

ЧЕБЫШЕВСКИЙ СБОРНИК

Том 23. Выпуск 1.

УДК 539.4

DOI 10.22405/2226-8383-2022-23-1-223-235

О возможности использования метода NACE при проведении ускоренных испытаний арматурного проката на водородное охрупчивание и коррозионное растрескивание

Н. Н. Сергеев, С. Н. Кутепов, А. Н. Сергеев, А. Е. Гвоздев, Е. А. Протопопов,
А. Н. Чуканов, Д. С. Клементьев

Сергеев Николай Николаевич — доктор технических наук, профессор, Тульский государственный педагогический университет им. Л. Н. Толстого (г. Тула).

e-mail: technology@tspu.tula.ru

Кутепов Сергей Николаевич — кандидат педагогических наук, доцент, Тульский государственный педагогический университет им. Л. Н. Толстого (г. Тула).

e-mail: kutepov.sergei@mail.ru

Сергеев Александр Николаевич — доктор педагогических наук, профессор, Тульский государственный педагогический университет им. Л. Н. Толстого (г. Тула).

e-mail: ansergueev@mail.ru

Гвоздев Александр Евгеньевич — доктор технических наук, профессор, Тульский государственный педагогический университет им. Л. Н. Толстого (г. Тула).

e-mail: gwozdew.alexandr2013@yandex.ru

Протопопов Евгений Александрович — кандидат технических наук, Тульский государственный университет (г. Тула).

e-mail: pea_12@mail.ru

Чуканов Александр Николаевич — доктор технических наук, доцент, Тульский государственный педагогический университет им. Л. Н. Толстого (г. Тула).

e-mail: alexchukanov@yandex.ru

Клементьев Денис Сергеевич — аспирант, Тульский государственный педагогический университет им. Л. Н. Толстого (г. Тула).

e-mail: denis.klementev.93@mail.ru

Аннотация

В статье представлен анализ возможности использования стандарта NACE Standard TM0177-2005 при проведении ускоренных лабораторных испытаний на водородное охрупчивание и коррозионное растрескивание арматурного проката. Показано, что применение стандарта NACE при ускоренных лабораторных испытаниях арматурных сталей нецелесообразно, вследствие специфического размера и геометрии образцов для испытаний, не позволяющих приблизить условия испытания к реальным и значительного времени испытания.

Ключевые слова: водородное охрупчивание, коррозионное растрескивание, скорость деформации, арматурная сталь.

Библиография: 17 названий.

Для цитирования:

Н. Н. Сергеев, С. Н. Кутепов, А. Н. Сергеев, А. Е. Гвоздев, Е. А. Протопопов, А. Н. Чуканов, Д. С. Клементьев. О возможности использования метода NACE при проведении ускоренных испытаний арматурного проката на водородное охрупчивание и коррозионное растрескивание // Чебышевский сборник, 2022, т. 23, вып. 1, с. 223–235.

CHEBYSHEVSKII SBORNIK

Vol. 23. No. 1.

UDC 539.4

DOI 10.22405/2226-8383-2022-23-1-223-235

About the possibility of using the NACE method when conducting accelerated tests of rebar rolled products for hydrogen embrittlement and stress corrosion cracking

N. N. Sergeev, S. N. Kutepov, A. N. Sergeev, A. E. Gvozdev, E. A. Protopopov,
A. N. Chukanov, D. S. Klement'yev

Sergeev Nikolay Nikolaevich — doctor of technical science, professor, Tula State Lev Tolstoy Pedagogical University (Tula).

e-mail: technology@tspu.tula.ru

Kutepov Sergey Nikolaevich — candidate of pedagogical science, associate professor, Tula State Lev Tolstoy Pedagogical University (Tula).

e-mail: kutepov.sergei@mail.ru

Sergeev Aleksandr Nikolaevich — doctor of pedagogical science, professor, Tula State Lev Tolstoy Pedagogical University (Tula).

e-mail: ansergueev@mail.ru

Gvozdev Aleksander Evgenyevich — doctor of technical science, professor, Tula State Lev Tolstoy Pedagogical University (Tula).

e-mail: gvozdev.alexandr2013@yandex.ru

Protopopov Evgeny Aleksandrovich — candidate of technical sciences, Tula State University (Tula).

e-mail: pea_12@mail.ru

Chukanov Aleksandr Nikolaevich — doctor of technical science, associate professor, Tula State Lev Tolstoy Pedagogical University (Tula).

e-mail: alexchukanov@yandex.ru

Klement'yev Denis Sergeevich — postgraduate student, Tula State Lev Tolstoy Pedagogical University (Tula).

e-mail: denis.klementev.93@mail.ru

Abstract

The article presents an analysis of the possibility of using the NACE Standard TM0177-2005 standard during accelerated laboratory tests for hydrogen embrittlement and corrosion cracking of rebar rolled products. It is shown that the use of the NACE standard in accelerated laboratory tests of reinforcing steels is impractical, due to the specific size and geometry of the test samples, which do not allow to bring the test conditions closer to real and a significant test time.

Keywords: hydrogen embrittlement, corrosion cracking, deformation rate, reinforcing steel.

Bibliography: 17 titles.

For citation:

N. N. Sergeev, S. N. Kutepov, A. N. Sergeev, A. E. Gvozdev, E. A. Protopopov, A. N. Chukanov, D. S. Klement'yev, 2022, "About the possibility of using the NACE method when conducting accelerated tests of rebar rolled products for hydrogen embrittlement and stress corrosion cracking", *Chebyshevskii sbornik*, vol. 23, no. 1, pp. 223–235.

