

УДК 620.165.79

А.В. Ильин¹, В.Ю. Филин¹**РАСЧЕТНЫЕ ОЦЕНКИ ПРОЧНОСТИ ПО ОТНОШЕНИЮ
К ХРУПКИМ РАЗРУШЕНИЯМ С ПРИМЕНЕНИЕМ
ИНЖЕНЕРНО-КРИТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА (ЕСА)**

DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-S1-13-19

Выполнение оценок прочности по критерию предотвращения хрупкого разрушения для конструкций ответственного назначения является актуальной задачей, особенно в случаях применения новых корпусных и сварочных материалов и нетрадиционных конструкторских решений. Однако процедуры проведения таких расчетов имеют ряд неточностей и ограниченную применимость. Целый ряд особенностей – отсутствие термообработки после сварки, резко выраженная структурная неоднородность сварных соединений – требуют разработки научно обоснованных расчетных процедур. Предложены принципы проведения таких оценок, основанные на накопленном авторами экспериментальном материале и теоретических разработках.

Ключевые слова: сварные конструкции, инженерно-критический анализ (ЕСА), методы испытаний, неразрушающий контроль.

Strength assessments in respect of brittle fracture prevention for critical structures are essential, especially when new hull and welding materials and unconventional design solutions are used. However the procedures for such calculations contain a lot of inaccuracies as well as a limited applicability. A number of features such as absence of post weld heat treatment, significant structural heterogeneity of welded joints require the development of scientifically substantiated calculation procedures. In this paper we propose guidelines for such assessments based on experimental data collected by the authors and theoretical developments.

Keywords: welded structures, engineering and critical assessment (ECA), test methods, NDT.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Центральный научно-исследовательский институт конструкционных материалов „Прометей”» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal state unitary enterprise «Central Research Institute of Structural Materials „Prometey”» State research center of the Russian Federation] E-mail: mail@crism.ru

Введение

Процедуры инженерно-критического анализа (engineering critical assessment – ЕСА), описанные в стандартах DNV-OS-F101 [1] и DNV-RP-F108 [2], разработаны для монтажных кольцевых сварных швов трубопроводов и базируются на использовании математического аппарата механики разрушения – оценку выполняют с учетом наличия в конструкции трещиноподобных дефектов. Применимость данных процедур (согласно указанным стандартам) ограничена случаем использования 100%-ного автоматического ультразвукового контроля (АУЗК) высокой точности с использованием фазированных или антенных решеток, при котором определяется как протяженность, так и глубина залегания дефектов. Тем не менее данный подход может быть распространен на другие классы конструкций, например, сосуды, эксплуатируемые под давлением, в том числе барокамеры, водолазные колокола, а также любые конструкции, подвергаемые гидравлическим испытаниям внутренним давлением. Для рассматриваемых конструкций характерен высокий уровень остаточных напряжений после сварки, что заставляет рассматривать данную задачу в рамках аппарата нелинейной механики разрушения (НЛМР).

При ЕСА определяют критические размеры дефекта для данных свойств материала и условий нагружения; критерии приемки дефектов сварных швов при неразрушающем контроле (НК) выводятся из полученных оценок с использованием процедур рассмотрения вероятности выявления дефектов и погрешности определения их размеров при НК.

Полученные оценки также используют для определения критичности накопленных эксплуатационных повреждений, влияния условий эксплуатации (температура, уровень деформации, срок службы и т. д.), а также для обоснования отказа от термообработки после сварки.

Применение ЕСА позволяет снизить консерватизм получаемых оценок, т. е. уменьшить заведомую ошибку в безопасную сторону как при определении допустимого размера дефекта, так и при назначении требований к конструкционным материалам.

**Основные положения ЕСА и проблемы
его применения**

При условии определения размера и расположения конкретного дефекта при НК появляется возможность количественной оценки его опасно-

сти. В то же время знание параметров нагружения и трещиностойкости материала позволяет вычислить допускаемый размер дефекта. Применение методов НК, отличных от АУЗК, приводит к необходимости внесения консервативных предположений, снижающих ценность ЕСА. Идеология самой оценки, так же как и конкретные процедуры ее проведения, основаны на стандарте BS 7910 [3]. Далее рассмотрены краткие положения данного метода.

