



УДК 621.791.052:536.453:620.169.1

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ УПРОЩЕННОЙ ДИАГРАММЫ СТАТИЧЕСКОЙ КОРРОЗИОННОЙ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ ТРУБНЫХ СТАЛЕЙ ПРИ ПОЧВЕННОЙ КОРРОЗИИ

Академик НАН Украины **В. И. МАХНЕНКО**, **В. М. ШЕКЕРА**, канд. техн. наук, **Е. М. ОНОПРИЕНКО**, инж.
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Описана методика определения параметров упрощенной диаграммы статической коррозионной трещиностойкости для трубных сталей в среде почвенных водных растворов. Показана возможность построения упрощенных диаграмм на малых образцах типа Шарпи с предварительно созданной усталостной трещиной. Использование акустической эмиссии для фиксирования скачков роста трещины позволяет сократить время испытания до 5...7 сут.

Ключевые слова: диаграмма статической коррозионной трещиностойкости, магистральные трубопроводы, акустическая эмиссия, коэффициент интенсивности напряжений, скорость роста трещины

Для современных магистральных трубопроводов (МТ) большое значение имеет обеспечение ресурса безопасной эксплуатации путем адекватного реагирования на результаты регулярных технических диагностик состояния трубопровода и в первую очередь на выявляемые при этом различные дефекты несплошности материала, среди которых наиболее опасными являются коррозионные трещины. Такое адекватное реагирование в соответствии с идеологией «прогнозирование и предупреждение» («the fitness for service» [1]) предусматривает прогнозирование поведения обнаруженного дефекта на определенный срок эксплуатации и выработку рекомендаций для предупреждения неблагоприятных проявлений (отказов) вплоть до ремонта.

Прогнозирование поведения обнаруженной коррозионной трещины соответствующей формы и размера в известном поле статических механических напряжений, а также при известных тем-

пературном условии и коррозионной среде реализуется на основе диаграммы статической коррозионной трещиностойкости (ДСКТ) данного материала (рис. 1).

Такая диаграмма для трубных сталей связывает скорость роста трещины v в определенной точке ее контура θ (рис. 2) с коэффициентом интенсивности напряжений $K_I(\theta)$ в этой точке. ДСКТ имеет три характерные зоны: *I* — $0 < K_I < K_{ISCC}$, где преобладает механизм электрохимической коррозии и скорости $v(K_I)$, которые близки к таковым для равномерной коррозии; *II* — $K_{ISCC} < K_I < K_{IC}$, где преобладает механизм водородного охрупчивания [1, 2], а скорость роста трещин $v(K_I)$ значительно более высокая, чем в зоне *I*; *III* — $K_I > K_{IC}$, где спонтанный рост трещин соответствует хрупкому разрушению.

Для построения ДСКТ в общем случае требуются большие затраты времени, среди которых основную долю составляют затраты на получение зависимости $v - K_I$ в зоне *I*. Для практических прогнозных расчетов, связанных с оценкой риска

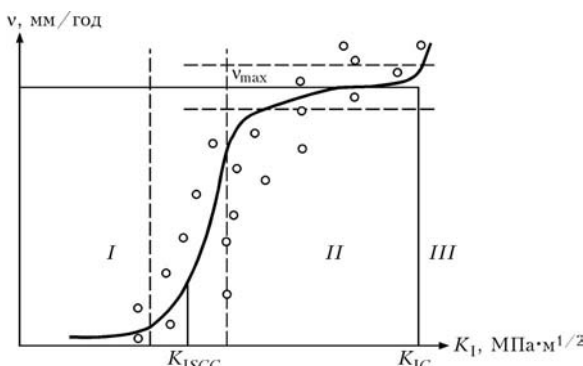


Рис. 1. Диаграмма статической коррозионной трещиностойкости: *I-III* и остальные обозначения см. в тексте

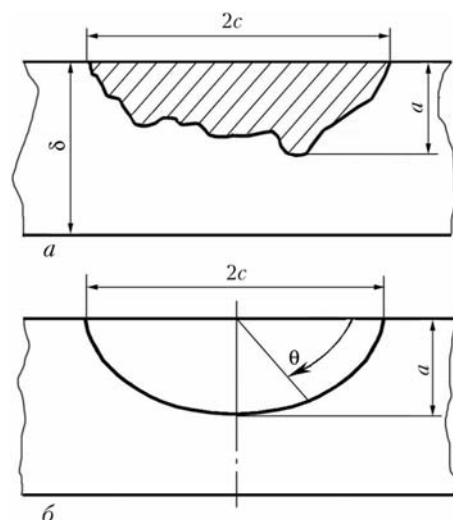


Рис. 2. Схема поверхностной трещины в стенке трубы (а) и ее описание полуэллиптической трещиной размером $a \times 2c$ (б)

