

Вестник Евразийской науки / The Eurasian Scientific Journal <https://esj.today>

2021, №3, Том 13 / 2021, No 3, Vol 13 <https://esj.today/issue-3-2021.html>

URL статьи: <https://esj.today/PDF/27SAVN321.pdf>

Ссылка для цитирования этой статьи:

Кожин В.Н., Астафьев В.И., Иоффе А.В., Сергеева А.О., Булгаков С.А. Определение критической величины раскрытия трещины (CTOD) по испытаниям образцов на трехточечный изгиб // Вестник Евразийской науки, 2021 №3, <https://esj.today/PDF/27SAVN321.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ.

For citation:

Kozhin V.N., Astafev V.I., Ioffe A.V., Sergeeva A.O., Bulgakov S.A. (2021). Critical crack opening (CTOD) determination from three-point flexion tests of samples. *The Eurasian Scientific Journal*, [online] 3(13). Available at: <https://esj.today/PDF/27SAVN321.pdf> (in Russian)

Кожин Владимир Николаевич

ООО «СамараНИПИнефть», Самара, Россия
Генеральный директор
Кандидат технических наук

Астафьев Владимир Иванович

ООО «СамараНИПИнефть», Самара, Россия
Старший научный сотрудник
Доктор физико-математических наук
E-mail: Vladimir.astafev@mail.ru

Иоффе Андрей Владиславович

ООО «ИТ-сервис», Самара, Россия

Сергеева Анна Олеговна

ООО «ИТ-сервис», Самара, Россия

Булгаков Сергей Александрович

ООО «СамараНИПИнефть», Самара, Россия
Начальник управления
Кандидат технических наук
E-mail: BulgakovSA@samnpi.rosneft.ru

Определение критической величины раскрытия трещины (CTOD) по испытаниям образцов на трехточечный изгиб

Аннотация. Данная работа посвящена вопросам испытаний материалов по определению сопротивляемости металлов развитию трещин в тонкостенных трубопроводных системах. Работа состоит из двух частей — методике испытаний по определению трещиностойкости металла труб и определению на базе этой методики величины трещиностойкости металла труб, изготовленных из стали 13ХФА. Представлены важные термины и определения, символы и обозначения в формулах для проведения расчетов и пояснений в иллюстрациях. Работа включает фотографии разрушенных образцов стали после испытаний. В соответствии с изложенной методикой испытаний на трещиностойкость в лаборатории ООО «ИТ-Сервис» было выполнено исследование образцов из стали марки 13ХФА, изготовленных из двух фрагментов труб длиной по 200 мм, наружным диаметром 273 мм и толщиной стенки 20 мм. Испытания проводились на универсальной электрогидравлической испытательной системе INSTRON 8802 с применением образцов типа

SENB. После нанесения надреза на образцах выращивалась усталостная трещина. Готовые образцы с уже выращенной усталостной трещиной охлаждались до требуемой температуры и затем подвергались воздействию монотонно возрастающей нагрузки. В процессе испытания производилось измерение силы F , действующей на образец в каждый момент времени, раскрытия берегов надреза V и перемещения по линии действия силы (прогиб образца q), фиксируемые установленными датчиками раскрытия и перемещения. Нагружение образца останавливалось после разрушения (хрупкое распространение трещины) или после прохождения плато максимальных нагрузок. На основании полученных зависимостей и фактического измерения изломов образцов после их разрушения было рассчитано значение величины критического значения раскрытия трещины при различных значениях температуры испытания.

Ключевые слова: лабораторные испытания; образцы стали; сталь; трубы; металл; трещины; деформация

Введение

Методические рекомендации описывают метод испытания по определению деформационной характеристики трещиностойкости металлов — критического значения величины раскрытия в вершине трещины (CTOD — crack tip opening displacement) при монотонном нагружении образцов на трехточечный изгиб с контролируемым смещением. Данные рекомендации основаны на существующих стандартах Великобритании¹, США² и России³.

В соответствии с существующими методическими рекомендациями процедура испытаний заключается в следующем. Предварительно в образце создается начальная усталостная трещина при приложении переменного усилия. Затем образец подвергают действию монотонно увеличивающегося усилия и производят измерения усилия и смещения образца до момента, когда произойдет — либо мгновенное распространение трещины хрупкого разрушения, либо образец достигает состояния максимального усилия, связанного с пластическим разрушением. Приложенное при этом усилие в зависимости от величины смещения определяет некоторую точку на диаграмме нагружения. Данная точка используется для определения критического значения δ_c величины CTOD при испытании образцов на трехточечный изгиб. Экспериментальными исследованиями по определению δ_c при различных климатических условиях посвящены многочисленные работы [1–6].

1. Термины и определения

Традиционно в методических рекомендациях применяются следующие термины и определения:

Трещиностойкость — термин, определяющий способность материала сопротивляться развитию трещин при механических и других воздействиях.

¹ BS 7448-2: 1997. Fracture mechanics toughness tests — Part 2: Method for determination of K_{Ic} , critical CTOD and critical J values of welds in metallic materials.

² ASTM E1290-02. Standard Test Method for Crack-Tip Opening Displacement (CTOD) Fracture Toughness Measurement.

³ ГОСТ 25.506-85. Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении.

Нормальный отрыв — смещение берегов трещины в направлении, перпендикулярном исходной (недеформированной) плоскости трещины.

Раскрытие в вершине трещины (CTOD) — смещение берегов трещины непосредственно у ее вершины.

Критическое значение величины CTOD — значение CTOD, связанное с началом распространения трещины.

Устойчивое распространение трещины — медленное устойчивое подрастание трещины при возрастании нагрузки.

Распространение трещины хрупкого разрушения — быстрое неустойчивое подрастание трещины, которое происходит без предшествующего устойчивого ее развития.

Скачок (pop-in) — разрыв в записи зависимости нагрузки от смещения.

Примечание. Скачок соответствует внезапному увеличению смещения при внезапном уменьшении нагрузки. Впоследствии смещение и нагрузка продолжают расти относительно медленно до их соответствующих значений при скачке [7–11].

