

УДК 620.1: 621.78

Н.Н. Сергеев, д-р техн. наук, профессор, Тульский государственный педагогический университет им. Л. Н. Толстого (Тула, Россия) (e-mail: technology@tspu.tula.ru)

В.В. Извольский, канд. техн. наук, доцент, Тульский государственный университет (Тула, Россия) (e-mail: kafedrasmik@mail.ru)

А.Н. Сергеев, д-р пед. наук, профессор, Тульский государственный педагогический университет им. Л. Н. Толстого (Тула, Россия) (e-mail: ansergueev@mail.ru)

С.Н. Кутепов, канд. пед. наук, Тульский государственный педагогический университет им. Л. Н. Толстого (Тула, Россия) (e-mail: kutepov.sergei@mail.ru)

А.Е. Гвоздев, д-р техн. наук, профессор, Тульский государственный педагогический университет им. Л. Н. Толстого (Тула, Россия) (e-mail: gwozdew.alexandr2013@yandex.ru)

Е.В. Агеев, д-р техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» (Курск, Россия) (e-mail: ageev_ev@mail.ru)

Д.С. Клементьев, магистр, Тульский государственный педагогический университет им. Л. Н. Толстого (Тула, Россия) (e-mail: denis.klementev.93@mail.ru)

ВЛИЯНИЕ МИКРОСТРУКТУРНЫХ ФАКТОРОВ И ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА КОРРОЗИОННУЮ СТОЙКОСТЬ АРМАТУРНОЙ СТАЛИ КЛАССА А600

В настоящее время горячекатаная стержневая арматура класса А600 из низколегированных сталей в состоянии поставки имеет высокую склонность к такому специфичному виду разрушения, как коррозионное растрескивание под напряжением (КРН). Однако возможные случаи обрушения напрягаемых железобетонных конструкций, в большинстве случаев инициируемые коррозионным растрескиванием под напряжением, ставят проблему этого вида разрушения особенно остро.

При коррозионном растрескивании под напряжением происходит образование трещин, возникновение которых зависит не только от структурного состояния материала, вида и уровня напряжений, но также и от степени агрессивности среды в которой происходит эксплуатация. В этой связи представляется весьма актуальным установить, как изменяется коррозионная стойкость арматурной стали класса А600 в зависимости от изменения химического состава, микроструктуры, уровня приложенных и остаточных микронапряжений, и различных режимов термической обработки. Цель настоящей работы – исследование влияния вышеуказанных факторов на сопротивляемость низколегированной арматурной стали класса А600 коррозионному растрескиванию под напряжением

Показано, что чувствительность арматуры к коррозионному растрескиванию под напряжением в значительной степени определяется химическим составом (в основном содержанием углерода), типом микроструктуры и уровнем остаточных микронапряжений. Исследовано влияние режимов термической обработки на коррозионную стойкость арматурной стали класса прочности А600 в растворах нитратов. Показано, что применение дополнительной термической обработки (нормализация и улучшение) повышает коррозионную стойкость стали. Высокую коррозионную стойкость арматура из стали имеет только при содержании углерода на нижнем пределе марочного состава, что обеспечивается структурой однородного бейнита при механических свойствах на уровне класса прочности А600. При более высоких механических свойствах арматура из стали имеет более низкую коррозионную стойкость.

Ключевые слова: арматурная сталь, коррозионное растрескивание под напряжением, коррозионная стойкость, термическая обработка.

DOI: 10.21869/2223-1560-2018-22-2-52-63

Ссылка для цитирования: Влияние микроструктурных факторов и термической обработки на коррозионную стойкость арматурной стали класса А600 / Н.Н. Сергеев, В.В. Извольский, А.Н. Сергеев, С.Н. Кутепов, А.Е. Гвоздев, Е.В. Агеев, Д.С. Клементьев // Известия Юго-Западного государственного университета. 2018. Т. 22, № 2(77). С. 52-63.

Введение

Выпускаемая в настоящее время металлургической промышленностью горя-

чекатаная стержневая арматура класса А600 из низколегированных сталей в состоянии поставки имеет высокую склон-

ность к такому специфичному виду разрушения, как коррозионное растрескивание под напряжением (КРН). Однако возможные случаи обрушения напрягаемых железобетонных конструкций, в большинстве случаев инициируемые КРН, ставят проблему этого вида разрушения особенно остро.

При КРН происходит образование трещин, возникновение которых зависит не только от структурного состояния материала, вида и уровня напряжений, но также и от степени агрессивности среды, в которой происходит эксплуатация [1, 2]. В этой связи представляется весьма актуальным установить, как изменяется коррозионная стойкость арматурной стали класса А600 в зависимости от изменения химического состава, микроструктуры, уровня приложенных и остаточных микронапряжений, и различных режимов термической обработки.

Цель настоящей работы – исследование влияния вышеуказанных факторов на сопротивляемость низколегированной арматурной стали класса А600 коррозионному растрескиванию под напряжением.

1. Материалы и методы исследования

Исследование стойкости стержневой арматуры к КРН проводили на опытных плавках сталей марки 80С, 20ХГ2Ц. Химический состав, механические свойства и структура исследуемых сталей приведены в таблицах 1 и 2. Механические свойства определяли по ГОСТ 12004-81 [3]. За среднее значение принимали результаты, полученные по испытаниям трех образцов. Выбор плавки производили с таким расчетом, чтобы химический состав плавки (в основном содержание углерода) соответствовал, по возможности, верхнему, среднему и нижнему уровню марочного состава [4].