1. Реальный дефект рассматривается как поверхностная полуэллиптическая или внутренняя эллиптическая трещина.

2. С учетом действующих эксплуатационных напряжений для рассматриваемого расчетного случая (монтаж, испытания, рабочее давление) и наличия остаточных сварочных напряжений рассчитывается максимальное значение коэффициента интенсивности напряжений K_I (параметра нагрузки материала в вершине трещины). Определяется также величина так называемых референсных напряжений (σ_{ref}), представляющих собой эксплуатационные напряжения, определенные с учетом измененной геометрической формы сечения конструкции с дефектом.

3. На основе результатов экспериментального определения характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) материалов – основного металла, металла сварного шва, металла зоны термического влияния – определяют параметр относительной трещиностойкости $K_r = K_I / K_{Ic}$, где K_{Ic} – критический коэффициент интенсивности напряжений, корректное определение которого невозможно для материалов с высокой трещиностойкостью (вязкостью разрушения). Затем экспериментально находят либо параметр δ_c – величину критического раскрытия в вершине трещины (CTOD), либо параметр J_c – критическое значение J -интеграла. Значения K_{Ic} определяют по формуле [4, 5]

$$K_{Ic} = \sqrt{J_c E} = \sqrt{m \delta_c \sigma_T E}, \quad (1)$$

где E – модуль упругости; σ_T – предел текучести материала; m – коэффициент, находящийся в диапазоне от 1 до 2.

Испытания на трещиностойкость должны быть проведены при минимальной температуре эксплуатации конструкции.

4. Определяют относительную нагруженность L_r , как отношение референсных напряжений, действующих у вершины трещины, к величине предела текучести σ_T ; в более сложных вариантах учитывают определенную пластическую деформацию и возможность деформационного упрочнения материала.

5. В координатах «относительная трещиностойкость K_r –относительная нагруженность L_r » рассматривают расположение полученной в результате расчета точки по отношению к границе обла-

стей приемлемости и неприемлемости дефекта. На основании этого принимают решение о возможности оставления дефекта, для которого произведен расчет, без ремонта.

В зависимости от объема требуемых данных и требуемой точности стандартом устанавливаются различные уровни оценок (от 1 до 3 с подуровнями), каждому из которых соответствует своя диаграмма критических состояний K_r – L_r , называемая Failure Assessment Diagram (FAD). Некоторые дополнения данной процедуры вводятся при оценках уровня 3, когда допускается учитывать резерв трещиностойкости материала, находящегося в достаточно вязком состоянии, который связан с наличием стабильного подрастания трещины перед разрушением.

Вследствие сложности анализа все процедуры обычно реализуются в виде компьютерных программ. Одна программа заранее вычисляет допускаемые размеры дефектов, другая проводит оценку в процессе АУЗК после сварки с автоматизированным принятием решения о допустимости дефекта. На рис. 1 показаны характерные дефекты стыковых швов трубопроводов, исследованные при валидации (предварительной проверке) метода АУЗК. Данный метод широко используется при укладке морских трубопроводов во всем мире, в том числе в морских бассейнах России.

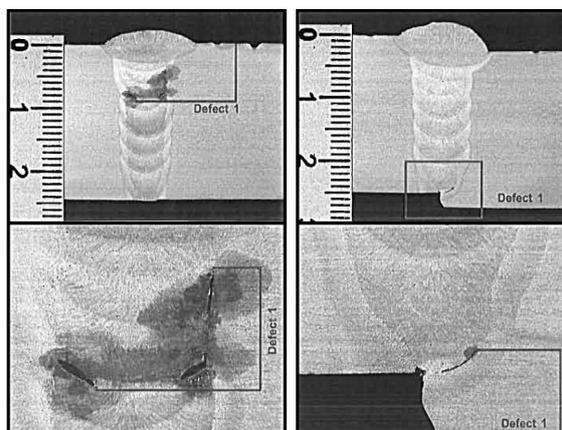


Рис. 1. Характерные дефекты стыковых сварных соединений труб

Необходимо рассмотреть некоторые проблемные моменты процедуры ЕСА и связанных с ней технических решений. Авторы [6] считают, что целесообразно сделать акцент на проблемах, относящихся к допущениям и положениям, принятым вне рамок стандарта BS 7910, – к ним можно отнести следующие:

