Оригинальная статья / Original article

https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-5-8-22

Влияние масштабного фактора и состояния поверхности на чувствительность стали 20ГС2 к водородному растрескиванию

Н. Н. Сергеев [1], В. В. Извольский [2], А. Н. Сергеев [1], С. Н. Кутепов [2], А. Е. Гвоздев [1], Е. В. Агеева [3] ✉, Д. С. Клементьев [1], О.В. Кругляков [3]

[1] ФГБОУ ВО «Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого» пр. Ленина, 125, г. Тула, 300026, Российская Федерация

[2] ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет», пр. Ленина, 92, г. Тула, 300012, Российская Федерация

[3] ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», ул. 50 лет Октября, 94, г. Курск, 305040, Российская Федерация

✉ e-mail: ageeva-ev@yandex.ru

Резюме

Цель исследования. *В настоящее время установлено, что процесс коррозионно-механического разрушения протекает в несколько стадий. Однако, как показывает практика и анализ многочисленных разрушений конструкционных элементов из высокопрочных материалов в строительной и машиностроительной отраслях, очень часто в реальных конструкциях уже имеются технологические дефекты типа трещин. В таких случаях процесс коррозионно-механического разрушения начинается непосредственно с роста трещины, минуя подготовительные стадии – инкубационный период и образование концентратора напряжения.* ***Целью*** *настоящей работы являлось исследование влияния масштабного фактора и состояния поверхности на чувствительность стали 20ГС2 к водородному растрескиванию.*

Методы. *Для определения влияния состояния поверхности и масштабного фактора на длительную коррозионную прочность в среде, вызывающей водородное растрескивание, была выбрана арматурная сталь марки 20ГС2 (четыре плавки). Испытаниям подвергли натурные образцы (l = 300…400 мм) различного диаметра (10, 12 и 14 мм) с гладкокатаным и с периодическим профилем. Также из натурных стержней (гладкокатаных и с периодическим профилем) диаметром 10, 12 и 14 мм были выточены образцы с диаметром рабочей части от 6 до 10 мм через 1 мм с чистотой поверхности Ra2,5. Длительную коррозионную прочность оценивали временем до разрушения по результатам испытаний 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 при комнатной температуре с катодной поляризацией и различном уровне растягивающих напряжений.*

Результаты. *Экспериментально установлено, что натурные образцы арматурной стали 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. Показано, что натурные образцы арматурной стали 20ГС2 с периодическим профилем обладают меньшей стойкостью к водородному растрескиванию, по сравнению с натурными гладкокатаными образцами. Меньшая стойкость к водородному растрескиванию арматуры периодического профиля обусловлена наличием на ее поверхности ребер, которые играют роль естественных концентраторов напряжений. Полученные экспериментальные результаты позволяют рекомендовать для испытаний на коррозионно-механическое разрушение в средах, вызывающих наводороживание, натурные образцы, так как их использование позволяет приблизить условия эксперимента к реальным условиям эксплуатации изделий.*

Заключение. *Полученные результаты могут быть использованы при создании ресурсосберегающих процессов обработки металлических сплавов и композиционных материалов.*

Ключевые слова: *арматурная сталь; длительная коррозионная прочность; растягивающие напряжения; водородное растрескивание.*

Конфликт интересов: *Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.*

Финансирование: *Работа выполнена при финансовой поддержке проекта №11.6682.2017/8.9.*

Для цитирования: Влияние масштабного фактора и состояния поверхности на чувствительность стали 20ГС2 к водородному растрескиванию / Н. Н. Сергеев, В. В. Извольский, А. Н. Сергеев, С. Н. Кутепов, А. Е. Гвоздев, Е. В. Агеева, Д. С. Клементьев, О.В. Кругляков // Известия Юго-Западного государственного университета. 2019; 23(5): 8-22. https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-5-8-22.