2. Символы и обозначения

В настоящих методических рекомендациях применяются следующие символы и обозначения:

a — номинальная длина трещины, мм;

a_0 — длина предварительно нанесенной усталостной трещины, мм;

Δa — величина среднего устойчивого распространения трещины, мм;

B — толщина образца, мм;

W — высота образца, мм;

S — расстояние между опорами, мм;

y — половина расстояния между точками крепления режущей кромки, мм;

z — расстояние от точки измерения раскрытия надреза над поверхностью образца, мм;

$f\left(\frac{a}{W}\right)$ — безразмерная поправочная функция;

q — смещение образца при испытании на изгиб вдоль линии нагружения, мм;

F — текущее усилие, приложенное к образцу, Н;

F_c — усилие в начале распространения трещины хрупкого разрушения или скачка, когда величина Δa меньше 0,2 мм, Н;

F_u — усилие в начале распространения трещины хрупкого разрушения или скачка, когда величина Δa больше 0,2 мм, Н;

F_m — усилие при достижении плато максимального усилия для полностью пластического поведения образца, Н;

F_f — максимальное усилие при предварительном нанесении усталостной трещины, Н;

R — коэффициент асимметрии цикла (отношение минимального к максимальному значению усилия F) при нанесении предварительной усталостной трещины;

V — текущее раскрытие образца, мм;

V_p — пластическая составляющая V , соответствующая F_c , F_u и F_m , мм;

V_c — значение V в начале распространения трещины хрупкого разрушения или скачка, когда Δa меньше 0,2 мм, мм;

V_u — значение V в начале распространения трещины хрупкого разрушения или скачка, когда Δa больше 0,2 мм, мм;

V_m — значение V при достижении плато максимального усилия для полностью пластического поведения образца, мм;

δ — текущее раскрытие в вершине трещины (CTOD), мм;

δ_c — критическое значение CTOD в начале распространения трещины хрупкого разрушения или скачка, когда Δa меньше 0,2 мм, мм;

δ_u — критическое значение CTOD в начале распространения трещины хрупкого разрушения или скачка, когда Δa больше 0,2 мм, мм;

δ_m — значение CTOD при достижении плато максимального усилия для полностью пластического поведения образца, мм;

T — температура испытания, °С;

E — модуль упругости Юнга, МПа;

ν — коэффициент Пуассона;

σ_{YS} — условный предел текучести при остаточной деформации 0,2 % при температуре испытания на разрушение, МПа;

σ_{TS} — предел прочности на растяжение при температуре испытания на разрушение, МПа;

σ_{YSP} — условный предел текучести при остаточной деформации 0,2 % при температуре нанесения предварительной усталостной трещины, МПа;

σ_{TSP} — предел прочности на растяжение при температуре нанесения предварительной усталостной трещины, МПа;

K_I — коэффициент интенсивности напряжений при плоской деформации, МПа·м^{1/2};

K_{IC} — критическое значение величины K_I (вязкость разрушения при плоской деформации), МПа·м^{1/2};

K_f — максимальное значение коэффициента интенсивности напряжений при предварительном нанесении усталостной трещины, МПа·м^{1/2}.

3. Определение критического значения CTOD

3.1 Образцы для испытаний

Для определения критического значения CTOD (критического раскрытия в вершине трещины δ_c) применяются плоские образцы прямоугольного или квадратного сечения с надрезом и предварительно выращенной усталостной трещиной (рис. 1).

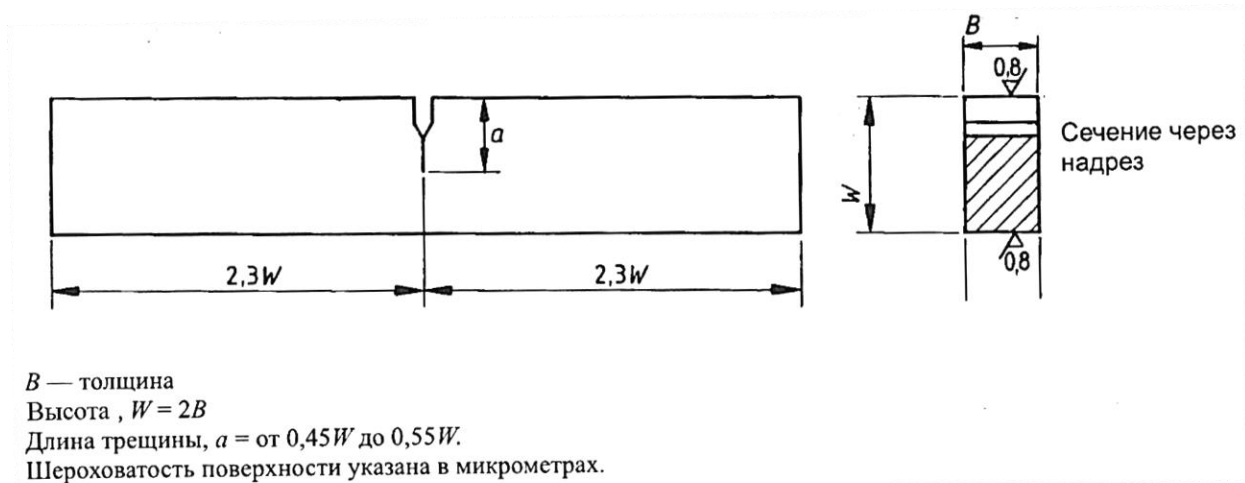


Рисунок 1. Образец на трехточечный изгиб

Профиль надреза с предварительно выращенной усталостной трещиной изображен на рисунке 2.

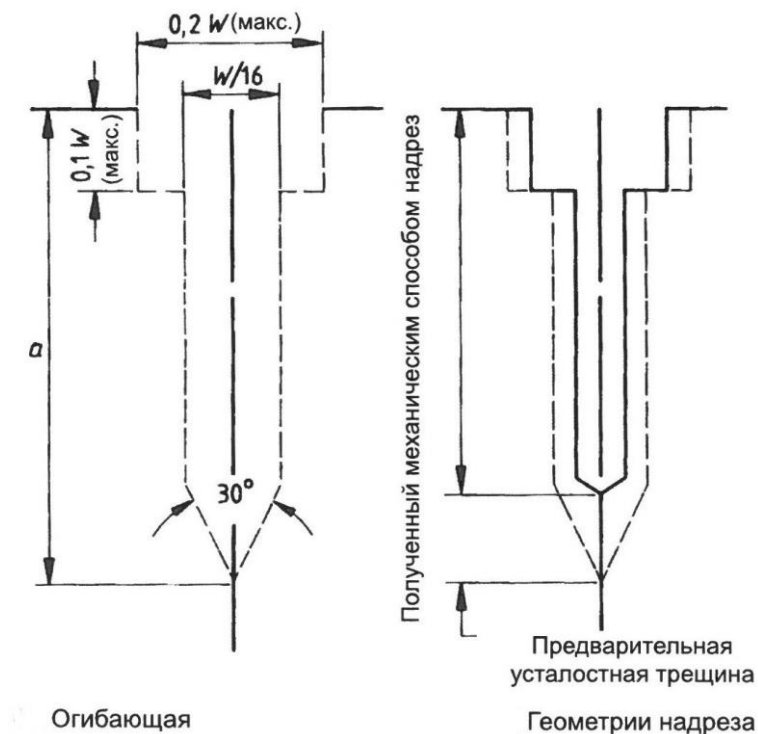


Рисунок 2. Допустимые иницирующие надрезы усталостной трещины

В качестве альтернативы, если возникновение и/или развитие усталостной трещины трудно контролировать, можно использовать конфигурацию шевронного надреза, как показано на рисунке 3. При использовании шевронного надреза, радиус корня должен быть не более 0,25 мм. Плоскость надреза должна быть перпендикулярна поверхностям образца с точностью до $\pm 2^\circ$.

