

УДК 620.193

Влияние переменного тока на коррозионное растрескивание под напряжением трубной стали X70 в нейтральных средах

Т.А. Ненашева^{1*}, А.И. Маршаков¹, В.Э. Игнатенко¹

¹ ФГБУН «Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина Российской академии наук (ИФХЭ РАН)», Российская Федерация, 119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 31, к. 4

* E-mail: tnenasheva@inbox.ru

Тезисы. Переменный ток ускоряет коррозионное растрескивание трубной стали X70 в электролитах различного состава: 3,5%-ном растворе NaCl (pH 7), цитратном буфере (pH 5,5), смеси раствора NS4 с боратным буфером (pH 7). Возрастание скорости роста трещины при статической нагрузке и ухудшение трещиностойкости стали при медленном растяжении образца с постоянной скоростью (SSRT-испытания) коррелируют с увеличением скорости коррозии металла.

Ключевые слова: трубная сталь, коррозионное растрескивание под напряжением, переменный ток.

Негативное влияние переменного тока (далее – АС) промышленной частоты на коррозию подземных и подводных стальных конструкций давно известно¹. Ранее установлено, что АС значительно ускоряет коррозию углеродистой стали в 3,5%-ном растворе NaCl [1, 2]. В ряде исследований [3–5] показано, что под действием АС увеличивается склонность трубной стали к коррозионному растрескиванию под напряжением (КРН). В связи с этим авторами экспериментально изучено влияние АС на общую трещиностойкость трубной стали X70 и скорость роста коррозионной трещины при статической нагрузке в средах, моделирующих природные электролиты (грунтовые электролиты и морскую воду).

Методика эксперимента

В качестве рабочих и вспомогательных электродов использовались образцы из стали класса прочности X70 (предел текучести $\sigma_{0,2} = 538$ МПа, предел прочности $\sigma_b = 622$ МПа), вырезанные из трубы типоразмера $\varnothing 1420 \times 18,7$ мм производства Харцызского трубного завода (табл. 1), и стали 08кп [1].

Таблица 1

Химический состав трубной стали X70, % масс.

C	Mn	Si	Cr	Nb	Cu	Mo	V	S	P	Al	Ti
0,1	1,6	0,33	0,03	0,05	0,018	0,03	0,005	0,006	0,03	0,035	0,01

В качестве рабочих электролитов использовали:

- 3,5%-ный (масс.) раствор NaCl, моделирующий морскую воду;
- цитратный буфер (ЦБ) (молярная концентрация: 0,08М $C_6H_8O_7$ + 0,1М KCl + 0,0416М NaOH; pH = 5,5), который имитирует слабокислый грунтовый электролит [6, 7];
- смесь синтетического грунтового электролита NS4 (молярная концентрация: 0,0016М KCl + 0,0058М $NaHCO_3$ + 0,0016М $CaCl_2$ + 0,0011М $MgSO_4$) и боратного буфера (ББ) (молярная концентрация: 0,1М H_3BO_3 + 0,008М $Na_2B_4O_7$; pH = 7).

Все растворы готовили из особо чистых реактивов на дистилляте. Опыты проводили при комнатной температуре (20 ± 2 °С) и свободном доступе кислорода.

¹ См. CEN/TS 15280:2006. Evaluation of a.c. corrosion likelihood of buried pipelines – Application to cathodically protected pipelines: Technical Specification, а также Инструкция по защите от коррозии подземных стальных трубопроводов, расположенных в зоне действия рельсового электротранспорта на переменном токе. – М.: Стройиздат, 1972. – 126 с.

(Электродные потенциалы далее указаны относительно стандартного водородного электрода.) Влияние переменного синусоидального (50 Гц) тока на массопотери стали при потенциале коррозии (далее – АС-коррозия), рост трещины и трещиностойкость стали изучали в 3-электродных ячейках [8].

Измерение потенциала и скорости коррозии стали [2]. Скорость коррозии стали определяли гравиметрическим методом после 24 ч выдержки образцов в растворе на электродах из стали 08кп толщиной 0,2 мм с площадью рабочей поверхности 7 см².

Определение скорости внедрения водорода в сталь [10]. Скорость внедрения водорода в металл (i_p) определяли методом электрохимической десорбции водорода в ячейке Деванатхана – Стахурского [9]. Использовали мембраны из стали 08кп толщиной 0,1 мм.

Определение скорости роста трещины при постоянной нагрузке [11]. В качестве рабочих электродов использовали образцы из стали X70 с предварительно выращенной усталостной трещиной, которая служила инициатором развития трещин при коррозионных экспериментах. Габаритные размеры рабочего электрода 200×17×3 мм, вспомогательного – 10×10×3 мм. Рабочая площадь каждого из электродов составляла 1...2 см².