Статья поступила в редакцию 08.07.2019

Статья подписана в печать 06.08.2019

Статья опубликована 25.10.2019

Influence of Scale Factor and Surface Condition on 20GS2 Steel Sensitivity to Hydrogen Cracking

Nikolay N. Sergeev [1], Valeriy V. Izvolsky [2], Aleksandr N. Sergeev [1], Sergey N. Kutepov [2], Aleksandr E. Gvozdev [1], Ekaterina V. Ageeva [3] ✉, Denis S. Klementyev [1], Oleg V. Kruglyakov [3]

[1] Tula State Pedagogical University named after L. N. Tolstoy
125 Lenin str., Tula 300026, Russian Federation

[2] Tula State University
92 Lenin str., Tula 300012, Russian Federation

[3] Southwest State University
50 Let Oktyabrya str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

✉ e-mail: ageeva-ev@yandex.ru

Abstract

Purpose of reseach. *At present, it is found that the process of corrosion-mechanical destruction proceeds in several stages. However, as practice and analysis of numerous destructions of structural elements made of high-strength materials in the construction and engineering industries show, very often in real structures there are already technological defects such as cracks. In such cases, the process of corrosion-mechanical destruction begins directly with crack growth, bypassing the preparatory stages – the incubation time and the formation of a stress concentrator. The* *goal of this paper is to study the influence of scale factor and surface condition on the sensitivity of 20GS2 steel to hydrogen cracking.*

Methods. *Reinforcing steel of 20GS2 grade (four melts) was chosen to determine the influence of surface condition and scale factor on the long-term corrosion strength in the environment causing hydrogen cracking. Full-scale specimens (l = 300.400 mm) of different diameters (10, 12 and 14 m) with smooth-rolled and die-rolled sections were tested. Also, from 10, 12 and 14 mm diameter full-scale rods (smooth-rolled and with die-rolled sections) there were turned samples with a diameter of the working part from 6 to 10 mm every 1 mm with surface condition of Ra2,5. The long-term corrosion strength was estimated through time preceding failure by testing four samples at each point of the graph. To create the experimental conditions as close as possible to the operational ones, the tests were carried out in an aqueous solution of sulfuric acid with the addition of ammonium rhodanide at room temperature with cathodic polarization and different levels of tensile stresses.*

Results. *It has been experimentally found that full-scale specimens of 20GS2 reinforcing steel in comparison with turned ones have less sensitivity to hydrogen cracking. This circumstance is due to the fact that after mechanical processing by cutting in turned samples, the value of residual tensile stresses is much higher than in full-scale specimens. It has been shown that full-scale specimens of 20GS2 reinforcing steel with a die-rolled section have less resistance to hydrogen cracking, as compared with full-scale smooth-rolled samples. The lower resistance to hydrogen cracking of die-rolled section reinforcement is due to the presence of ribs on its surface which play the role of natural stress concentrators. The experimental results obtained allow us to recommend full-scale specimensto to be tested for corrosion and mechanical destruction in environments that cause hydrogenation of full-scale specimens, since their use makes it possible to approximate the experimental conditions to the actual conditions of operation of products.*

Conclusion. *The results obtained can be used in the creation of resource-saving processes for processing metal alloys and composite materials.*

Keywords: *reinforcing steel; long-term corrosion strength; tensile stresses; hydrogen cracking.*

Conflict of interest. *The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.*

Financing: *The work was carried out according to project No. 11.6682.2017 / 8.9.*

For citation: Sergeev N.N., Izvolsky V.V., Sergeev A.N., Kutepov S.N., Gvozdev A.E., Ageeva E.V., Clementyev D.S., Kruglyakov O.V. Influence of Scale Factor and Surface Condition on 20GS2 Steel Sensitivity to Hydrogen Cracking. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2019, 23(5): 8-22 (In Russ.). https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-5-8-22.

Received 08.07.2019

Accepted 06.08.2019

Published 25.10.2019

***

Введение

Коррозионно-механическое разрушение (КМР), к которому относится и водородное растрескивание, проявляющееся при одновременном воздействии коррозионной среды и механических напряжений (приложенных или остаточных), является одним из наиболее часто встречающихся видов хрупкого разрушения металлических и композиционных железобетонных конструкций на предприятиях химической, газонефтедобывающей, металлургической, машиностроительной и других отраслей промышленности [1-4].

В настоящее время установлено, что процесс КМР протекает в несколько стадий [3]: 1) инкубационный период; 2) стадия стабильного роста трещины до критического размера; 3) стадия нестабильного (лавинообразного) роста макротрещины. Однако, как показывает практика и анализ многочисленных разрушений конструкционных элементов из высокопрочных материалов в строительной и машиностроительной отраслях, очень часто (некоторые исследователи полагают, что всегда) в реальных конструкциях уже имеются технологические дефекты типа трещин [4]. В таких случаях процесс КМР начинается непосредственно с роста трещины, минуя подготовительные стадии – инкубационный период и образование концентратора напряжения.