1. Введение

Жесткие требования по снижению металлоемкости и себестоимости современных и перспективных изделий и конструкций определили резкое возрастание спроса на высокопрочные арматурные стали. Однако в большинстве случаев повышение прочностных характеристик приводит к снижению запаса пластичности и повышению чувствительности материала к хрупкому разрушению. Процесс хрупкого разрушения высокопрочных сталей, как правило, осуществляется по механизму замедленного разрушения, при напряжениях, значительно меньше предела текучести под действием постоянной статической нагрузки спустя некоторое время после нагружения. Особую опасность при этом вызывает замедленное хрупкое разрушение, вызванное совместным воздействием растягивающих напряжений и агрессивных водородсодержащих сред [1, 2].

Основным способом изучения процесса коррозионно-механического разрушения арматурных сталей в водородсодержащих средах является оценка изменения их физико-механических свойств после наводороживания. Из анализа экспериментальных данных по влиянию водорода на свойства сталей следует, что при кратковременных механических испытаниях водородная хрупкость проявляется главным образом в снижении пластичности, а такие механические характеристики как прочность, текучесть, твердость, модуль нормальной упругости существенно не меняются при умеренном наводороживании. Из этого следует, что для оценки влияния водорода рационально использовать все методы испытаний, характеризующие пластичность сталей: испытания на изгиб, растяжение для определения относительного удлинения, сужения и др. [2, 3].

При моделировании процесса водородного растрескивания весьма важным аспектом является разработка соответствующей процедуры испытаний, поскольку от принятого варианта испытаний зависит чистота эксперимента и возможность прогнозирования реального времени до разрушения при водородном растрескивании. Анализ существующих методов коррозионно-механических испытаний показывает, что в России имеется сравнительно малое число ГОСТов, регламентирующих их проведение. Основными ГОСТами, регламентирующими проведение коррозионно-механических испытаний, являются: ГОСТ 9.901.1-89, ГОСТ 9.901.4-89, ГОСТ 9.903-81, ГОСТ Р 53679-2009, ГОСТ Р 9.915-2010. Среди зарубежных ГОСТов следует отметить стандарты ASTM F519-13, ASTM F519-17, NACE Standard TM0177-2005, регламентирующие проведение испытаний на водородное охрупчивание и коррозионное растрескивание.

Многообразие условий, при которых возникает хрупкое разрушение металлических деталей и конструкций, породило большое количество методов определения характеристик КМР. Ускоренные лабораторные испытания проводятся на оборудовании, в котором напряженное состояние образца достигается различными способами. В зависимости от способа создания напряженного состояния (одноосное растяжение, растяжение при изгибе и натяжение на неподвижные опоры) в процессе эксперимента может изменяться как уровень растягивающих напряжений, так и деформация образца [1, 2].

Поэтому выбор типа испытательных образцов и метода проведения ускоренных лабораторных испытаний на водородное охрупчивание и коррозионное растрескивание является весьма актуальной задачей при организации коррозионно-механических испытаний.

Цель настоящей работы – анализ применимости стандарта NACE Standard TM0177-2005 для испытаний стальной стержневой арматуры на водородное охрупчивание и коррозионное растрескивание.

2. Анализ стандарта «NACE Standard TM0177-2005»

За рубежом одним из наиболее часто используемых методов проведения лабораторных испытаний на водородное охрупчивание и коррозионное растрескивание под напряжением (КРН) является метод испытания с медленной скоростью деформации (Slow Strain Rate Test – SSRT).

С целью усовершенствования технологии испытаний для определения склонности легированных материалов к КРН с учетом взаимодействия механических нагрузок и агрессивных сред впервые в 1960-х годах было проведено испытание с медленной скоростью деформации. Одной из наиболее примечательных особенностей является скорость испытания, при которой экспериментальные результаты могут быть получены в течение определенного времени эксперимента [4]. Метод SSRT требует меньше финансовых ресурсов, чем испытания на распространение трещин по механике разрушения, потому что геометрия образца и процедура испытаний более просты [5]. По этим причинам метод SSRT был принят для испытаний материалов, которые работают в условиях эксплуатации близких к условиям коррозионного растрескивания под напряжением.

Сущность метода заключается в том, что испытуемый образец непрерывно перемещается с постоянной скоростью деформации до полного разрушения. Данный метод испытаний очень привлекателен, поскольку он дает окончательный ответ в течение относительно короткого времени на вопрос о том, проявляет ли система сплав - окружающая среда восприимчивость к КРН [6]. Время до разрушения материала обычно используется для того, чтобы сделать выводы о свойствах материала в конкретных условиях испытаний, поскольку оно может быть получено сразу после разрушения образца. Кроме того, параметры пластичности испытуемого образца, такие как сужение или удлинение, могут быть легко измерены после завершения испытания.

Поскольку этот метод испытаний наиболее чувствителен к скорости деформации, которая играет значительную роль в контроле времени до разрушения материала, необходимо предварительно определить соответствующую скорость деформации, чтобы гарантировать, что разрушение образца полностью вызвано совместным воздействием механических нагрузок и агрессивной среды.