3.2 Подготовка образцов и нанесение предварительной усталостной трещины

3.2.1 Все образцы должны испытываться в состоянии после окончательной термообработки, механической обработки и кондиционирования в условиях окружающей

среды. Образцы должны подвергаться окончательной механической обработке в данном конечном состоянии. Однако для материалов, для которых механическая обработка затруднена, окончательная обработка может быть выполнена после механической обработки при условии, что требуемые размеры и допуски на размер, форму и общую поверхность удовлетворяются, и полностью учитывается влияние размера образца на металлургическое состояние, вызванное определенной термической обработкой.

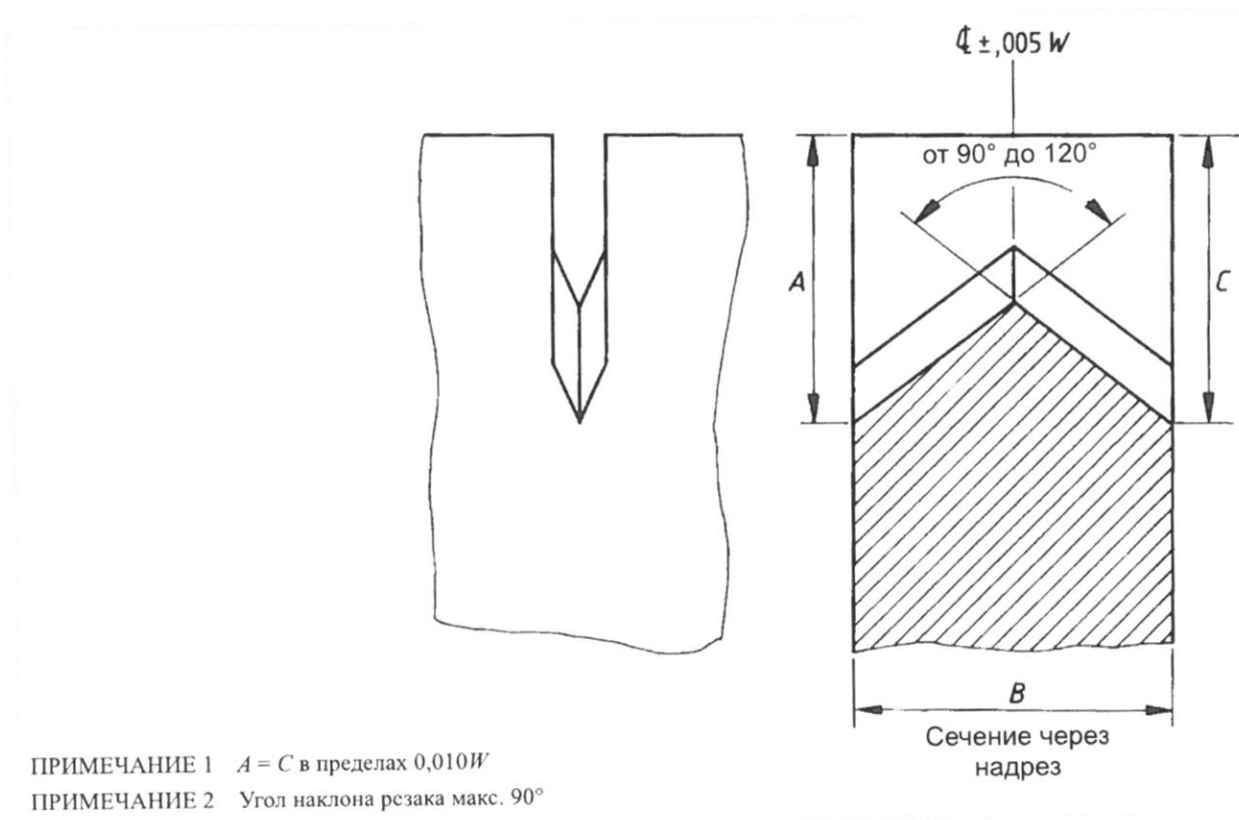


Рисунок 3. Шевронный надрез

3.2.2 Усталостную трещину вырабатывают от исходного механического надреза. Ее создание осуществляют с применением испытательных машин, позволяющих задавать и регистрировать минимальные и максимальные усилия цикла нагружения и число циклов. Способ нагружения должен обеспечивать получение заданной глубины и фронта усталостной трещины.

3.2.3 Измеряется толщина (B) и высота (W) образца. Данные значения B и W должны регистрироваться и использоваться для определения максимального усилия цикла (F_f) при выращивании предварительной усталостной трещины.

3.2.4 Испытательные приспособления для нанесения предварительной усталостной трещины должны быть такими, чтобы распределение напряжения было равномерным по толщине образца (B) и симметричным относительно плоскости предполагаемой трещины.

3.2.5 Усилие нанесения предварительной усталостной трещины должно измеряться с точностью $\pm 2,5\%$.

3.2.6 Режим циклического нагружения должен быть выбран в соответствии со следующими тремя условиями:

1. значение максимального усилия цикла F_f на финальной стадии выращивания усталостной трещины должно быть не более

$$F_f = \frac{B(W-a)^2(\sigma_{YSP} + \sigma_{TSP})}{4S}, \quad (1)$$

2. значение максимального коэффициента интенсивности напряжений K_f в цикле должно быть не более

$$\frac{K_f}{E} = 3,2 \cdot 10^{-4} M^{0,5}; \quad (2)$$

3. в испытаниях, которые дают корректные значения трещиностойкости K_{IC} материала, величина K_f должна быть не более

$$K_f = 0,6 \frac{\sigma_{YSP}}{\sigma_{YS}} K_{1C}. \quad (3)$$

Для низколегированной стали расчет по формуле (1), как правило, приводит к меньшим значениям нагрузки, чем по формуле (2), а условия корректности по K_{1C} не выполняются даже при более низкой температуре испытаний. В этом случае формула (3) при выборе нагрузки не используется.

3.2.7 Усталостная трещина ограниченной формы и размера должна образовываться от вершины надреза, сделанного механическим способом в образце, как указано в пп. (а–д):

- а) для начального распространения предварительной усталостной трещины, максимальный коэффициент интенсивности напряжений не должен превышать $1,3K_f$. Коэффициент асимметрии цикла (R) должен находиться в диапазоне от 0 до 0,1;
- б) отношение a/W должно находиться в диапазоне от 0,45 до 0,55;
- в) минимальное распространение усталостной трещины должно быть больше 1,3 мм или 2,5 % от ширины образца (W);
- г) разница между двумя измерениями длины трещины на поверхностях образца, измеренная с точностью до $\pm 0,05$ мм, не должна превышать 15 % от среднего значения двух измерений;
- д) вершина трещины должна быть в пределах ограничительной огибающей, как показано на рисунке 2. Плоскость предварительной усталостной трещины всегда должна находиться в пределах 10° от плоскости распространения трещины.