В соответствии с этим исторически сложились два научных направления и два принципиально различных способа испытания материалов на чувствительность к КМР [4]:

1) испытания гладких образцов или образцов с мягкими концентраторами напряжений;

2) испытания образцов с предельно острыми концентраторами напряжений в виде усталостных трещин.

Методика первого способа испытаний заключается в определении времени до разрушения или образования трещин заданного размера при различных видах нагружения в коррозионной среде. Большое значение для воспроизводимости результатов коррозионно-механических испытаний гладких образцов имеет подготовка поверхности, обычно состоящая из шлифовки и последующего удаления наклепанного слоя металла электрополировкой.

Методика второго способа испытаний фактически заключается в определении развития трещины до критического размера, которое не учитывает начальные стадии роста трещин, во многих случаях имеющих весьма существенное значение. Состояние поверхности образца в этом случае значит много меньше, поскольку нанесением острого надреза фактически задают направление развития трещины.

Выбор типа испытательного образца в конечном итоге определяется задачами исследований. Более полные результаты получают при использовании двух типов испытательных образцов – гладких и с надрезами.

Имея в наличии данные о влиянии среды, состоянии поверхности образца и масштабного эффекта, можно проводить испытания по определению длительной коррозионной прочности на образцах одного диаметра и профиля, что намного упростит эксперимент и его анализ, а также повысит качество экспериментальных данных.

Целью настоящей работы являлось исследование влияния масштабного фактора и состояния поверхности на чувствительность стали 20ГС2 к водородному растрескиванию.

Материалы и методы

Для определения влияния состояния поверхности и масштабного фактора на длительную коррозионную прочность в среде, вызывающей водородное растрескивание, была выбрана арматурная сталь марки 20ГС2 (четыре плавки). Химический состав исследуемых плавок приведен в таблице. Испытаниям подвергли натурные образцы (l = 300…400 мм) различного диаметра (10, 12 и 14 мм) с гладкокатаным и с периодическим профилем. Также из натурных стержней (гладкокатаных и с периодическим профилем) диаметром 10, 12 и 14 мм были выточены образцы (рис. 1) с диаметром рабочей части от 6 до 10 мм через 1 мм с чистотой поверхности Ra2,5.

Длительную коррозионную прочность оценивали временем до разрушения по результатам испытаний 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 $D_К$ = = 60 А/м^2 и различном уровне растягивающих напряжений $\sigma_Э$ = 300…1000 МПа.

Таблица 1

Химический состав и механические свойства исследованных плавок стали 20ГС2

Table 1

Chemical composition and mechanical properties of heat of 20GS2 steel under study

№ плавки	Содержание элементов, %					Механические свойства			Вид обработки поверхности, диаметр
	C	Mn	Si	S	P	$\sigma_В$, 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, Ø10 мм
2	0,18	1,30	2,04	0,032	0,017	1200	1080	15,0	Гладкокатаная, Ø10 мм
3	0,20	1,08	1,62	0,029	0,015	1280	1130	15,2	Периодический профиль, Ø12 мм
4	0,23	1,20	2,00	0,026	0,014	1300	1180	14,8	Периодический профиль, Ø14 мм

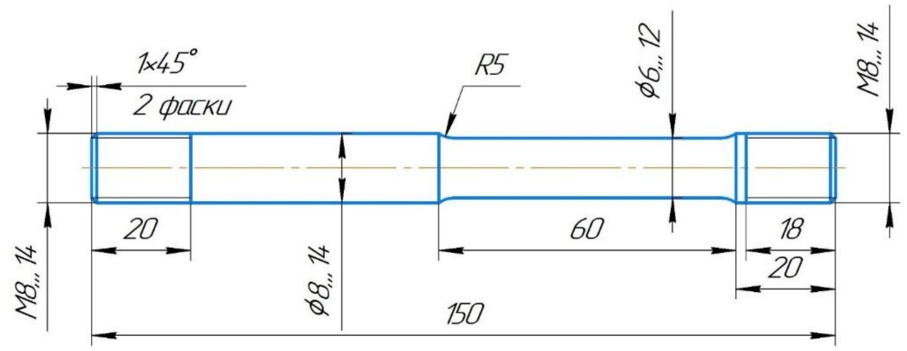

Рис. 1. Эскиз точеного образца для испытаний на длительную коррозионную прочность

Fig. 1. Sketch of turned sample to be tested for long-term corrosion strength

Длина рабочей части образца, находившейся в специальной коррозионной камере в контакте с агрессивной средой, составляла 80…100 мм. Для устранения разрушения в зоне пробки и на линии раздела (поверхность агрессивной среды – воздух) образцы изолировали клеем БФ. В целях исключения разброса данных из-за повреждений или загрязнений поверхности (задиры, окалина, масляные пятна и т. д.) образцы перед испытанием тщательно осматривали, а отобранные подвергали обезжириванию.