Исследование коррозионной стойкости проводили на натуральных образцах ($l = 300$ мм; $\varnothing 12$ мм) стержневой арматуры периодического профиля в состоянии поставки (горячекатанном) и прошедших термическую обработку (нормализация, улучшение). Рабочая часть образца составляла 100 мм. Стойкость стали против КРН оценивали временем до разрушения по результатам испытаний 4-6 образцов на каждую экспериментальную точку графика.

Таблица 1

Химический состав исследованных марок сталей

Марка стали	№ плавки	Химический состав, % (масс.)							
		С	Mn	Si	Cr	Ti	Zr	S	P
80С	1	0,81	0,80	0,82	–	0,025	–	0,033	0,027
	2	0,74	0,62	0,65	–	0,030	–	0,029	0,014
	3	0,77	0,81	0,90	–	0,076	–	0,015	0,014
20ХГ2Ц	1	0,21	1,42	0,54	1,06	–	0,06	0,020	0,022
	2	0,23	1,50	0,80	1,05	–	0,06	0,018	0,031
	3	0,23	1,43	0,66	1,09	–	0,11	0,024	0,032
	4	0,26	1,67	0,60	1,16	–	0,10	0,021	0,036

Таблица 2

Механические свойства и структура исследованных марок сталей

Марка стали	№ плавки	Механические свойства					Структура
		σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ_5 , %	δ_P , %	HRC	
80С	1	1180	815	4,50	3,50	37	Сорбит
	2	1030	635	12,50	6,00	30	Перлит
	3	990	560	11,00	6,00	29	Перлит
20ХГ2Ц	1	1140	810	14,50	6,00	35	Бейнит
	2	930	560	16,50	12,00	26	Бейнит с участками феррита
	3	1320	1045	11,00	2,00	43	Мартенситно-бейнитная смесь
	4	1350	940	11,50	3,50	44	Мартенсит

Примечание – работа проведена совместно с к.т.н. Извольским В.В.

Для создания условий эксперимента, максимально приближенных к эксплуатационным испытаниям, проводили в кипящем растворе нитратов (60% $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ + 5% NH_4NO_3 + 35% H_2O) при температуре 110 °С и рабочих напряжениях $\sigma_{\text{Э}} = 0,1 \dots 0,8\sigma_B$ в состоянии поставки и $\sigma_{\text{Э}} = 0,7 \dots 0,8\sigma_B$ после прохождения термической обработки.

2. Результаты и их обсуждение

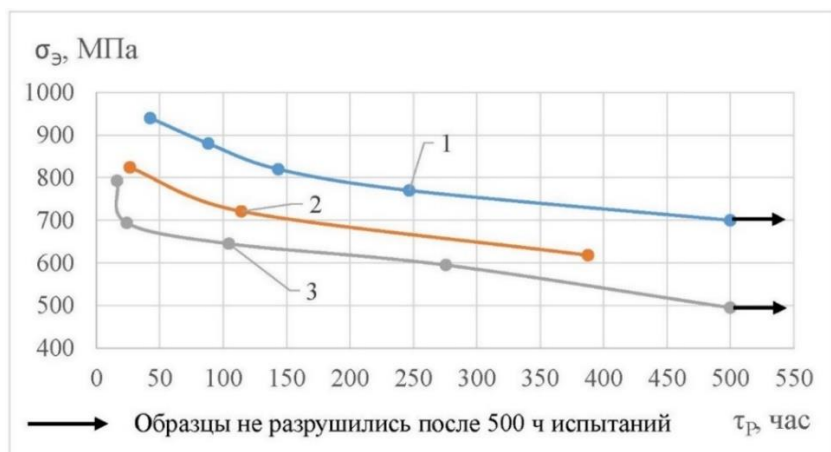
Результаты коррозионных испытаний сталей 80С и 20ХГ2Ц в состоянии поставки приведены на рис. 1, из которого видно, что в обоих случаях наибольшей сопротивляемостью КРН обладает плавка №1. Из приведенных результатов видно, что при изменении химического состава (в основном углерода) в пределах марочного резко изменяются механические и коррозионные свойства.

Анализ кривых коррозионной стойкости стали 80С (рис. 1, а) показывает, что, хотя различия в стойкости испытанных плавки стали 80С и имеют место, они

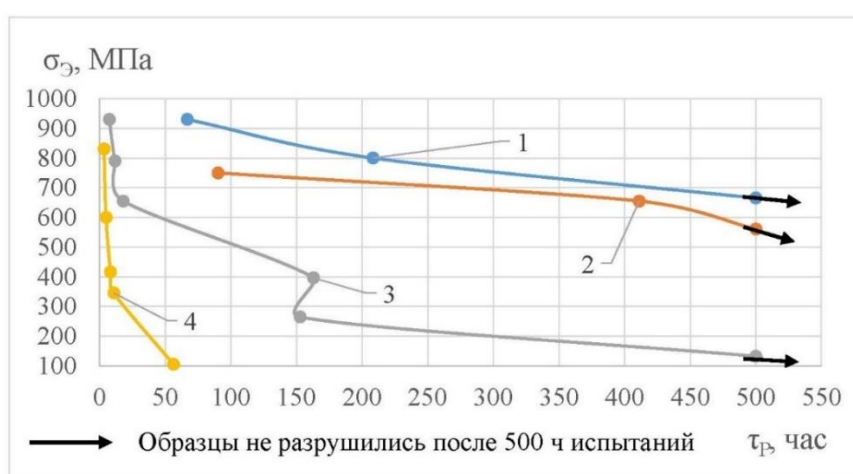
не являются существенными и очевидно определяются уровнем остаточных напряжений.