3.3 Испытательное оборудование

3.3.1 Для определения характеристик трещиностойкости используют испытательные машины с механическим, гидравлическим или электрогидравлическим приводом.

3.3.2 Предварительный расчет максимальной нагрузки с целью определения необходимой мощности испытательной машины для разрушения образца на трехточечный изгиб производят по формуле:

$$P_{max} = 0,1 \frac{(W-a_0)^2}{W} B(\sigma_{YS} + \sigma_{TS}).$$

3.3.3 Испытательная машина должна быть оборудована встроенными или переносными устройствами, предназначенными для записи диаграмм « $F-V$ » (сила — перемещение берегов надреза) и « $F-q$ » (сила — перемещение по оси действия силы (прогиб образцов)).

3.3.4 Измерения усилий выполняется с помощью силоизмерительной системы испытательной машины или датчиком сопротивления, установленным на тяге в системе нагружения машины. Устройство для измерения силы должно иметь линейную характеристику с погрешностью ± 1 %.

3.3.5 Для измерения смещения берегов надреза на образцах применяют датчики смещения тензорезисторного, индукционного или емкостного типа. Датчик смещения должен иметь линейную характеристику во всем диапазоне рабочего хода. Допускается погрешность измерения и регистрации смещения ± 2 %. Тарировка датчика производится с точностью 0,01 мм.

4. Процедура испытания

4.1 Измерение образцов

4.1.1 Размеры образцов должны соответствовать величинам, указанным в разделе 2. Измерения должны производиться как перед испытанием, в соответствии с п.п. 4.1.2–4.1.4, так и после испытаний в соответствии с п. 4.3. Измерения должны регистрироваться и использоваться для расчета СТОВ в соответствии с разделом 5.

4.1.2 Измерьте толщину образца с точностью до $\pm 0,025$ мм или $\pm 0,1$ %, в зависимости от того, что больше, но не менее чем в трех равноудаленных друг от друга точках вдоль предполагаемого пути распространения трещины. Среднее значение этих измерений принимается за толщину (B).

4.1.3 Измерьте высоту образца с точностью до $\pm 0,025$ мм или $\pm 0,1$ %, в зависимости от того, что больше, но не менее чем в трех равноудаленных друг от друга точках по высоте образца на линии не более 10 % номинальной ширины от плоскости трещины. Среднее значение этих измерений принимается за высоту (W).

4.1.4 При использовании направленных наружу присоединенных режущих кромок, следует измерить толщину режущей кромки (z). Если в их качестве используются бритвенные лезвия, то половина их толщины должна быть принята за размер z .

4.2 Процедура проведения испытания

4.2.1 Образец помещают на опоры, устанавливают датчик раскрытия трещины и проводят (при необходимости) охлаждение или нагрев до заданной температуры испытаний.

Расстояние между опорами S при испытании образца должно находиться в пределах $S = 4W \pm 0,02W$, фактическая величина S должна быть зафиксирована с точностью до $\pm 0,5$ %. Точность установки образца на опоры по совпадению линии действия нагрузки с надрезом должна быть ± 1 % S и перпендикулярно к осям опор с точностью до $\pm 2^\circ$.

4.2.2 Температура испытания образца должна контролироваться и регистрироваться с точностью до ± 2 °С. Испытания должны проводиться на месте, в подходящей низко- или высокотемпературной среде. Перед испытанием в жидкой среде, образец должен удерживаться в жидкости в течение не менее 30 сек/мм толщины (B) после того, как поверхность образца достигнет испытательной температуры. При использовании газообразной среды, должно использоваться время выдержки не менее 1 мин/мм толщины.

Если образец переносится из одной среды в другую и обе они находятся при испытательной температуре после истечения требуемого времени выдержки, то образец

должен быть выдержан в новой среде в течение времени, затраченного на перенос, после того, как будет снова достигнута температура испытания.

4.2.3 Нагружают образец с заданной скоростью перемещения нагружающей траверсы. Нагружение проводят до момента нестабильного разрушения образца (явного срыва на диаграмме деформирования) или до момента явного перехода через максимум нагрузки. После этого датчик раскрытия трещины снимают и производят долом образца при температуре испытания.

4.2.4 Выполняют необходимые измерения в изломе образца: длины исходной усталостной трещины и величины стабильного подраста трещины, если таковой имеется.

Точность измерения усилия при испытании должна быть не менее $\pm 1\%$. Точность измерения раскрытия берегов трещины должна превышать $\pm 0,003$ мм при измерении перемещений до 0,3 мм и $\pm 1\%$ при больших перемещениях.

4.2.5 Запись зависимости усилия от смещения испытания обычно имеет вид одного из шести типов, показанных на рисунке 4. Записи типов (1), (2) и (3), включающие распространение трещины в пределах или близко к линейной зависимости усилия от смещения, скорее всего, приведут к получению достоверных значений вязкости разрушения при плоской деформации K_{IS} . Самые высокие значения упруго-пластической вязкости разрушения (CTOD) будут связаны с типами записей (4), (5) и (6).

4.3 Измерение длины трещины после испытания

4.3.1 После завершения испытания, поверхность разрушения образца должна быть исследована и измерена для определения первоначальной длины трещины (a_0) и величины устойчивого распространения трещины (Δa).

Примечание. Когда испытание заканчивается до разлома образца пополам, необходимо разломить образец, чтобы выявить предварительную усталостную трещину и любое распространение трещины, которое произошло во время испытания. Последнее может быть отмечено путем термического тонирования или применения нескольких циклов усталостного нагружения перед разломом образца. Это должно быть сделано с осторожностью, чтобы свести к минимуму любую дополнительную деформацию образца. Охлаждение ферритных сталей, достаточное для обеспечения хрупкого поведения при разломе образца, будет целесообразно.