Например, когда испытание проводится при относительно высоких скоростях деформации, разрушение материала не зависит от воздействия агрессивной среды, которое является основной причиной развития процесса КРН, поскольку для взаимодействия между материалами и окружающей средой требуется достаточный период времени. Поэтому разрушение за счет механизма коалесценции микропор на поверхности разрушения обычно обнаруживается и используется для описания процесса разрушения образца при быстром разрыве (вязкое разрушение). Разрушение образца при КРН может произойти при использовании соответствующей скорости деформации, поскольку необходимо обеспечить достаточное время для взаимодействия агрессивной среды, материала и механической нагрузки. Тем не менее, следует отметить, что скорость деформации не должна быть слишком низкой, поскольку в этом случае испытания занимают слишком большой промежуток времени.

В зависимости от конкретных условий испытаний и исследуемых материалов для SSRT-метода обычно рекомендуются постоянные скорости деформации в диапазоне от $1,0 \cdot 10^{-5}$ до $1,0 \cdot 10^{-8} \text{ с}^{-1}$ для оценки чувствительности металлов и сплавов к растрескиванию, вызванного коррозионно-механическим воздействием [5-7].

Образцы для испытания методом SSRT на растяжение могут быть изготовлены в различных формах в зависимости от стандартных испытаний и заданных материалов. Основой для проведения испытаний служит NACE Standard TM0177-2005 «Laboratory Testing of Metals for Resistance to Sulfide Stress Cracking and Stress Corrosion Cracking in H₂S Environments» (Лабораторные испытания металлов на устойчивость к сульфидному растрескиванию под на-

пряжением и КРН в сероводородсодержащих средах).

Данный стандарт был установлен Национальной ассоциацией инженеров по коррозии (NACE) для оценки чувствительности металлических материалов к сульфидному КРН в водородсодержащей среде. Основные положения этого стандарта можно свести к следующему:

1. Анизотропия материала по отношению к механическим свойствам и чувствительности к коррозионному растрескиванию является важным параметром. Характер распространения трещин в испытуемом образце должен соответствовать характеру распространения трещин, наблюдаемых в реальных условиях эксплуатации металлического изделия.

2. Гальванические эффекты между разнородными металлами могут либо ускорять, либо уменьшать чувствительность к растрескиванию: например, ускорение чувствительности к растрескиванию может иметь место в некоторых сплавах на основе никеля, когда они контактируют с электрохимически менее активными сплавами, например, низколегированной сталью, тогда как чувствительность к растрескиванию дуплексных нержавеющей сталей, соединенных с электрохимически менее активным сплавом, может быть уменьшена.

3. Температура испытания может повлиять на чувствительность к растрескиванию. Испытания при температурах выше $+23\text{ }^{\circ}\text{C}$ снижают чувствительность исследуемых материалов (сталей) к растрескиванию, в то время как чувствительность к растрескиванию может быть значительно повышена, если испытание проводится при температурах ниже $23\text{ }^{\circ}\text{C}$.

4. Различные методы испытаний могут не обязательно обеспечивать одинаковое время до разрушения однотипных материалов.

5. Неоднородная структура испытуемых материалов, например, сварных соединений, может привести к отклонению результатов испытаний.

6. Максимальные напряжения без разрушения в течение определенного периода воздействия следует рассматривать как кажущееся пороговое напряжение. Более длительное время выдержки или большее количество образцов могут привести к более низким пороговым значениям.

7. Результаты испытаний на сульфидное коррозионное растрескивание под напряжением могут обладать широким разбросом времени до разрушения. Повторные испытания необходимы для получения качественных значений, применимых для характеристики чувствительности материала к растрескиванию.

8. Время испытания варьируется в широких пределах в зависимости от различных типов испытаний (растяжение, изгиб) на коррозионное растрескивание под напряжением.

Стандарт устанавливает четыре метода испытаний на стойкость металлов и сплавов к растрескиванию: 1) стандартное испытание на растяжение (метод А); 2) стандартное испытание балки на изгиб (метод В), 3) стандартное испытание С-образных колец (метод С) и стандартное испытание двойной консольной балки (DCB) (метод D). Наиболее широкое применение нашел метод А. Рассмотрим основные особенности данного метода.

При изготовлении стандартного образца для испытаний методом А необходимо учитывать следующие моменты:

1. Влияние размера и формы образца – рабочая длина образца имеет длину 25,4 мм, а диаметр образца на этом участке составляет 6,4 мм и длину 25,4 мм.

2. Радиус кривизны на обоих концах образца для испытаний должен составлять не менее 15 мм, чтобы избежать высокой концентрации напряжений и разрушения в месте скругления.

3. Концы образца должны быть достаточно длинными, чтобы на них помещались уплотнения для коррозионной камеры, и чтобы они прочно удерживались в захватах испытательной машины.

4. Механическую обработку испытуемого образца необходимо производить осторожно, чтобы избежать перегрева и холодной обработки. Из последних двух проходов образца следует удалить не более 0,05 мм. Шлифование также допустимо. Шероховатость поверхности образца должна быть ниже 0,81 мкм.

5. Образец следует обезжирить перед установкой в испытательную камеру. Измерительную секцию не следует трогать или загрязнять после очистки.

Электролитический раствор для испытания на растяжение по стандарту NACE должен состоять из 5,0% масс. NaCl и 0,5% масс. уксусной кислоты в дистиллированной или деионизированной воде. Для получения точных результатов испытания процедуру испытания следует выполнять шаг за шагом следующим образом:

1. Измерение диаметра испытуемого образца для расчета нагрузки на образец в соответствии с требуемым уровнем напряжения.