– как оценивать достоверность информации по трещиностойкости материала? Что делать при отсутствии статистически представительных данных?

– насколько тесно связаны результаты расчета с выбором оборудования и метода НК?

– в каких конкретных случаях и каким образом следует учитывать в оценках цикличность нагрузки при эксплуатации?

– должны ли присутствовать какие-либо иные соображения при оценке допустимых размеров дефекта, кроме следующих из расчетных оценок?

– как определять коэффициенты запаса, вводимые в процедуру расчета?

Определение трещиностойкости материала для проведения ЕСА

Специалистам в области механики разрушения известно, что результаты определения параметров трещиностойкости (критических значений $CTOD$ и J -интеграла) вязких материалов существенно зависят от типа испытываемых образцов. Общим требованием к корректности таких испытаний является достижение при испытаниях уровня жесткости напряженного состояния (степени пластического стеснения) на фронте трещины в образце, близкого к достигаемому в вершине дефекта конструкции. Отсюда следует требование проводить испытания металла натурной толщины.

Согласно Правилам Российского морского регистра судоходства (РМРС) [7, 8] такие испытания должны быть выполнены на образцах типа «single-edge-notched bend» (SENB) [9] прямоугольного сечения размером $B \times 2B$ с нагружением при трехточечном изгибе (рис. 2), где B – толщина конструкции; направление распространения трещины – вдоль шва. Эти испытания, как и испытания на внецентренное растяжение образцов типа «compact tension» (CT) сечением $B \times 2B$, обеспечивают максимальную жесткость при напряженном состоянии и наиболее консервативные оценки.

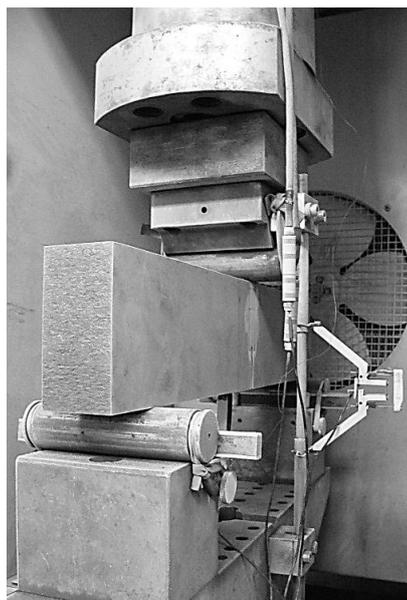


Рис. 2. Испытания образцов SENB

В стандартах DNV [1, 2] предписывается проводить испытания по другой схеме – с использованием образцов типа «single-edge-notch tension» (SENT) с односторонним боковым надрезом, нагружаемых растяжением; направление распространения трещины – поперек сварного шва, от наружной поверхности. Размер образца в направлении распространения трещины соответствует толщине металла B , поперечный размер выбирают от B до $2B$ (рис. 3). Глубину трещины выбирают равной наибольшей предполагаемой глубине дефекта ($0,2-0,3 B$). Считается, что данный тип образца и схема нагружения соответствуют реальной жесткости напряженного состояния в вершине дефекта конструкции и возможному направлению разрушения. При этом четко не оговаривается исполнение образца: с жестко защемленными захватными частями (clamped specimen) или с отверстиями в захватных частях, с нагружением через пальцы (pinned specimen). Образцы в первом исполнении имеют жесткие ограничения по размерам и условиям закрепления, иначе нельзя применить приводимые расчетные формулы. Для образцов во втором исполнении затруднено корректное приложение нагрузки, особенно при небольшой толщине металла.

