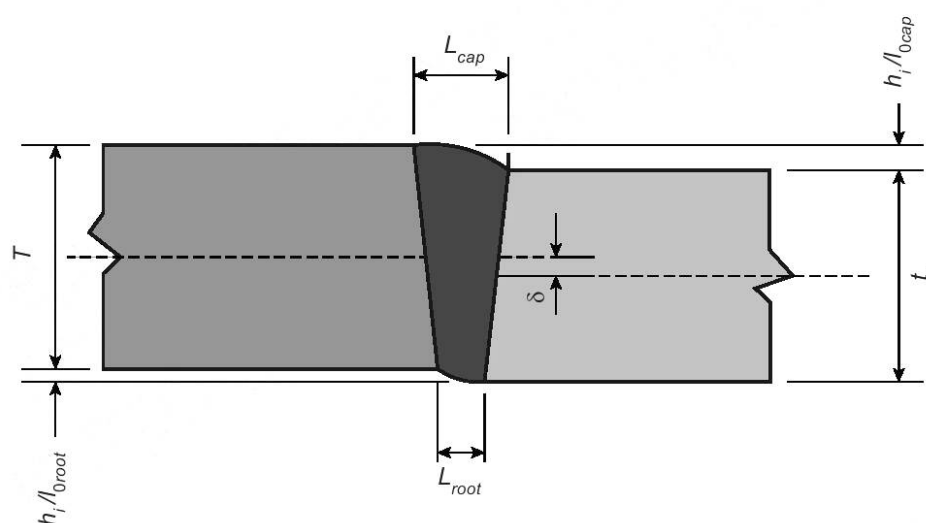
δ — смещение кромок сварного шва (разница толщины стенок, овальность, эксцентриситет центра) (см. рисунок 5);

L_{cap} — ширина лицевой стороны сварного шва;

h_i/l_{0root} — параметр смещения кромок корневой стороны сварного шва по [1];

h_i/l_{0cap} — параметр смещения кромок лицевой стороны сварного шва по [1];

D — наружный диаметр трубы.



T — толщина стенки толстостенной трубы; t_c — толщина стенки тонкостенной трубы; L_{cap} — ширина лицевой стороны сварного шва; L_{root} — ширина корневой стороны сварного шва; δ — смещение кромок сварного шва; h_i/l_{0cap} — параметр смещения кромок лицевой стороны сварного шва по [1]; h_i/l_{0root} — параметр смещения кромок корневой стороны сварного шва по [1]

Рисунок 5 — Схематичное изображение смещения кромок кольцевого сварного шва

7.3.10 В расчете SCF допустимо использовать значение δ (см. рисунок 5), определяемое по формуле

$$\delta = \frac{h_i/l_{0cap} + h_i/l_{0root}}{2}. \quad (8)$$

7.3.11 Параметр h_i/l_0 — см. [1]. Допустимо указывать меньшее значение h_i/l_0 , чем максимальные значения, указанные в [1], если такие значения обоснованы.

7.3.12 Для внутренней поверхности и односторонних сварных швов более низкий SCF может быть рассчитан следующим образом:

$$SCF_{root} = 1 + (SCF_{cap} - 1) \cdot \frac{L_{root}}{L_{cap}}, \quad (9)$$

где L_{cap} — ширина лицевой стороны сварного шва (см. рисунок 5), мм;

L_{root} — ширина корневой стороны сварного шва (см. рисунок 5), мм;

SCF_{cap} — SCF для дефектов внешней поверхности, определенных из приведенных выше уравнений.

7.3.13 Допускается применение правила Нейбера к кривой условной деформации под нагрузкой (см. рисунок 6). Правило Нейбера определяется следующим уравнением:

$$\sigma_2 \cdot \varepsilon_2 = \sigma_1 \cdot \varepsilon_1 \cdot SCF^2, \quad (10)$$

где SCF — коэффициент концентрации напряжений;

σ_1 — номинальное условное напряжение (исключая SCF), МПа;

ε_1 — номинальная деформация (исключая SCF);

σ_2 — фактическое условное напряжение (включая SCF), МПа;

ε_2 — фактическая деформация (включая SCF).

Условное напряжение, МПа

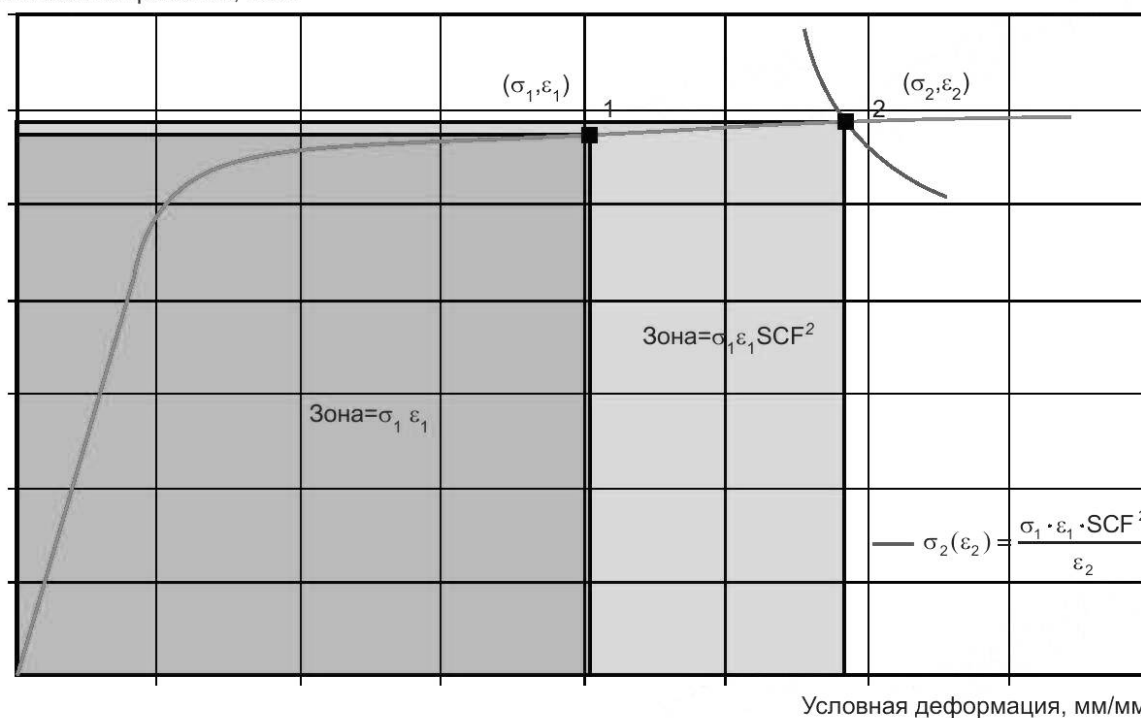


Рисунок 6 — Схематичное изображение правила Нейбера для сварного шва

7.3.14 Если средняя разница в пределе текучести между смежными трубами превышает 100 МПа, различия в жесткости могут значительно увеличить уровень напряжения в кольцевых сварных швах. В таких случаях рекомендуется выполнять анализ механики разрушения твердых 3D FEM или более точно определять приложенные напряжения с помощью специальных анализов FEM (см. раздел 8, приложения А и Б).

7.3.15 FAD не должна распространяться на произвольно большие пластические деформации, и для оси L_r ($L_r = \sigma_{ref}/YS$) рекомендуется использовать предел отсечки, обозначаемый как $L_{r-отсечка}$ или $L_{r, max}$.

7.3.16 В зависимости от решения опорного напряжения используются следующие максимальные значения L_r , max:

- круговой дефект поверхности в цилиндре: для оценок на основе деформации допустимо определять значение отсечки L_r в качестве условной UTS/YS исходной трубы, представляющей характеристическую кривую высокого напряжения-деформации для соответствующего состояния материала. Предельное значение отсечки L_r не должно превышать 1,5 для материалов С-Mn;

- поверхностный дефект на пластине: используются истинные значения YS и UTS (см. таблицу 3).

7.3.17 YS может быть определен как $R_{t0,5}$ или $R_{p0,2}$. Если кривая напряжения-деформации имеет площадку текучести, предел текучести должен быть определен как R_{eL} (см. рисунок 1).

7.3.18 Свойства вязкости разрушения должны быть описаны кривой сопротивления разрыву с нижней границей, как описано в 9.3. Кривая сопротивления должна быть репрезентативной для материалов, процедур сварки и рассматриваемых условий материалов (температура, процесс деформации и окружающая среда).

7.3.19 Вязкость разрушения должна быть описана нижней кривой сопротивления разрыву, если $\epsilon_{l, nom}$ превышает 0,4 % (см. раздел 9).

7.4 Категория III, внутреннее избыточное давление

7.4.1 Если кольцевое напряжение меньше $0,15 \cdot f_y$, то двухосевой эффект довольно незначителен и двухосная коррекция не требуется. Аналогично, если продольная деформация составляет менее 0,2 %, двухосный эффект будет весьма незначительным и двухосную коррекцию не выполняют. Если продольные деформации превышают 0,2 % ($\epsilon_{l, nom}$ не менее 0,2 %), а внутреннее избыточное давление превышает $0,15 \cdot f_y$ окружного напряжения, то приложенное напряжение P_m может быть определено в соответствии с одним из следующих подходов:

а) максимальное продольное двухосное напряжение в трубопроводе или райзере определяется FEM-анализом, который включает влияние внутреннего избыточного давления;

б) двухосное продольное напряжение σ_{b-a} рассчитывается по следующей формуле:

$$\sigma_{b-a} = \frac{\sigma_h}{2} + \sqrt{\sigma_{u-a}^2 - \frac{3}{4} \cdot \sigma_h^2}, \quad (11)$$

где σ_{u-a} — одноосное продольное напряжение, определенное из $\epsilon_{l, nom}$ и кривой одноосного напряжения-деформации, МПа;

σ_h — кольцевое напряжение (внутреннее давление), МПа;

σ_{b-a} — двухосное продольное напряжение, МПа;

в) двухосный эффект не включен в приложенное напряжение, но, чтобы компенсировать этот эффект, образцы SENB с высоким ограничением должны быть испытаны для обеспечения консервативной вязкости разрушения. Данный подход не рекомендуется для случаев, когда продольная деформация $\epsilon_{l, nom}$ превышает 0,4 %.

7.4.2 Истинная одноосная кривая напряжения-деформации должна использоваться для определения FAD, а одноосная деформация напряжения должна использоваться для определения значения L_r . Возможные несоответствия должны быть учтены, в том числе и для состояний двухосного стресса. Допустимо применять правило Нейбера, основанное на двухосном напряжении и кривой одноосного напряжения.

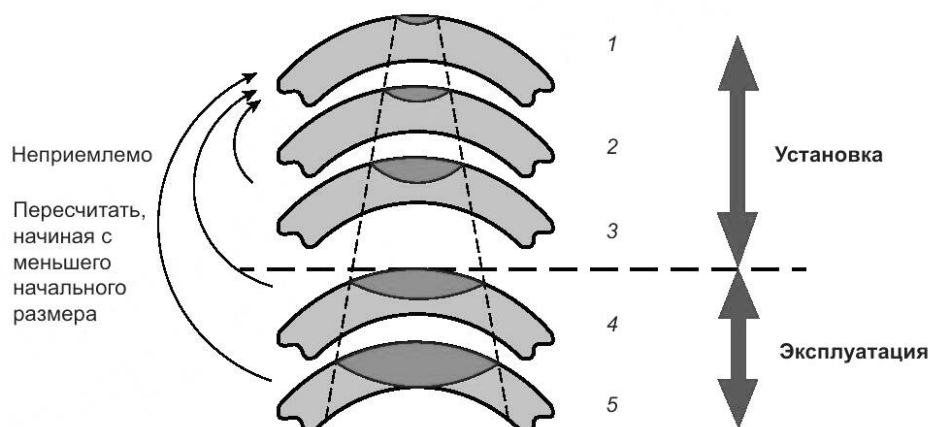
7.5 Категория IV, сочетающая рост усталостной трещины и разрывов

7.5.1 Все типы статических и динамических нагрузок, относящихся к кольцевым сварным швам в трубопроводе или райзере, должны учитываться для оценки предельного состояния усталости и разрушения:

- нагрузки во время установки (укладка в барабаны, S-укладка и J-укладка), обычно рассматриваемые как контроль смещения с указанными максимальными уровнями деформации;
- динамические нагрузки, когда трубопровод или райзер находятся между технологическим судном и местом касания;
- высокое напряжение или деформация при изгибе трубы к морскому дну (прогиб);
- динамические нагрузки в состоянии ожидания до запуска в эксплуатацию (свободные пролеты и т. д.);

- динамические нагрузки на стадии эксплуатации (свободные пролеты, боковые пряжки/петли расширения и т. д.);
- максимальное продольное напряжение в процессе эксплуатации (проверка разрушения в конце срока службы).