2. Установка образца в коррозионную камеру и последующая ее герметизация во избежание загрязнения среды в камере в процессе испытания.

3. Внешнее растягивающее напряжение прикладывается к испытуемому образцу с небольшим увеличением монотонного смещения, но следует соблюдать осторожность, чтобы не превысить требуемый уровень напряжения.

4. Коррозионная камера немедленно заполняется деаэрированным раствором. Этот раствор следует продувать инертным газом в течение не менее 20 мин, чтобы убедиться, что испытуемый раствор не содержит кислорода перед введением сероводорода. Затем коррозионный раствор насыщают со скоростью от 100 до 200 мл·мин⁻¹ в течение 20 мин на литр коррозионного раствора.

5. Испытания считают успешным, если произошло разрушение образца или же он не разрушился в течение 720 ч испытаний. Если образец разрушился при времени испытания менее 720 ч, материал, из которого он изготовлен, считают нестойким к сульфидному коррозионному растрескиванию. Если же образец прошел испытания в течение 720 ч без разрушения, проводят его визуальный осмотр для выявления признаков растрескивания.

Время до разрушения представляется очень полезным и гораздо более применимым для оценки чувствительности материалов к коррозионному растрескиванию, вызванному взаимодействием механических нагрузок и агрессивных сред, и поэтому его следует регистрировать с помощью систем регистрации времени.

Исходя из вышеизложенного можно выделить следующие достоинства и недостатки данного метода испытаний:

– *достоинства*: возможность уменьшения продолжительности испытания за счет контроля скорости деформации; получение качественных данных для оценки стойкости материала к коррозионному растрескиванию; изменчивость условий испытаний в зависимости от конкретных условий;

– *недостатки*: значительная трудоемкость процесса; специфические размеры и геометрия образца для коррозионно-механических испытаний; высокие требования к контролю процесса коррозионного растрескивания и водородного охрупчивания во избежание получения некорректных результатов испытаний.

3. Влияние масштабного фактора поверхности на чувствительность арматурной стали к водородному охрупчиванию

Поскольку особенностью стержневой арматуры железобетона является периодический профиль, сформированный в процессе горячей прокатки, совершенно очевидно, что не учитывать эту особенность при исследовании процессов коррозионного растрескивания и водородного охрупчивания будет большой ошибкой.

Для определения влияния состояния поверхности и масштабного фактора на длительную коррозионную прочность в среде, вызывающей водородное охрупчивание, была выбрана арматурная сталь марки 20ГС2 (четыре плавки). Химический состав исследуемых плавок приведен в табл. 1.

Таблица 1: Химический состав и механические свойства исследованных плавок стали 20ГС2

№ плавки	Содержание элементов, %					Механические свойства			Вид обработки поверхности, диаметр
	C	Mn	Si	S	P	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ_5 , %	
1	0,19	1,13	2,17	0,040	0,016	1300	1200	14,3	ВТМО, периодический профиль, $\varnothing 10$ мм
2	0,18	1,30	2,04	0,032	0,017	1200	1080	15,0	Гладкокатанная, $\varnothing 10$ мм
3	0,20	1,08	1,62	0,029	0,015	1280	1130	15,2	Периодический профиль, $\varnothing 12$ мм
4	0,23	1,20	2,00	0,026	0,014	1300	1180	14,8	Периодический профиль, $\varnothing 14$ мм

Испытаниям подвергли натурные образцы ($l = 300 \dots 400$ мм) различного диаметра (10, 12 и 14 мм) с гладкокатыным и с периодическим профилем (рис. 1, а,б). Также из натурных стержней (гладкокатынных и с периодическим профилем) диаметром 10, 12 и 14 мм были изготовлены образцы (рис. 1, в) с диаметром рабочей части от 6 до 10 мм через 1 мм с чистотой поверхности Ra 2,5.

По расположению этих кривых видно, что увеличение диаметра испытываемых образцов от 6 мм до исходного размера стержневой арматуры повышает длительную коррозионную прочность. Причем увеличение стойкости для образцов гладкокатынной стали значительно больше, чем с периодическим профилем. Отсюда следует, что несмотря на то, что точеные образцы $\varnothing 6$ мм, изготовленные из арматурной стали периодического профиля, имеют лучшую стойкость по сравнению с точеными образцами из гладкокатынной стали; натурные образцы с периодическим профилем наоборот имеют меньшую стойкость, чем гладкокатынные натурные образцы. Это можно объяснить тем, что элементы периодического профиля являются концентраторами напряжений, наличие которых облегчает и ускоряет зарождение и развитие субмикротрещин и микротрещин [1, 8].

Длительную коррозионную прочность оценивали временем до разрушения по результатам испытаний трех-четырех образцов на каждую точку графика. Для создания условий эксперимента, максимально приближенных к эксплуатационным, испытания проводили в водном растворе серной кислоты с добавлением роданистого аммония (4,5 % H_2SO_4 + 2,5 % NH_4CNS) при комнатной температуре с катодной поляризацией $j_K = 60$ А/м² и различном уровне растягивающих напряжений $\sigma_{\text{Э}} = 300 \dots 1000$ МПа. Данная среда была выбрана согласно рекомендациям, приведенным в работе [1].