Результаты и их обсуждение

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

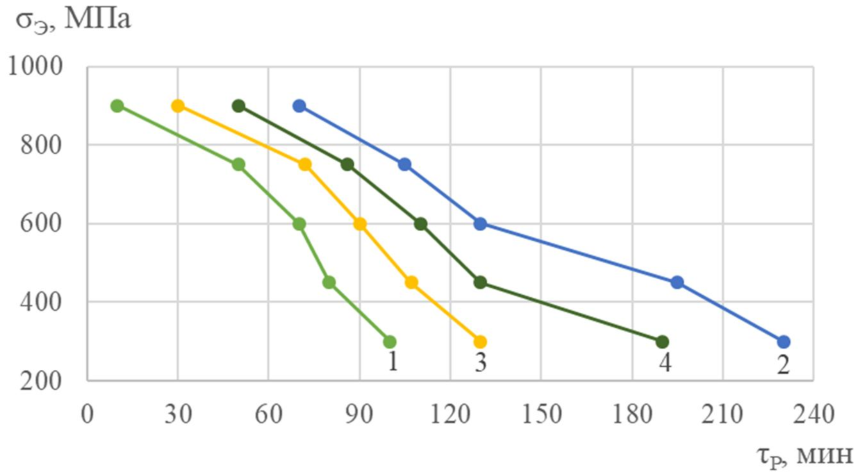

Рис. 2. Длительная коррозионная прочность точеных (1, 3) и натурных (2, 4) образцов из стали 20ГС2 в среде, вызывающей ВР: 1 – изготовленные из стали с гладкокатаным (Ø6 мм); 2 – натурные гладкокатаные; 3 – изготовленные из стали с периодическим профилем (Ø6 мм); 4 – натурные с периодическим профилем

Fig. 2. Long-term corrosion strength of turned (1, 3) and full-scale (2, 4) specimens of 20GS2 steel in the environment causing hydrogen cracking: 1 – made of steel with smooth-rolled (Ø6 mm); 2 – full-scale smooth-rolled; 3 – made of steel with a die-rolled section (Ø6 mm); 4 – full-scale with a a die-rolled section

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 гладкокатаной стали значительно больше, чем с периодиче-ским профилем. Отсюда следует, что несмотря на то, что точеные образцы Ø 6 мм, изготовленные из арматурной стали периодического профиля, имеют лучшую стойкость по сравнению с точеными образцами из гладкокатаной стали; натурные образцы с периодическим профилем наоборот имеют меньшую стойкость, чем гладкокатаные натурные образцы. Это можно объяснить тем, что элементы периодического профиля являются концентраторами напряжений, наличие которых облегчает и ускоряет зарождение и развитие субмикротрещин и микротрещин.

Влияние диаметра испытываемых образцов на длительную коррозионную прочность приведено на рис. 3, из которого видно, что изменение стойкости образцов, изготовленных из гладкокатаной арматуры и из арматуры периодического профиля при различных уровнях растягивающего напряжения, происходит по-разному.