© В. И. Махненко, В. М. Шекера, Е. М. Оноприенко, 2008

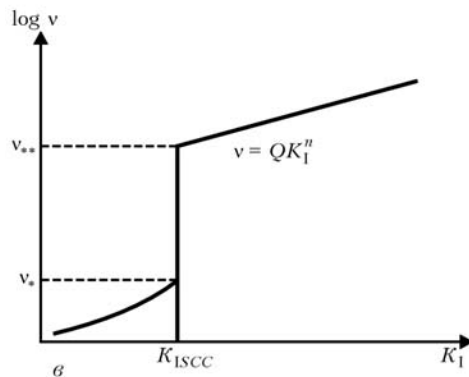
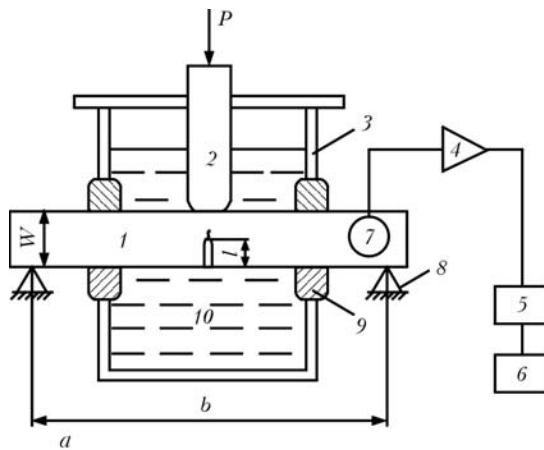


Рис. 3. Схема (а) и внешний вид установки (б) для получения упрощенной ДСКТ (в): 1 — образец; 2 — индентор; 3 — камера; 4 — усилитель; 5 — источник акустической эмиссии; 6 — регистратор; 7 — пьезоэлектрический датчик; 8 — опора; 9 — уплотнение; 10 — коррозионная среда

отказа от конкретной коррозионной трещины в стенке МТ, достаточно знания значений K_{ISCC} и зависимости $v - K_I$ в зоне II при $K_I \ll K_{IC}$, т. е. можно использовать упрощенную диаграмму ДСКТ, определяемую зависимостями:

$$\begin{aligned} v &= 0 & \text{при } K_I < K_{ISCC}; \\ v &= QK_I^n & \text{при } K_{ISCC} < K_I \ll K_{IC}. \end{aligned} \quad (1)$$

где K_{ISCC} , Q и n — параметры, определяемые экспериментально.

Важным параметром при оперативных условиях получения упрощенной ДСКТ является размер образцов (учитывая ограниченную (10...20 мм) толщину МТ), что существенно усложняет измерение кинетики роста коррозионной трещины при испытании.

С учетом отмеченного выше при получении экспериментальных данных для упрощенной ДСКТ применительно к МТ авторы использовали метод, описанный в работе [2], согласно которому геометрические измерения роста трещины в процессе опыта в значительной степени заменены прослушиванием ее роста с помощью акустической эмиссии. Схема такого опыта приведена на рис. 3, а, на рис. 3, б представлен внешний вид созданной в ИЭС им. Е. О. Патона экспериментальной установки для работы на образцах типа образцов Шарпи с предварительно выращенной усталостной трещиной при температуре агрессивной среды (почвенная коррозия) 10...60 °С.

Значения усилия P на инденторе задаются винтовым домкратом через тензометрическую скобу и контролируются в процессе испытания по заданной программе $P-t$.

Значение коэффициента интенсивности напряжения K_I связано с такими параметрами, как расстояние b между опорами, длина l трещины, высота W и толщина B образца (рис. 3), а также усилие P следующей зависимостью [3]:

$$\begin{aligned} K_I(l) = \frac{6P\sqrt{l}}{BW} \left\{ 1,93 - 3,07\left(\frac{l}{W}\right) + \right. \\ \left. + 14,53\left(\frac{l}{W}\right)^2 - 25,11\left(\frac{l}{W}\right)^3 + 25,8\left(\frac{l}{W}\right)^4 \right\}. \end{aligned} \quad (2)$$

При этом используется известное положение, что при $K_I > K_{ISCC}$ происходит скачкообразный рост трещины l , а значения скачков Δl пропорциональны K_I^2 , т. е.

$$\Delta l = \alpha K_I^2, \quad (3)$$

где α — коэффициент пропорциональности, который не зависит от силовых условий, а зависит только от свойств материала и коррозионной среды.