Наибольшей нестабильностью свойств обладает арматура из стали 20ХГ2Ц. С повышением содержания углерода до верхнего уровня марочного состава предел прочности на разрыв увеличивается, а коррозионная стойкость резко уменьшается. Проведенные исследования показали, что среди плавки стали 20ХГ2Ц наименьшей коррозионной стойкостью обладают плавки №4 и №3, имеющие структуру мартенсита и мартенсита и бейнита соответственно, а наивысшей – плавки №1 и № 2, имеющие структуру однородного бейнита и бейнита с участками феррита.

Анализ кривых коррозионной стойкости различных плавки стали 20ХГ2Ц (рис. 1, б) показывает, что все испытанные плавки можно разделить на две группы: 1) стали с бейнитными структурами; 2) стали со структурой мартенсита и мартенсита и бейнита.



а)



б)

Рис. 1. Коррозионная стойкость стали 80С (а) и 20ХГ2Ц (б) в состоянии поставки в растворе нитратов (цифры 1; 2; 3, 4 соответствуют номерам плавков)

Первая группа характеризуется резким увеличением коррозионной стойкости с уменьшением величины приложенных растягивающих напряжений, особенно при их уменьшении ниже предела текучести.

Коррозионная стойкость сталей второй группы с уменьшением величины приложенных растягивающих напряжений медленно увеличивается, и только начиная с очень малых напряжений (132 МПа), для стали с мартенситно-бейнитной структурой (кривая 3 на рис. 1, б) наблюдается более резкое ее возрастание, в то время как для стали с мартен-

ситной структурой (кривая 4 на рис. 1, б) резкое возрастание коррозионной стойкости наблюдается при напряжениях равных 105 МПа.

Такой характер зависимости коррозионной стойкости от величины растягивающих напряжений хорошо согласуется с данными, полученными в работе [5], в которой показано что наибольшей склонностью к растрескиванию в водородсодержащих средах обладают стали со структурой мартенсита.

Общеизвестно, что структурно-напряженный мартенсит характеризуется высокой термодинамической неустойчи-

востью, и его образование сопровождается значительными объемными изменениями, приводящими к значительной величине остаточных микронапряжений второго и третьего рода, неравномерно распределенных по сечению исходного аустенитного зерна. Таким образом, приложение внешних растягивающих напряжений при низкой способности мартенсита сопротивляться пластической деформации, приводит к возникновению больших локальных результирующих напряжений, поля которых способствуют интенсификации процесса растрескивания.

Преобразования в бейнитных и перлитных сталях происходят при достаточно высоких температурах, вследствие чего

релаксация напряжений, протекающая в процессе этих превращений, способствует снятию пиков остаточных микронапряжений и снижению чувствительности стали к КРН.

Для подтверждения данных выводов проводили качественный анализ искажений кристаллической структуры исследованных плавок стали рентгеноструктурным методом, по общепринятой методике Речингера. Искажения кристаллической структуры оценивали по ширине линий (110) и (220). Результаты анализа, приведенные в таблице 3, хорошо, согласуются с данными, полученными в ходе коррозионно-механических испытаний (см. рис. 1).

Таблица 3

Результаты рентгеноструктурного анализа искажений кристаллической структуры плавок сталей 80С и 20ХГ2Ц

Марка стали	№ плавки	Ширина линий		Эталон	
		(110)×10 ⁴ радиан	(220)×10 ⁴ радиан	(110)×10 ⁴ радиан	(220)×10 ⁴ радиан
80С	1	51	170	51	150
	2	51	150		
	3	53	206		
20ХГ2Ц	1	80	250	60	198
	2	63	204		
	3	100	275		
	4	100	288		

Так из таблицы 3 видно, что наибольшее искажение кристаллической структуры у стали 80С наблюдается у плавки №3. Искажений у плавки №2 не наблюдается, а для плавки №1 они имеют место только по ширине линии (220), и в меньше степени, чем для плавки №3. Тот факт, что для стали 80С плавка №1 обладает несколько большей сопротивляемостью КРН по сравнению с плавкой №2, хотя и имеет несколько большую степень искажения кристаллической решетки, следует связывать, по-видимому, с раз-

ницей в химической активности границ зерен.

Наибольшие искажения кристаллической структуры среди плавок стали 20ХГ2Ц (см. табл. 3) наблюдали у плавок №3 и №4, имеющих структуры мартенситно-бейнитной смеси и мартенсита соответственно, а наименьшие – у плавки №2 со структурой бейнита с участками феррита.

Таким образом, полученные данные подтверждают вывод о том, что стойкость стали против КРН зависит от оста-

точных искажений кристаллической структуры.

Влияние термической обработки на стойкость арматурной стали класса А600 к КРН проводили на стали 80С на базе плавки №2. Режимы термической обработки, механические характеристики и структура сталей приведены в таблице 4.

Выбор режимов производили с расчетом получения равнопрочного материала. Это позволило проводить испытания на стойкость к КРН при одинаковых

уровнях напряжений и определить, как влияет обработка на равную прочность на коррозионную стойкость стали. После нормализации сталь имела, как и в исходном состоянии, структуру тонкого перлита, а после улучшения – сорбита отпуска.

Анализ графических зависимостей (рис. 2) показал, что, улучшение и в еще большей степени нормализация увеличивают стойкость данной стали к КРН.