7.5.2 Комбинированный подход оценки усталости и разрушения на различных стадиях жизненного цикла морского трубопровода или райзера схематично представлен на рисунке 7.



1 — начальный размер дефекта; 2 — определение разрыва от каждого приращения деформации (подтверждается, что увеличенный дефект не является критическим); 3 — рост трещины от циклических напряжений во время установки (конечный дефект должен быть меньше размеров критических дефектов, оцененных для максимальной деформации при изгибе (и на более поздней стадии эксплуатации). Возможная проверка на разрыв и разрушение (при провисе); 4 — рост трещин от циклических напряжений на всех этапах после установки. Конечный дефект должен быть меньше критического размера дефекта на разных этапах; 5 — максимальное напряжение в работе окончательно проверено (проверка разрушения в конце срока службы)

Рисунок 7 — Схематичное изображение роста дефекта на различных стадиях жизненного цикла морского трубопровода или райзера

7.5.3 Критический размер дефекта с учетом случая статической нагрузки (проверка разрушения) должен быть определен в соответствии с 7.3 и учтен при определении усталостного ресурса. Оценка роста усталостной трещины должна проводиться с использованием соответствующего закона усталостной нагрузки и роста усталостной трещины, чтобы определить усталостную долговечность от начального размера дефекта и до достижения размера критического дефекта.

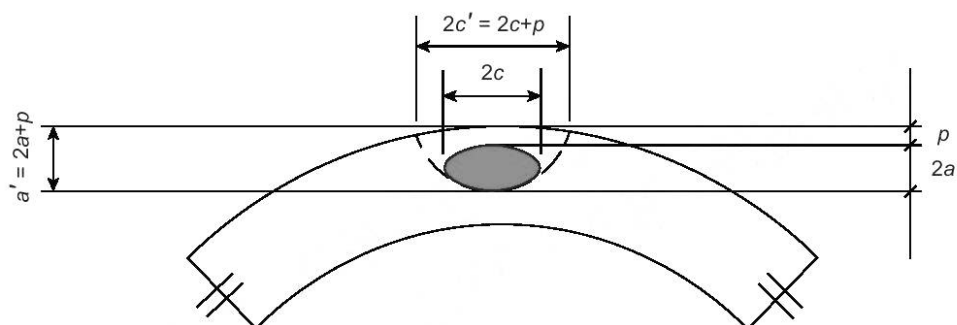
7.5.4 Для трубопроводов, плакированных или с внутренним покрытием, и райзеров усталостная долговечность должна приниматься равной времени, необходимому для наличия дефектов в корне, чтобы развиться через толщину плакированного/покрытого слоя.

7.5.5 В некоторых ситуациях рекомендуется комбинировать различные динамические и статические нагрузки при оценке усталости и разрушения на основе механики разрушения:

- большое количество сварных швов подвергается значительной пластической деформации (системный эффект, такой как наматывание установки), и многие из этих сварных швов классифицируются как чувствительные к усталости в соответствии с 5.3;
- определенный кольцевой шов имеет дефект сварного шва определенного размера и будет подвергаться различным комбинированным максимальным и динамическим нагрузкам. Такие оценки часто называют оценками соответствия целям или пригодности для обслуживания. В таких случаях $DFF_{ЕСА}$ должен составлять половину соответствующего DFF_{S-N} .

7.5.6 Если только максимальные дефекты разрушения внешней поверхности оценены и использованы для получения критериев приемлемости АУЗК для всех типов дефектов сварки, встроенные дефекты, близкие к поверхности, должны быть перекалифицированы в более крупные дефекты разрушения поверхности, соответствующие ГОСТ Р 54382.

7.5.7 Рекомендуемое правило должно учитывать внутренние дефекты как дефекты разрушения поверхности, где высота дефекта определяется как сумма измеренной высоты внедренного дефекта плюс высота связки, если половина высоты внедренного дефекта больше высоты связки согласно рисунку 8.



Примечание — Если $a > p$, то необходимо переквалифицировать в дефект поверхностного разрушения

- $a' = 2a + p$;

- $2c' = 2c + p$.

Рисунок 8 — Схематическое изображение переквалификации внутреннего дефекта в дефект разрушения поверхности

7.5.8 Необходимо выполнять оценку разрывов и нестабильных трещин, когда дефект определяется как разрушающий поверхность, а дефект должен быть указан как внутренний дефект при оценке динамической нагрузки. Если внутренний дефект подвергается большой пластической деформации (или нескольким приращениям, например, намотке) с последующей динамической нагрузкой, необходимо применять следующий метод оценки:

- определить дефект разрушения поверхности (выбранная длина и высота), подверженный соответствующему напряжению;
- дефект увеличивается при разрыве перед применением нового приращения напряжения по мере необходимости. Это продолжается, пока все приращения деформации не будут оценены;
- необходимо выполнить проверку, что дефект не является критическим и что он не растет больше, чем было определено;
- при необходимости учета циклических нагрузок исходный размер дефекта поверхности плюс суммарный разрыв определяется как внутренний дефект с выбранной высотой связи;
- усталостные нагрузки прикладываются к внутреннему дефекту и рассчитывается рост усталостной трещины. Если связка становится нестабильной, как это определено в следующем пункте, дефект должен рассматриваться как поверхностный дефект для остальных случаев нагрузки в зависимости от ситуации;

- разрыв связки следует определять, когда высота связки p составляет минимум:

- высота разрыва связок p меньше a' , где a' — половина высоты дефекта, включая накопленные разрывы и рост усталостной трещины (это обычно будет иметь место в случаях, когда довольно значительные максимальные продольные напряжения необходимо оценить) согласно рисунку 8;
- разрушение связки из-за пластического разрушения, где дефект определяется как внутренний дефект с использованием эталонных напряжений и коэффициентов интенсивности напряжений для плиты (см. [5]);
- допускается продолжать проводить анализ роста усталостной трещины после появления поверхностного дефекта, если этот дефект не является критическим. Если дефект увеличивается по толщине в течение расчетного срока службы, анализ должен начинаться заново с меньшего начального размера дефекта или увеличенной высоты связки;
- процесс продолжается до тех пор, пока максимально допустимые высоты дефектов не будут установлены для каждой начальной высоты связки и не будут определены длины дефектов.

7.5.9 Для встроенных дефектов в средах, неклассифицированных как кислые, допустимо использовать параметры FCG для воздуха (см. [5]). При увеличении трещины до поверхностной трещины соответствующие условия окружающей среды следует учитывать при выборе соответствующих параметров FCG.

7.5.10 Параметры роста усталостной трещины должны отражать среду внутри трубопровода или райзера.

7.5.11 Если трубы с внутренним покрытием или плакированные, внутренние дефекты, растущие по толщине слоя CRA (вкладыш, плакированный или наложенный шов в зависимости от ситуации), должны быть определены как отказ.

7.5.12 Если нестабильный разрыв оценивается по окончании срока службы, толщина стенки t_c , мм, должна быть определена по следующей формуле:

$$t_c = t - t_{fab} - t_{corr}. \quad (12)$$

7.5.13 Если максимальное продольное напряжение ниже $0,9 \cdot f_y$ (на основе напряжений) и материал должен быть пластичным, усталостные трещины могут расти почти на всю толщину стенки, не вызывая нестабильного разрушения (см. рисунок 2). В таких случаях можно не оценивать критический размер дефекта в конце срока службы (критический размер дефекта в работе). Специальные испытания на вязкость разрушения и на растяжение с учетом этого случая нагрузки и соответствующего состояния материала могут быть исключены.

7.5.14 Для определения критических размеров дефектов для нагрузки на основе напряжений и сварных швов, классифицированных как чувствительные к усталости, рекомендуются следующие подходы:

- если продольное напряжение, включая концентрации напряжений, ниже $0,5 \cdot f_y$ и охрупчивание маловероятно, критическая высота дефекта может быть определена как $0,75 \cdot t_c$ без оценки нестабильных трещин (не выполняются оценка нестабильной трещины или испытания на вязкость разрушения для случая нагрузки);

- если продольное напряжение, включая концентрацию напряжений, ниже f_y и охрупчивание маловероятно, критическая высота дефекта может быть определена как $0,5 \cdot t_c$ (нестабильная оценка разрушения или тестирование для случая нагрузки не выполняется).

7.5.15 При проведении оценки нестабильного разрушения с учетом напряжений на основе нагрузки необходимо использовать исходные данные согласно таблице 10.

Таблица 10 — Исходные данные

Параметр	Определение
Кривая напряжения-деформации	Согласно 9.7
$L_{r \text{ отсечка}}$	$L_{r, \max} (L_{r \text{ отсечка}})$ рассчитывается по формуле $L_{r, \max} = \frac{YS + UTS}{2 \cdot YS}$, где UTS — предел прочности на растяжение; YS — предел текучести для исходной трубы, представленный кривой напряжения-деформации, определенной для рассматриваемого варианта нагрузки
Вязкость разрушения	Минимально допустимое значение из трех отдельных значений, см. раздел 9
Остаточные напряжения после сварки	Напряжение вторичной мембраны, равное пределу текучести, $Q_m = YS$, где YS представляет состояние после сварки (обычно f_y). Если трубопровод или райзер подвергся пластической деформации, в трубопроводе или райзере будут возникать новые остаточные напряжения, и остаточные напряжения все равно следует принимать. В таких случаях допустимо определять остаточные напряжения как 40 % от f_y после сварки, $Q_m = 0,4 \cdot f_y$
Дополнительное напряжение при изгибе от возможных смещений	$P_b = (SCF_{cap} - 1) P_m$ или $P_b = (SCF_{root} - 1) P_m$ в зависимости от ситуации или правило Нейбера (см. 7.3). Подход Нейбера всегда даст правильные результаты, даже если полное напряжение ($P_m + P_b$) находится в пределах линейно-упругой области кривой напряжения-деформации

7.5.16 Коэффициент увеличения интенсивности напряжений (локальный коэффициент концентрации напряжений в корне сварного шва) M_k должен быть определен во всех оценках FCG, если сварной шов не шлифовался. Рекомендуется трехмерное решение (см. [5]). Более точные решения M_k или

точный профиль напряжения, основанный на весовой функции, могут быть альтернативно определены из анализа FEM.

7.5.17 При анализе методом FCG следует оценить дополнительное напряжение изгиба ΔP_b от возможного смещения:

$$\Delta P_b = (SCF_{cap} - 1) \cdot \Delta P_m \text{ или } \Delta P_b = (SCF_{root} - 1) \cdot \Delta P_m. \quad (13)$$

7.5.18 В дополнение к внутренним дефектам следует оценить внешние и внутренние поверхностные дефекты. Рекомендуемый подход к оценке различных типов дефектов обобщен в таблице 11.

7.5.19 Если специализированные испытания не проводятся, рекомендуются кривые, представленные в [5]. Если для сварных швов используются кривые, то среднее значение плюс две кривые стандартного отклонения для отношения напряжений R равно или больше, чем 0,5. Те же кривые рекомендуются, если сварные швы были пластически деформированными. Термообработка после сварки не считается достаточной для определения значений R ниже 0,5.