Поскольку скачок трещины сопровождается звучанием, то в схеме на рис. 3, а вместо измерения во времени очень малых приращений Δl (малое сечение образца) измеряют промежутки времени Δt между соседними прыжками роста



трещины. Геометрическим измерениям подлежит только начальный размер трещины l_1 и ее размер l_N в конце испытания после $n = 1, 2, \dots, N$ прыжков, фиксируемых соответствующей аппаратурой (см. рис. 3).

Для получения необходимого решения используются уравнения (2) и (3) в сочетании с зависимостями:

$$l_n = l_{n-1} + \alpha K_1^2(l_n), \quad (4)$$

$$\alpha = \frac{l_N - l_1}{N \sum_{n=1}^{N-1} K_1^2(l_n)}, \quad (5)$$

$$v_n = \Delta l_n / \Delta t_n \quad (n = 1, 2, \dots, N). \quad (6)$$

Испытания начинаются при больших значениях K_1 из области $K_{ISCC} < K_1 < K_{IC}$ где K_{ISCC} и K_{IC} назначаются исходя из опыта. По мере накопления сигналов, соответствующих росту трещины, значения P и соответственно K_1 уменьшаются до минимальных, при которых практически отсутствуют сигналы за 20...40 ч. Соответствующее значение K_1 принимается за K_{ISCC} . Поскольку длительность испытаний составляет от 1 до 4 недель, то при средних скоростях роста, не превышающих 10...20 мм/год, изменение $l_N - l_1$ составляет менее 1 мм и требует тщательного измерения. Для этих целей используют электронный микроскоп «Cam-Scan» с 80-кратным увеличением.

На рис. 4 показана микроструктура образца с коррозионной трещиной из стали 17Г1С (l_1 — в начале и l_N — в конце), полученная при испытании его на прочность в 3%-м растворе NaCl. Точность измерения $l_N - l_1$ не хуже 0,005 мм.

На рис. 5 приведены экспериментальные данные, полученные при испытании этого же образца в 3%-м растворе NaCl в течение трех недель (рис. 6) при температуре около 15...25 °С (в отсутствие регулятора температуры). Химический состав стали 17Г1С следующий, мас. %: 97,11 Fe; 0,40 Ni; 0,06 Cr; 0,038 Co; 1,6 Mn; 0,04 Cu; 0,02 Ti; 0,57 Si; 0,15 Al; 0,18 С.

На рис. 6 видно, что имеет место достаточно высокий разброс значений реальной скорости роста трещин, рассчитанных по сигналам акустической эмиссии (при средней скорости $v_{cp} = 3,2$ мм/год), что в значительной степени обусловлено колебаниями температуры, неучитываемыми в ночное и дневное время. Кроме того, следует принять во внимание, что Δl , определяемая зависимостью (3), не одинакова по толщине образца B , т. е. регистрируемые пики акустической эмиссии соответствуют локальным приращениям трещины по ее длине. Этот процесс достаточно хаотичен, однако отражает скорость роста трещин в зависимости от значений K_1 и среднего значения

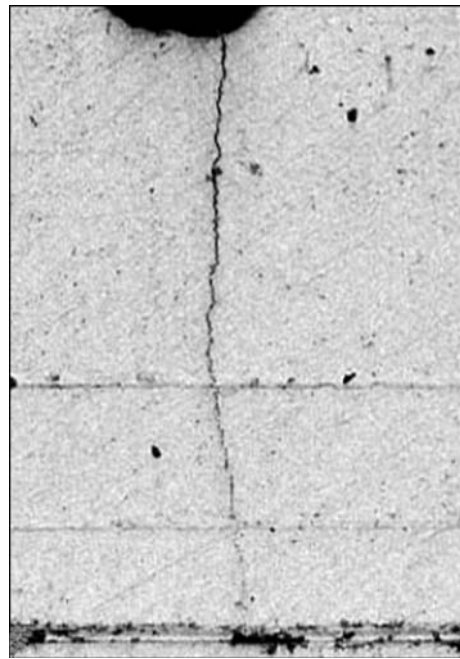


Рис. 4. Микроструктура образца из стали 17Г1С с коррозионной трещиной

скорости роста трещин v_{cp} по разности $l_N - l_1$ и общего времени испытания. Как видно из рис. 5, пороговое значение K_{ISCC} находится в пределах 11...13 МПа·м^{1/2}. Данные, представленные на рис. 5, 6, с определенной условностью можно использовать при оценке коррозионной статической трещиностойкости трубной стали 17Г1С в морской воде. Для определения почвенной коррозии, очевидно, требуется проведение испытаний в соответствующей коррозионной среде.