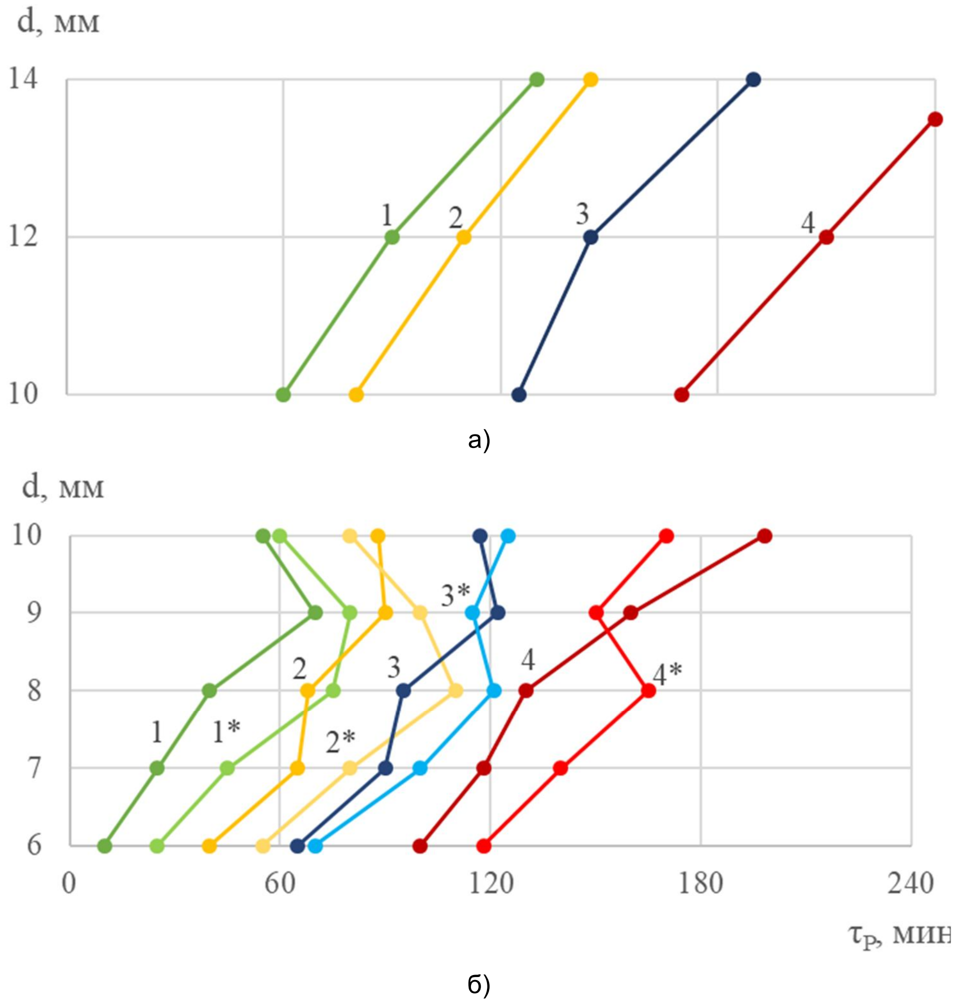

Рис. 3. Изменение длительной коррозионной прочности стали 20ГС2 при испытаниях на водородное растрескивание в зависимости от диаметра испытываемых натурных (а) и точеных (б) образцов и уровня растягивающих напряжений: 1 и 1*) $\sigma_э = 0{,}7\sigma_В$; 2 и 2*) $\sigma_э = 0{,}6\sigma_В$; 3 и 3*) $\sigma_э = 0{,}5\sigma_В$; 4 и 4*) $\sigma_э = 0{,}6\sigma_В$; на графике (а) цифры 1–2 соответствуют гладкокатаным образцам; цифры 3–4 – образцам периодического профиля; на графике (б) цифры 1–4 соответствуют образцам из гладкокатаной стали; цифры 1*–4* – образцам из стали с периодическим профилем

. Fig. 3. Change of long-term corrosion strength of 20GS2 steel when testing hydrogen cracking depending on diameter of the tested full-scale (a) and turned (б) specimens and tensile stresses level: 1 и 1*) $\sigma_э = 0{,}7\sigma_В$; 2 и 2*) $\sigma_э = 0{,}6\sigma_В$; 3 и 3*) $\sigma_э = 0{,}5\sigma_В$; 4 и 4*) $\sigma_э = 0{,}6\sigma_В$; on the graph (a) figures 1-2 correspond to smooth-rolled specimens; figures 3-4 correspond to the specimens with a die-rolled section; on the graph (b) figures 1-4 correspond to smooth-rolled steel specimens; figures 1*-4* – steel specimens with a die-rolled section

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 видим, что 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, которые на первых этапах облегчают процесс зарождения микротрещин за счет адсорбции этого эффекта, а затем могут способствовать упрочнению поверхности, доводя внутренние напряжения до критического значения в локальных микрообъемах приводящее к образованию микротрещин, а затем облегчают 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 натурных образцах высокопрочной арматурной стали марки 20ГС2, периодического профиля различного диаметра в состоянии поставки рис. 3, из которого также видно, что увеличение живого сечения испытываемых образцов приводит к увеличению стойкости. Из приведенных на рис. 2 и 3 графиков видно, что увеличение диаметра испытываемых образцов приводит к возрастанию длительной коррозионной прочности, а дефектность поверхности (наличие окалины, задиров, 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 натурных 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.

Выводы

1. Установлено, что натурные образцы арматурной стали 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. Показано, что натурные образцы арматурной стали 20ГС2 с периодическим профилем обладают меньшей стойкостью к водородному растрескиванию, по сравнению с натурными гладкокатаными образцами. Меньшая стойкость к водородному растрескиванию арматуры периодического профиля обусловлена наличием на ее поверхности ребер, которые играют роль естественных концентраторов напряжений.