Таблица 11 — Рекомендуемые параметры роста усталостной трещины и использование M_k для различных типов дефектов, используемых при анализе роста усталостной трещины

Тип дефекта	Закон увеличения дефекта	M_k (см. [5])
Дефект внешней поверхности	На основе испытаний, проводимых в рамках конкретного проекта или на основе кривых согласно [5] для морской среды с катодной защитой в соответствующих случаях. Кривая воздуха приемлема, если оцениваемые сварные швы не размещены в зоне воздействия морской воды	Решение 2 D или 3 D. L равна ширине сварного шва на наружной поверхности
Дефект внутренней поверхности	На основе испытаний, проводимых в рамках любого проекта (например, определение кислотности) или на основе наиболее репрезентативной кривой (см. [5]), если доказано, что она консервативна	2 D или 3 D решение. L равна ширине сварного шва на наружной поверхности
Внутренний дефект	Кривая воздуха приемлема для сред, не классифицированных как кислые, или доказано, что усталостные характеристики не снижаются из-за воздействий окружающей среды	Не нормируется

7.5.20 Из-за возможных остаточных напряжений в сварном шве или их возникновения, или перераспределения остаточных напряжений от пластической деформации во время установки или эксплуатации сжимающая часть циклических напряжений может способствовать росту усталостной трещины, и весь диапазон напряжений следует учитывать при оценке.

7.5.21 Если на кольцевые сварные швы нанесено покрытие, считается приемлемым из-за короткой продолжительности использовать параметры FCG для воздуха при проведении оценки роста усталостной трещины во время установки.

7.5.22 Для учета дополнительного периода для выполнения механики разрушения оценку роста усталостных трещин необходимо выполнять с помощью DFF_{ECA} на основе следующих допущений:

- если анализ проводится для определения оставшегося срока службы известных дефектов, но эти дефекты не являются растущими усталостными трещинами (например, это обычные дефекты сварного шва, обнаруженные при неразрушающем контроле во время изготовления), а кольцевой сварной шов, содержащий дефект, не вызывает усталостные нагрузки, указанные в ECA (например, для дефектов, обнаруженных в трубопроводе, кольцевые сварные швы перед установкой, где эксплуатационные усталостные нагрузки являются наихудшим случаем, который не будет испытываться во всех местах кольцевых сварных швов), тогда рекомендуется указывать DFF_{ECA} , равный 1. Данное допущение применимо для оценочной категории IV, где максимально допустимые размеры дефектов оцениваются для определения критериев приемлемости АУЗК;

- если анализ проводится для определения оставшегося срока службы известных дефектов, но эти дефекты не являются растущими усталостными трещинами, а усталостные нагрузки, указанные в ECA, являются консервативной оценкой нагрузок определенного кольцевого сварного шва, тогда рекомендуется указать DFF_{ECA} , равный половине DFF_{S-N}

$$DFF_{ECA} = \frac{DFF_{S-N}}{2}; \quad (14)$$

- если анализы выполняются для определения оставшегося срока службы известных дефектов (обнаруженных), которые предположительно являются растущими усталостными трещинами, и усталостные нагрузки, рассмотренные в ECA, являются консервативной оценкой нагрузок, испытываемых на определенном кольцевом шве, о котором идет речь, рекомендуется указывать DFF_{ECA} , равный DFF_{S-N} .

7.5.23 DFF_{ECA} обычно включается в оценки FCG, увеличивая количество циклов нагрузки на коэффициент DFF_{ECA} .

7.5.24 При оценке FCG рекомендуется определять толщину стенки t_{fat} по следующей формуле:

$$t_{fat} = t - t_{fab} - t_{corr}/2. \quad (15)$$

7.5.25 Испытания на усталость при малоцикловой усталости (диапазоны напряжений/деформаций в упругопластическом режиме) обычно проводятся на 4-точечных изгибающих установках, где уровень деформации точно измеряется во время испытаний. Необходимо точно определить уровень деформации в трубе перед испытанием. Альтернативой при испытаниях может быть оснащение достаточным количеством тензодатчиков, прямое измерение общей кривизны, вращение концов труб или их комбинация (см. раздел 10).

8 Метод конечных элементов

8.1 Общие положения

8.1.1 Анализ механики разрушения методом конечных элементов может быть использован для оценки максимально допустимых размеров дефектов, но в таких случаях запас прочности может отличаться от определенного по методике, представленной в разделе 7. Необходимо оценить вероятность разрушения, чтобы обеспечить соответствие ГОСТ Р 54382.

8.1.2 Необходимо проводить анализ механики разрушения методом твердого трехмерного FEM. Использование других специализированных программ на основе FEM допускается, если оцениваемая геометрия и размеры дефектов сравниваются с результатами специального анализа механики разрушения трехмерных FEM.

8.1.3 Анализ механики разрушения FEM может использоваться для проверки нестабильного разрушения, оценки разрывов или для подтверждения того, что методики, указанные в разделе 7, являются обоснованными и достаточно консервативными. FEM-анализ может быть использован, если некоторые допущения, указанные для подходов к механике разрушения в разделе 7, не выполняются.

8.2 Металл сварного шва с прочностью ниже, чем у исходного металла трубы

8.2.1 Анализ механики разрушения FEM может быть использован для случаев, когда металл сварного шва имеет более низкую прочность, чем металл основной трубы.

8.2.2 Максимальный размер дефекта должен быть подтвержден анализом механики разрушения FEM, т. е. анализом максимальной высоты дефекта с соответствующей длиной дефекта и максимальной длины дефекта с соответствующей высотой дефекта, как показано на рисунке 9. Анализ механики разрушения FEM с размерами дефектов A и B должен привести к снижению CDF, чем подход, основанный на FAD, как показано на рисунке 10.

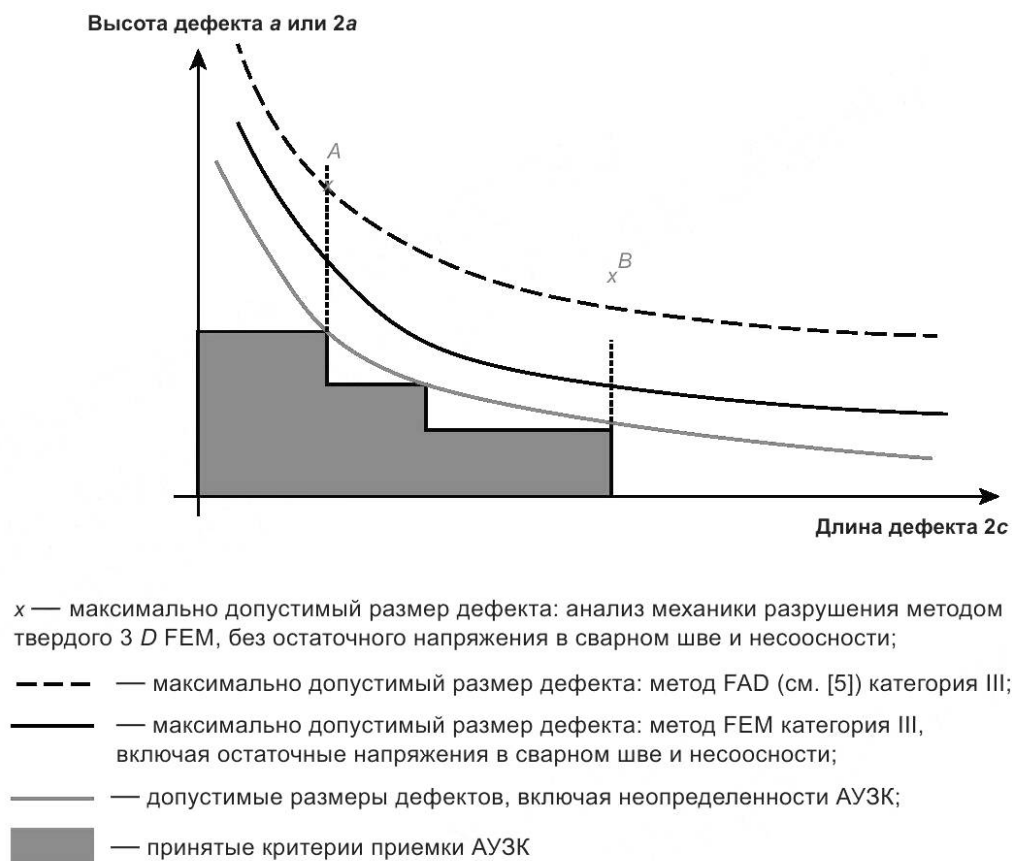


Рисунок 9 — Использование анализа механики разрушения FEM для определения допустимых значений размеров дефектов

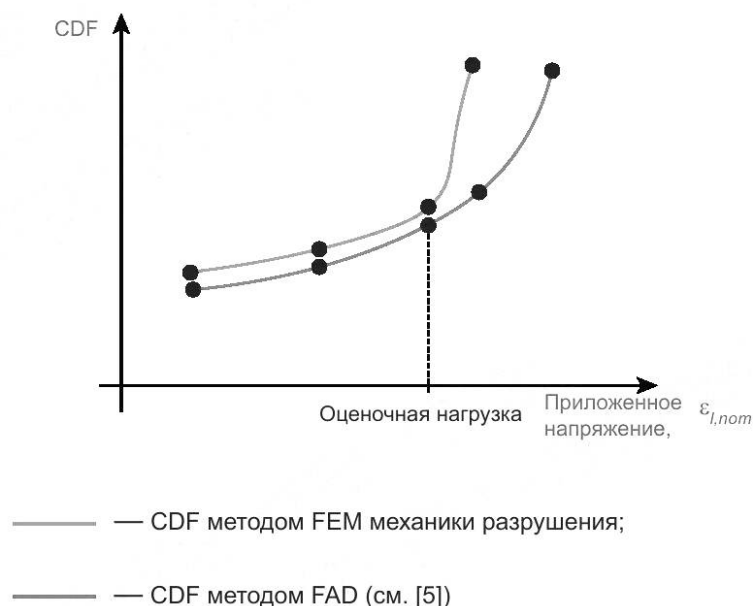


Рисунок 10 — Пример CDF, определяемой по результатам анализа механики разрушения FEM в сравнении с CDF, определяемой в соответствии с методом FAD

8.2.3 При сравнениях допустимо не включать смещение сварного шва и остаточные напряжения в сварном шве. Однако смещение и остаточные напряжения в сварном шве должны учитываться при оценке максимально допустимых размеров дефектов, как показано на рисунке 9. Также допусти-

мо сравнивать CDF, где учитываются несоосности и остаточные напряжения в сварном шве, если эти функции учтены в анализе механики разрушения методом FEM.

8.2.4 Если подтверждено, что подходы к оценке согласно разделу 7 дают CDF, которая не менее CDF, полученной в результате анализа механики разрушения методом FEM, подходы к оценке в разделе 7 могут считаться применимыми.

8.2.5 Если CDF оценивается консервативно с использованием оценочного подхода, описанного в разделе 7, без учета остаточных напряжений при сравнении, то приемлемо учитывать остаточные напряжения, увеличивая приложенное напряжение с помощью YS/E .

8.3 Конечно-элементный метод

8.3.1 При проведении анализа механики разрушения методом конечных элементов, имитирующим нагрузку на основе деформации, и определении максимальных допустимых размеров дефектов с учетом одного отдельного случая деформации рекомендуется выполнить одну из следующих процедур:

- проводят минимум три анализа FEM стационарных дефектов с различной высотой, но одинаковой длины, и CDF наносится на график в зависимости от высоты дефекта. Критерием разрушения может быть нестабильность при указанном максимальном допустимом количестве разрывов;
- проводят анализ FEM, имитирующий рост трещин.

8.3.2 Для приведенных методов определяют репрезентативные кривые напряжения-деформации и сопротивления разрыву (см. приложение А).

8.3.3 Для получения точных результатов при разработке расчетной модели необходимо:

- точно построить сетку и проверить сходимость;
- выбрать соответствующие элементы;
- точно определить свойства материала при растяжении-деформации;
- определить достаточность общей длины модели для того, чтобы конечные эффекты не оказывали чрезмерного влияния на CDF;
- определить граничные условия и нагрузки таким образом, чтобы максимально точно смоделировать фактическое состояние нагрузки.