Скорость роста трещины (V) на рабочем электроде определяли методом измерения электросопротивления образца (R_t) [6]. Изменение R_t в зависимости от времени испытаний (τ) регистрировали микроомметром БСЗ-010-2 (точность измерений 10⁻⁸ Ом). К образцу прикладывали постоянную растягивающую нагрузку (500 кг), что при расчете коэффициента интенсивности напряжений в вершине трещины [7, 11] соответствует области «пласт» кривой разрушения стали X70 [7].

Определение трещиностойкости при растяжении образцов с постоянной медленной скоростью деформации (англ. slow strain

rate test, SSRT). Опыты проводились на цилиндрических образцах из стали X70 с рабочей частью диаметром 2,5 мм, изготовленных согласно ГОСТ 1497-84, с применением разрывной машины марки HYBER AB [12]. Скорость растяжения образца составляла 2·10⁻⁶ мм/с, длительность опыта – около 10...15 дней.

Относительное сужение образца (RA, %) после разрыва рассчитывали по формуле

$$RA = \frac{S_0 - S_k}{S_0} \cdot 100, \quad (1)$$

где S_0 – начальная площадь поперечного сечения образца, мм²; S_k – площадь поперечного сечения образца после разрыва, мм². Учитывая значение RA при разрыве образца на воздухе (RA₀), определяли индекс КРН (I_{RA} , %):

$$I_{RA} = \frac{RA}{RA_0} \cdot 100. \quad (2)$$

Результаты и их обсуждение

Влияние переменного тока на скорость и потенциал коррозии стали. При различных значениях пикового потенциала (E_p) изучено влияние АС на скорость коррозии стали ($i_{кор}$) в растворах различного состава (табл. 2). Как видим, в отсутствие АС ($E_p = 0$) $i_{кор}$ максимальна в ЦБ, а в растворах NaCl и NS4+ББ значения $i_{кор}$ примерно равны. Ускоряющее действие АС на коррозию стали в изученных растворах различно. Так, если $E_p = 0,5$, в растворе NaCl $i_{кор}$ возрастает примерно в 10 раз, в ЦБ – в 7,4 раза, в NS4+ББ – только в 2 раза. При увеличении E_p наиболее слабое влияние АС также наблюдается в растворе NS4+ББ.

Надо отметить, что при увеличении E_p от 1 до 1,4 В скорость АС-коррозии изменяется незначительно, т.е. $i_{кор}$ стремится к некоторому предельному значению, индивидуальному в каждом из изученных растворов. Очевидно, данный эффект связан с торможением растворения стали из-за образования слоя продуктов коррозии на ее поверхности. При этом должен наблюдаться переход от общей коррозии стали к локальной [1].

Влияние АС на скорость роста коррозионной трещины. На рис. 1 видно, что в отсутствие АС рост трещины зависит от состава электролита: в хлоридном растворе $V = 3,3 \cdot 10^{-8}$ мм/с, это меньше, чем в цитратном буфере ($V = 1,1 \cdot 10^{-7}$ мм/с). Эффект, оказываемый АС на рост трещины, также зависит

Таблица 2

$i_{кор}$, А/см², при различных значениях пикового потенциала

Среда	E_p , В			
	0	0,5	1,0	1,4
Раствор NaCl	$5,55 \cdot 10^{-6}$	$5,95 \cdot 10^{-5}$	$1,0 \cdot 10^{-4}$	$1,7 \cdot 10^{-4}$
ЦБ	$2,47 \cdot 10^{-5}$	$1,96 \cdot 10^{-4}$	$6,47 \cdot 10^{-4}$	$6,84 \cdot 10^{-4}$
NS4+ББ	$5,7 \cdot 10^{-6}$	$1,16 \cdot 10^{-5}$	$2,03 \cdot 10^{-5}$	$2,3 \cdot 10^{-5}$

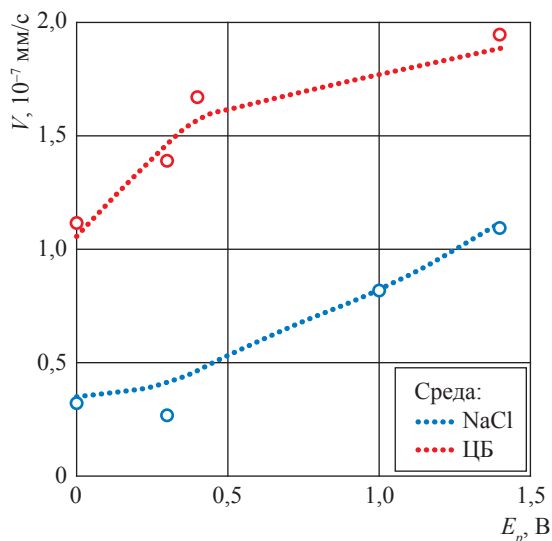


Рис. 1. Скорость роста коррозионной трещины в стали X70 при разных значениях пикового потенциала

от состава раствора. Установлено, что в растворе NaCl при малых значениях $E_p = 0,3 \text{ В}$ АС практически не влияет на V (см. рис. 1). При увеличении E_p до $1,4 \text{ В}$ значение V возрастает в три-четыре раза (до $1,1 \cdot 10^{-7} \text{ мм/с}$). В ЦБ ускорение роста трещины наблюдается даже при незначительных значениях $E_p = 0,3 \dots 0,4 \text{ В}$, но при увеличении E_p до $1,0 \dots 1,4 \text{ В}$ V возрастает менее чем в 2 раза (до $1,95 \cdot 10^{-7} \text{ мм/с}$) (см. рис. 1).