Необходимо отметить, что по логике оценок по процедуре ЕСА подразумевается, что для всех расчетных случаев как основной металл, так и металл сварного соединения находится в полностью вязком состоянии (это предусматривается и отсылкой стандарта [2] к уровню 3 оценок). Действительно, качество современных металлургических полуфабрикатов может обеспечить отсутствие хрупких разрушений основного металла при температурах до -60°C [10]. Однако литая структура металла шва и крупнозернистая структура металла зоны термического влияния (ЗТВ) вблизи линии сплавления могут разрушаться хрупко при температурах $\sim 0^\circ\text{C}$, поэтому могут иметь место большие различия результатов испытаний образцов разных типов и схем нагружения. Данное положение подтверждается зарубежными исследователями. Например, в работе [11] на образцах SENT толщиной 25 мм при -60°C получены значения $CTOD$ для крупнозернистой ЗТВ у линии сплавления 0,3 мм и выше, в то время как образцы SENB размером 10×10 мм показали хрупкое разрушение с величиной $CTOD$ от 0,02 мм, несмотря на обратное действие масштабного фактора.

Сопоставление данных, полученных при испытаниях образцов SENB сечением $B \times 2B$ и SENT того же сечения при том же направлении распространения трещины [10], показало, что разрушение образцов SENB имело хрупкий характер, на образцах SENT наблюдался значительный вязкий прирост трещины (рис. 4), а критические значения $CTOD$ превышали значения, полученные на образцах SENT, более чем в 10 раз. Таким образом,

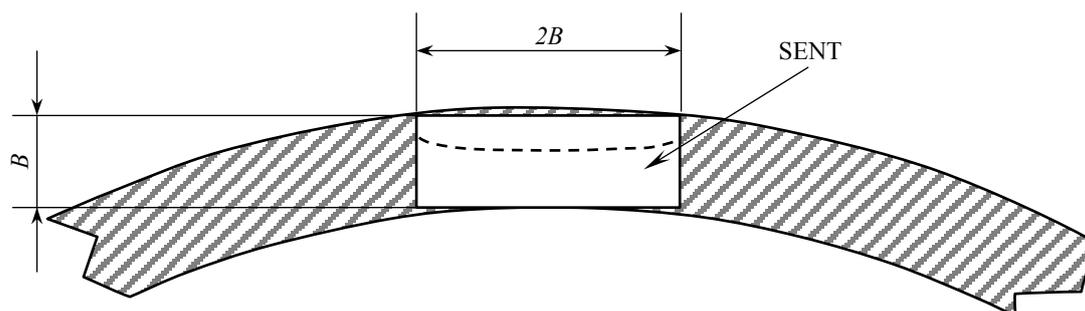


Рис. 3. Поперечное сечение образца SENT из кольцевого сварного соединения трубы

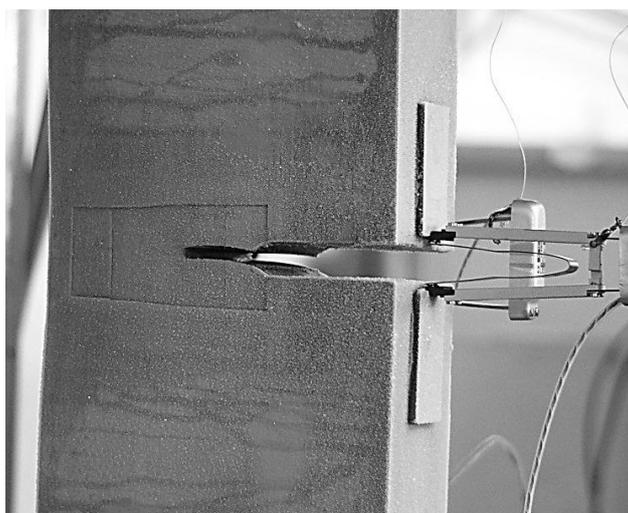


Рис. 4. Испытание образца SENT – видно большое раскрытие трещины в вершине

доказана значимость выбора методики испытаний для получения столь ключевой для метода ЕСА информации.