8.3.4 Если оцениваются многократные приращения деформации (например, установка намотки на катушку), то рекомендуется, чтобы каждое приращение деформации оценивалось как монотонное событие, при котором разрыв определяется путем сравнения движущей силы трещины для разной высоты дефекта с кривой сопротивления разрыву (см. приложение Б). Взаимосвязь между напряжением и деформацией должна обновляться для каждого приращения деформации для представления фактического состояния рассматриваемого материала. Это должно основываться на испытаниях на растяжение предварительно напряженного материала для имитации второго и последующих приращений деформации (например, установка намотки на катушку) согласно 9.8. В большинстве случаев приемлемо использовать кривую сопротивления разрыву, отражающую состояние материала в заводских условиях согласно 9.3.

8.3.5 Если анализ механики разрушения FEM выполняется для случаев с разнородными материалами (например, CRA сварных швов в трубах с внутренним покрытием или плакированных) или для случаев с несоответствием потенциальной прочности сварного шва, то может быть трудно определить тип комбинации кривой напряжения-деформации, которая приведет к наибольшей движущей силе трещины, поэтому рекомендуется провести анализ чувствительности.

8.3.6 Приложенное напряжение может быть определено либо на основе вращения концов трубы, либо как напряжение при наружном изгибе примерно посередине между выемкой и концом трубы. При условиях намотки на катушку и пр. допустимо моделировать, что труба изогнута относительно кривизны с фактическим радиусом. Если имитация наматывания выполняется, когда рассматриваются трубы с различной жесткостью (разной толщиной стенки, кривыми напряжения-деформации и т. д.), примыкающие к кольцевому сварному шву, рекомендуется смоделировать изгиб относительно репрезентативной кривизны.

8.3.7 Нагрузка, основанная на напряжении, обычно не оценивается анализом механики разрушения FEM, если только материал не обладает низкими характеристиками вязкости разрушения или не выполняется оценка больших выявленных дефектов. Если нагрузка на основе напряжений оценивается с помощью анализа механики разрушения FEM, то увеличение CDF из-за остаточных напряжений в сварном шве может быть рассчитано следующим образом:

$$CDF_{WRS} = CDF \cdot 2,5 \cdot (\sigma/YS)^{-1,8}, \quad (16)$$

- где CDF_{WRS} — движущая сила трещины, включая остаточное напряжение в сварном шве;
 CDF — движущая сила трещины согласно анализу FEM без остаточного напряжения в сварном шве;
 YS — предел текучести, представляющий металл основной трубы в состоянии после сварки, МПа;
 σ — продольное напряжение в анализе FEM, МПа.

8.3.8 Если кольцевые сварные швы подвергались пластической деформации, то увеличение CDF из-за остаточных напряжений в последующих случаях нагрузки на основе напряжений можно рассчитать следующим образом:

$$CDF_{RS} = CDF \cdot 1,8 \cdot (\sigma/YS)^{-1,2}, \quad (17)$$

где CDF_{RS} — движущая сила трещины, включая остаточное напряжение после пластической деформации.

8.3.9 Возможная несоосность сварного шва и изменения жесткости между смежными трубами (разница в поперечном сечении или разница в пределе текучести, превышающая 100 МПа) должны быть включены в анализ механики разрушения FEM, если результаты используются непосредственно для определения максимально допустимых размеров дефектов (т. е. анализ механики разрушения FEM компенсирует анализ, указанный в 7.3).

8.3.10 Если анализ механики разрушения FEM используется для корректировки исходных данных для оценки расчета движущей силы трещины, то использование подхода, описанного в 7.3, обеспечит изменение кривой напряжения-деформации или эталонного напряжения таким образом, что корректная движущая сила трещины будет оцениваться для кольцевого сварного шва без перекоса.

9 Испытания

9.1 Общие положения

9.1.1 При проведении анализа механики разрушения всегда следует проводить специальные испытания на растяжение и вязкость разрушения. Для анализа роста усталостных трещин параметры роста усталостных трещин будут приемлемы, если на свойства не влияет окружающая среда, а температура для оцениваемой нагрузки ограничена максимумом плюс 100 °C для воздуха и максимумом плюс 20 °C для морской среды.

9.1.2 Материал в образцах для испытаний должен иметь такой же уровень деформации, температуры, окружающей среды и т. д., что и состояние оцениваемого варианта нагрузки. Материал должен быть подвергнут соответствующим симуляциям:

- предварительная деформация материала для получения корректных пределов текучести и деформационного упрочнения (например, рабочая фаза после пластической деформации трубопровода или райзера во время установки);
- старение, которое будет происходить со временем на материалах, которые были пластически деформированы;
- испытания должны проводиться при соответствующей температуре, если температура может изменить свойства материала;
- необходимо учитывать влияние окружающей среды при испытаниях.

9.1.3 Рекомендуется проводить испытания на вязкость разрушения и испытания на растяжение на материалах и при физических условиях, указанных в таблице 12.

9.1.4 Температуры при испытаниях должны учитывать соответствующие оценки температуры T_{ass} , и испытания могут быть релевантными как для низких, так и для высоких температур согласно таблице 13.

Т а б л и ц а 12 — Рекомендованные условия при испытаниях на вязкость разрушения и на растяжение

Параметры анализа	Физическое условие, подлежащее проверке
Анализ механики разрушения в тех случаях, когда материал не подвергался пластической деформации до нагрузки, рассматриваемой в анализе	Качество выполненной сварки в соответствующей среде и температуре ¹⁾
Анализ механики разрушения, когда материал подвергался пластической деформации до нагрузки, рассматриваемой в анализе	Напряженный и выдержанный в соответствующих окружающей среде и температуре материал ^{1), 2), 3), 4)}
¹⁾ Температура испытаний указана в таблице 13. ²⁾ Если к кольцевым сварным швам применяются несколько больших приращений деформации, например при намотке на барабан, последующие приращения деформации растяжения обычно происходят после сжатия, и допустимо предварительное сжатие материала до проведения испытаний на растяжение (незначительное влияние на кривые сопротивления разрыву). В качестве альтернативы могут использоваться полученные свойства. ³⁾ Некоторые материалы показывают незначительное изменение вязкости разрушения и сопротивления разрыву из-за пластической деформации, а испытания в состоянии после сварки приемлемы, если это может быть обосновано. ⁴⁾ Следует учесть, что старение происходит после первого запуска в эксплуатацию, когда в трубопроводе или райзере повышается температура. Старение является наиболее значимым для свойств при растяжении и часто демонстрирует довольно незначительные изменения в вязкости разрушения и сопротивлении разрыву. Следовательно, испытание на вязкость разрушения в условиях деформации и старения может быть опущено, если это обосновано.	

Т а б л и ц а 13 — Рекомендуемые температуры при испытаниях на вязкость разрушения и на растяжение

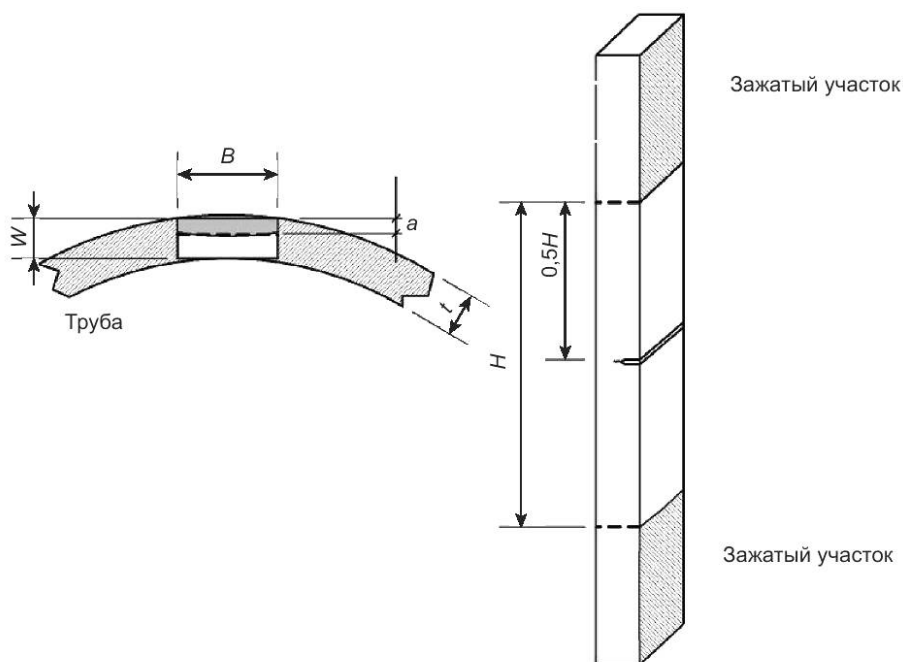
Температура при испытаниях ¹⁾	Трубы C-Mn и 13Cr	Трубы 22Cr и 25Cr
$T_{ass,min}$ ²⁾	Применяется при $T_{ass,min} < 0\text{ }^{\circ}\text{C}$	Применяется при $T_{ass,min} < 0\text{ }^{\circ}\text{C}$
Комнатная температура RT	Приемлемо при $0\text{ }^{\circ}\text{C} \leq T_{ass} \leq 50\text{ }^{\circ}\text{C}$	Приемлемо при $0\text{ }^{\circ}\text{C} \leq T_{ass} \leq 20\text{ }^{\circ}\text{C}$
$T_{ass,max}$	Применяется при $T_{ass,max} > 50\text{ }^{\circ}\text{C}$	Применяется при $T_{ass,max} > 20\text{ }^{\circ}\text{C}$
¹⁾ При необходимости проведения анализа механики разрушения как для низких, так и для высоких температур, рекомендуется проводить испытания как при высоких, так и при низких температурах. ²⁾ При проведении испытаний на растяжение при T_{min} меньше $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ они могут быть заменены испытаниями при комнатной температуре, если оцениваемое напряжение контролируется нагрузкой (на основе напряжения).		

9.2 Испытание на вязкость разрушения

9.2.1 Свойства вязкости разрушения должны быть определены в программе испытаний на вязкость разрушения с использованием образцов с односторонним надрезом на растяжение (SENT). Типичная конфигурация образцов SENT и рекомендуемые размеры образцов представлены на рисунке 11 (см. также [1]).

9.2.2 Стандартный вырез со стандартной усталостной предварительной трещиной необходимо делать с W не менее 8 мм. Более тонкие образцы могут быть изготовлены с вырезом EDM, если доказано, что материал является пластичным. Рекомендуется, чтобы B равнялось $2W$ и чтобы образцы были как можно большего размера.

9.2.3 Свойства вязкости разрушения должны быть установлены на основе соответствующих процедур сварки, и обычно должны быть проверены как металл шва, так и микроструктура FL/HAZ. Испытания SENT и SENB представлены в [6], [7], [8] соответственно.



Примечание — Рекомендуемые размеры:

$$1 \leq B/W \leq 2$$

$$0,2 \leq a/W \leq 0,5$$

$$H = 10W.$$

W — толщина образца для испытаний; B — ширина образца для испытаний; a — глубина надреза в образце; t — толщина стенки трубы; H — ширина рабочей части образца

Рисунок 11 — Рекомендуемые размеры для образцов SENT

9.2.4 Если материал подвергся пластической деформации (например, намотка на барабан при установке) и нестабильному разрушению, оценка выполняется на более поздней стадии (например, во время работы), где максимальное продольное напряжение ниже Y_S приемлемо для использования результатов испытаний на вязкость разрушения для установки или определения критических размеров дефектов, как описано в 7.5.

9.2.5 Если испытание на вязкость разрушения невозможно и $\varepsilon_{l,nom}$ превышает 0,4 %, рекомендуются испытания всего участка трубы или испытания сегмента трубы, как описано в разделе 10.

9.2.6 Вязкость разрушения может быть выражена через значение J_{mat} или смещение отверстия вершины трещины $CTOD_{mat}$. Процедуры расчета $CTOD$ и J приведены в [7].