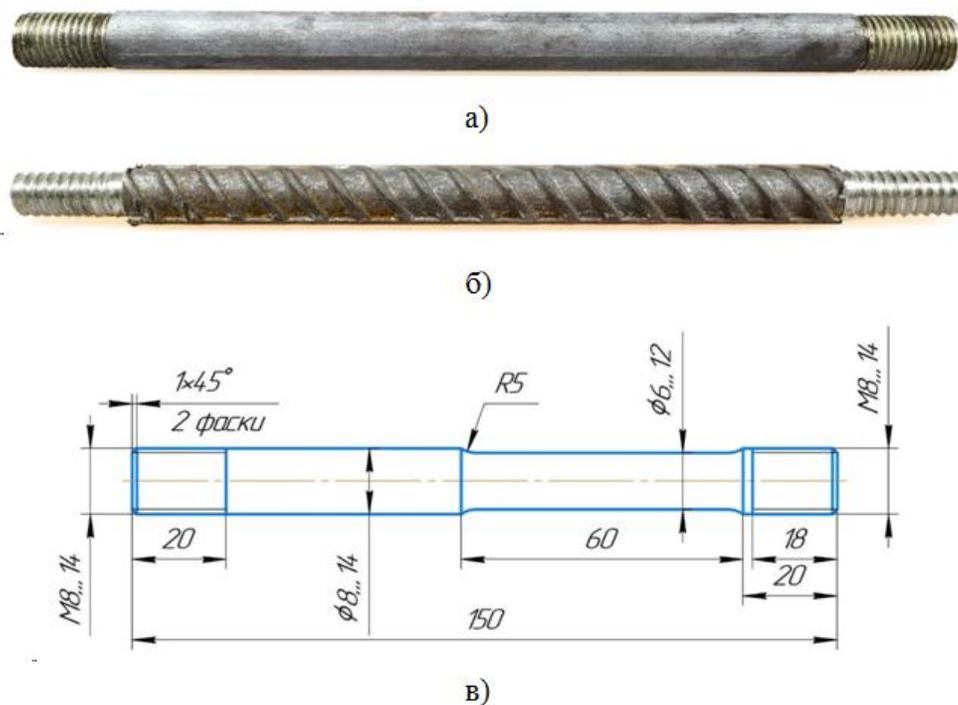


Рис. 1: Образцы для коррозионно-механических испытаний: а) натуральный гладкокатанный; б) натуральный периодической профиля; в) эскиз точеного образца

На рис. 2 представлены кривые длительной коррозионной прочности, отображающие стойкость натуральных образцов гладкокатанных и с периодическим профилем в зависимости от уровня растягивающих напряжений (на каждую точку было испытано по 4 образца).

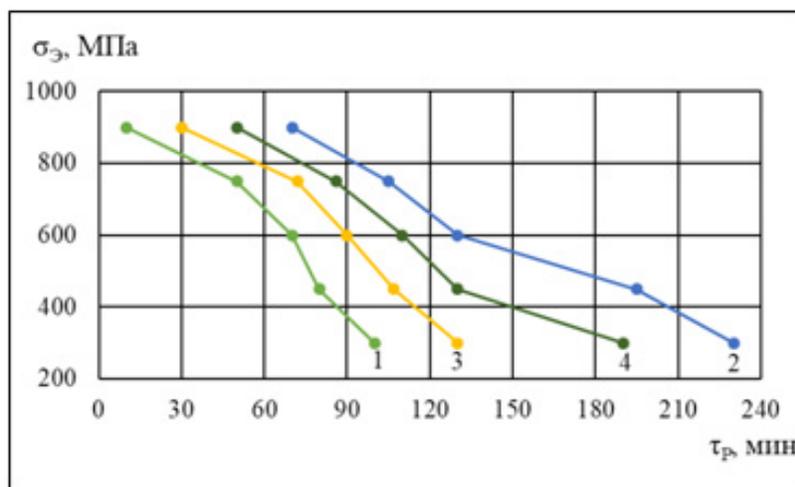


Рис. 2: Длительная коррозионная прочность точеных (1, 3) и натуральных (2, 4) образцов из стали 20ГС2 в среде, вызывающей ВР: 1) изготовленные из гладкокатанной стали ($\phi 6$ мм); 2) натуральные гладкокатанные; 3) изготовленные из стали с периодическим профилем ($\phi 6$ мм); 4) натуральные с периодическим профилем

Анализ влияния диаметра испытываемых образцов на длительную коррозионную прочность показал [8], что изменение стойкости образцов, изготовленных из гладкокатанной арматуры и из арматуры периодического профиля при различных уровнях растягивающего на-

пряжения, происходит по-разному. При уровне растягивающих напряжений 1000...600 МПа с возрастанием диаметра образца наблюдается увеличение длительной коррозионной прочности, а при переходе от точеных образцов к натурным наблюдается резкое понижение стойкости, причем для образцов с периодическим профилем уменьшение стойкости начинается с диаметра 8 мм.

При уменьшении растягивающих напряжений до 400 МПа начинает изменяться характер кривых, уменьшается влияние поверхности на длительную коррозионную прочность, а для образцов, изготовленных из гладкой арматурной стали, влияние поверхности при растягивающем напряжении 400 МПа практически отсутствует.

Для образцов, изготовленных из периодической арматурной стали, снижение стойкости наблюдается в интервале размеров диаметра от 8 мм до 9 мм с последующим повышением стойкости при переходе к натурным образцам. Это можно объяснить влиянием поверхности и живого сечения арматуры периодического профиля. При обтачивании арматуры до диаметра 9 мм нарушается поверхностная сплошность образца, но остаются концентраторы напряжений, в которых и происходит локальное накопление микронапряжений под воздействием внешних растягивающих напряжений, среды и диффундирующего водорода, которое может привести к зарождению и развитию микротрещин.