Таблица 4

Термическая обработка, механические свойства и структура стали 80С

№ режима п/п	Марка стали, D (мм)	Режим термообработки	Механические характеристики			Структура
			σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ_5 , %	
1	80С Ø12	Горячекатанная в исходном состоянии	1030	635	12,50	Перлит
2		Улучшение: закалка в масло от 850 °С + отпуск при 570 °С в течение 2-х ч	1010	645	12,00	Сорбит
3		Нормализация: нагрев в печи до 1000 °С + охлаждение на воздухе	1000	595	12,00	Перлит

Примечание – работа проведена совместно с к.т.н. Извольским В.В.

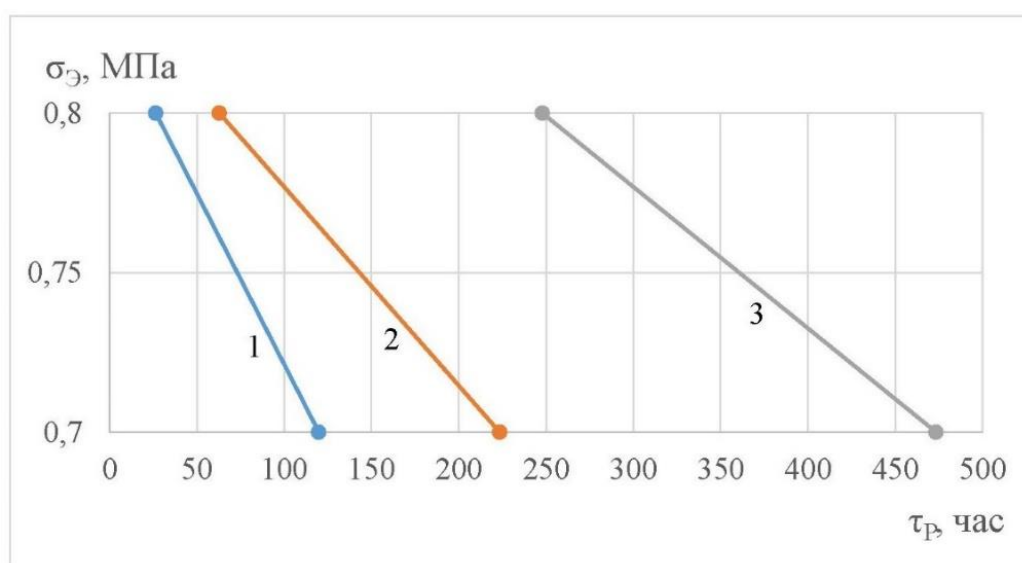


Рис. 2. Сравнительная стойкость стали 80С в растворе нитратов при различных видах термической обработки (номера графиков соответствуют режимам термообработки, приведенным в таблице 4)

Повышение стойкости стали против растрескивания после улучшения и нормализации по сравнению с горячекатаным состоянием объясняется, прежде всего, уровнем остаточных напряжений, который у стали 80С после нормализации и улучшения значительно меньше. В первом случае снижение остаточных напряжений обусловлено нагревом до температур аустенитного состояния и последующего охлаждения на спокойном воздухе, при этом превращения протекают более полно и не сопровождаются пластической деформацией. Во втором случае остаточные напряжения, образующиеся после закалки, почти полностью снимаются высоким отпуском.

Из полученных экспериментальных данных можно сделать вывод, что при производстве стали 80С особо важным параметром является контроль скорости охлаждения после горячей прокатки. Равномерное охлаждение с контролируемой скоростью позволит получить более однородные структуры, обеспечивающие однородные механические и коррозионные свойства.

3. Выводы

1. Изменение коррозионной стойкости арматурных сталей класса прочности А600 при изменении химического состава (в основном углерода) в пределах марочного при сложившейся технологии производства объясняется изменением микроструктуры стали.

2. Стержневая арматура периодического профиля из стали 80С в состоянии поставки при механических свойствах класса прочности А600 имеет достаточно высокую стойкость против КРН. Наилучшие коррозионные и механические свойства для арматуры, изготовлен-

ной из стали 80С, обеспечивают структуры сорбита и тонкого перлита.

3. Арматура из стали марки 20ХГ2Ц в состоянии поставки при сложившейся технологии производства отличается большой нестабильностью стойкости против КРН при изменении химического состава (в основном углерода) в пределах марочного. Высокую коррозионную стойкость арматура из стали 20ХГ2Ц имеет только при содержании углерода на нижнем пределе марочного состава, что обеспечивается структурой однородного бейнита при механических свойствах на уровне класса прочности А600. При более высоких механических свойствах арматура из стали 20ХГ2Ц имеет более низкую коррозионную стойкость.

Данные результаты могут быть использованы при создании ресурсосберегающих процессов обработки материалов [6-31].

Работа выполнена по проекту №11.6682.2017/8.9.

Список литературы

1. Сергеев Н. Н. Механические свойства и внутреннее трение высокопрочных сталей в коррозионных средах: дис. ... д-ра. техн. наук 01.04.07. Тула, 1996. 467 с.
2. Извольский В.В., Сергеев Н.Н. Коррозионное растрескивание и водородное охрупчивание арматурных сталей железобетона повышенной и высокой прочности. Тула: Изд-во ТГПУ им. Л. Н. Толстого, 2001. 163 с.
3. ГОСТ 12004-81. Сталь арматурная. Методы испытаний на растяжение (с Изменениями № 1, 2). М.: Стандартиформ, 2009. 22 с.
4. ГОСТ 5781-82. Сталь горячекатаная для армирования железобетонных конструкций. Технические условия. М.: Стандартиформ, 2009. 24 с.