9.2.7 В общем случае не рекомендуется преобразовывать значения $CTOD$ в J или наоборот. Если J рассчитывается из испытаний на вязкость разрушения, J также следует использовать при анализе FAD и наоборот. Для преобразования значений J_{mat} в значения $CTOD_{mat}$ или $CTOD_{mat}$ в значения J_{mat} допустимо использовать следующее уравнение:

$$J_{mat} = CTOD_{mat} \cdot R_{p0,2} \cdot 1,517 \cdot (R_{p0,2}/R_m)^{-0,3188}, \quad (18)$$

где $R_{p0,2}$ — предел текучести испытываемого материала;

R_m — предел прочности при растяжении, представляющий испытываемый материал.

9.2.8 Если J_{mat} преобразуется из значений $CTOD_{mat}$, низкие значения $R_{p0,2}$ и R_m должны использоваться для получения консервативных результатов. Если значения $CTOD_{mat}$ преобразуются из J_{mat} , следует использовать высокие значения $R_{p0,2}$ и R_m , чтобы обеспечить достаточно консервативные результаты. Высокие и низкие значения могут быть определены, как описано в 9.5 и 9.6 соответственно.

9.2.9 Можно оценить K_{mat} по результатам испытаний с V-образным надрезом по Шарпи, используя обоснованные значения Шарпи в корреляциях вязкости разрушения. Тем не менее, результаты счи-

таются менее надежными, и не рекомендуется оценивать целостность кольцевых швов трубопровода или райзера на основании результатов испытаний с V-образным надрезом по Шарпи.

9.2.10 Если используются различные комбинации материалов и наплавки, может быть трудно проверить свойства вязкости разрушения всех типичных микроструктур с использованием стандартных образцов для испытаний на вязкость разрушения. Одним из возможных способов может быть тестирование небольших образцов с надрезом согласно рисунку 12.

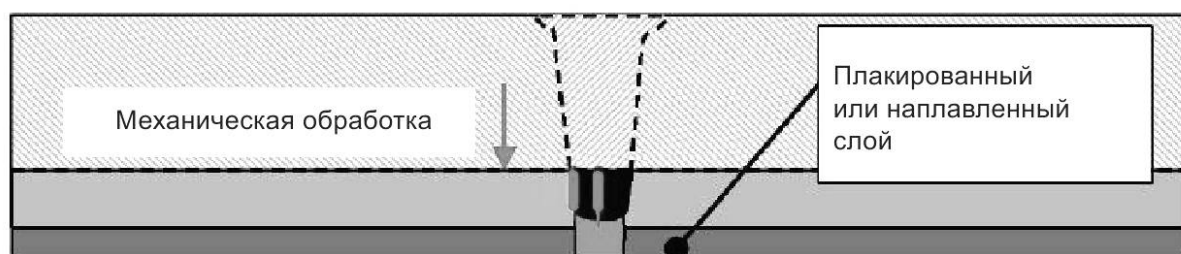


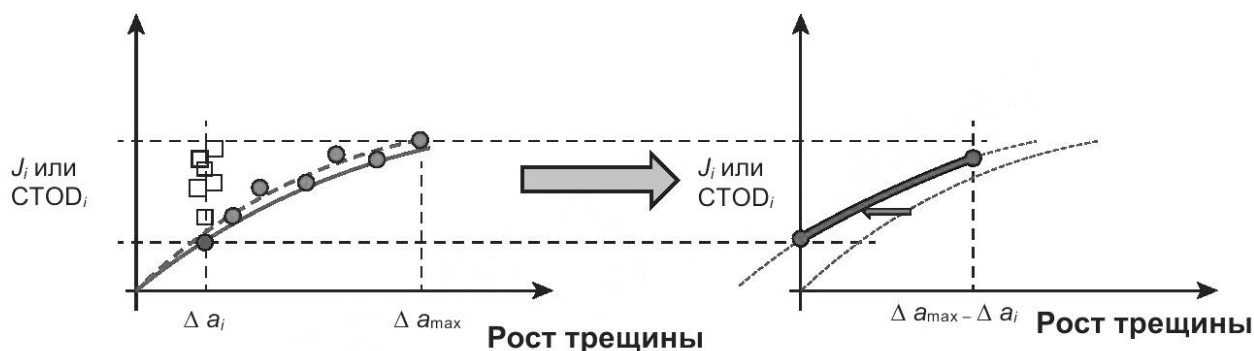
Рисунок 12 — Испытания микроструктуры на вязкость разрушения в корне CRA кольцевых швов плакированных трубопроводов или с покрытием

9.3 Определение кривых сопротивления разрыву

9.3.1 Определение кривых сопротивления разрыву необходимо при $\epsilon_{l, nom}$ больше 0,4 %.

9.3.2 Кривые R (кривые J или CTOD), которые должны использоваться при оценке разрывов в соответствии с настоящим стандартом, должны быть характерной низкой кривой, определяемой следующим образом:

- метод нескольких образцов с минимум шестью действительными контрольными точками. Нижняя граница R -кривой установлена и используется в оценках. Точки данных испытаний не должны быть ниже характеристической кривой сопротивления разрыву;
- метод одиночного образца с минимум тремя действительными испытаниями и нижней граничной кривой, представляющей все результаты оценок (характеристическая кривая сопротивления разрыву подбирается таким образом, чтобы ни одна из частей отдельных трех кривых сопротивления одного образца не находилась выше характеристической кривой сопротивления);
- R -кривая, основанная на нескольких образцах, где инициация разрыва не включена, как описано ниже и на рисунке 13.



а) R -кривая, используемая для первого приращения деформации

б) R -кривая, используемая для последующих приращений деформации

- — результаты SENT; ● — возникновение разрывов; □ — зона растяжения;
- — кривая регрессии; ——— — нижняя граница кривой сопротивления разрыву;
- — кривая разрыва, указанная после 1-го приращения деформации;
- — нижняя граница кривой сопротивления разрыву

Рисунок 13 — Схематичное изображение подхода к настройке кривой сопротивления разрыву с учетом начала разрыва

9.3.3 Кривая сопротивления разрыву, применяемая в оценках, не должна превышать максимальное удлинение трещины, измеренное для репрезентативных испытаний SENT. Испытательные образцы, которые дают значительные внезапно появляющиеся или нестабильные трещины, не должны использоваться для получения R -кривой. Если в образцах внезапно появляются или присутствуют нестабильные трещины до достижения максимальной зоны нагрузки, то данные материалы не подходят для испытаний на деформацию. В таких случаях рекомендуется внести изменения в процедуры сварки или наплавки.

9.3.4 Если для построения R -кривой выполняется более шести SENT испытаний, допустимо не учитывать самые низкие значения, определенные в таблице 14. Тем не менее, недопустимо игнорировать образцы со значительными трещинами или нестабильными переломами до достижения максимальной зоны нагрузки (см. рисунок 13).

Т а б л и ц а 14 — Рекомендуемые правила построения R -кривой при выполнении более шести SENT испытаний (несколько образцов)

Количество действительных результатов испытаний на вязкость разрушения SENT	R -кривая
6	Все шесть значений, нет точки ниже R -кривой
От 8 до 10	Самый низкий результат испытаний может быть проигнорирован до или после определения R -кривой, ни один из оставшихся результатов теста не должен быть ниже R -кривой
От 12	Два самых низких результата испытаний могут быть проигнорированы до или после R -кривой, определенной, что ни один из оставшихся результатов испытаний не должен быть ниже R -кривой

9.3.5 Если используется процедура для одного образца, рекомендуется построить характеристическую R -кривую так, чтобы ни одна из R -кривых, полученных в результате испытаний, не была ниже характеристической кривой, использованной в оценках. Необходимо первоначально сгенерировать кривую регрессии средней мощности, а затем понизить эту кривую, пока ни одна контрольная точка не окажется ниже кривой.

9.3.6 Допускается не включать затупление, то есть расширение трещины ниже начала разрыва, если возникновение разрывов (CTOD_i или J_i) определяется (см. [7]), как показано на рисунке 13, для ситуаций, когда сварные швы не сжимаются между приращениями деформации.

9.3.7 Сопротивление расширению трещин, выраженное в J_{mat} или CTOD_{mat} при смещении трещины 0,2 мм относительно линии затупления, не рекомендуется в качестве определения возникновения разрывов.

9.3.8 В расчете применяют полуэмпирическую модель для измерения зоны растяжения на всех поверхностях разрушения. При движущей силе трещины ниже J_i или CTOD_i дефект не будет расти, и кривая сопротивления разрыву на рисунке 13 б) может быть указана для всех приращений деформации, кроме первого. Этот подход применим только для метода испытаний с несколькими образцами и только для серий, в которых до максимальной нагрузки не было обнаружено внезапно появляющихся или нестабильных трещин.

9.3.9 Если используется общий подход ECA и испытываются только три образца SENT, то для всех испытаний SENT измеряется рост трещины, включая притупление (всего минус a₀). Для каждого набора (три образца) один образец должен быть испытан за пределами максимальной нагрузки (смещение выемки надреза V при максимальной нагрузке, умноженная, например, на 1,1), один образец должен быть испытан до приблизительной максимальной загрузки и один образец должен быть разгружен до максимальной нагрузки.

9.3.10 В испытания кривой сопротивления могут быть включены следующие условия:

- три образца с надрезом в центре сварного шва и три образца с надрезом в микроструктуре FL/HAZ испытываются с использованием различных отверстий с надрезом, по крайней мере, один после максимальной нагрузки;
- три последних испытания проводятся в месте, показывающем наименьшее сопротивление разрыву.

9.4 Определение вязкости разрушения с одним значением

9.4.1 Определение вязкости разрушения с одним значением (в одной точке) при $\epsilon_{l,nom}$ не более 0,4 % и нагрузке на основе напряжений.

9.4.2 Для случаев нагрузки, учитывающих уровни продольной деформации ниже 0,4 %, оценка на разрыв не выполняется, при этом допустимо определять вязкость разрушения по одному параметру, представленную наименьшим из минимум трех испытаний SENT для каждого места надреза. Если проверено более трех образцов, может быть установлено значение, эквивалентное наименьшему из трех, как описано в таблице 15.

9.4.3 Все результаты испытаний должны представлять одну однородную группу (идентичная микроструктура и условия испытаний и т. д.).

9.4.4 Если минимальная вязкость разрушения составляет менее 70 % от среднего значения для трех, или если максимальное значение составляет более 140 % от среднего значения для трех, разброс считается чрезмерным, и рекомендуются дополнительные данные испытаний.

Т а б л и ц а 15 — Рекомендуемое правило для определения вязкости разрушения по одному значению

Количество результатов испытаний на вязкость разрушения	Эквивалентная вязкость разрушения
От 3 до 5	Самый низкий
От 6 до 10	Второй по величине
От 11 до 15	Третий по величине

9.5 Испытания на растяжение

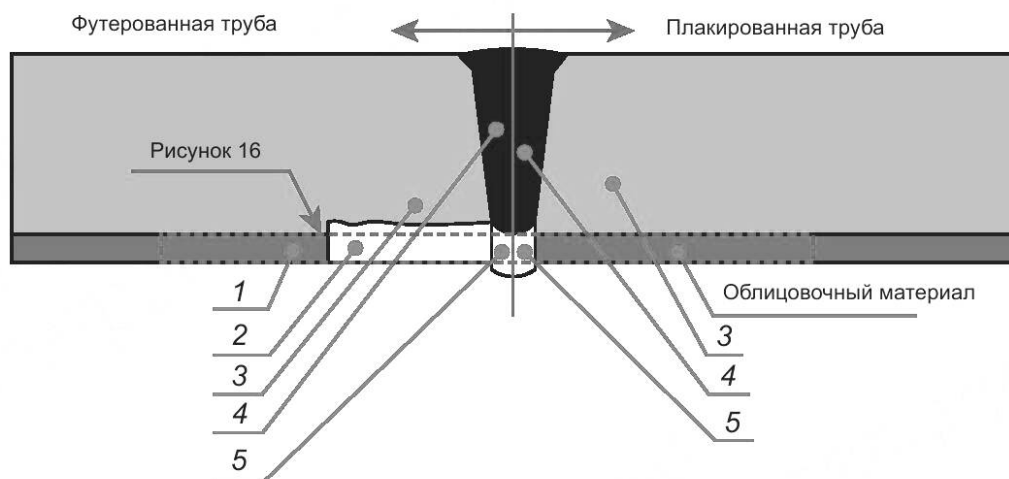
9.5.1 Свойства при растяжении изменяются из-за температуры и пластической деформации. Поскольку движущая сила трещины зависит от формы и уровня кривых напряжения-деформации, важно, чтобы кривые напряжения-деформации были репрезентативными при оценке механики разрушения. Соответствующие условия материала и температуры, как описано в таблицах 12 и 13, должны быть проверены.