При высоких уровнях растягивающих напряжений и наличии концентраторов внутренних напряжений на поверхности происходит быстрое зарождение, а чаще всего развитие уже имеющихся на поверхности и в поверхностном объеме дефектов, которые и являются зародышами микротрещин. Ускорению этого процесса способствует совместное воздействие среды и водорода, которое на первых этапах облегчает процесс зарождения микротрещин за счет адсорбции этого эффекта, а затем может способствовать упрочнению поверхности, доводя внутренние напряжения до критического значения в локальных микрообъемах, приводящего к образованию микротрещин, а затем облегчает развитие и распространение этих микротрещин. Уменьшение внешних растягивающих напряжений замедляет протекание перечисленных процессов, а наличие остаточных локальных напряжений в поверхностном слое металла является недостаточным для быстрого зарождения субмикротрещин, в результате чего удлиняется инкубационный период.

Наблюдаемый масштабный эффект был проверен на натуральных образцах высокопрочной арматурной стали марки 20ГС2 периодического профиля различного диаметра в состоянии поставки [8]. Анализ полученных результатов показал, что увеличение живого сечения испытываемых образцов приводит к возрастанию длительной коррозионной прочности, а дефектность поверхности (наличие окалина, задигов, микроязв и несплошностей, а также неравномерное распределение внутренних напряжений, обусловленное профилем) оказывает обратное влияние – уменьшает стойкость образцов при испытании в водородосодержащих средах.

Увеличение длительной коррозионной прочности высокопрочной арматурной стали как точеных, так и натуральных образцов, можно объяснить специфической особенностью распределения диффундирующего водорода в напряженном поверхностном объеме металла. При увеличении сечения образца возрастает время диффузии водорода вглубь образца и в то же время наличие большого количества дефектов приводит к более равномерному распределению водорода в них и, следовательно, увеличивает время создания критического содержания водорода в локальных микрообъемах, которое способствует охрупчиванию металла и созданию высокого уровня локальных микронапряжений, приводящих к зарождению и развитию микротрещин. Зарождение большого количества субмикротрещин в поверхностном слое образца приводит к релаксации и перераспределению локальных микронапряжений, замедляя развитие этих субмикротрещин. Требуется определенное время для создания в этих локальных объемах соответствующего напряженного состояния, необходимого для развития микротрещин. Величина этого напряжения зависит от внешних растягивающих напряжений и концентрации водорода в этих микрообъемах.

4. Заключение

На основании проведенных исследований о влиянии геометрии и размера образца на длительную коррозионную прочность в среде, вызывающей водородное охрупчивание, можно сделать следующие *выводы*:

1) Натурные образцы арматурной стали марки 20ГС2 по сравнению с точеными обладают меньшей чувствительностью к водородному растрескиванию. Данное обстоятельство обусловлено тем фактом, что после механической обработки резанием в точеных образцах значение уровня остаточных растягивающих напряжений значительно выше, чем в натурных образцах.

2) Натурные образцы арматурной стали марки 20ГС2 с периодическим профилем обладают меньшей стойкостью к водородному растрескиванию по сравнению с натурными гладкокатыными образцами. Меньшая стойкость к водородному растрескиванию арматуры периодического профиля обусловлена наличием на ее поверхности ребер, которые играют роль естественных концентраторов напряжений.

Таким образом, проведенный анализ требований стандарта «NACE Standard TM0177-2005» и результаты коррозионно-механических испытаний стержневой арматуры марки 20ГС2, позволяют рекомендовать использовать для испытаний на коррозионно-механическое разрушение в средах, вызывающих наводороживание натурные образцы, т. к. их применение позволяет приблизить условия эксперимента к реальным условиям эксплуатации изделий, сократить трудоемкость проведения испытаний за счет более простой конфигурации образца, сохранения его профиля (что особенно важно при испытании арматуры периодического профиля) и использования коррозионной среды не требующей специальной подготовки.

Полученные результаты могут быть использованы при создании ресурсосберегающих процессов обработки материалов [9-17].

СПИСОК ЦИТИРОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сергеев Н. Н., Сергеев А. Н. Механические свойства и внутреннее трение высоко-прочных сталей в коррозионных средах: монография. Тула: Изд-во ТулГУ, 2018. 430 с.
2. Сергеев Н. Н., Сергеев А. Н., Кутепов С. Н., Гвоздев А. Е., Ушаков М. В., Извольский В. В. Физико-механические и коррозионные свойства металлических материалов, эксплуатируемых в агрессивных средах. Тула: Изд-во ТулГУ, 2019. 553 с.
3. Сергеев Н. Н., Извольский В. В., Сергеев А. Н., Кутепов С. Н., Гвоздев А. Е., Клементьев Д. С., Пантюхин О. В. Разработка методики исследования коррозионно-механического разрушения арматурных сталей в водородосодержащих средах // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2018. Вып. 8. С. 35-56.
4. Baumert K. L., Watkins W. R. Case histories using the slow strain rate test // Slow strain rate testing for the evaluation of environmentally induced cracking: Research and Engineering Applications.; R.D.Kane (ed.). ASTM, 1993. P. 173-180.
5. Beavers J. A., Koch G. H. Limitations of the slow strain rate test technique // Slow strain rate testing for the evaluation of environmentally induced cracking: Research and Engineering Applications.; R.D.Kane (ed.). ASTM, 1993. P. 22-39.
6. Parkins R. D. Slow strain rate testing – 25 years experience // Slow strain rate testing for the evaluation of environmentally induced cracking: Research and Engineering Applications.; R.D.Kane (ed.). ASTM, 1993. P. 7-21.