3. Полученные экспериментальные результаты позволяют рекомендовать для испытаний на коррозионно-механическое разрушение в средах, вызывающих наводороживание, натурные образцы, так как их использование позволяет приблизить условия эксперимента к реальным условиям эксплуатации изделий.

Данные результаты могут быть использованы при создании ресурсосберегающих процессов обработки металлических сплавов и композиционных материалов [5-24].

Список литературы

1. Сергеев Н.Н., Сергеев А.Н. Водородное охрупчивание и растрескивание высокопрочной арматурной стали: монография. Тула: Изд-во ТулГУ, 2017. 180 с.

2. Сергеев Н.Н., Сергеев А.Н. Механические свойства и внутреннее трение высокопрочных сталей в коррозионных средах: монография. Тула: Изд-во ТулГУ, 2018. 430 с.

3. Основы повышения долговечности высокопрочных сталей, эксплуатируемых в водородсодержащих средах: монография / Н.Н. Сергеев, А.Н. Сергеев, С.Н. Кутепов, Г.М. Журавлев, А.Е. Гвоздев. Тула: Изд-во ТулГУ, 2019. 348 с.

4. 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.

5. Влияние условий отпуска на механические и коррозионные свойства стали 23Х2Г2Т / Н.Н. Сергеев, В.В. Извольский, А.Н. Сергеев, С.Н. Кутепов, А.Е. Гвоздев // Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П.А. Соловьева. 2018. № 2(45). С. 128-135.

6. Влияние химического состава стали 23Х2Г2Т на стойкость против коррозионного растрескивания / Н.Н. Сергеев, В.В. Извольский, А.Н. Сергеев, С.Н. Кутепов, А.Е. Гвоздев, А.Н. Чуканов, О.В. Пантюхин // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2018. Вып. 9. С. 409-442.

7. Влияние уровня растягивающих напряжений на длительную прочность арматурных сталей в водородсодержащих средах / Н.Н. Сергеев, А.Н. Сергеев, А.Е. Гвоздев, И.В. Тихонова, С.Н. Кутепов, Е.В. Агеев // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2018. Т. 8, № 2 (27). С. 6-19.

8. Применение технологии изготовления «корковым» способом формообразующих вставок для литья под давлением медных сплавов / Н.Н. Сергеев, А.Н. Сергеев, С.Н. Кутепов, А.Е. Гвоздев, Е.В. Агеев, Д.С. Клементьев // Известия Юго-Западного государственного университета. 2018. Т. 22, № 3(78). С. 67-83. https://doi.org/10.21869/2223-1560-2018-22-3-67-83.

9. 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. https://doi.org/10.21869/2223-1560-2018-22-2-52-63.

10. Разработка прогрессивных технологий получения и обработки металлов, сплавов, порошковых и композиционных наноматериалов: монография / М.Х. Шоршоров, А.Е. Гвоздев, В.И. Золотухин, А.Н. Сергеев, А.А. Калинин, А.Д. Бреки, Н.Н. Сергеев, О.В. Кузовлева, Н.Е. Стариков, Д.В. Малий. Тула: Изд-во ТулГУ, 2016. 235 с.

11. Влияние деформационной повреждаемости на формирование механических свойств малоуглеродистых сталей / Г.М. Журавлев, А.Е. Гвоздев, Н.Н. Сергеев, Д.А. Провоторов // Производство проката. 2015. № 12. С. 9-13.

12. 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.

13. Механизмы водородного растрескивания металлов и сплавов. Ч.I (обзор) / Н.Н. Сергеев, А.Н. Сергеев, С.Н. Кутепов, А.Г. Колмаков, А.Е. Гвоздев // Материаловедение. 2018. № 3. С. 27-33.

14. Механизмы водородного растрескивания металлов и сплавов. Ч.II (обзор) / Н.Н. Сергеев, А.Н. Сергеев, С.Н. Кутепов, А.Г. Колмаков, А.Е. Гвоздев // Материаловедение. 2018. № 4. С. 20-29.

15. Формирование пластических зон около сферической полости в упрочненных низкоуглеродистых сталях в условиях водородной стресс-коррозии / Н.Н. Сергеев, В.А. Терешин, А.Н. Чуканов, А.Г. Колмаков, А.А. Яковенко, А.Н. Сергеев, И.М. Леонтьев, Д.М. Хонелидзе, А.Е. Гвоздев // Материаловедение. 2017. № 12. С. 18-25.