Важно отметить, что на рис. 1 приведены усредненные за период опыта значения V , а при больших значениях E_p рост

трещины со временем тормозится. Так, в ЦБ при $E_p = 1,4 \text{ В}$ трещина вначале (до 200 ч) растет быстрее, затем V снижается. При отключении АС значение V уменьшается, но остается выше ($1,4 \cdot 10^{-7} \text{ мм/с}$), чем до поляризации переменным током. Очевидно, что уменьшение V со временем связано с ростом слоя продуктов коррозии в трещине, что приводит к увеличению омической составляющей E_p и, следовательно, к уменьшению истинного значения E_p .

При длительных испытаниях потенциал коррозии ($E_{\text{кор}}$) со временем увеличивается, что, очевидно, связано с уменьшением истинного значения E_p из-за образования слоя продуктов коррозии внутри трещины, при этом V должна снижаться.

Влияние АС на трещиностойкость стали при SSRT-испытаниях. На рис. 2 показаны диаграммы растяжения образцов на воздухе, в хлоридном растворе, ЦБ, NS4+ББ без АС-поляризации и при $E_p = 0,5 \text{ В}$. Во всех изученных растворах АС уменьшает время ($\tau_{\text{раз}}$) до разрыва образцов, а также RA, соответственно, увеличивая $I_{\text{РА}}$, что свидетельствует о повышении склонности стали к КРН в условиях АС (табл. 3, см. $E_p = 0,5 \text{ В}$ на рис. 2).

Необходимо отметить, что величина $I_{\text{РА}}$, значения которой определялись в разных растворах при АС-поляризации и без нее, удовлетворительно коррелирует (коэффициент корреляции $R^2 = 0,78$) с $\tau_{\text{раз}}$ (рис. 3). Это подтверждает удовлетворительную точность определения параметров трещиностойкости стали (см. табл. 3).

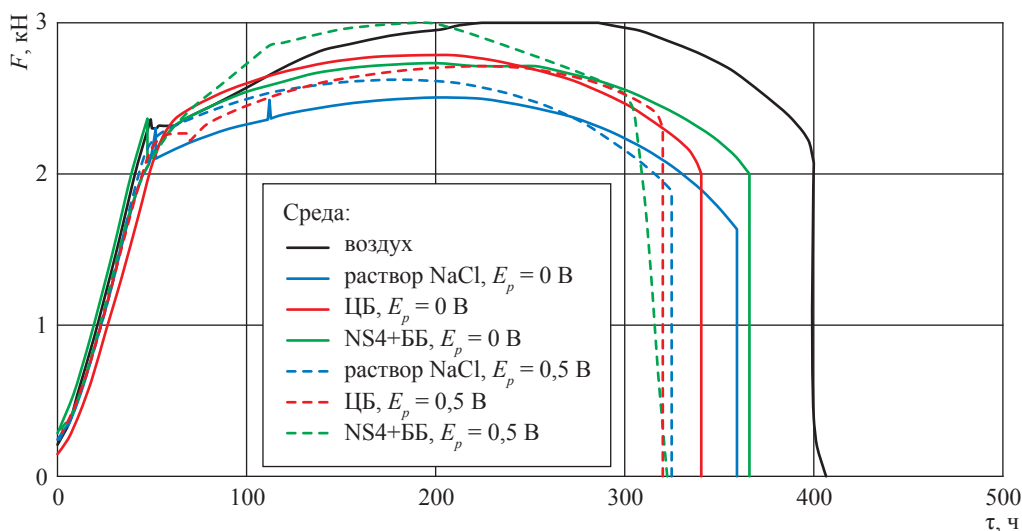


Рис. 2. Зависимость усилия растяжения образцов F от времени

Таблица 3

**Параметры трещиностойкости стали
в различных растворах, определенные
методом SSRT**

Среда	$E_{p, B}$	$\tau_{раз}, ч$	RA, %	$I_{RA}, \%$
Раствор NaCl	0	371	70	18
	0,5	342	51	40
ЦБ	0	340	53	38
	0,5	320	23	73
NS4+ББ	0	366	60	30
	0,5	322	46	47

Корреляция величин V и $i_{кор}$ в условиях АС-поляризации. Ранее установлено, что преобладающим механизмом транскристаллитного роста трещины в трубной стали X70, погруженной в ЦБ, при статической нагрузке является локальное растворение металла [7, 11]. Предполагалось, что в синтетической морской воде процесс транскристаллитного КРН трубной стали API X70 контролируется смешанным механизмом анодного растворения и водородного охрупчивания металла [13]. В связи с этим рассмотрим связь величины V с массопотерей металла при АС-коррозии стали.