По мнению авторов результаты испытаний образцов SENB сечением $B \times 2B$ действительно могут давать заведомую ошибку в безопасную сторону при оценке трещиностойкости по отношению к условиям нагружения конструкции с дефектом. В то же время испытания образцов SENT с надрезом от поверхности оказываются недостаточно консервативными [6]. По результатам расчетов авторов работ [12, 13] видно, что оптимальным может быть проведение испытаний образцов SENB сечением $B \times B$ ($a/B \approx 0,5$, где a – размер дефекта).

Выбор типа образца для испытаний на трещиностойкость нельзя осуществлять без доказательства консерватизма получаемых оценок. Из-за отсутствия общепринятой методики разумным выходом на настоящий момент является проведение испытаний с использованием образцов, гарантирующих отсутствие ошибки в опасную сторону (как указано в Правилах РМРС), с требованием привести аргументы при проведении испытаний по другим методикам. В случае испытания образцов уменьшенных размеров необходим учет масштабного эффекта.

Связь результатов оценок по ЕСА с системой неразрушающего контроля

Для выполнения оценок по процедуре ЕСА необходимо располагать информацией о размерах и координатах залегания дефекта (протяженность, глубина, высота) либо основываться на неких консервативных предположениях, если часть информации недоступна. Применение в АУЗК многоэлементных преобразователей (фазированных решеток или антенных решеток) позволяет с достаточной точностью определять все координаты дефекта.

Радиографический контроль (РК) позволяет определять протяженность дефекта в плоскости (а этот размер влияет на результат расчета в гораздо меньшей степени, чем его высота) и его ширину, в расчете не используемую. Этот метод контроля не выявляет действительно опасные для прочности конструкции плоскостные дефекты – несплавления и трещины, ориентированные перпендикулярно поверхности. Обнаруженные дефекты (глубиной от 25 до 50% толщины основного металла) можно с безопасным допуском считать поверхностными в зависимости от его толщины, глубину дефекта рационально связать с величиной валика шва.

При ручном ультразвуковом контроле (РУЗК) однозначно выявляется лишь протяженность дефекта. Можно также установить – поверхностный это дефект или внутренний. Возможно также определение высоты дефекта при сканировании УЗ-преобразователями по схеме «тандем», что требует значительного увеличения трудоемкости контроля.

Таким образом, применение процедуры ЕСА совместно с РК или РУЗК возможно, но требует использования предположений о наиболее опасном расположении дефекта, что снижает ценность метода.

Ультразвуковая система, которую предполагается использовать для проведения АУЗК, согласно работе [2] должна пройти квалификационные испытания (валидацию) для каждого типоразмера конструкции и конкретной процедуры сварки. Процедура включает контроль сварных швов с искусственно внесенными дефектами, с последующей разрезкой на шлифы. По результатам сопоставления фактических размеров дефектов с полученными при контроле должно быть показано, что вероятность выявления дефекта любой допустимой величины, определенной при процедуре ЕСА, составляет не менее 90% при доверительном уровне 95%.

В данном случае присутствует некоторая неопределенность. Как уже отмечалось, идеология оценок основана на том, что металл конструкции находится в полностью вязком состоянии. Тогда размеры допустимых дефектов фактически определяются условием «пластического коллапса» – потери несущей способности нетто-сечения, и составляют несколько миллиметров по глубине и десятки (сотни) миллиметров по протяженности. Такие дефекты выявляются с близкой к 100%-ной вероятностью и при РУЗК. С учетом того, что проведение валидации системы контроля не должно быть связано с результатами испытаний на трещиностойкость, остается непонятным, как можно оценить надежность системы АУЗК, если критическим окажется дефект существенно меньших размеров.