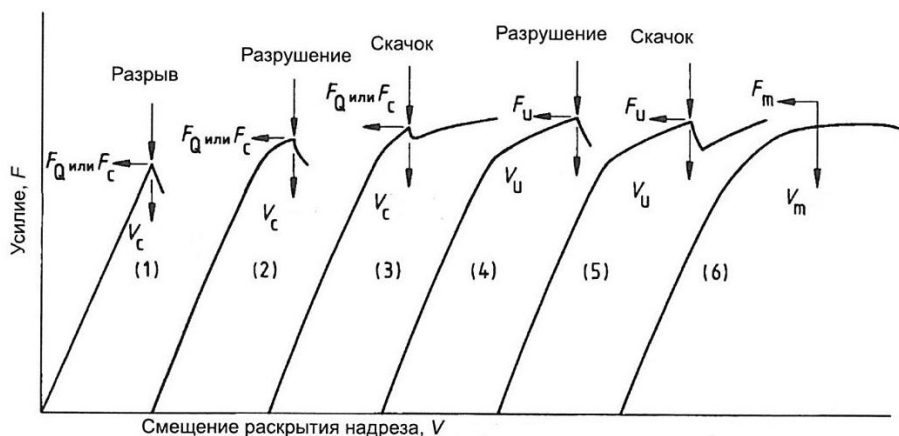


Рисунок 4. Характерный тип кривой зависимости усилия от смещения раскрытия надреза

4.3.2 Измеряется длина трещины (a) до вершины предварительной усталостной трещины с точностью до $\pm 0,25\%$ a или $\pm 0,05$ мм, в зависимости от того, что больше. Измерения должны проводиться на девяти равноотстоящих друг от друга точках, где внешние точки расположены на 1% B от поверхности образца. Первоначальную длину трещины (a_0) получают, сначала усредняя два измерения во внешних точках, а затем усредняя это значение с семью внутренними точками. Данный расчет будет включать взвешенное суммирование размеров длины трещины, разделенное на восемь.

Для того чтобы результат испытания был действительным, длина трещины (a_0) должна удовлетворять следующим требованиям:

- а) отношение a_0/W должно находиться в пределах от 0,45 до 0,55;
- б) разница между любыми двумя из девяти измерений длины трещины не должна превышать 10% a_0 ;
- в) никакая часть фронта предварительной усталостной трещины не должна быть ближе к иницирующему надрезу трещины, чем на 1,3 мм или $2,5\%$ W , в зависимости от того, что больше;
- г) предварительная усталостная трещина должна находиться в пределах соответствующей огибающей для соответствующего значения a_0/W (см. рис. 2);
- д) плоскость предварительной усталостной трещины должна находиться в пределах 10° от плоскости распространения трещины.

Средняя длина трещины (a_0) должна регистрироваться для определения значений CTOD.

4.4 Устойчивое распространение трещины

4.4.1 Если образец разрушается путем распространения трещины хрупкого разрушения до первого достижения плато максимального усилия (рис. 4, тип записи (4)), поверхность разрушения должна быть проверена на предмет наличия устойчивого распространения трещины, в области между передним фронтом усталостной трещины и началом распространения трещины хрупкого разрушения.

4.4.2 При наличии свидетельства устойчивого распространения трещины, оно должно быть измерено с точностью до $\pm 0,05$ мм. Величину устойчивого распространения трещины (Δa) получают, усредняя измерения во внутренних и внешних точках поверхности разрушения.

4.4.3 При наличии свидетельства остановленного распространения трещины хрупкого разрушения и последующего устойчивого распространения трещины, и когда это может быть связано со скачковым поведением последующего разрушения до первого достижения плато максимального усилия (рис. 4), суммарные величины Δa до каждого скачка и разрушения должны быть измерены и записаны, как указано в п. 4.4.2.

Примечание. Суммарные величины Δa будут включать в себя любое устойчивое распространение трещины перед предварительной усталостной трещиной и любое устойчивое распространение трещины, связанное с любым скачком, до того, как будет зафиксировано конкретное скачкообразное или разрушающее поведение.

4.4.4 Форма предварительной усталостной трещины и любое свидетельство устойчивого распространения трещины или остановленного распространения трещины хрупкого разрушения до первого достижения плато максимального усилия должны регистрироваться на диаграмме поверхности разрушения. На диаграмме также должны регистрироваться любые

необычные особенности поверхности трещины, такие как расщепления или расслоения в плоскостях, перпендикулярных поверхности трещины.

Примечание. Расщепления и расслоения могут привести к скачкам без какого-либо остановленного распространения трещины хрупкого разрушения в плоскости предварительной усталостной трещины.

5. Обработка результатов испытаний

5.1 Общие положения

5.1.1 Критическое значение CTOD определяют по информации о размерах образца для испытаний (B , W , a_0 и, при необходимости, z), условном пределе текучести при остаточной деформации 0,2 % (σ_{YS}) при температуре испытания на разрушение, а также конкретных данных из записи зависимости усилия (F) от смещения (V) при испытании на разрушение.

5.1.2 Скачки, дающие как падение усилия (величина y на рис. 5), так и увеличение смещения (x на рис. 5) менее чем на 1 %, должны игнорироваться. Скачок трещины под номером n считается значимым, и критическое значение CTOD определяется именно для этого события, если выполняется условие $d_n > 5$ %, где величина d_n определяется по следующей формуле (рис. 5):

$$d_n(F_1) = 100 \left[1 - \frac{D_1}{F_1} \left(\frac{F_n - y_n}{D_n - x_n} \right) \right] \%, \quad (4)$$

5.2 Определение CTOD

5.2.1 Зависимость $F(V)$ усилия (F) от смещения раскрытия надреза (V) обычно бывает одной из шести типов, показанных на рисунке 4.

5.2.1.1 Определение F_c и V_c , или F_u и V_u

Исходя из записи зависимости усилия (F) от смещения раскрытия надреза (V) (рис. 4, тип записей (1)–(5)), находим критические значения F_c и V_c , или F_u и V_u (в зависимости от величины Δa) в точках, соответствующих:

- разрушению, когда нет значительных скачков (примеры этих критических значений усилия и смещения приведены на рисунке 4, типы записей (1), (2) и (4));
- первому значительному скачку до разрушения (рис. 4, типы записей (3) и (5)).