7. Kane R. D., Wilhelm S. M. Status of standardization activities on slow strain rate testing techniques // Slow strain rate testing for the evaluation of environmentally induced cracking: Research and Engineering Applications.; R.D.Kane (ed.). ASTM, 1993. P. 40-47.
8. Сергеев Н. Н., Извольский В. В., Сергеев А. Н., Кутепов С. Н., Гвоздев А. Е., Агеева Е. В., Клементьев Д. С., Кругляков О. В. Влияние масштабного фактора и состояния поверхности на чувствительность стали 20ГС2 к водородному растрескиванию // Известия Юго-Западного государственного университета. 2019. Т. 23. № 5. С. 8-22.
9. Шоршоров М. Х., Гвоздев А. Е., Сергеев А. Н., Кутепов С. Н., Кузовлева О. В., Селедкин Е. М., Клементьев Д. С., Калинин А. А. Моделирование процессов ресурсосберегающей обработки слитковых, порошковых, наноструктурных и композиционных материалов: монография. Изд. 2-е, испр. и доп. М.; Вологда: Инфра-Инженерия, 2021. 360 с.
10. Sergeev N. N., Kutepov S. N., Sergeev A. N., Kolmakov A. G., Izvol'skii V. V., Gvozdev A. E. Long-term strength of 22Kh2G2AYu reinforcing-bar steel during corrosion cracking tests in a boiling nitrate solution // Russian Metallurgy (Metally). 2020. № 4. P.434-440.
11. Sergeev N. N., Sergeev A. N., Kutepov S. N., Gvozdev A. E., Kolmakov A. G., Klementev D. S. Influence of heat treatment on residual stress formation in the wear-resistant steel 60–steel 15–steel 60 bimetal material // Inorganic Materials: Applied Research. 2021. Vol. 12. № 1. P. 5-9.
12. Сергеев А. Н., Кутепов С. Н., Кузовлева О. В., Гвоздев А. Е., Клементьев Д. С. Математическое планирование и моделирование процессов поведения металлических систем в экстремальных условиях и состояниях // Алгебра, теория чисел и дискретная геометрия: современные проблемы, приложения и проблемы истории: Материалы XVIII Международной конференции, посвящённой со дня рождения профессоров Б.М. Бредихина, В.И. Нечаева и С.Б. Стечкина. Тула: ТГПУ им. Л. Н. Толстого, 2020. С. 385-388.
13. Гвоздев А. Е. Экстремальные эффекты прочности и пластичности в металлических высоколегированных слитковых и порошковых системах: монография. 2-е изд., исправ. и доп. Тула: Изд-во ТулГУ, 2019. 477 с.
14. Шоршоров М. Х., Гвоздев А. Е., Золотухин В. И., Сергеев А. Н., Калинин А. А., Бреки А. Д., Сергеев Н. Н., Кузовлева О. В., Стариков Н. Е., Малий Д. В. Разработка прогрессивных технологий получения и обработки металлов, сплавов, порошковых и композиционных наноматериалов: монография. Тула: Изд-во ТулГУ, 2016. 235 с.
15. Программный комплекс для анализа коррозионных процессов и прогнозирования характеристик длительной прочности и долговечности арматурных сталей классов прочности А600-А1000 и Ат600-Ат1000 в условиях водородной стресс-коррозии: а. с. № 2019613673 Российская Федерация / Д. М. Хонелидзе, А. Н. Сергеев, А. Н. Чуканов, Д. В. Малий, С. Н. Кутепов, А. Е. Гвоздев, Д. С. Клементьев, Д. С. Метелкина, Е. В. Цой; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «ТГПУ им. Л. Н. Толстого». – № 2019612300; за-явл. 07.03.2019. опублик. 21.03.2019.
16. Способ формирования упрочненного поверхностного слоя в зоне лазерной резки деталей из легированных конструкционных сталей: патент на изобретение № 2707374 Российская Федерация / Н. Н. Сергеев, И. В. Минаев, И. В. Тихонова, А. Е. Гвоздев, А. Н. Сергеев, А. Г. Колмаков, С. Н. Кутепов, Д. В. Малий, И. В. Голышев; заявитель и патентообладатель ООО «МЕТАЛЛИКА71» № 2019115250; заявл. 17.05.2019; опублик. 26.11.2019.

17. Математический цифровой комплекс для расчета длительной коррозионной прочности арматурной стали марки 20ГС2 при разных температурах отпуска: а. с. № 2021681247 / Д. С. Клементьев, А. Н. Сергеев, П. Н. Медведев, С. Н. Кутепов, Д. В. Малий, Ю. С. Дорохин, А. Е. Гвоздев; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «ТГПУ им. Л. Н. Толстого». №2021680533; заявл. 10.12.2021; опублик. 20.12.2021.