Из соображений консерватизма оценок погрешность при определении размеров дефекта и его положения должна прибавляться к размерам допустимого по расчету дефекта. В стандартах процедуры оценки погрешности измерений отсутствуют.

Необходимость оценок цикличности нагрузки и возможности развития дефекта при эксплуатации на примере трубопроводов

Оценка возможности прироста признанного допустимым дефекта сварного соединения в результате циклического нагружения при эксплуатации предусмотрена как стандартом BS 7910 [3], так и программным обеспечением, реализующим процедуру ЕСА. Фактически она не применяется,

проектант трубопровода старается доказать, что необходимость такого учета отсутствует. Однако пренебрежимо малая циклическая повреждаемость сварных соединений, не имеющих дефектов, может оказаться вполне значимой для конструкции с дефектом, допустимым в соответствии с процедурой ЕСА.

В трубопроводах происходят пульсации внутреннего давления. Применительно к наземным газопроводам фактические режимы нагружения приведены в работе [14]. За период эксплуатации 25 лет приведенные размахи пульсирующих напряжений в долях от рабочих напряжений и соответствующие им количества циклов составляют:

Приведенный размах	Количество циклов
0,04	3500
0,1	400
0,2	200

Полное снятие и возобновление давления 10.

Расчетные оценки циклического ресурса и прямые экспериментальные данные показали, что циклическая повреждаемость при таком режиме нагружения действительно мала даже при наличии исходного дефекта размером 0,2 от толщины стенки трубы и протяженностью 200 мм [15].

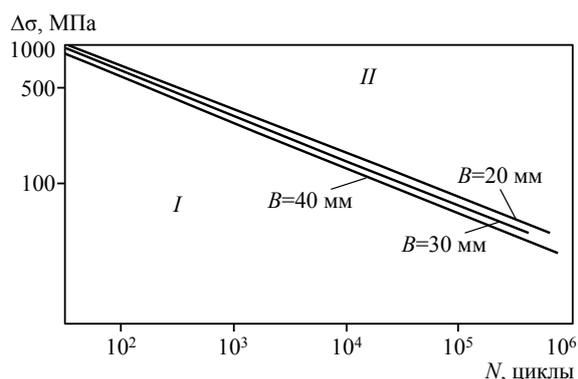
Однако для подводных трубопроводов и иных конструкций ответственного назначения данный вопрос требует рассмотрения. Могут быть выполнены достаточно простые оценки, основанные на анализе кинетики усталостной или коррозионно-усталостной трещины, развивающейся от дефекта, пропущенного при НК. Предельное число циклов N определяется по формуле

$$N = \int_{a_0}^{a_{\max}} \frac{da}{C(K_{\max} - K_{\min})^m}, \quad (2)$$

где a_0 , a_{\max} – начальный и конечный размер дефекта; K_{\max} , K_{\min} – максимальное и минимальное значение коэффициента интенсивности напряжений для дефекта с текущим размером a при напряжении σ ; C , m – параметры материала.

Принимая значения этих параметров в соответствии с рекомендациями BS 7910, величину $a_0=0,4B$ (максимальная оценка из практики применения процедуры ЕСА), $a_{\max}=1,1a_0$ (т. е. допуская не более чем 10%-ный прирост дефекта), получим для трубопроводов оценку зависимости N от размаха напряжений $\Delta\sigma$, представленную на рис. 5. Попадание в область II означает, что следует учитывать возможность прироста дефекта при эксплуатации конструкции. Результаты оценки мало зависят от толщины металла.