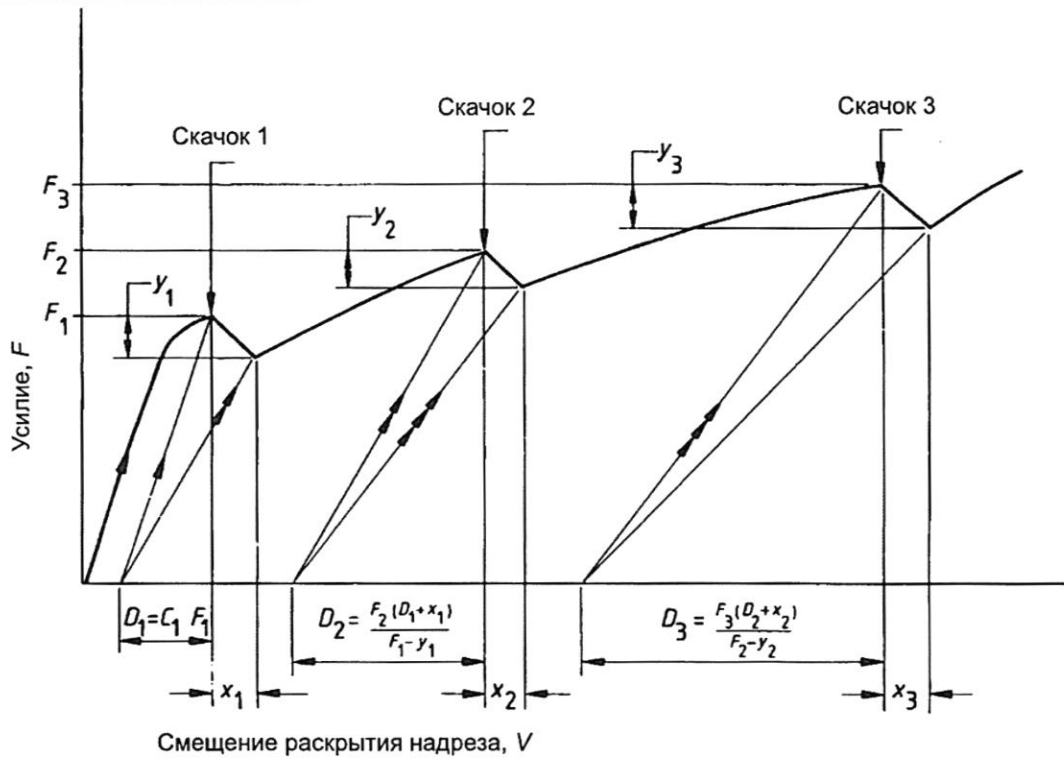
5.2.1.2 Определение F_m и V_m

Исходя из записи испытания, соответствующей типу (6) (достижению плато максимального усилия на рис. 4), определяются значения F_m и V_m в точке, соответствующей первому достижению максимального усилия.

5.2.1.3 Определение V_p

Исходя из записи испытания, графическим или аналитическим методом определяется пластическая составляющая величины раскрытия надреза (V_p), соответствующая подходящему смещению раскрытия надреза, V_c , V_u или V_m , как определено в пп. 5.2.1.1 и 5.2.1.2.

Графический метод выполняется либо вручную на основе записи испытания, либо с использованием компьютерных методик. Аналитический метод основан на методиках упругой податливости и включает вычитание теоретического значения упругого смещения раскрытия надреза (V_e) из значения соответствующего общего смещения раскрытия надреза.



ПРИМЕЧАНИЕ 1 C_1 является первоначальным соответствием.

ПРИМЕЧАНИЕ 2 D представляет V

Рисунок 5. Оценка значимой величины скачка

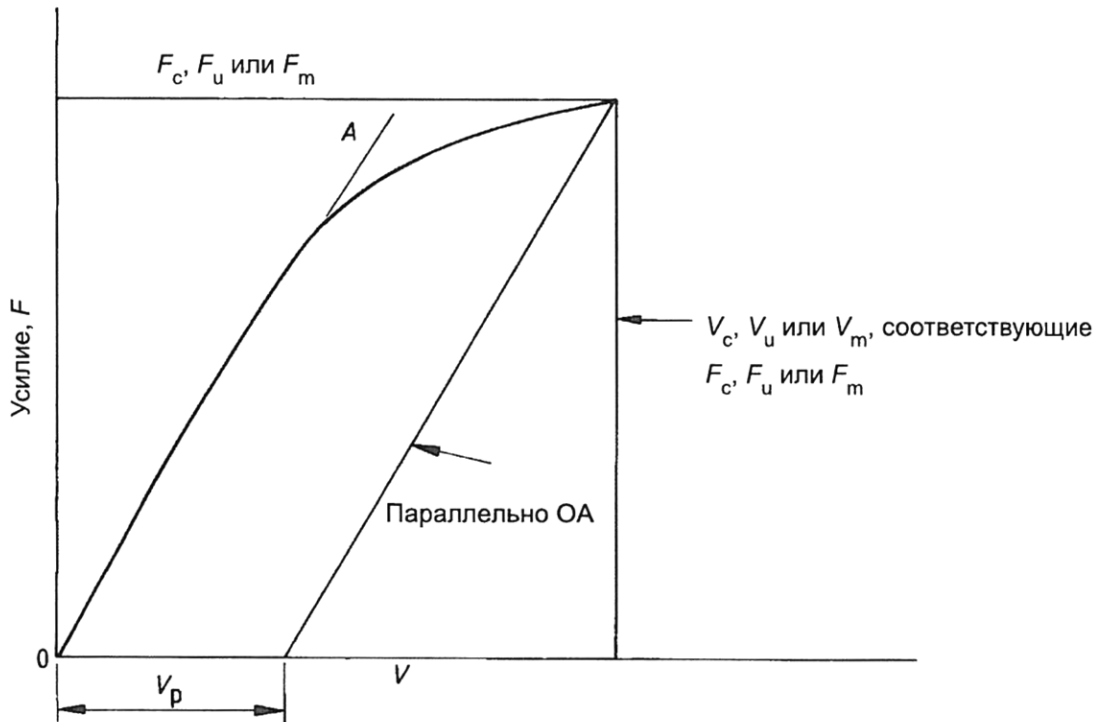


Рисунок 6. Определение V_p (для расчета CTOD)

5.3 Расчет критического значения СТОД

Используя размеры B , W , z , размер a_0 , значения усилия F_c , F_u или F_m и соответствующее значение V_p , определяем δ_c , δ_u или δ_m , используя соответствующие значения F_c , F_u или F_m , по следующей формуле:

$$\delta = \left[\frac{FS}{BW^{1.5}} \times f\left(\frac{a_0}{W}\right) \right]^2 \frac{(1-\nu^2)}{2\sigma_{YS}E} + \frac{0,4(W-a_0)V_p}{0,4W+0,6a_0+z},$$

где $f\left(\frac{a_0}{W}\right)$ задается выражением

$$f\left(\frac{a_0}{W}\right) = \frac{3\left(\frac{a_0}{W}\right)^{0.5} \left[1,99 - \left(\frac{a_0}{W}\right) \left(1 - \frac{a_0}{W}\right) \left(2,15 - \frac{3,93a_0}{W} + \frac{2,7a_0^2}{W^2} \right) \right]}{2\left(1 + \frac{2a_0}{W}\right) \left(1 - \frac{a_0}{W}\right)^{1,5}}.$$

6. Испытания на трещиностойкость образцов из стали 13ХФА

В соответствии с изложенной методикой испытаний на трещиностойкость в лаборатории ООО «ИТ-Сервис» было выполнено исследование образцов из стали марки 13ХФА, изготовленных из двух фрагментов труб длиной по 200 мм, наружным диаметром 273 мм и толщиной стенки 20 мм.