В средах раствора NaCl и ЦБ гравиметрически определена зависимость V от $i_{кор}$ стали (рис. 4). Видно, что в обоих электролитах рост трещины ускоряется с увеличением массопотери металла. Поскольку АС-коррозия стали имеет преимущественно локальный характер [1], можно полагать, что рост трещины определяется локальным растворением металла. Вместе с тем нужно отметить две особенности данной связи: во-первых, в двух изученных средах зависимости V от $i_{кор}$ различны, во-вторых, эти зависимости нелинейные и в области больших значений $i_{кор}$ рост трещины с увеличением $i_{кор}$ незначительно ускоряется (см. рис. 4, ЦБ).

В ЦБ с pH = 5,5 скорость катодного выделения водорода при потенциалах вблизи коррозионного значительно выше [14], чем в хлоридном растворе с pH = 7 [1]. Скорости внедрения водорода в сталь (i_H) также заметно отличаются. Так, при потенциале коррозии i_H в ЦБ в 10 раз больше, чем в растворе NaCl, а при постоянном катодном потенциале $E = -0,75 В$ – примерно в 3 раза (табл. 4).

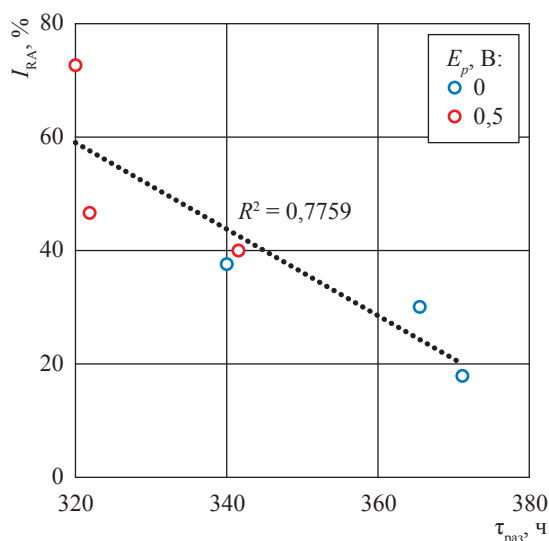


Рис. 3. Сопоставление значений I_{RA} , рассчитанных для разных сред, и $\tau_{раз}$

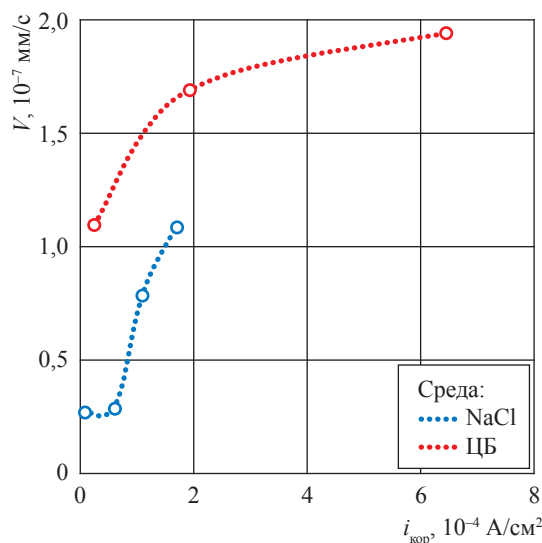


Рис. 4. Зависимость скорости роста трещины от скорости коррозии стали

Таблица 4

**$i_H, A/cm^2$, в различных средах
при потенциале коррозии и постоянном
катодном потенциале**

Среда	$E_{кор}$	$E = -0,75 В$
Раствор NaCl	$0,8 \cdot 10^{-6}$	$3,4 \cdot 10^{-6}$
ЦБ	$8,1 \cdot 10^{-6}$	$9,4 \cdot 10^{-6}$
NS4+ББ	$9,8 \cdot 10^{-6}$	$20,5 \cdot 10^{-6}$

Очевидно, что отличие значений V при АС-поляризации в ЦБ и растворе NaCl (см. рис. 4) может быть связано с наводороживанием стали. Наводороживание стали объясняет последнее действие АС, которое выражается в разнице значений V до и после АС-поляризации образца. Однако, поскольку в ЦБ преобладающий механизм роста трещины – локальное растворение металла [15], можно полагать, что абсорбированный металлом водород ускоряет локальное растворение стали и, соответственно, рост коррозионной трещины. Ускорение растворения железа и углеродистых сталей при их наводороживании (так называемое индуцируемое водородом анодное растворение) неоднократно обнаруживалось в слабокислых и рН-нейтральных электролитах [16–18].