С учетом многообразия почвенных составов намечена целая программа исследований такого типа. На рис. 7 приведена ДСКТ, полученная для случая, когда для образцов из стали 17Г1С в качестве агрессивной среды использовали водную вытяжку почвы, взятую в районе г. Бородинка (почва № 1).

Для приготовления водной вытяжки почву предварительно высушили и просеяли, затем за-

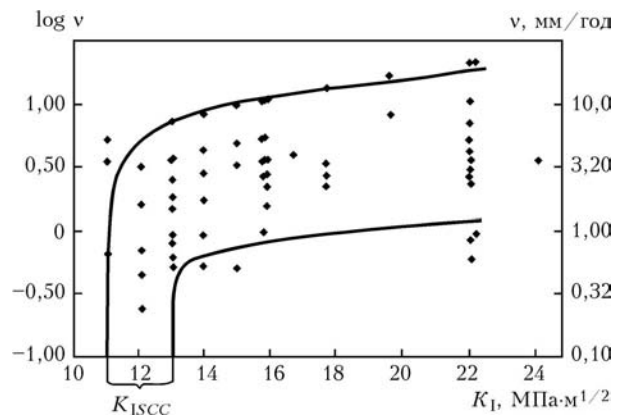


Рис. 5. ДСКТ, полученные по результатам трехнедельных испытаний образца из стали 17Г1С в 3%-м растворе NaCl при 15 < T < 25 °С

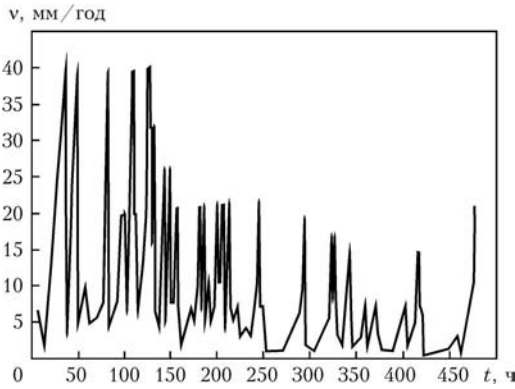


Рис. 6. Кинетика изменения скорости роста коррозионной трещины во время испытаний образца в соответствии с рис. 5

лили водопроводной водой для экстракции в течение 24 ч с достаточно интенсивным перемешиванием. Отстоянный несколько часов раствор вытяжки отфильтровали. В готовом состоянии он имел плотность 0,997 г/см³ и pH 8,2. Химический состав вытяжки, исследованный путем выпаривания определенного объема до получения сухого осадка на микроскопе «Philips Analytical X-ray Spectrometer», имел следующий химический состав, мас. %: 4,6 Na₂O; 6,8 SiO₂; 15,9 SO₃; 6,9 NaCl; 55,1 CaO; 0,02 TiO₂; 0,07 CuO; 6,9 MgO; 0,36 Al₂O₃; 0,46 P₂O₅; 0,23 Fe₂O₃; 0,027 NiO; 0,06 ZnO; 0,13 SrO; 2,3 K₂O.

Из приведенных данных видно, что химический состав водной вытяжки почвы № 1 заметно отличается от состава 3%-го раствора NaCl, в котором pH 7,0, а скорость роста коррозионной трещины примерно в 1,5 раза выше. Иными словами, по аналогии с равномерной коррозией [4] можно ожидать, что состав почвы оказывает определенное влияние на скорость роста трещин наряду с такими факторами, как температура и уровень напряжений в металле образца, поэтому оперативное определение ДСКТ для конкретных сочетаний труба–почва имеет большое значение для оценки риска, связанного с повреждением антикоррозионной изоляции МТ. Покажем это на простом примере.