5. Lynch S.P. Chapter 2: Hydrogen embrittlement (HE) phenomena and mechanisms // Stress Corrosion Cracking. Woodhead Publishing Limited. 2011. P. 90-130.

6. Макаров Э.С., Гвоздев А.Е., Журавлев Г.М. Теория пластичности дилатирующих сред: монография; под ред. проф. А.Е. Гвоздева. 2-е изд. перераб. и доп. Тула: Изд-во ТулГУ, 2015. 337 с.

7. Распределение температур и структура в зоне термического влияния для стальных листов после лазерной резки / А.Е. Гвоздев, Н.Н. Сергеев, И.В. Минаев, А.Г. Колмаков, И.В. Тихонова, А.Н. Сергеев, Д.А. Провоторов, Д.М. Хонелидзе, Д.В. Малий, И.В. Голышев // Материаловедение. 2016. № 9. С. 3-7.

8. Сопряженные поля в упругих, пластических, сыпучих средах и металлических труднодеформируемых системах: монография / Э.С. Макаров, В.Э. Ульченкова, А.Е. Гвоздев, Н.Н. Сергеев, А.Н. Сергеев; под ред. проф. А.Е. Гвоздева. Тула: Изд-во ТулГУ, 2016. 526 с.

9. Механизмы водородного растрескивания металлов и сплавов, связанные с усилением дислокационной активности / Н.Н. Сергеев, С.Н. Кутепов, А.Е. Гвоздев, Е.В. Агеев // Известия Юго-Западного государственного университета. 2017. Т. 21, № 2(71). С. 32-47.

10. Анализ теоретических представлений о механизмах водородного растрескивания металлов и сплавов / Н.Н. Сергеев, А.Н. Сергеев, С.Н. Кутепов, А.Е. Гвоздев, Е.В. Агеев // Известия Юго-Западного государственного университета. 2017. Т. 21, № 3(72). С. 6-33.

11. Перспективные стали для кожухов доменных агрегатов / Н.Н. Сергеев, А.Е. Гвоздев, А.Н. Сергеев, И.В. Тихонова, С.Н. Кутепов, О.В. Кузовлева, Е. В. Агеев // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2017. Т. 7, № 2(23). С. 6-15.

12. Влияние режимов термической обработки на стойкость высокопрочной арматурной стали к водородному растрескиванию / Н.Н. Сергеев, А.Н. Сергеев, С.Н. Кутепов, А.Е. Гвоздев, Е.В. Агеев // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2017. Т. 7, № 4 (25). С. 6-20.

13. Принятие решений по статистическим моделям в управлении качеством продукции / Г.М. Журавлев, А.Е. Гвоздев, С.В. Сапожников, С.Н. Кутепов, Е.В. Агеев // Известия Юго-Западного государственного университета. 2017. Т. 21, № 5(74). С. 78-92.

14. Temperature distribution and structure in the heat-affected zone for steel sheets after laser cutting / А.Е. Gvozdev, N.N. Sergeev, I.V. Minayev, I.V. Tikhonova, A.N., Khonelidze D.M. Sergeev, D.V. Maliy, I.V. Golyshev, A.G. Kolmakov, D.A. Provotorov // Inorganic Materials: Applied Research. 2017 Т. 8. № 1. С. 148-152.

15. Вариант определения максимального пластического упрочнения в инструментальных сталях / Г.М. Журавлев, А.Е. Гвоздев, А.Е. Чеглов, Н.Н. Сергеев, О.М. Губанов // Сталь. 2017. № 6. С. 26-39.

16. Бреки А.Д., Гвоздев А.Е. О влиянии масел с наночастицами твёрдых смазочных материалов на потери мощности в зубчатых передачах // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2017. № 4. С. 171-180.

17. Бреки А.Д., Гвоздев А.Е. О зависимости вязкости масел от наличия в них наночастиц твердых смазочных материалов и взвешенных частиц износа при использовании эмпирического уравнения Вальтера // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2017. № 3. С. 90-98.

18. Исследование и расчет температурного поля в баллонах шинно-пневматических муфт нефтебуровых и газобуровых установок / Б.Д. Кукаленко,

Е.В. Заборский, А.Д. Бреки, А.Е. Гвоздев // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2017. № 1. С. 207-217.

19. On friction of metallic materials with consideration for superplasticity phenomenon / A.D. Breki, A.E. Gvozdev, A.G. Kolmakov, N.E. Starikov, D.A. Provotorov, N.N. Sergeyev, D.M. Khonelidze // Inorganic Materials: Applied Research. 2017. Т. 8. № 1. С. 126-129.

20. Synthesis and dry sliding behavior of composite coating with (R-OOO)FT polyimide matrix and tungsten disulfide nanoparticle filler / A.D. Breki, A.L. Didenko, V.V. Kudryavtsev, E.S. Vasilyeva, O.V. Tolochko, A.G. Kolmakov, A.E. Gvozdev, D.A. Provotorov, N.E. Starikov, Yu.A. Fadin // Inorganic Materials: Applied Research. 2017. Т. 8. № 1. С. 32-36.

21. Composite coatings based on A-OOO polyimide and WS₂ nanoparticles with enhanced dry sliding characteristics / A.D. Breki, A.L. Didenko, V.V. Kudryavtsev, E.S. Vasilyeva, O.V. Tolochko, A.E. Gvozdev, N.N. Sergeyev, D.A. Provotorov, N.E. Starikov, Yu.A. Fadin, A.G. Kolmakov // Inorganic Materials: Applied Research. 2017. Т. 8. № 1. С. 56-59.