Нелинейный характер кривых на рис. 4 может обуславливаться разными факторами, учитывая сложный механизм КРН сталей. Тем не менее наиболее очевидной причиной является образование слоя продуктов коррозии в трещине при интенсивном протекании АС-коррозии. При увеличении продолжительности опыта действие переменного тока ослабевает, что выражается в торможении роста трещины и увеличении $E_{\text{кор}}$ и связано, по-видимому, с увеличением омической составляющей в измеряемом значении E_p . Поскольку трещина является наиболее глубоким дефектом на поверхности образца, то толщина слоя продуктов коррозии должна быть в ней максимальна. Следовательно, истинное значение E_p должно быть наименьшим у вершины трещины, и в результате скорость роста трещины тормозится. При этом дно более мелких коррозионных дефектов, покрытое не столь толстым слоем продуктов коррозии, продолжает растворяться под действием АС, что обеспечивает большую массопотерю металла.

Следовательно, опасность влияния АС на рост глубоких трещин невелика. Основное негативное действие АС может быть связано с ускорением первой стадии КРН, а именно, с образованием питтингоподобных очагов коррозии, которые служат концентраторами механических напряжений [1].

Корреляция величин $I_{\text{РА}}$ и $i_{\text{кор}}$ стали. Индекс $I_{\text{РА}}$ (см. табл. 3), характеризующий склонность стали к КРН, возрастает при ускорении коррозии металла под действием АС (рис. 5, сплошная линия). Однако $i_{\text{кор}}$ не является единственным параметром, определяющим

величину $I_{\text{РА}}$. Пунктиром на рис. 5 соединены точки, показывающие значения $I_{\text{РА}}$, полученные в растворе NaCl, ЦБ и NS4+ББ в отсутствие и при АС-поляризации. Видно, что действие АС-поляризации в значительной степени зависит от состава раствора. В хлоридной среде АС существенно ускоряет коррозию стали, но при этом наблюдается самое малое увеличение $I_{\text{РА}}$. В ЦБ отмечается максимальное увеличение $i_{\text{кор}}$ и $I_{\text{РА}}$ в условиях АС-поляризации. В растворе NS4+ББ относительно небольшое увеличение $i_{\text{кор}}$ приводит к существенному возрастанию $I_{\text{РА}}$ (голубой пунктир имеет максимальный угол наклона).

Значительное возрастание $I_{\text{РА}}$ и $i_{\text{кор}}$ под действием АС в ЦБ может быть объяснено индуцируемым водородом растворением металла. Однако для NS4+ББ значение $i_{\text{Н}}$ больше, чем для ЦБ (см. табл. 4), а значение $i_{\text{кор}}$ – меньше. Следует отметить, что в NS4+ББ кроме ионов Cl^- и SO_4^{2-} – активаторов растворения железа – в относительно большом количестве (0,0058М) содержатся ионы HCO_3^- , которые могут образовывать плотный защитный слой сидерита FeCO_3 на поверхности корродирующей стали [19]. Образование такого слоя на поверхности образца, включая боковые стенки концентратора напряжений – микротрещины, уменьшает скорость коррозии. При пластической деформации металла в вершине микротрещины этот защитный слой разрушается, и растворение металла локализуется в вершине растущей трещины. Тогда при наложении АС скорость

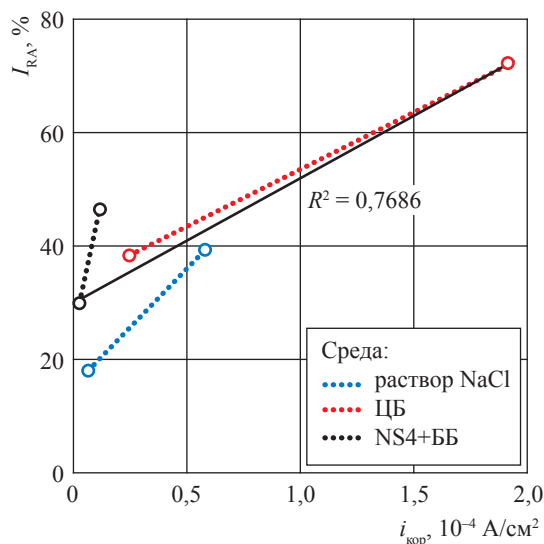


Рис. 5. Сопоставление индекса КРН и скорости коррозии стали

общей коррозии образца увеличивается незначительно, но склонность стали к КРН существенно возрастает.

Показано, что влияние состава электролита на общую трещиностойкость трубной стали должно определяться:

1) присутствием ионов-активаторов, ускоряющих растворение металла;

2) наличием ионов-пассиваторов, образующих защитный слой продуктов коррозии на поверхности металла;

3) наводороживающей способностью раствора, которая, в свою очередь, зависит от величины pH, буферной емкости раствора и присутствия промоторов абсорбции водорода.