16. 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.

17. Влияние разнозернистости аустенита на кинетику перлитного превращения в мало- и среднеуглеродистых низколегированных сталях / А.Е. Гвоздев, А.Г. Колмаков, Д.А. Провоторов, И.В. Минаев, Н.Н. Сергеев, И.В. Тихонова // Материаловедение. 2014. № 7. С. 23-26.

18. 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.

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. Vol. 8. No. 1. С. 126-129.

20. 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.

21. 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. https://doi.org/10.21869/2223-1560-2017-21-5-78-92.

22. Диффузия водорода в сварных соединениях конструкционных сталей / Н.Н. Сергеев, А.Н. Сергеев, С.Н. Кутепов, А.Е. Гвоздев, Е.В. Агеев // Известия Юго-Западного государственного университета. 2017. Т. 21, № 6(75). С. 85-95. https://doi.org/10.21869/2223-1560-2017-21-6-85-95.

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

24. 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.

References

1. Sergeev N.N., Sergeev A.N. *Vodorodnoe ohrupchivanie i rastreskivanie vysokoprochnoj armaturnoj stali* [Hydrogen embrittlement and cracking of high-strength reinforcing steel]. *Tula, Izd-vo TulGU Publ.,* 2017, 180 p. (In Russ.).

2. Sergeev N.N., Sergeev A.N. *Mekhanicheskie svojstva i vnutrennee trenie vysokoprochnyh stalej v korrozionnyh sredah* [Mechanical properties and internal friction of high-strength steels in corrosive environments]. *Tula, Izd-vo TulGU Publ.,* 2018, 430 p. (In Russ.).

3. Sergeev N.N., Sergeev A.N., Kutepov S.N., ZHuravlev G.M., Gvozdev A.E. *Osnovy povysheniya dolgovechnosti vysokoprochnyh stalej, ekspluatiruemyh v vodorodsoderzhashchih sredah* [Bases of increase of durability of the high-strength steels operated in hydrogen-containing environments]. *Tula, Izd-vo TulGU Publ.,* 2019, 348 p. (In Russ.).

4. Izvol'skij V.V., Sergeev N.N. *Korrozionnoe rastreskivanie i vodorodnoe ohrupchivanie armaturnyh stalej zhelezobetona povyshennoj i vysokoj prochnosti* [Corrosion cracking and hydrogen embrittlement of reinforced concrete reinforcement steels of high and high strength]. *Tula, Izd-vo TGPU im. L. N. Tolstogo Publ.,* 2001, 163 p. (In Russ.).

5. Sergeev N.N., Izvol'skij V.V., Sergeev A.N., Kutepov S.N., A.E. Vliyanie uslovij otpuska na mekhanicheskie i korrozionnye svojstva stali Gvozdev 23H2G2T [Influence of tempering conditions on mechanical and corrosion properties of steel 23X2G2T]. *Vestnik Rybinskoj gosudarstvennoj aviacionnoj tekhnologicheskoj akademii im. P.A. Solov'eva = Bulletin of Rybinsk state aviation technological Academy. P. A. Solovyov*, 2018, no. 2(45), pp. 128-135 (In Russ.).

6. Sergeev N.N., Izvol'skij V.V., Sergeev A.N., Kutepov S.N., Gvozdev A.E., CHukanov A.N., Pantyuhin O.V. Vliyanie himicheskogo sostava stali 23H2G2T na stojkost' protiv korrozionnogo rastreskivaniya [Influence of chemical composition of steel 23X2G2T on resistance against corrosion cracking]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki = Proceedings of Tula State University. Technical science*, 2018, is. 9, pp. 409-442 (In Russ.).

7. Sergeev N.N., Sergeev A.N., Gvozdev A.E., Tihonova I.V., Kutepov S.N., Ageev E.V. Vliyanie urovnya rastyagivayushchih napryazhenij na dlitel'nuyu prochnost' armaturnyh stalej v vodorodsoderzhashchih sredah [Influence of the level of tensile stresses on the long-term strength of reinforcing steels in hydrogen-containing media]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*, 2018, vol. 8, no. 2 (27), pp. 6-19 (In Russ.).