Испытания проводились на универсальной электрогидравлической испытательной системе INSTRON 8802 с применением образцов типа SENB (рис. 1). После нанесения надреза на образцах выращивалась усталостная трещина (рис. 2): амплитуда нагружения образца $F_{max}-F_{min}$ составляла 6800 Н, цикл синусоидальный, коэффициент асимметрии цикла $R = 0,1$, частота нагружения 10 Гц, расстояние между опорами $S = 120$ мм, начальный вырез 13 мм. Усталостная трещина выращивалась длиной 2 мм. Таким образом, общая начальная длина выреза с усталостной трещиной составила $a_0 = 15$ мм.

Готовые образцы с уже выращенной усталостной трещиной охлаждались до требуемой температуры и затем подвергались воздействию монотонно возрастающей нагрузки. В процессе испытания производилось измерение силы F , действующей на образец в каждый момент времени, раскрытия берегов надреза V и перемещения по линии действия силы (прогиб образца q), фиксируемые установленными датчиками раскрытия и перемещения. Нагружение образца останавливалось после разрушения (хрупкое распространение трещины) или после прохождения плато максимальных нагрузок.

По завершению испытания производилась обработка полученных результатов по следующей схеме:

- измерение длины исходной усталостной трещины;
- измерение статического подроста трещины;
- построение и анализ зависимости нагрузка-раскрытие берегов трещины ($F-V$) с выбором расчетной точки, соответствующей критическому событию;
- расчет параметра трещиностойкости СТОД.

Результаты испытаний приведены в таблице 1 и на рисунках 7–10.

Таблица 1 показывает значение критического значения величины раскрытия трещины δ_c в зависимости от температуры испытаний.

На рисунке 7 приведены графики зависимости $F(V)$ «нагрузка-раскрытие берегов трещины» при различных значениях температуры испытаний.

На рисунке 8 приведен внешний вид образцов после испытаний на трещиностойкость.

Вид хрупких изломов образцов после разрушения приведен на рисунке 9.

На основании полученных графиков зависимости $F(V)$ (рис. 7) и фактического измерения изломов образцов после их разрушения было рассчитано значение величины критического значения раскрытия трещины (δ_c) при различных значениях температуры испытания T (рис. 10).

Таблица 1

Результаты испытаний на трещиностойкость

№	Температура испытаний	δ_c , мм
1	+20 °C	0.32
2	-20 °C	0.20
3	-20 °C	0.17
4	-60 °C	0.08

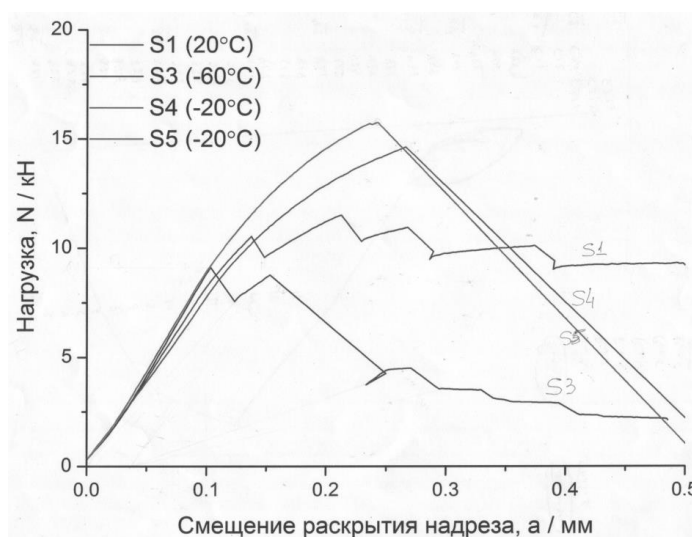
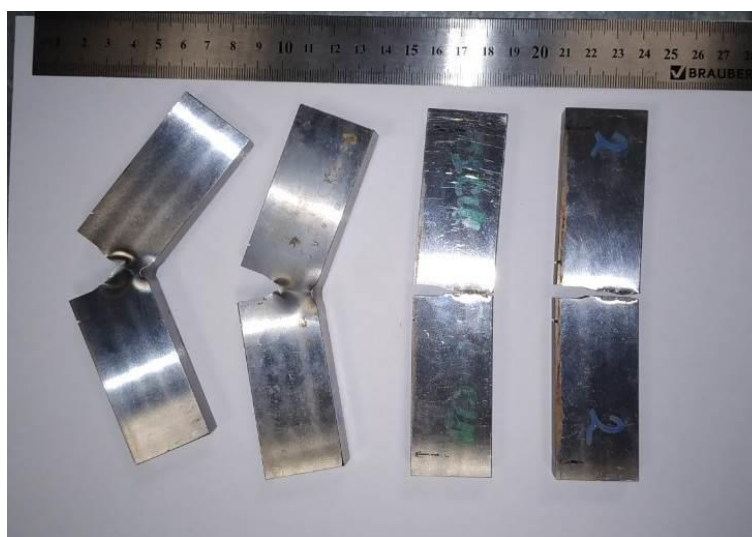


Рисунок 7. Диаграмма «нагрузка-раскрытие берегов трещины» при различных значениях температуры испытаний



а) б) в) г)

Рисунок 8. Вид разрушенных образцов после испытаний:
а, в, г — температура испытаний +20 °C; б — температура испытаний -60 °C

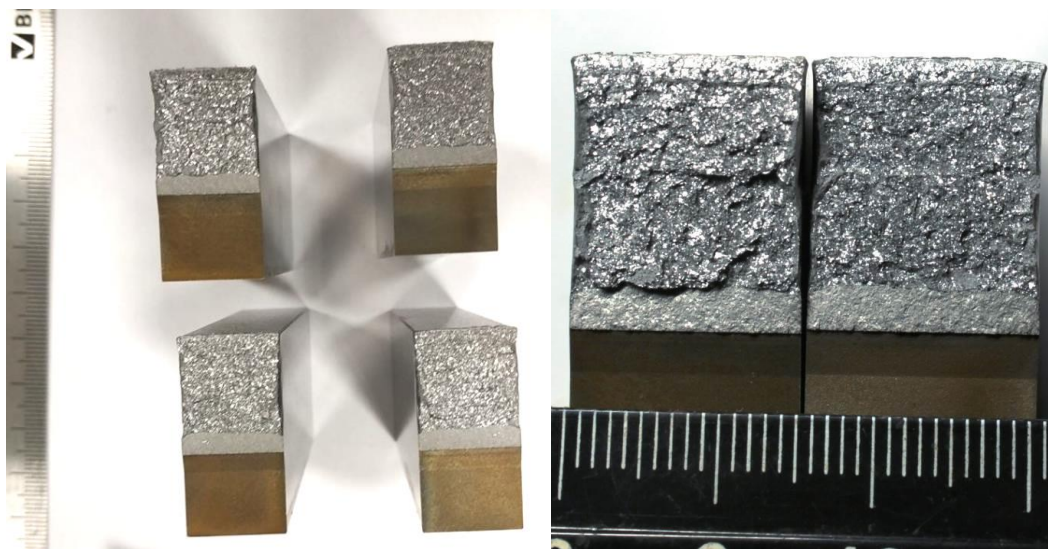


Рисунок 9. Вид хрупких изломов образцов после разрушения (температура испытаний +20 °С)