Таким образом, АС ускоряет КРН трубной стали X70 во всех изученных электролитах. При статических механических напряжениях скорость роста коррозионной трещины максимальна в ЦБ, но она уменьшается со временем. Торможение роста трещины может быть связано с образованием слоя продуктов коррозии

внутри трещины, что приводит к уменьшению истинного значения E_p вследствие увеличения его омической составляющей. Рост трещины ускоряется с увеличением коррозионной массы потери металла и в растворе NaCl, и в ЦБ. В совокупности с ранее полученными результатами [7, 11] это свидетельствует, что рост трещины определяется скоростью растворения металла. Более быстрый рост трещины в ЦБ по сравнению с раствором NaCl объяснен ускоряющим действием абсорбированного металлом водорода на анодное растворение стали.

АС ухудшает трещиностойкость стали (уменьшает время до разрыва образцов и увеличивает индекс КРН) при растяжении металла с малой скоростью деформации. При постоянной величине пикового потенциала (0,5 В) индекс КРН зависит от состава электролита: минимальное значение наблюдается в растворе NaCl, максимальное – в ЦБ, что согласуется со скоростями коррозии стали в этих растворах. В среде NS4+ББ относительно небольшое увеличение скорости коррозии стали приводит к существенному возрастанию индекса КРН.

Список литературы

1. Маршаков А.И. Влияние переменного тока на скорость растворения углеродистой стали в хлоридном электролите. Ч. 1: Условия свободной коррозии / А.И. Маршаков, Т.А. Ненашева // Коррозия: материалы, защита. – 2016. – № 4. – С. 1–11.
2. Marshakov A.I. The effect of alternating current on the rate of dissolution of carbon steel in a chloride electrolyte. Pt. 2: Cathode potentials / A.I. Marshakov, T.A. Nenashева, E.V. Kasatkin, et al. // Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces. – 2018. – Т. 54. – № 7. – С. 1236–1245.
3. Zhu M. Effect of AC on stress corrosion cracking behavior and mechanism of X80 pipeline steel in carbonate/bicarbonate solution / Min Zhu, Cuiwei Du, Xiaogang Li, et al. // Corrosion Science. – 2014. – Т. 87. – С. 224–232. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2014.06.028>
4. Zhu M. Effect of AC current density on stress corrosion cracking behavior of X80 pipeline steel in high pH carbonate/bicarbonate solution / Min Zhu, Cuiwei Du, Xiaogang Li, et al. // Electrochimica Acta. – 2014. – Т. 117. – С. 351–359. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2013.11.149>
5. Wan H. Effect of alternating current on stress corrosion cracking behavior and mechanism of X80 pipeline steel in near-neutral solution / Hongxia Wan, Dongdong Song, Zhiyong Liu, et al. // Journal of Natural Gas Science and Engineering. – 2017. – Т. 38. – С. 458–465.
6. Игнатенко В.Э. Влияние катодной поляризации на скорость коррозионного растрескивания трубных сталей / В.Э. Игнатенко, А.И. Маршаков, В.А. Маричев и др. // Защита металлов. – 2000. – Т. 36. – № 2. – С. 132–139.
7. Marshakov A.I. Effect of electrolyte composition on crack growth rate in pipeline steel / A.I. Marshakov, V.E. Ignatenko, R.I. Bogdanov, et al. // Corrosion Science. – 2014. – Т. 83. – С. 209–216.
8. Ненашева Т.А. Образование локальных очагов коррозии трубной стали под действием циклической знакопеременной поляризации / Т.А. Ненашева, А.И. Маршаков, И.В. Касаткина // Коррозия: материалы, защита. – 2015. – № 5. – С. 9–17.
9. Devanathan M.A.V. The mechanism of hydrogen evolution on iron in acid solutions by determination of permeation rates / M.A.V. Devanathan, Z. Stachurski // J. Electrochem. Soc. – 1964. – Т. 111. – № 5. – С. 619–623. – DOI: [10.1149/1.2426195](https://doi.org/10.1149/1.2426195).