Большинство МТ изготовлены из сварных продольношовных труб. Повреждение изоляции в зоне продольного шва связано со значительным риском развития локальной поверхностной коррозии. Это достаточно медленный процесс, контролируемый электрохимическим механизмом коррозии трубной стали, скорость развития которого зависит от степени геометрической и физической неоднородности в околошовной зоне сварного шва (последнее в определенной степени зависит от завода изготовителя — поставщика труб).

Если вовремя не остановить процесс коррозии (путем исправления поврежденной изоляции), то в околошовной зоне продольного шва развивается канавочный дефект [1] несплошности материала,

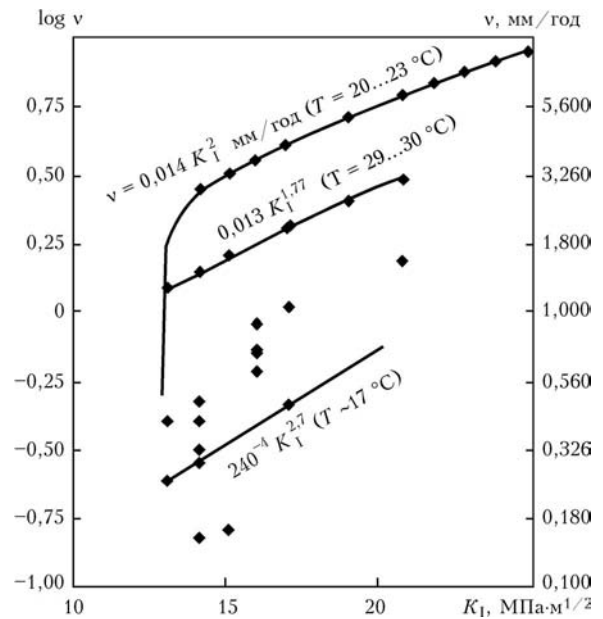


Рис. 7. ДСКТ образца из стали 17Г1С, испытанного в условиях почвенной коррозии

на дне которого при рабочих окружных напряжениях (с учетом концентрации напряжений) с большой вероятностью зарождается стресс-коррозионная трещина. Такая трещина развивается в основном по механизму электрохимической коррозии до тех пор, пока ее размеры с учетом окружных напряжений $\sigma_{\beta\beta}$ создают условия к преобладанию механизма водородного охрупчивания. Это будет иметь место, когда значения K_I на контуре трещины превысят пороговые, т. е. $K_I > K_{I,SCC}$. Можно показать, что при $K_{I,SCC} \approx 10...13 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$ и окружных напряжениях в стенке трубы $\sigma_{\beta\beta} = 260...350 \text{ МПа}$ размер трещины $a \times 2c$ (см. рис. 2) вдоль сварного шва будет достаточно малым.

Для расчета значений K_I можно воспользоваться рекомендациями работы [5], приведенными в [6]. В этих рекомендациях при $a/c < 0,2$ (трещина вытянута вдоль сварного шва) значения K_I при $\theta = \pi/2$ (см. рис. 2) определяются простой зависимостью

$$K_I \left(\theta = \frac{\pi}{2} \right) = \sigma_{\beta\beta} \sqrt{\pi \frac{a}{1000}} M_K f(\alpha/\delta) [\text{МПа}\cdot\text{м}^{1/2}], \quad (7)$$

где $f(\alpha/\delta) \approx \frac{1,12 + 5(\alpha/\delta)^4}{1 - \alpha/\delta}$ при $\alpha/\delta \leq 0,55$;

$$f(\alpha/\delta) \approx \frac{0,303(1 + 3,03 \frac{a}{\delta})^4}{\sqrt{a/\delta} (1 - a/\delta)^3} \text{ при } \alpha/\delta > 0,55;$$

M_K учитывает концентрацию напряжений в околошовной зоне шва и, согласно [5],

$$\text{при } L < 2\delta \text{ и } \alpha/\delta < 0,05 (L/\delta)^{0,55}$$

$$M_K = 0,51(L/\delta)^{0,27} (\alpha/\delta)^{-0,31} \geq 1,0; \quad (8)$$



Результаты расчета K_I (МПа·м^{1/2}) по (7) и M_K по (8) при $\delta = 20$ мм, $L/\delta = 1,5$ и разной глубине трещины