9.5.2 Рекомендуется проводить испытания на растяжение по ГОСТ Р 54382 (см. также [1]).

9.5.3 Для сварных швов CRA в плакированных или футерованных трубах необходимо проводить испытания материалов на растяжение.

9.5.4 Проведение испытаний на растяжение для подтверждения прочности необходимо выполнять на пяти участках кольцевого шва и околошовной зоны. Указанные участки представлены на рисунке 14:

- материал исходной трубы;
- сварочный шов;
- корень/горячий проход (если отличается от сварного шва);
- материал плакированный/вкладыш;
- наплавка.

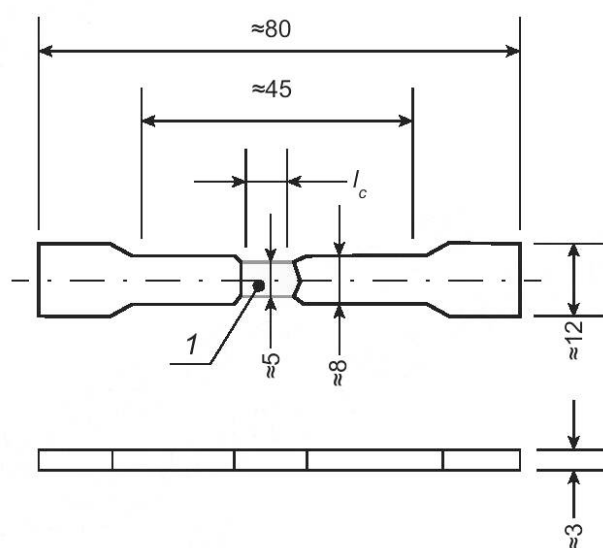


1 — материал футеровки (см. рисунок 16); 2 — наплавка; 3 — исходная труба; 4 — присадочный шов; 5 — корневой сварной шов/горячий проход

Рисунок 14 — Схематичное изображение участков кольцевого сварного шва и околошовной зоны, для которых выполняют кривые напряжения-деформации материала

9.5.5 На рисунке 15 представлен образец конструкции для испытаний на растяжение корневых сварных швов/горячих проходов. Этот образец также может быть использован для наложенных сварных швов и сварных швов в направлении поперечной сварки, l_c должна быть максимально возможной ширины.

9.5.6 Испытания на растяжение футеровки, плакированного слоя и наплавленного шва (более короткий образец) будут возможны с использованием прямоугольных образцов согласно рисунку 16.



l_c — ширина сварного шва; 1 — корневой сварной шов/горячий проход

Рисунок 15 — Образец для определения на растяжение корневой сварной шов/горячий проход

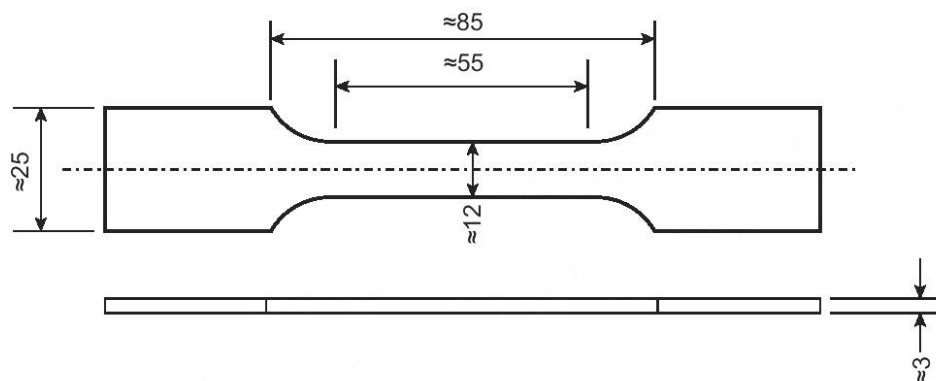


Рисунок 16 — Рекомендованный образец для определения на растяжение наплавляемого/футерованного слоя

9.5.7 Поскольку материалы CRA и материалы С-Мп имеют некоторый разный модуль упругости, необходимо предусмотреть некоторые более низкие кривые напряжения-деформации для материалов CRA по сравнению с исходной трубой С-Мп, если это ограничено до деформации 0,5 %, т. е. материалы CRA должны пересекать кривые деформации С-Мп до деформации 0,5 % (см. рисунок 17).

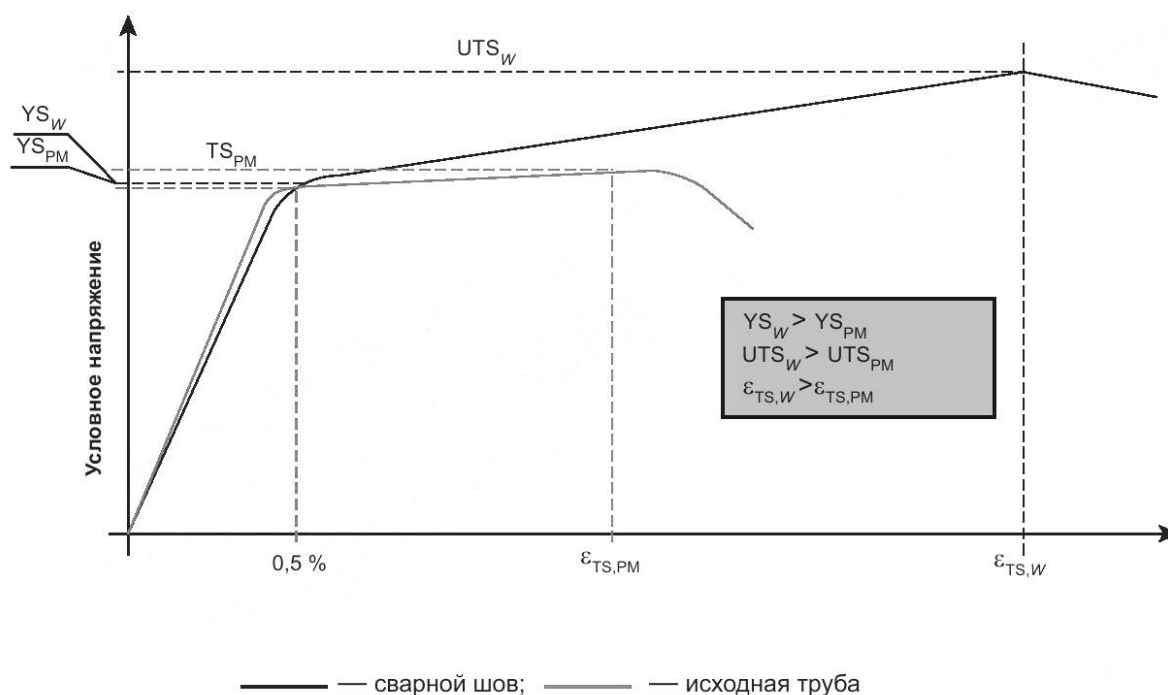


Рисунок 17 — Определение кольцевого шва с прочностью не менее металла основной трубы (разные материалы)

9.5.8 Если невозможно определить кривые напряжения-деформации для различных материалов, приемлемо использовать испытание на растяжение поперечного шва, чтобы продемонстрировать, что сварной шов, по меньшей мере, такой же прочный, как и исходный материал, так что подходы к оценке, описанные в разделе 7, могут быть использованы.

9.6 Определение кривых напряжения-деформации для оценок на основе деформации

9.6.1 Кривая напряжения-деформации, используемая в анализах механики разрушения на основе деформации, должна представлять высокий предел текучести в сочетании с низкими свойствами деформационного упрочнения, поскольку это приведет к более высокому CDF и обеспечит достаточно консервативные результаты.

9.6.2 Если трубопровод или райзер пластически деформированы и позже подвергаются пластической деформации, для которой выполняют анализ механики разрушения на основе деформации, материал должен быть подвергнут деформации и выдержке до проведения испытаний (см. 9.8).

9.6.3 Свойства на растяжение и кривые напряжения-деформации для основанных на деформации оценок следует определять следующим образом:

а) испытания на растяжение, проводимые в процессе производства или квалификации, должны быть выданы подрядчику ЕСА, и результаты следует учитывать при построении кривых напряжения-деформации;

б) кривые напряжения-деформации вплоть до равномерного удлинения (деформация в UTS) должны быть получены из данных испытаний на растяжение;

в) свойства при растяжении, используемые в ЕСА, должны описывать характерную кривую высокого напряжения-деформации с упрочнением при низком напряжении. Эта кривая высокого напряжения-деформации должна быть построена на основе результатов испытаний на растяжение соответствующего состояния материала следующим образом:

- характеристический предел текучести, определяемый как указанный максимальный предел текучести, либо как средний предел текучести, определенный по результатам испытаний, плюс коэффициент Z , умноженный на стандартное отклонение, где Z следует взять из таблицы 16;
- предел прочности на разрыв, определяемый как минимальное отношение UTS/YS , существующее в совокупности испытаний (то есть тесты на растяжение с самым низким отношением UTS/YS), умноженное на характерный высокий YS . Также допустимо вывести характеристику UTS таким же образом, как для YS ;
- кривая напряжения-деформации должна иметь релевантный разрыв, и деформация на UTS (равномерное удлинение) не должна быть ниже среднего значения равномерного удлинения, установленного по результатам испытаний.

9.6.4 В таблице 16 представлен характеристический предел текучести для нагрузки, основанной на деформации, определяемой как 84,1 % фрактиль (среднее значение плюс одно стандартное отклонение) с достоверностью 95 %.

Т а б л и ц а 16 — Количество стандартных отклонений Z

Количество испытаний, n	Z
3	5,01
5	2,82
10	1,93
15	1,69
20	1,57
30	1,44
50	1,32
100	1,22
∞	1,00

9.6.5 В качестве основы для кривой оценки отказа следует использовать истинные одноосные кривые напряжения-деформации. Кривые условного напряжения должны быть преобразованы в кривые истинного напряжения следующим образом:

$$s = \sigma (\varepsilon + 1), \quad (19)$$

$$e = \ln (\varepsilon + 1). \quad (20)$$

9.6.6 Формулы корреляции (19) и (20) действительны только до условных UTS.

9.7 Определение кривых напряжения-деформации для нагрузки на основе напряжений

9.7.1 Кривая напряжения-деформации, используемая в оценках механики разрушения на основе напряжений, должна быть низкой, поскольку это приведет к повышению CDF, что обеспечит достаточно

консервативные результаты. При условии, что прочность металла сварного шва равна или выше, чем у основной трубы, следует использовать кривую напряжения-деформации, представляющую исходную трубу. Кривая должна представлять продольное направление трубы.

9.7.2 Характеристическая кривая напряжения-деформации для нагрузки на основе напряжения должна быть определена с использованием одного из следующих подходов:

- на основе SMYS ($R_{t0,5}$) и SMTS с равномерным удлинением и с поправкой на температуру, если трубопровод или райзер не подвергались пластической деформации;
- на основе результатов испытаний на растяжение для типичного состояния материала, где YS и UTS определены как средние значения минус Z , умноженные на стандартное отклонение, где Z следует взять из таблицы 17. Свойства растяжения, определенные таким образом, соответствуют свойствам растяжения с вероятностью 2,3 % безотказной работы, оцененной с доверительной вероятностью не менее 95 %.