22. Противоизносные свойства пластичных смазочных композиционных материалов «ЛИТОЛ 24 - частицы гидросиликатов магния» / А.Д. Бреки, В.В. Медведева, Н.А. Крылов, А.Г. Колмаков, Ю.А. Фадин, А.Е. Гвоздев, Н.Н. Сергеев, С.Е. Александров, Д.А. Провоторов // Материаловедение. 2017. № 3. С. 38-42.

23. Maximum plastic strengthening in tool steels / G.M. Zhuravlev, A.E. Gvozdev, A.E. Cheglov, N.N. Sergeev, O.M. Gubanov // Steel in Translation. 2017. Vol. 47. № 6. P 399-411.

24. Многоуровневый подход к проблеме замедленного разрушения высокопрочных конструкционных сталей под действием водорода / В.П. Баранов, А.Е. Гвоздев, А.Г. Колмаков, Н.Н. Сергеев,

А.Н. Чуканов // Материаловедение. 2017. № 7. С. 11-22.

25. Расчет деформационной повреждаемости в процессах обратного выдавливания металлических изделий / А.Е. Гвоздев, Г.М. Журавлев, А.Г. Колмаков, Д.А. Провоторов, Н.Н. Сергеев // Технология металлов. №1. С. 23-32.

26. Роль процесса зародышеобразования в развитии некоторых фазовых переходов второго рода / А.Е. Гвоздев, Н.Н. Сергеев, И.В. Минаев, И.В. Тихонова, А.Г. Колмаков // Материаловедение. 2015. № 1. С. 15-21.

27. Гвоздев А.Е., Журавлев Г.М., Колмаков А.Г. Формирование механических свойств углеродистых сталей в процессах вытяжки с утонением. Технология металлов. 2015. № 11. С. 17-29.

28. Зависимость показателей сверхпластичности труднодеформируемых сталей Р6М5 и 10Р6М5-МП от схемы напряженного состояния / А.Е. Гвоздев, А.Г. Колмаков, Д.А. Провоторов, Н.Н. Сергеев, Д.Н. Боголюбова // Деформация и разрушение материалов. 2015. №11. С. 42-46.

29. Role of nucleation in the of first-order phase transformations / A.E. Gvozdev, N.N. Sergeyev, I.V. Minayev, A.G. Kolmakov, I.V. Tikhonova // Inorganic Materials: Applied Research. 2015. Т. 6. № 4. P. 283-288.

30. Условия проявления нестабильности цементита при термоциклировании углеродистых сталей / А.Е. Гвоздев, А.Г. Колмаков, А.В. Маляров, Н.Н. Сергеев, И.В. Тихонова, М.Е. Пруцков // Материаловедение. 2014. № 10. С. 31-36.

31. Гвоздев А.Е., Афанаскин А.В., Гвоздев Е.А. Закономерности проявления сверхпластичности сталей Р6М5 и 10Р6М5-МП // Металловедение и термическая обработка металлов. 2002. № 6. С. 32-36.

Поступила в редакцию 20.02.18

UDC 620.1: 621.78

N.N. Sergeev, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Tula State Lev Tolstoy Pedagogical University (Tula, Russia) (e-mail: technology@tspu.tula.ru)

V.V. Izvol'skiy, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Tula State University (Tula, Russia) (e-mail: kafedrassmik@mail.ru)

A.N. Sergeev, Doctor of Pedagogic Sciences, Professor, Tula State Lev Tolstoy Pedagogical University (Tula, Russia) (e-mail: ansereguev@mail.ru)

S.N. Kutepov, Candidate of Pedagogic Science, Tula State Lev Tolstoy Pedagogical University (Tula, Russia) (e-mail: kutepov.sergei@mail.ru)

A.E. Gvozdev, Doctor of Engineering Science, Professor, Tula State Lev Tolstoy Pedagogical University (Tula, Russia) (e-mail: gvozdev.alexandr2013@yandex.ru)

E.V. Ageev, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Southwest State University (Kursk, Russia) (e-mail: ageev_ev@mail.ru)

D.S. Klement'yev, Undergraduate, Tula State Lev Tolstoy Pedagogical University (Tula, Russia) (e-mail: denis.klementev.93@mail.ru)

THE INFLUENCE OF MICROSTRUCTURAL FACTORS AND HEAT TREATMENT ON THE CORROSION RESISTANCE OF REINFORCING STEEL CLASS A 600

Currently, hot rolled bar reinforcement class A600 of low-alloy steels in the delivery condition has a high tendency to this very specific kind of destruction as stress corrosion cracking under tension (SCC). However, there are cases of collapse of pre-stressed concrete structures, in most cases initiated corrosion cracking under stress, put the problem this type of fracture is particularly acute.

In stress corrosion cracking cracks occur, the occurrence of which depends not only on the structural state of the material, the type and level of stress, but also on the degree of aggressiveness of the environment in which the operation occurs. In this regard, it is very important to establish how the corrosion resistance of class A600 reinforcing steel varies depending on the change in the chemical composition, microstructure, the level of applied and residual micro-stresses, and various modes of heat treatment. The purpose of this paper is to study the effect of the above factors on the resistance of low-alloyed reinforcing steel class A600 stress corrosion cracking

It is shown that the sensitivity of the reinforcement to stress corrosion cracking is largely determined by the chemical composition (mainly carbon content), the type of microstructure and the level of residual micro-stresses. The influence of heat treatment regimes on the corrosion resistance of A600-grade reinforcing steel in nitrates solutions is investigated. It is shown that the use of additional heat treatment (normalization and improvement) increases the corrosion resistance of steel. High corrosion resistance steel reinforcement has only a carbon content at the lower limit of the vintage composition, which is provided by the structure of homogeneous bainite with mechanical properties at the level of strength class A600. With higher mechanical properties, the steel reinforcement has lower corrosion resistance.