Результаты расчета	$\sigma_{\beta\beta}$, МПа	a , мм						
		0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	1,0	2,0
K_I в зоне продольного шва	260	15,2	15,8	16,7	17,6	18,4	21,0	22,6
	360	21,1	22,1	23,2	24,4	25,4	29,0	31,4
K_I в гладкой части трубы	260	5,2	6,4	7,9	9,2	10,3	14,6	20,5
	360	12,2	11,6	11,0	12,8	14,2	20,1	28,5
M_K	—	2,94	2,37	2,10	1,91	1,78	1,44	1,1

при $\alpha/\delta > 0,05(L/\delta)^{0,55}$

$$M_K = 0,83(\alpha/\delta)^{-0,15(L/\delta)^{-0,45}} \quad (9)$$

Приведенные в таблице результаты расчета $K_I(\pi/2)$ по (7) и (8) для стенки трубы толщиной $\delta = 20$ мм при $L = 30$ мм и $\sigma_{\beta\beta} = 260$ и 360 МПа в зависимости от глубины a (при $a/c < 0,2$) трещины, образовавшейся в зоне продольного шва и в гладкой части трубы, показывают, что в зоне продольного шва при $K_{ISCC} = 10...13$ МПа·м^{1/2} создаются условия для роста трещины по механизму водородного охрупчивания уже при $a = 0,1$ мм и $\sigma_{\beta\beta} = 260$ МПа, а в гладкой части трубы эти условия создаются при $a > 0,5$ мм.

С помощью ДСКТ на рис. 7 в случае ее соответствия почвенным условиям можно определить кинетику дальнейшего роста трещины во времени до риска появления сквозного дефекта либо перехода в стадию спонтанного роста (см. рис. 1, зона III).

В таблице приведены значения M_K (8), показывающие степень влияния геометрической неоднородности в районе сварного шва на K_I . Из таблицы видно, что это влияние резко снижается по мере увеличения глубины трещины и уже при $a > 2$ мм ($\delta = 20$ мм) значения M_K близко к 1. Из этого следует, что при заданных значениях K_{ISCC} снижение мембранных напряжений смещает наступление условий роста трещины по механизму водородного охрупчивания в зону расположения более глубоких трещин, где влияние геометрической неоднородности в районе сварного шва резко уменьшается.

Исходя из этих позиций кольцевые сварные швы в основном находятся в более благоприятных

условиях, чем продольные, антикоррозионная защита которых требует большого внимания.

Выводы

1. Для прогнозирования развития коррозионных трещин в МТ Украины необходимо иметь ДСКТ трубных сталей в соответствующих почвенных условиях.

2. С учетом многообразия возможных сочетаний указанных факторов, а также того, что для рассматриваемой проблемы наиболее важно знание развития коррозионной трещины при значениях K_I выше K_{ISCC} , в работе предлагается использовать подход, основанный на прослушивании роста коррозионной трещины методом акустической эмиссии [2].

3. На малых образцах можно достаточно оперативно получать необходимые ДСКТ для конкретных условий.

1. *Fitness-for-service: Recommended practice 579.* — Washington: American Petroleum Institute, 2000. — 625 p.
2. *Механiка руйнування та мiцнiсть матерiалiв / За ред. проф. З. Т. Назарчука: Довiдник, посiбник: В 6 т. — Т.5: Неруйнiвний контроль i технiчна дiагностика.* — Львiв: ФМІ ім. Г. В. Карпенка НАН України, 2001. — 1132 с.
3. *Механика разрушения и прочность материалов / Под общ. ред. В. В. Панасюка: Справоч. пособие: В 2 т. — Т. 2: Коэффициенты интенсивности напряжений в телах с трещинами / М. П. Саврух.* — Киев: Наук. думка, 1988. — 619 с.
4. *Марченко А. Ф.* Почвенная коррозия трубопроводной стали и магистральных трубопроводов // Стр-во трубопроводов. — 1995. — № 1. — С. 29–34.
5. *Recommendations for fatigue design of welded joints and components.* — S.I., [1996]. — 117 p. — (Intern. Inst. of Welding; Doc. XIII-1539-96 / XV-845-96).
6. *Махненко В. И.* Ресурс безопасной эксплуатации сварных соединений и узлов современных сварных конструкций. — Киев: Наук. думка, 2006. — 618 с.

The paper describes the procedure of determination of parameters of a simplified diagram of static corrosion crack resistance for pipe steels in the soil water solution environment. Shown is the possibility of plotting simplified diagrams using small-sized Charpy-type samples with pre-induced fatigue crack. Use of acoustic emission for recording the crack growth jumps allows shortening the testing time to 5...7 days.

Поступила в редакцию 29.01.2008