10. Маршаков А.И. Влияние кислородсодержащих окислителей на скорость проникновения водорода через железную мембрану / А.И. Маршаков, О.В. Батищева, Ю.Н. Михайловский // Защита металлов. – 1989. – Т. 25. – № 6. – С. 888–896.
11. Арабей А.Б. Влияние состава коррозионной среды на скорость роста трещины в трубной стали X70 / А.Б. Арабей, Р.И. Богданов, В.Э. Игнатенко и др. // Физикохимия поверхности и защита материалов. – 2011. – Т. 47. – № 2. – С. 208–217.
12. Игнатенко В.Э. Применение метода SSRT для оценки влияния состава коррозионной среды на склонность трубной стали X70 к растрескиванию под напряжением / В.Э. Игнатенко, Ю.И. Кузнецов, А.Б. Арабей и др. // Коррозия: материалы, защита. – 2011. – Т. 9. – С. 16–25.
13. Sun F. Comparative study on the stress corrosion cracking of X70 pipeline steel in simulated shallow and deep sea environments / Feilong Sun, Shuai Ren, Zhong Li, et al. // Materials Science & Engineering: A. – 2017. – Т. 685. – С. 145–153. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.12.118>.
14. Маршаков А.И. Влияние атомарного водорода на анодное растворение железа в слабокислом сульфатном электролите / А.И. Маршаков, М.А. Малеева, А.А. Рыбкина и др. // Физикохимия поверхности и защита материалов. – 2010. – Т. 46. – № 1. – С. 36–45.
15. Богданов Р.И. Влияние состава раствора на скорость роста трещины в трубной стали X70 при статической и циклической нагрузке / Р.И. Богданов, А.И. Маршаков, В.Э. Игнатенко // Коррозия: материалы, защита. – 2011. – № 11. – С. 30–38.
16. Ненашева Т.А. Влияние абсорбированного металлом водорода на кинетику активного растворения стали Ст3 в средах, имитирующих «подпленочный» электролит / Т.А. Ненашева, А.И. Маршаков // Коррозия: материалы, защита. – 2009. – №. 2. – С. 1–6.
17. Ненашева Т.А. Влияние абсорбированного сталью водорода на кинетику ее растворения в нейтральных карбонатных средах / Т.А. Ненашева, А.И. Маршаков // Коррозия: материалы, защита. – 2008. – № 4. – С. 10–15.
18. Ненашева Т.А. Кинетика растворения наводороженной углеродистой стали в электролитах в pH, близком к нейтральному / Т.А. Ненашева, А.И. Маршаков // Физикохимия поверхности и защита материалов. – 2015. – Т. 51. – № 6. – С. 664–672. – DOI: [10.7868/S0044185615040257](https://doi.org/10.7868/S0044185615040257).
19. MH-2-95. Report of public inquiry concerning stress corrosion cracking on Canadian oil and gas pipelines: report of the inquiry / National Energy Board. – Calgary, Alberta, Canada: NEB, 1996.

The effect of alternating current on stress-corrosion cracking of an X70 pipeline steel in neutral solutions

T.A. Nenasheva^{1*}, A.I. Marshakov¹, V.E. Ignatenko¹

¹ Russian academy of sciences A.N. Frumkin Institute of Physical chemistry and Electrochemistry (IPCE RAS), Est. 31, Bld. 4, Leninskiy prospect, Moscow, 119071, Russian Federation

* E-mail: tnenasheva@inbox.ru

Abstract. The alternating current accelerates the stress-corrosion cracking of an X70-grade pipe steel in electrolytes of different composition, namely: 3,5% NaCl solution (pH 7), citrate buffer (pH 5,5), mixtures of NS4 solution with borate buffer (pH 7). Increase in crack growth rate under static load and deterioration of steel crack resistance during slow strain rate tests correlate with increase of metal corrosion rate.

Keywords: pipeline steel, stress corrosion cracking, AC-induced corrosion.

References

1. MARSHAKOV, A.I., T.A. NENASHEVA. The effect of alternating current on the rate of dissolution of carbon steel in a chloride electrolyte [Vliyaniye peremennogo toka na skorost rastvoreniya uglerodistoy stali v khloridnom elektrolite]. Pt. 1: Provisos for free corrosion [Usloviya svobodnoy korrozii]. *Korroziya: Materialy, Zashchita*. 2016, no. 4, pp. 1–11. (Russ.).
2. MARSHAKOV, A.I., T.A. NENASHEVA, E.V. KASATKIN, et al. The effect of alternating current on the rate of dissolution of carbon steel in a chloride electrolyte. Pt. 2: Cathode potentials. *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*. 2018, vol. 54, no. 7, pp. 1236–1245. ISSN 2070-2051.