REFERENCES

1. Sergeev N. N. & Sergeev A. N. 2018, *Mechanical properties and internal friction of high-strength steels in corrosion environments: monograph*, TulGU, Tula.
2. Sergeev N. N., Sergeev A. N., Kutepov S. N., Gvozdev A. E., Ushakov M. V. & Izvol'skii V. V. 2019, *Physical-mechanical and corrosion properties of metallic materials operated in aggressive environments*, TulGU, Tula.
3. Sergeev N. N., Izvol'skii V. V., Sergeev A. N., Kutepov S. N., Gvozdev A. E., Klementev D. S. & Pantyukhin O. V. 2018, "Development of a method for studying the corrosion-mechanical failure of reinforcing steels in hydrogen-containing media", *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki*, issue 8, pp. 35-56.
4. Baumert, K. L. & Watkins, W.R. 1993, "Case histories using the slow strain rate test", *Slow strain rate testing for the evaluation of environmentally induced cracking: Research and Engineering Applications*; R.D.Kane (ed.), ASTM, pp. 173-180.
5. Beavers J. A. & Koch G. H. 1993, "Limitations of the slow strain rate test technique", *Slow strain rate testing for the evaluation of environmentally induced cracking: Research and Engineering Applications*, R.D.Kane (ed.), ASTM, pp. 22-39.
6. Parkins R. D. 1993, "Slow strain rate testing – 25 years experience", *Slow strain rate testing for the evaluation of environmentally induced cracking: Research and Engineering Applications*, R.D.Kane (ed.), ASTM, pp. 7-21.
7. Kane R. D. & Wilhelm S. M. 1993, "Status of standardization activities on slow strain rate testing techniques", *Slow strain rate testing for the evaluation of environmentally induced cracking: Research and Engineering Applications*, R.D.Kane (ed.), ASTM, pp. 40-47.
8. Sergeev N. N., Izvol'skii V. V., Sergeev A. N., Kutepov S. N., Gvozdev A. E., Ageeva E. V., Klementev D. S. & Kruglyakov O. V. 2019, "Influence of the scale factor and state of the surface on the sensitivity of steel 20GS2 to hydrogen cracking", *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta*, vol. 23, no. 5, pp. 8-22.
9. Shorshorov M. Kh., Gvozdev A. E., Sergeev A. N., Kutepov S. N., Kuzovleva O. V., Seledkin E. M., Klementev D. S. & Kalinin A. A. 2021, *Modeling of resource-saving processes processing of ingot, powder, nanostructured and composite materials: monograph. Ed. 2nd, rev. and additional*, Infra-Engineering, Moscow, Vologda.
10. Sergeev N. N., Kutepov S. N., Sergeev A. N., Kolmakov A. G., Izvol'skii V. V. & Gvozdev A. E. 2020, "Long-term strength of 22Kh2G2AYu reinforcing-bar steel during corrosion cracking tests in a boiling nitrate solution", *Russian Metallurgy (Metally)*, no. 4, pp. 434-440.
11. Sergeev N. N., Sergeev A. N., Kutepov S. N., Gvozdev A. E., Kolmakov A. G. & Klementev D. S. 2021, "Influence of heat treatment on residual stress formation in the wear-resistant steel 60–steel 15–steel 60 bimetal material", *Inorganic Materials: Applied Research*, vol. 12, no. 1, pp. 5-9.

12. Sergeev A. N., Kutepov S. N., Kuzovleva O. V., Gvozdev A. E. & Klementev D. S. "Mathematical planning and modeling of the processes of behavior of metal systems in extreme conditions and states", *Algebra, teoriya chisel i diskretnaya geometriya: sovremennyye problemy, prilozheniya i problemy istorii* (Proc. XVIII Int. Conf. dedicated to the birthday of professors B.M. Bredikhina, V.I. Nechaev and S.B. Stechkin). Tula, 2020, pp. 385-388.
13. Gvozdev A. E. 2019, *Extremal effects of strength and plasticity in highly alloyed metal ingot and powder systems: monograph. 2nd ed., corrected and additional*, TulGU, Tula.
14. Shorshorov M. Kh., Gvozdev A. E., Zolotukhin V. I., Sergeev A. N., Kalinin A. A., Breki A. D., Sergeev N. N., Kuzovleva O. V., Starikov N. E. & Maliy D. V. 2016, *Development of progressive technologies for the production and processing of metals, alloys, powder and composite nanomaterials: monograph*, TulGU, Tula.
15. Khonelidze D. M., Sergeev A. N., Chukanov A. N., Maliy D. V., Kutepov S. N., Gvozdev A. E., Klementev D. S., Metelkina D. S. & Tsoi E. V. 2019, *Software package for analysis of corrosion processes and prediction of long-term strength and durability characteristics of reinforcing steels of strength classes A600-A1000 and At600-At1000 under hydrogen stress corrosion*, Russia, cer. of aut. no. 2019613673.
16. Sergeev N. N., Minaev I. V., Tikhonova I. V., Gvozdev A. E., Sergeev A. N., Kolmakov A. G., Kutepov S. N., Maliy D. V. & Golyshev I. V. 2019, *Method for forming a hardened surface layer in the zone of laser cutting of parts from alloyed structural steels*, Russia, patent no. 2707374.
17. Klementev D. S., Sergeev A. N., Medvedev P. N., Kutepov S. N., Maliy D. V., Dorokhin Yu. S. & Gvozdev A. E. 2021, *Mathematical digital complex for calculating the long-term corrosion strength of 20GS2 reinforcing steel at different tempering temperatures*, Russia, cer. of aut. no. 2021681247.

Получено 28.11.2021 г.

Принято в печать 27.02.2022 г.