Таблица 17 — Количество стандартных отклонений Z

Количество испытаний, n	Z
3	2,95
5	2,74
10	2,52
15	2,42
20	2,37
30	2,30
50	2,23
100	2,16

9.7.3 Кривая напряжения-деформации должна включать в себя прерывистость текучести в зависимости от ситуации.

9.7.4 Данные, на основе которых вычисляются стандартные и среднеквадратические отклонения, должны быть репрезентативными для всех применяемых материалов анализируемой конструкции при соответствующих температурных, преддеформирующих и прочих условиях. В зависимости от имеющихся данных необходимо использовать комбинацию данных лабораторных испытаний (для установления влияния ключевых параметров и формы кривой напряженно-деформированного состояния в соответствующих условиях) и данных заводских испытаний в продольном направлении (для получения лучшей картины общей статистики).

9.8 Напряжение и старение

9.8.1 Для ЕСА на основе деформации следует оценить материал с высоким пределом текучести и низким уровнем деформационного упрочнения (см. 9.6). Для ЕСА на основе напряжений следует оценить материал с низким пределом текучести и высоким пределом прочности на растяжение (см. 9.7). Предварительное натяжение и старение не выполняют для ЕСА-статистики при рассмотрении первого приращения нагрузки, но их следует учитывать для последующих случаев нагрузки.

9.8.2 При установлении процедуры предварительного натяжения и старения необходимо учитывать три важных механизма материала:

- эффект Баушингера;
- деформационное упрочнение;
- старение.

9.8.3 Наиболее критическая ситуация представляет собой намотку на катушку в течение 12 часов, так как свойства при растяжении представлены самой высокой кривой напряжения-деформации с небольшим деформационным упрочнением. Однако приращение деформации может быть больше при намотке в течение шести часов в выпрямителе, и эту ситуацию также следует учитывать.

9.8.4 Для других методов установки, при которых продольная деформация превышает 0,4 %, важно, чтобы вся последовательность установки была оценена, чтобы определить наибольший прирост деформации и оценить различные приращения.

9.8.5 Если ЕСА включает ситуации, когда трубопровод или райзер уже подвергались пластической деформации, испытания на растяжение и на механику разрушения должны проводиться на материале, представляющем собой деформированный материал, который при необходимости подвергался старению. Для намоточной установки, в которой трубы будут сжиматься до последующего увеличения напряжения при растяжении, допустимо основываться на оценке вязкости разрушения при проведении испытаний на вязкость разрушения материала после сварки.

9.8.6 Если оцениваемая ситуация нагружения происходит через определенное время после пластической деформации материала, свойства при растяжении дополнительно изменяются. Необходимый период времени варьируется и в целом не определен, но эффект ускоряется при более высокой температуре. Общая рекомендация заключается в том, что старение следует учитывать после первого запуска в эксплуатацию, когда трубопровод или райзер испытывает повышенную температуру.

9.8.7 Если нагрузка, подлежащая оценке после того, как труба подверглась пластической деформации, основана на деформации, предварительное натяжение должно заканчиваться напряжением для получения репрезентативных результатов. Это наиболее важно для свойств на растяжение, поскольку это обеспечит высокую кривую напряжения-деформации с низкими свойствами деформационного упрочнения, которые будут увеличить CDF.

9.8.8 Если условия нагрузки основаны на напряжении, а трубопровод или райзер уже подвергся пластической деформации, цикл предварительного напряжения должен заканчиваться сжатием, чтобы получить кривую низкого напряжения-деформации, которая является наиболее консервативной для оценок на основе напряжения.

9.8.9 Предварительное натяжение должно моделировать один полный цикл деформации (то есть всю последовательность установки, но не непредвиденные обстоятельства), если для оперативного этапа необходимо выполнить ЕСА. Тем не менее, это не является необходимым, если доказано, что моделирование, когда материал расслаблен и только пластически деформирован при растяжении, даст такие же результаты, как если бы материал моделировался для полного цикла намотки, где последний прирост заканчивается натяжением.

9.8.10 Моделирование деформации должно выполняться на образцах сегментов, достаточных для моделирования фактической нагрузки. Образец и моделирование в целом могут быть аналогичны описанному в 10.2. После деформации материалов образцы для испытаний извлекаются из образца сегмента таким образом, чтобы испытываемый материал имел соответствующие условия деформации.

9.8.11 Если имеет место старение, рекомендуются испытания на искусственное старение при температуре 250 °С в течение одного часа. Моделирование старения выполняется после предварительного натяжения, но до испытания материалов.

10 Квалификационные испытания

10.1 Общие положения

10.1.1 Полномасштабные испытания являются наиболее репрезентативными, но сегментные образцы являются хорошей альтернативой для снижения времени и затрат на испытания.

10.1.2 Квалификационные испытания сегмента не применяются для оценки ситуаций, когда кольцевые сварные швы подвергаются пластической деформации в сочетании со значительным внутренним давлением.

10.1.3 Полномасштабные испытания или испытания сегментов рекомендуются для следующих ситуаций:

- кольцевые сварные швы, подверженные малоцикловой усталости (см. также 7.5);
- плакированные или футерованные трубопроводы, подверженные $\epsilon_{l,nom}$ больше 2,25 %;
- С-Mn материалы для трубопроводов со SMYS более 555 МПа и $\epsilon_{l,nom}$ больше 2,25 %;
- 13Cr мартенситных сталей, если $\epsilon_{l,nom}$ больше 2,25 %;
- дуплексные нержавеющие стали 22Cr и 25Cr, если $\epsilon_{l,nom}$ больше 2,25 %;
- если используются другие материалы и продольная деформация превышает 2 %.

10.1.4 Основная цель испытаний — доказать, что предельное состояние усталости и разрушения является квалифицированным. Испытания должны учитывать:

- материальное состояние для рассматриваемой нагрузки;
- температурный режим для рассматриваемой нагрузки;

- состояние нагрузки (уровень деформации/напряжения, диапазон напряжения/деформации, внутреннее давление, количество циклов и т. д.);
- частоту испытаний, если это необходимо (особенно при испытаниях в специальных условиях);
- качество сварного шва (дефекты и смещения сварного шва).

10.1.5 Квалификационные испытания должны проводиться на кольцевых сварных швах с истинными дефектами сварки.

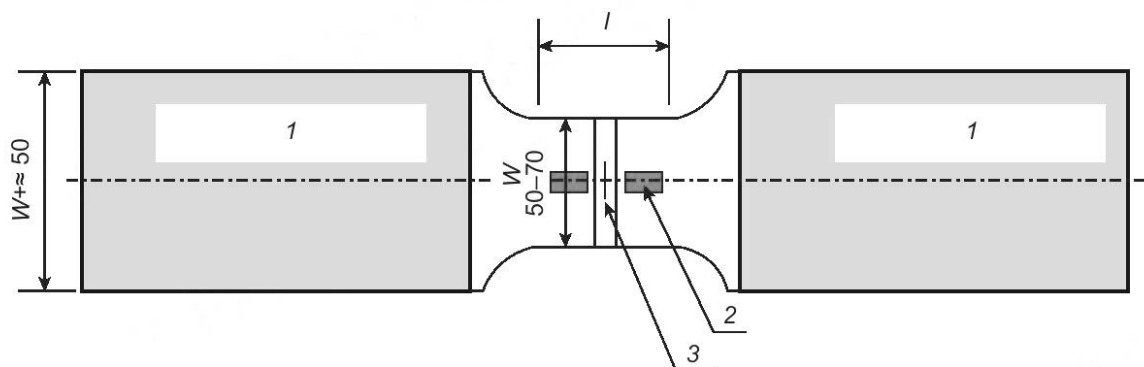
10.2 Квалификационные испытания с использованием образцов сегментов

10.2.1 Допустимо проводить квалификационные испытания только для самой критичной процедуры сварки и надреза с самой низкой кривой сопротивления разрыву. Надрез обычно должен быть изготовлен с внешней кромки сварки. Допускаются испытания образцов без шлифования внешней стороны сварного шва и высоты подкрепления корня сварного шва.

10.2.2 На основании геометрии образцов изготавливается вырез в соответствующей позиции. Высота надреза должна представлять максимально допустимую высоту, определенную для соответствующей длины надреза для трубопровода или райзера. Рекомендуется изготавливать выемку методом EDM с минимально возможной шириной, не превышающей 0,2 мм.

10.2.3 Остаточные напряжения могут быть существенно снижены при изготовлении образцов сегмента, и рекомендуется, чтобы оценка критического размера дефекта, которая является основой для размера выемки EDM, проводилась без остаточных напряжений. Однако следует использовать кривую напряжения-деформации и кривую сопротивления разрыву, используемые для оценки максимально допустимых размеров дефектов.

10.2.4 Уровень деформации в образце должен измеряться во время испытаний таким образом, чтобы можно было проверить, что моделирование фактической нагрузки является достаточно точным. Это может быть сделано с помощью датчиков смещения, измеряющих по определенной длине, или с помощью тензодатчиков, как показано на рисунке 18. Рекомендуется использовать среднее значение тензодатчиков на каждой стороне сварного шва в качестве показателя уровня деформации и использовать сторону, показывающую наименьшее значение деформации, для моделирования фактического приращения деформации.



1 — закрепление в испытательной установке; 2 — тензодатчик; 3 — вырез EDM; l — минимально возможное расстояние

Рисунок 18 — Схематичное изображение образца сегмента для измерения деформаций при квалификационных испытаниях

10.2.5 Если рассматривается несколько циклов пластической деформации, три образца должны быть испытаны следующим образом:

- первый образец монотонно нагружается до отказа. Максимальная деформация (деформационная способность) в образце сегмента должна быть выше, чем деформация в трубе;
- второй образец моделируется с несколькими приращениями деформации для намотки, полный цикл установки моделирует 12 часов, чтобы последний цикл находился в сжатом состоянии;
- третий образец моделируется до нескольких приращений деформации (обычно один полный цикл намотки составляет 12 часов) с последующей монотонной нагрузкой до отказа. Данные испытания должны подтвердить, что деформационная способность в образце сегмента выше, чем рассчитанная для трубы, также после цикла пластических испытаний.

Приложение А (справочное)

Диаграмма оценки отказов

Точность подхода FAD можно сравнить с точностью анализа механики разрушения FEM путем сравнения CDF.

CDF может быть получен из любого подхода к диаграмме оценки отказов FAD и нанесен на график как функция от приложенной нагрузки (приложенной деформации или напряжения). Построенную кривую необходимо сравнить с CDF в сравнении с приложенной нагрузкой, полученной в результате анализа FEM, как показано на рисунке А.1.