3. ZHU, M., C. DU, X. LI, et al. Effect of AC on stress corrosion cracking behavior and mechanism of X80 pipeline steel in carbonate/bicarbonate solution. *Corrosion Science*. 2014, vol. 87, pp. 224–232. ISSN 0010-938X. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2014.06.028>
4. ZHU, M., C. DU, X. LI, et al. Effect of AC current density on stress corrosion cracking behavior of X80 pipeline steel in high pH carbonate/bicarbonate solution. *Electrochimica Acta*. 2014, vol. 117, pp. 351–359. ISSN 0013-4686. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2013.11.149>
5. WAN, H., D. SONG, Zh. LIU, et al. Effect of alternating current on stress corrosion cracking behavior and mechanism of X80 pipeline steel in near-neutral solution. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 2017, vol. 38, pp. 458–465. ISSN 1875-5100.
6. IGNATENKO, V.E., A.I. MARSHAKOV, V.A. MARICHEV, et al. Impact of cathodization to the rates of corrosion cracking of pipe steels [Vliyaniye katodnoy polyarizatsii na skorost korrozionnogo rastreskivaniya trubnykh staley]. *Zashchita Metallov*. 2000, vol. 36, no. 2, pp. 132–139. (Russ.).
7. MARSHAKOV, A.I., V.E. IGNATENKO, R.I. BOGDANOV, et al. Effect of electrolyte composition on crack growth rate in pipeline steel. *Corrosion Science*. 2014, vol. 83, pp. 209–216. ISSN 0010-938X.
8. NENASHEVA, T.A., A.I. MARSHAKOV, I.V. KASATKINA. Generation of local focuses of pipe steel corrosion subject to the cyclic alternated polyarization [Obrazovaniye lokalnykh ochagov korrozii trubnoy stali pod deystviyem tsiklicheskoj znakoperemennoy polyarizatsii]. *Korroziya: Materialy, Zashchita*. 2015, no. 5, pp. 9–17. (Russ.).
9. DEVANATHAN, M.A.V., Z. STACHURSKI. The mechanism of hydrogen evolution on iron in acid solutions by determination of permeation rates. *J. Electrochem. Soc.* 1964, vol. 111, no. 5, pp. 619–623. ISSN 0013-4651. DOI: 10.1149/1.2426195.
10. MARSHAKOV, A.I., O.V. BATISHCHEVA, Yu.N. MIKHAYLOVSKIY. Impact of the oxygeneous acidifiers to the rates of hydrogen penetration through an iron membrana [Vliyaniye kislородosoderzhashchikh oksilitekey na skorost proniknoveniya vodoroda cherez zheleznyuyu membranu]. *Zashchita Metallov*. 1989, vol. 25, no. 6, pp. 888–896. (Russ.).
11. ARABEY, A.B., R.I. BOGDANOV, V.E. IGNATENKO, et al. Effect of corrosion medium composition on rate of crack growth in X70 pipeline steel. *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*. 2011, vol. 47, no. 2, pp. 236–245. ISSN 2070-2051. DOI: 10.1134/S2070205111020031.
12. IGNATENKO, V.E., Yu.I. KUZNETSOV, A.B. ARABEY, et al. Application of the SSRT method to estimate an effect of a corrosive medium composition on the stress-cracking appetite of an X70 pipe steel [Primeneniye metoda SSRT dlya otsenki vliyaniya sostava korrozionnoy sredy na sklonnost trubnoy stali X70 k rastreskivaniyu pod napryazheniyem]. *Korroziya: Materialy, Zashchita*. 2011, vol. 9, pp. 16–25. (Russ.).
13. SUN, F., S. REN, Zh. LI, et al. Comparative study on the stress corrosion cracking of X70 pipeline steel in simulated shallow and deep sea environments. *Materials Science & Engineering: A*. 2017, vol. 685, pp. 145–153. ISSN 0921-5093. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.12.118>.
14. MARSHAKOV, A.I., M.A. MALEEVA, A.A. RYBKINA, et al. Effect of atomic hydrogen on the anodic dissolution of iron in a weakly acidic sulfate electrolyte. *Protection of metals and physical chemistry of surfaces*. 2010, vol. 46, no. 1, pp. 40–49. ISSN 2070-2051. DOI: 10.1134/S2070205110010053.
15. BOGDANOV, R.I., MARSHAKOV A.I., V.E. IGNATENKO. Effect of solution composition on crack growth rate in X70 pipeline steel under static and cyclic loading [Vliyaniye sostava rastvora na skorost rosta treshchiny v trubnoy stali X70 pri staticheskoy i tsiklicheskoj nagruzke]. *Korroziya: materialy, zashchita*. 2011, vol. 11, pp. 30-38. ISSN 1813-7016. (Russ.).
16. NENASHEVA, T.A., A.I. MARSHAKOV. Effect of the occluded hydrogen on kinetics of active dissolution of the St3 steel in the media simulating an “underfilm” electrolyte [Vliyaniye absorbirovannogo metallom vodoroda na kinetiku aktivnogo rastvoreniya stali St3 d sredakh, imitiruyushchikh “podplenochnyy” elektrolit]. *Korroziya: Materialy, Zashchita*. 2009, vol. 2, pp. 1–6. (Russ.).
17. NENASHEVA, T.A., A.I. MARSHAKOV. Effect of the St3-steel-occluded hydrogen on kinetics of its dissolution in the neutral carbonate media [Vliyaniye absorbirovannogo stalyu St3 vodoroda na kinetiku yeye rastvoreniya v neytralnykh karbonatnykh sredakh]. *Korroziya: Materialy, Zashchita*. 2008, vol. 4, pp. 10–15. (Russ.).
18. NENASHEVA, T.A., A.I. MARSHAKOV. Kinetics of dissolution of hydrogenated carbon steel in electrolytes with pH close to neutral. *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*. 2015, vol. 51, no. 6, pp. 1018–1026. ISSN 2070-2051. DOI: 10.1134/S2070205115040255.
19. NATIONAL ENERGY BOARD. *Report of public inquiry concerning stress corrosion cracking on Canadian oil and gas pipelines: report of the inquiry*. Calgary, Alberta, Canada: NEB, 1996, MH-2-95.