При наличии нестационарных режимов нагружения, характеризующихся различными значениями размаха напряжений $\Delta\sigma$, [МПа] и числом циклов n_i на каждом из режимов, необходимость



таких оценок определяется из принципа линейного суммирования повреждений как условие

$$\sum_i \frac{n_i \cdot 2 \cdot 10^{10}}{(\Delta\sigma_i)^3} \geq 1. \quad (3)$$

Необходимость дополнительных ограничений допустимых размеров дефекта

Дефекты, принимаемые в качестве критических по процедуре ЕСА (хрупкое состояние материала не предполагается), для ряда проектов имеют высоту 0,2–0,4 от толщины металла при протяженности в десятки миллиметров, т. е. их площадь составляет сотни мм². По критериям РК Правил Регистра [7] максимальная площадь шлаковых включений должна быть не более 70 мм². При УЗК могут быть сделаны лишь приближенные оценки, которые, однако, показывают, что дефект площадью, на порядок превышающей площадь эталонного отражателя, также будет давать амплитуду эхо-сигнала, превышающую максимально допустимую (при длине дефекта до 50 мм равную опорному уровню -6 дБ). Таким образом, процедура ЕСА позволяет пропускать дефекты, многократно превышающие нормы действующей системы НК.

Поскольку основной задачей НК является проверка качества выполнения сварочных работ, то появление недопустимых по нормативной документации дефектов свидетельствует о нарушениях в технологическом процессе сварки. Основным типом дефектов сварных соединений являются несплавления, ориентированные поперек линии действия напряжений, т. е. наиболее опасные дефекты. Учитывая вероятностный характер показаний НК, следует считать, что появление высокого процента недопустимых по другим критериям дефектов приводит к снижению надежности конструкции.

Для численной оценки использовали известный подход к определению вероятности пропуска в конструкции дефекта с размером больше критического. На основании рассмотрения выявляющей способности систем РУЗК авторами была предложена формула

Рис. 5. Области низкой циклической нагруженности, не требующей расчетных оценок (I), и значимой циклической нагруженности (II). Границы областей мало зависят от толщины металла B

$$F_{gl} = 1 - \exp \left[-n \frac{V}{B} \exp \left[-\frac{x}{\sqrt{1,41 + 0,023B}} - \frac{x}{1,7} \right] \right], \quad (4)$$

где F_{gl} – вероятность пропуска дефекта в крупногабаритной сварной конструкции с размером, большим x ; B – толщина; V – суммарная протяженность сварных швов; n – доля участков шва, забракованных по дефектам.

Например, принимая $x=7$ мм (максимально допустимая глубина дефекта по процедуре ЕСА), $B=30$ мм, $V/B=10^4$, получаем:

- при $n=1$ – $F_{gl}=0,77$, т. е. пропуск дефекта большего размера имеет высокую достоверность;
- при $n=0,01$ (1% брака) – $F_{gl}=0,015$, что приемлемо.

Поэтому нормы дефектности, разработанные на основании проведения процедуры ЕСА, должны сопровождаться внесением в нормативную документацию на сварку указаний о корректирующих действиях при превышении некоторой частоты появления дефектов с размерами, близкими к критическому, либо при обнаружении дефектов определенных размеров, которые заведомо меньше критических.

Величина коэффициента запаса

Согласно стандарту BS 7910, Приложение К, в расчетные оценки прочности необходимо вводить коэффициенты запаса, учитывающие недостаточную точность и разброс исходных данных. Наиболее высокие коэффициенты запаса назначаются для рассчитываемой относительной трещиностойкости K_r по экспериментальным значениям СТOD. Их величина определяется исходя из принятой приемлемой вероятности разрушения конструкции и коэффициента вариации (COV), данных по величине СТOD. Уже при значении COV, равном 0,2, для ответственных конструкций с допустимой вероятностью разрушения 10^{-5} коэффициент запаса составляет 2,9. Принципиальность такого подхода подтверждена результатами численного расчета связи вероятности разрушения конструкций с рассеянием данных по трещиностойкости, полученными в работе [12].

Следует отметить, что в случаях, когда при испытаниях на трещиностойкость регистрируют-

ся преимущественно хрупкие разрушения, фактическая величина COV составляет $>0,5$, что имеет теоретическое обоснование, связанное с рассмотрением хрупкого разрушения как случайного процесса. При значении COV более 0,4 стандарт BS 7910 не содержит указаний по определению коэффициента запаса для конструкций с малой вероятностью разрушений, т. е. предполагается, что такой материал неприменим. Не разъяснено также, как оценивать разброс данных при наличии значительного стабильного прироста трещины, когда при испытаниях образцов наблюдается полностью вязкое разрушение. По-видимому, в этом случае можно принять коэффициент запаса равным единице.