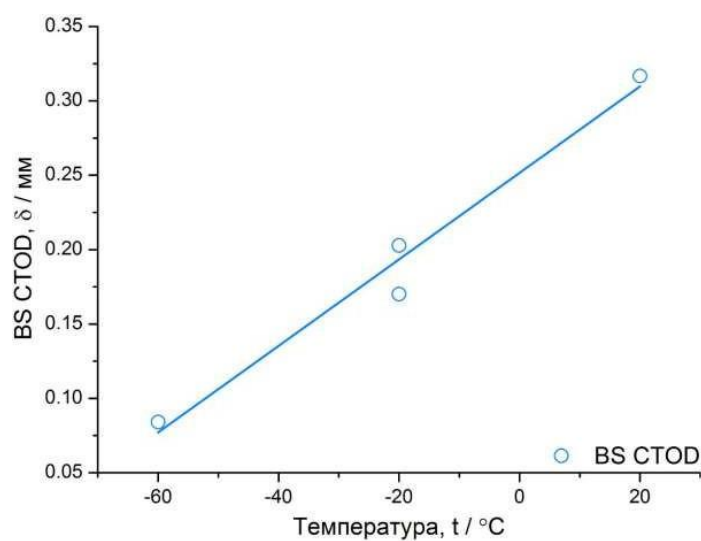


Рисунок 10. Зависимость параметра трещиностойкости δ_s от температуры испытаний T

ЛИТЕРАТУРА

1. Маркадеева А.Ю., Ильин А.В., Гусев М.А. Исследование трещиностойкости зоны термического влияния сварных соединений сталей, применяемых для арктических конструкций // Вектор науки ТГУ. 2018. № 1 (43). С. 43–51.
2. Ильин А.В., Леонов В.П., Филин В.Ю. Определение параметра трещиностойкости CTOD для металла сварных соединений судокорпусных сталей при низких климатических температурах // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. 2009. № 32. С. 120–146.
3. Ильин А.В., Филин В.Ю., Артемьев Д.М. Сопоставление различных методик оценки трещиностойкости металла сварных конструкций, работающих в арктических условиях // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. 2015. № 40–41. С. 62–71.
4. Зотов О.Г., Сулягин Р.В., Кононов А.А., Шамшуринов А.И. Исследование причин снижения вязких характеристик образцов трубной стали при испытаниях на CTOD // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2014. № 4 (207). С. 157–165.
5. Антонов М.И., Пушева И.Ю., Мансырев Э.И., Емельянов А.В., Антонова Н.М. Особенности методики проведения механических испытаний по определению характеристик трещиностойкости сварных соединений и трубных сталей, применяемых на объектах ПАО «Газпром» // Территория «НЕФТЕГАЗ». 2015. № 8. С. 68–74.
6. Тимофеев О.Я., Строгонова О.А., Ярцев Б.А., Рыбакина О.Г., Балагура С.В., Чернов В.Г., Авдонкин С.В. Инженерные основы норм Российского морского регистра судоходства по проектированию, строительству и эксплуатации морских подводных трубопроводов // Трубопроводный транспорт (теория и практика). 2010. № 4 (20). С. 4–9.
7. Zhu X.-K., Joyce J.A. Review of fracture toughness (G, K, J, CTOD, CTOA) testing and standardization // Engineering Fracture Mechanics. 2012. Vol. 85. Pp. 1–46. doi: 10.1016/j.engfracmech.2012.02.001
8. Daves M.G. Quantifying pop-in severity in fracture toughness tests // Fatigue Frac.: Eng. Mater. Struct. 1991. Vol. 14. No. 10. Pp. 1007–1014.
9. Yamashita Y., Kanna S. Assessment of pop-in significance in heterogeneous weld heat-affected zone using finite element analyses // Procedia Materials Science. 2014. Vol. 3. Pp. 991–996.
10. Berejnoi C., Perez Ipina J.E. An alternative method for small pop-in assessment // Engineering Fracture Mechanics. 1998. Vol. 59. No. 5. Pp. 667–681.
11. Petit T., Ritter C., Besson J., Morgeneyer T.F. Impact of machine stiffness on “pop-in” crack propagation instabilities // Engineering Fracture Mechanics. 2018. Vol. 202. Pp. 405–422.

Kozhin Vladimir Nikolaevich

SamaraNIPIneft LLC, Samara, Russia

Astafev Vladimir Ivanovich

SamaraNIPIneft LLC, Samara, Russia

E-mail: Vladimir.astafev@mail.ru

Ioffe Andrei Vladislavovich

IT-Service LLC, Samara, Russia

Sergeeva Anna Olegovna

IT-Service LLC, Samara, Russia

Bulgakov Sergei Aleksandrovich

SamaraNIPIneft LLC, Samara, Russia

E-mail: BulgakovSA@samnipi.rosneft.ru

Critical crack opening (CTOD) determination from three-point flexion tests of samples

Abstract. This paper considers the issues of material testing to determine the metal resistance against the development of cracks in thin-walled pipeline systems. The work consists of two parts — the test method to determine the crack resistance in metal tubes and determination of the crack resistance parameters in metal pipes made of 13XFA steel at the basis of this method. The work also contains the important terms and definitions, symbols and signs in formulas for calculations and explanations in illustrations. The work includes photographs of destructed steel samples after their testing. In accordance with the stated method of testing for fracture toughness in the laboratory of IT-Service LLC, a study was carried out of samples of steel grade 13XFA, made from two fragments of pipes 200 mm long, 273 mm outer diameter and 20 mm thick. The tests were carried out on the INSTRON 8802 universal electrohydraulic testing system using SENB samples. After making a notch, a fatigue crack was grown on the samples. The finished specimens with the already grown fatigue crack were cooled to the required temperature and then subjected to a monotonically increasing load. During the test, the force F acting on the sample at each moment of time, the opening of the edges of the notch V and the displacement along the line of the force action (sample deflection q) were measured, recorded by the installed opening and displacement sensors. The loading of the sample stopped after fracture (brittle crack propagation) or after passing the plateau of maximum loads. Based on the obtained dependences and the actual measurement of the fractures of the samples after their destruction, the value of the critical value of the crack opening was calculated at various values of the test temperature.

Keywords: laboratory tests; steel samples; steel; pipes; metal; fractures; deformation