Key words: reinforcing steel, stress corrosion cracking, corrosion resistance, heat treatment.

DOI: 10.21869/2223-1560-2018-22-2-52-63

For citation: Sergeev N.N., Izvol'skiy V.V., Sergeev A.N., Kutepov S.N., Gvozdev A.E., Ageev E.V., Klement'yev D.S. The Influence of Microstructural Factors and Heat Treatment on the Corrosion Resistance of Reinforcing Steel Class A 600. Proceedings of the Southwest State University, 2018, vol. 22, no. 2(77), pp. 52-63 (in Russ.).

Reference

1. Sergeev N. N. *Mechanicheskie svoystva i vnutrennee trenie vysoko-prochnykh stalej v korrozionnykh sredah.* Diss. d-ra tehn. nauk. Tula, 1996, 467 p.

2. Izvol'skiy V.V., Sergeev N.N. *Korrozionnoe rastreskivanie i vodorodnoe ohrupchivanie armaturnykh stalej zhelezobetona povyshennoj i vysokoj prochnosti.* Tula, 2001, 163 p.

3. GOST 12004-81. *Stal' armaturnaja. Metody ispytaniy na rastjazhenie (s Iz-*

menenijami № 1, 2). Moscow, Standartinform Publ., 2009, 22 p.

4. GOST 5781-82. Stal' gorjachekatanaja dlja armirovanija zhelezobetonnyh konstrukcij. Tehnicheskie uslovija. Moscow, Standartinform Publ., 2009. 24 p.

5. Lynch S.P. Chapter 2: Hydrogen embrittlement (HE) phenomena and mechanisms. Stress Corrosion Cracking. Woodhead Publishing Limited, 2011, pp. 90-130.

6. Makarov Je.S., Gvozdev A.E., Zhuravlev G.M. Teorija plastichnosti dilatirujushhijh sred: monografija; ed. by A.E. Gvozdev. 2-e izd. pererab. i dop. Tula, 2015, 337 p.

7. Gvozdev A.E., Sergeev N.N., Minaev I.V., Kolmakov A.G., Tihonova I.V., Sergeev A.N., Provotorov D.A., Honelidze D.M., Malij D.V., Golyshev I.V. Raspreделение температур i struktura v zone termicheskogo vlijanija dlja stal'nyh listov posle lazernoj rezki. Materialovedenie, 2016, no. 9, pp. 3-7.

8. Makarov Je.S., Ul'chenkova V.Je., Gvozdev A.E., Sergeev N.N., Sergeev A.N. Soprijazhennye polja v uprugih, plasticheskijh, sypuchijh sredah i metallicheskih trudnodeformiruemijh sistemah, ed. by A.E. Gvozdev. Tula, 2016, 526 p.

9. Sergeev N.N., Kutepov S.N., Gvozdev A.E., Ageev E.V. Mehanizmy vodorodnogo rastreskivanija metallov i splavov, svjazannye s usileniem dislokacionnoj aktivnosti. Izvestija Jugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta, 2017, vol. 21, no. 2(71), pp. 32-47.

10. Sergeev N.N., Sergeev A.N., Kutepov S.N., Gvozdev A.E., Ageev E.V. Analiz teoreticheskijh predstavlenij o mehanizmah vodorodnogo rastreskivanija metallov i splavov. Izvestija Jugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta, 2017, vol. 21, no. 3(72), pp. 6-33.

11. Sergeev N.N., Gvozdev A.E., Sergeev A.N., Tihonova I.V., Kutepov S.N., Kuzovleva O.V., Ageev E. V. Perspektivnyje

stali dlja kozhuhov domennyh agregatov. Izvestija Jugo-Zapadnogo gosudarstvennogo uni-versiteta. Serija: Tehnika i tehnologii, 2017, vol. 7, no. 2(23), pp. 6-15.

12. Sergeev N.N., Sergeev A.N., Kutepov S.N., Gvozdev A.E., Ageev E.V. Vlijanie rezhimov termicheskij obrabotki na stojkost' vysokoprochnoj armaturnoj stali k vodorodnomu rastreskivaniju. Izvestija Jugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Tehnika i tehnologii, 2017, vol. 7, no. 4 (25), pp. 6-20.

13. Zhuravlev G.M., Gvozdev A.E., Sapozhnikov S.V., Kutepov S.N., Ageev E.V. Prinjatije reshenij po statisticheskim modeljam v upravlenii kachestvom produkcii. Izvestija Jugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta, 2017, vol. 21, no. 5(74), pp. 78-92.

14. Gvozdev A.E., Sergeev N.N., Minayev I.V., Tikhonova I.V., Khonelidze A.N., Sergeev D.M., Malij D.V., Golyshev I.V., Kolmakov A.G., Provotorov D.A. Temperature distribution and structure in the heat-affected zone for steel sheets after laser cutting. Inorganic Materials: Applied Research, 2017, vol. 8, no. 1, pp. 148-152.