Выводы и рекомендации

Использование процедуры ЕСА согласно международным признанным стандартам показывает наличие значительных недоработок и неточностей. Не гарантировано отсутствие ошибок в опасную сторону. Процедура расчета ориентирована на полностью вязкое состояние материала при любых расчетных случаях, поэтому особенно

важно, чтобы вязкое состояние металла сварных соединений при минимальной температуре, соответствующей расчетному случаю, было подтверждено экспериментально представительными испытаниями на трещиностойкость образцов типа SENB или СТ натурной толщины, обеспечивающих жесткость напряженного состояния, не менее достигаемой в конструкции.

Снижение консерватизма оценок достигается учетом частичной релаксации остаточных сварочных напряжений при эксплуатационном нагружении.

Предлагается определять величину коэффициента запаса в выражении для прочности в соответствии с возможностями используемой системы НК, повторяемостью и продолжительностью наступления расчетного случая и достоверностью экспериментальной информации о трещиностойкости материала.

Предложения авторов позволяют обеспечить адекватность расчетных оценок прочности и расширить область применения процедуры инженерно-критического анализа для различных конструкций ответственного назначения.

ЛИТЕРАТУРА

1. DNV-OS-F101. Submarine Pipeline Systems. October, 2013.
2. DNV-RP-F108. Fracture control for pipeline installation methods introducing cyclic plastic strain. January, 2006.
3. BS 7910. Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures. British standard. 2005. 297 p.
4. Брок Д. Основы механики разрушения: Пер. с англ. М.: ВШ. 1980. 368 с.
5. Нотт Дж.Ф. Основы механики разрушения: Пер. с англ. М.: Металлургия. 1978. 256 с.
6. Ильин А.В., Филин В.Ю. Проблемы использования расчетных процедур ЕСА («инженерного критического анализа») для определения допустимых размеров дефекта в ходе строительства морских подводных трубопроводов // Опасные грузы и контейнеры. 2014. №1–2. С. 56–69.
7. Правила классификации и постройки морских трубопроводов. Российский морской регистр судоходства. 2012. 283 с.
8. Руководство по техническому наблюдению за постройкой и эксплуатацией морских подводных трубопроводов. Российский морской регистр судоходства. 2009. 64 с.
9. ISO 15653–2010. Metallic materials – Method of test for the determination of quasistatic fracture toughness of welds. 46 p.
10. Ильин А.В., Гусев М.А. Новые методики исследования сопротивления разрушению металла труб для магистральных газопроводов // Черная металлургия. 2013. №6 (1362). С. 47–59.
11. Odd M. Akselsen, Erling Østby and Bård Nyhus. Low Temperature Fracture Toughness of X80 Girth Welds // Proceedings of the Twenty-second (2012) International Offshore and Polar Engineering Conference. Rhodes. 2012.
12. Ильин А.В., Филин В.Ю. Применение расчетных оценок прочности с использованием механики разрушения для сварных конструкций глубоководной техники // Деформация и разрушение материалов. 2012. №2. С. 9–15.
13. Ilyin A.V., Filin V.Yu. The Interrelation of Local and Energy Criteria of Unstable Brittle Fracture for Low-Alloyed Cold Resistant Steels // In: 19th European conference on fracture. Fracture Mechanics for Durability, Reliability and Safety. Kazan. Proceeding №418.
14. Суринович В., Трофимов Е., Васильев А. О технологической необходимости и возможности обеспечения длительной и безопасной эксплуатации стальных нефтегазопроводов (на примере ОАО «Газпром») // Газовый бизнес. 2010. №3–4. С. 102–103.
15. Ильин А.В., Васильев А.К., Глибенко О.В., Садкин К.Е., Филин В.Ю. Стендовые испытания новых труб для магистральных трубопроводов // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2011. №10. С. 16–19.