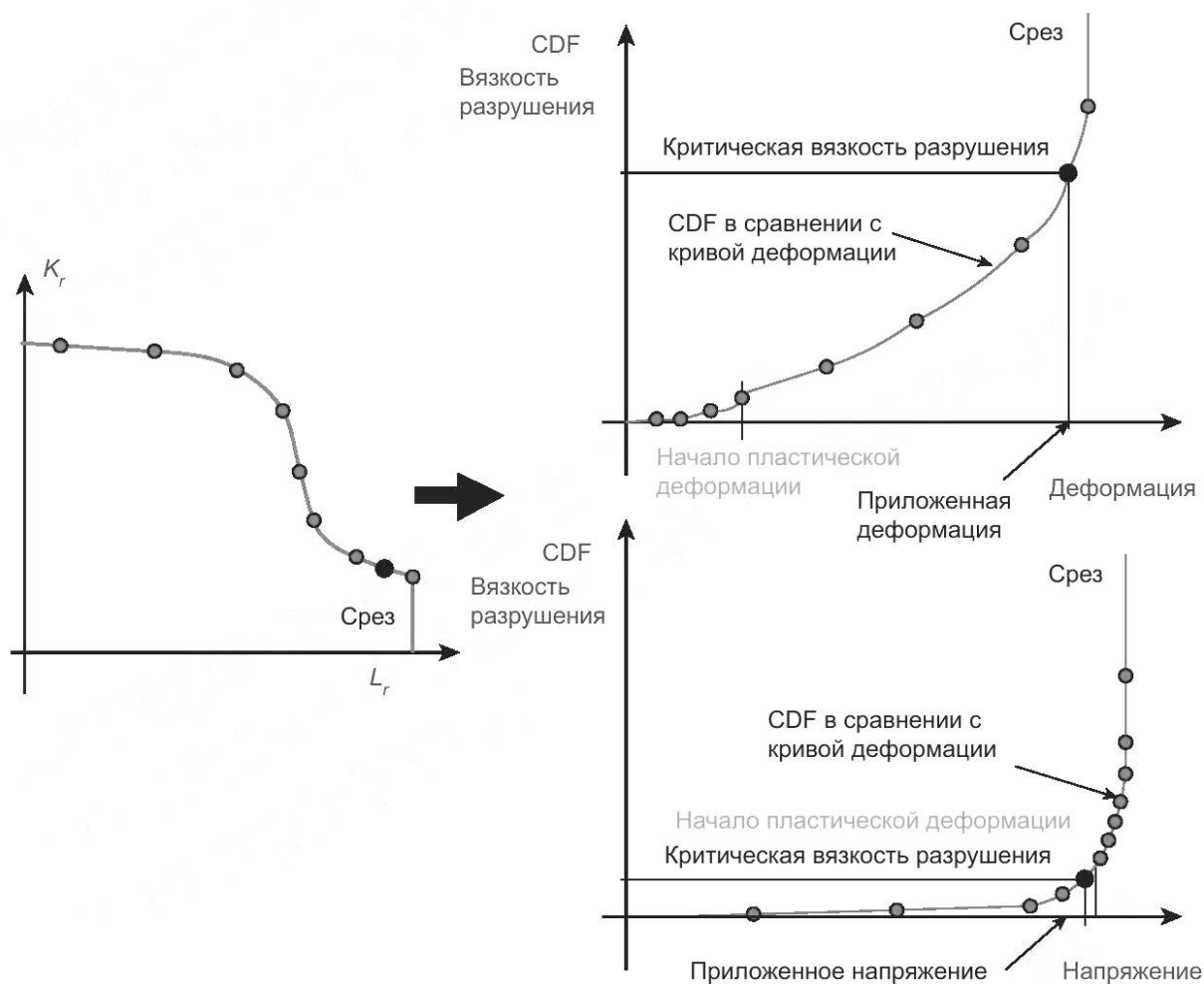


Рисунок А.1 — Схематическое изображение того, как CDF можно извлечь из оценки FAD, чтобы сравнить результаты, например с результатами анализа механики разрушения FEM

Приложение Б
(справочное)

Метод конечных элементов при анализе механики разрушения

Результаты анализа механики разрушения по методу FEM CDF можно сравнить с соответствующей нагрузкой на вязкость разрушения материала, представленной вязкостью разрушения при стабильном/неустойчивом расширении трещины (см. рисунки Б.1 и Б.2).

Важно, чтобы такие сравнения отражали нагрузку, учитываемую при оценке. Если нагрузка основана на деформации, следует сравнить CDF с приложенным напряжением, а если нагрузка основана на напряжении, следует сравнить CDF с приложенной нагрузкой.

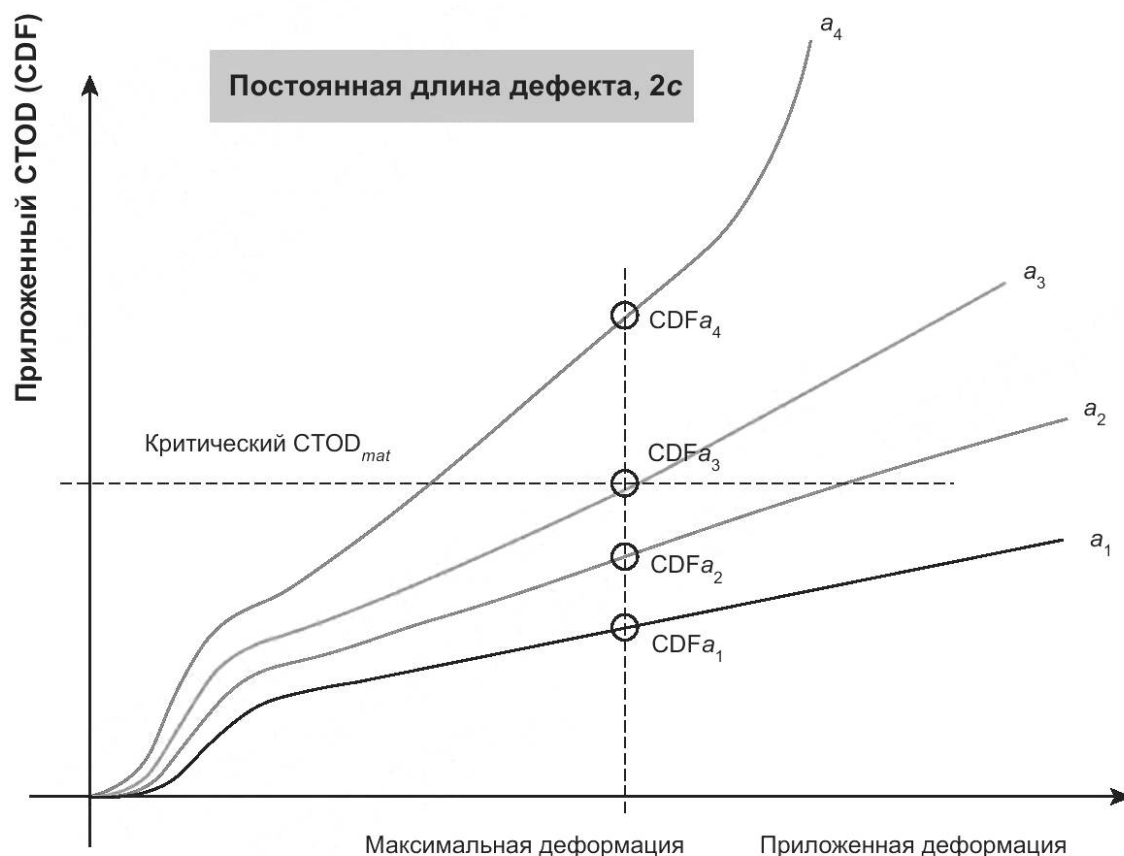


Рисунок Б.1 — Иллюстрация CDF, оцененного с помощью механики разрушения FEM, в зависимости от приложенной деформации и определения максимально допустимого размера дефекта (аналогично подходу FAD с указанием вязкости при одном разрушении)

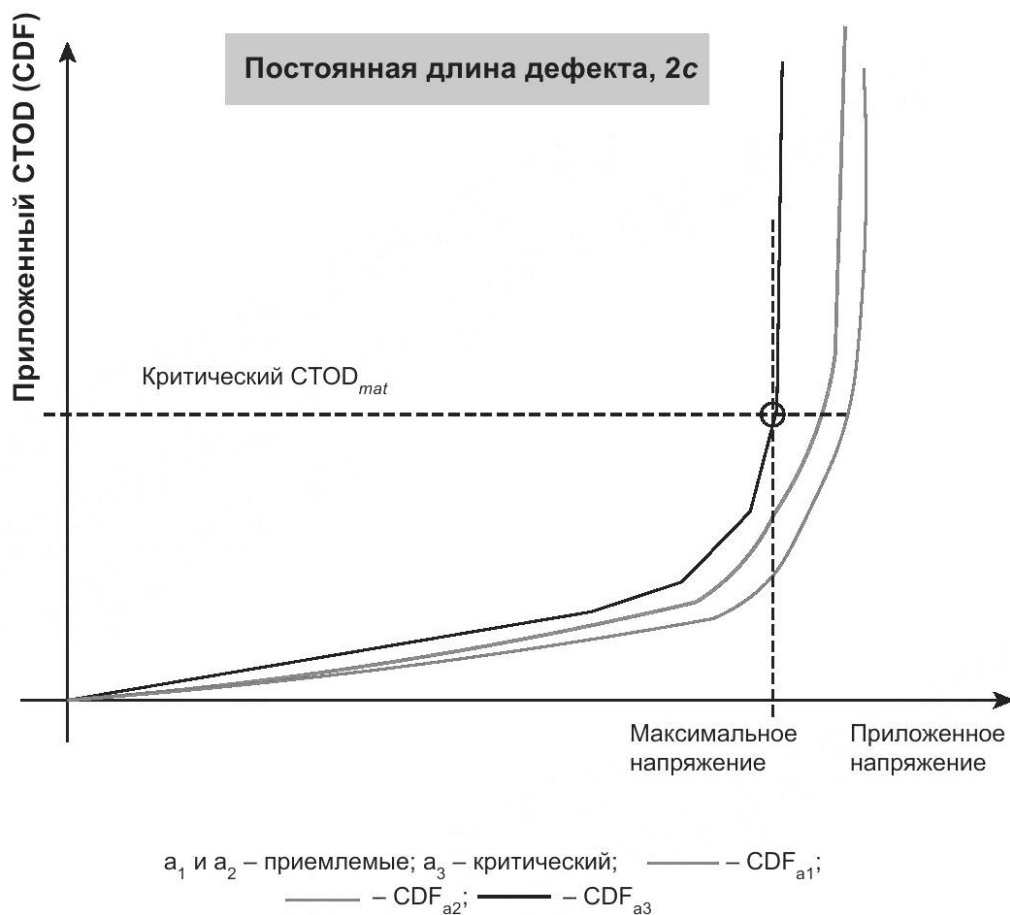


Рисунок Б.2 — Иллюстрация CDF, оцененного с помощью механики разрушения FEM, в зависимости от приложенной деформации и определения максимально допустимого размера дефекта (аналогично подходу FAD с указанием вязкости при одном разрушении)

Библиография

- [1] DNV-ST-F101 Подводные трубопроводные системы (Submarine pipeline systems)
- [2] DNV-RP-C203 Расчет усталостной прочности морских стальных конструкций (Fatigue design of offshore steel structures)
- [3] DNV-RP-F108 Оценка дефектов в сварных швах трубопровода и кольцевого шва (Assessment of flaws in pipeline and riser girth welds. Recommended practice)
- [4] Правила классификации и постройки морских подводных трубопроводов. РМРС — СПб, 2022
- [5] BSI BS 7910 Руководство по методам оценки приемлемости дефектов в металлических конструкциях (Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures)
- [6] BSI BS 8571 Методика испытаний по определению вязкости разрушения металлических материалов с помощью образцов с односторонним растяжением с надрезом (SENT) (Method of test for determination of fracture toughness in metallic materials using single edge notched tension (SENT) specimens)
- [7] ISO 12135:2021 Материалы металлические. Унифицированный метод испытания для определения вязкости разрушения под действием квазистатической нагрузки (Metallic materials — Unified method of test for the determination of quasistatic fracture toughness)
- [8] DNV-RP-F112 Дуплексная конструкция из нержавеющей стали против водородного растрескивания под напряжением (Duplex stainless steel — design against hydrogen induced stress cracking. Recommended practice)

Ключевые слова: нефтяная и газовая промышленность, системы подводной добычи, предотвращение, трещинообразование, трубопроводы, методические указания

Редактор *Е.Ю. Митрофанова*
Технический редактор *И.Е. Черепкова*
Корректор *О.В. Лазарева*
Компьютерная верстка *И.Ю. Литовкиной*

Сдано в набор 03.04.2025. Подписано в печать 09.04.2025. Формат 60×84 $\frac{1}{8}$. Гарнитура Ариал.
Усл. печ. л. 5,58. Уч-изд. л. 4,74.

Подготовлено на основе электронной версии, предоставленной разработчиком стандарта

Создано в единичном исполнении в ФГБУ «Институт стандартизации»
для комплектования Федерального информационного фонда стандартов,
117418 Москва, Нахимовский пр-т, д. 31, к. 2.
www.gostinfo.ru info@gostinfo.ru