15. Zhuravlev G.M., Gvozdev A.E., Cheglov A.E., Sergeev N.N., Gubanov O.M. Variant opredelenija maksimal'nogo plasticheskogo uprochnenija v instrumental'nyh staljah. Stal', 2017, no. 6, pp. 26-39.

16. Breki A.D., Gvozdev A.E. O vlijanii masel s nanochasticami tvjordijh smazochnyh materialov na poteri moshhnosti v zubchatykh peredachah. Izvestija Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tehnicheskie nauki, 2017, no. 4, pp. 171-180.

17. Breki A.D., Gvozdev A.E. O zavisimosti vjazkosti masel ot nalichija v nih nanochastic tverdijh smazochnyh materialov i vzveshennyh chastic iznosa pri ispol'zovanii jempiricheskogo uravnenija Val'tera. Izvestija Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tehnicheskie nauki, 2017, no. 3, pp. 90-98.

18. Kukalenko B.D., Zaborskij E.V., Breki A.D., Gvozdev A.E. Issledovanie i raschet temperaturnogo polja v ballonah shinnopnevmaticheskikh muft nefteburovyh i gazoburovyh ustanovok. Izvestija Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tehnicheskie nauki, 2017, no. 1, pp. 207-217.
19. Breki A.D., Gvozdev A.E., Kolmakov A.G., Starikov N.E., Provotorov D.A., Sergeev N.N., Khonelidze D.M. On friction of metallic materials with consideration for superplasticity phenomenon. Inorganic Materials: Applied Research, 2017, vol. 8, no. 1, pp. 126-129.
20. Breki A.D., Didenko A.L., Kudryavtsev V.V., Vasilyeva E.S., Tolochko O.V., Kolmakov A.G., Gvozdev A.E., Provotorov D.A., Starikov N.E., Fadin Yu.A. Synthesis and dry sliding behavior of composite coating with (R-OOO) FT polyimide matrix and tungsten disulfide nanoparticle filler. Inorganic Materials: Applied Research, 2017, vol. 8, no. 1, pp. 32-36.
21. Breki A.D., Didenko A.L., Kudryavtsev V.V., Vasilyeva E.S., Tolochko O.V., Gvozdev A.E., Sergeev N.N., Provotorov D.A., Starikov N.E., Fadin Yu.A., Kolmakov A.G. Composite coatings based on A-OOO polyimide and WS₂ nanoparticles with enhanced dry sliding characteristics. Inorganic Materials: Applied Research, 2017, vol. 8, no. 1, pp. 56-59.
22. Breki A.D., Medvedeva V.V., Krylov N.A., Kolmakov A.G., Fadin Ju.A., Gvozdev A.E., Sergeev N.N., Aleksandrov S.E., Provotorov D.A. Protivoiznosnye svojstva plastichnyh smazochnyh kompozicionnyh materialov «LITOL 24 - chasticy gidrosilikatov magnija». Materialovedenie, 2017, no. 3, pp. 38-42.
23. Zhuravlev G.M., Gvozdev A.E., Cheglov A.E., Sergeev N.N., Gubanov O.M. Maximum plastic strengthening in tool steels. Steel in Translation, 2017, vol. 47, no. 6, pp. 399-411.
24. Baranov V.P., Gvozdev A.E., Kolmakov A.G., Sergeev N.N., Chukanov A.N. Mnogourovnevnyj podhod k probleme zamedlennogo razrushenija vysokoprochnyh konstrukcionnyh stalej pod dejstviem vodoroda. Materialovedenie, 2017, no. 7, pp. 11-22.
25. Gvozdev A.E., Zhuravlev G.M., Kolmakov A.G., Provotorov D.A., Sergeev N.N. Raschet deformacionnoj povrezhdaemosti v processah obratnogo vydavlivanija metallicheskih izdelij. Tehnologija metallov, no.1, pp. 23-32.
26. Gvozdev A.E., Sergeev N.N., Minaev I.V., Tihonova I.V., Kolmakov A.G. Rol' processa zarodysheobrazovanija v razvitii nekotoryh fazovyh perehodov vtorogo roda. Materialovedenie, 2015, no. 1, pp. 15-21.
27. Gvozdev A.E., Zhuravlev G.M., Kolmakov A.G. Formirovanie mehanicheskikh svojstv uglerodistyh stalej v processah vytjazhki s utoneniem. Tehnologija metallov, 2015, no. 11, pp. 17-29.
28. Gvozdev A.E., Kolmakov A.G., Provotorov D.A., Sergeev N.N., Bogoljubova D.N. Zavisimost' pokazatelej sverh-plastichnosti trudnodeformiruemyh stalej R6M5 i 10R6M5-MP ot shemy naprjazhennogo sostojanija. Deformacija i razrushenie materialov, 2015, no.11, pp. 42-46.
29. Gvozdev A.E., Sergeev N.N., Minaev I.V., Kolmakov A.G., Tikhonova I.V. Role of nucleation in the of first-order phase transformations. Inorganic Materials: Applied Research, 2015, vol. 6, no. 4, pp. 283-288.
30. Gvozdev A.E., Kolmakov A.G., Maljarov A.V., Sergeev N.N., Tihonova I.V., Pruckov M.E. Uslovija projavlenija nestabil'nosti cementita pri termociklirovanii uglerodistyh stalej. Materialovedenie, 2014, no. 10, pp. 31-36.
31. Gvozdev A.E., Afanaskin A.V., Gvozdev E.A. Zakonomernosti projavlenija sverhplastichnosti stalej R6M5 i 10R6M5-MP. Metallovedenie i termicheskaja obrabotka metallov, 2002, no. 6, pp. 32-36.