8. Sergeev N.N., Sergeev A.N., Kutepov S.N., Gvozdev A.E., Ageev E.V., Klement'ev D.S. Primenenie tekhnologii izgotovleniya «korkovym» sposobom formoobrazuyushchih vstavok dlya lit'ya pod davleniem mednyh splavov [Application of technology in the production of «cortical» method of forming inserts for die casting copper alloys]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University,* 2018, vol. 22, no. 3(78), pp. 67-83 (In Russ.). https://doi.org/10.21869/2223-1560-2018-22-3-67-83.

9. Sergeev N. N., Izvol'skij V. V., Sergeev A. N., Kutepov S. N., Gvozdev A. E., Ageev E. V., Klement'ev D. S. Vliyanie mikrostrukturnyh faktorov i termicheskoj obrabotki na korrozionnuyu stojkost' armaturnoj stali klassa A600 [The influence of microstructural factors and heat treatment on corrosion resistance of reinforcing steel class A600]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University.* 2018, vol. 22, no. 2(77), pp. 52-63 (In Russ.). https://doi.org/10.21869/2223-1560-2018-22-2-52-63.

10. SHorshorov M.H., Gvozdev A.E., Zolotuhin V.I., Sergeev A.N., Kalinin A.A., Breki A.D., Sergeev N.N., Kuzovleva O.V., Starikov N.E., Malij D.V. *Razrabotka progressivnyh tekhnologij polucheniya i obrabotki metallov, splavov, poroshkovyh i kompozicionnyh nanomaterialov* [Development of progressive technologies for obtaining and processing metals, alloys, powder and composite nanomaterials]. *Tula, Izdatel'stvo TulGU Publ.,* 2016, 235 p. (In Russ.).

11. ZHuravlev G.M., Gvozdev A.E., Sergeev N.N., Provotorov D.A. Vliyanie deformacionnoj povrezhdaemosti na formirovanie mekhanicheskih svojstv malouglerodistyh stalej [Influence of deformation damage on formation of mechanical properties of low-carbon steels]. *Proizvodstvo prokata = Production of rolled products*, 2015, no. 12, pp. 9-13 (In Russ.).

12. Baranov V.P., Gvozdev A.E., Kolmakov A.G., Sergeev N.N., CHukanov A.N. Mnogourovnevyj podhod k probleme zamedlennogo razrusheniya vysokoprochnyh konstrukcionnyh stalej pod dejstviem vodoroda [Multilevel approach to the problem of delayed destruction of high-strength structural steels under the action of hydrogen]. *Materialovedenie = Materials science*, 2017, no. 7, pp. 11-22 (In Russ.).

13. Sergeev N.N., Sergeev A.N., Kutepov S.N., Kolmakov A.G., Gvozdev A.E. Mekhanizmy vodorodnogo rastreskivaniya metallov i splavov [Mechanisms of hydrogen cracking of metals and alloys. Pt.I.]. *Materialovedenie = Materials science*, 2018, no. 3, pp. 27-33 (In Russ.).

14. Sergeev N.N., Sergeev A.N., Kutepov S.N., Kolmakov A.G., Gvozdev A.E. Mekhanizmy vodorodnogo rastreskivaniya metallov i splavov [Mechanisms of hydrogen cracking of metals and alloys. Pt.II]. *Materialovedenie = Materials science*, 2018, no. 4, pp. 20-29 (In Russ.).

15. Sergeev N.N., Tereshin V.A., CHukanov A.N., Kolmakov A.G., YAkovenko A.A., Sergeev A.N., Leont'ev I.M., Honelidze D.M., Gvozdev A.E. Formirovanie plasticheskih zon okolo sfericheskoj polosti v uprochnennyh nizkouglerodistyh stalyah v usloviyah vodorodnoj stress-korrozii [Formation of plastic zones near a spherical cavity in hardened low-carbon steels under conditions of hydrogen stress corrosion]. *Materialovedenie = Materials science*, 2017, no. 12, pp. 18-25 (In Russ.).

16. Gvozdev A.E., ZHuravlev G.M., Kolmakov A.G. Formirovanie mekhanicheskih svojstv uglerodistyh stalej v processah vytyazhki s utoneniem [Formation of mechanical properties of carbon steels in the processes of drawing with thinning]. *Tekhnologiya metallov = Technology of metals*, 2015, no. 11, pp. 17-29 (In Russ.).

17. Gvozdev A.E., Kolmakov A.G., Provotorov D.A., Minaev I.V., Sergeev N.N., Tihonova I.V. Vliyanie raznozernistosti austenita na kinetiku perlitnogo prevrashcheniya v malo- i sredneuglerodistyh nizkolegirovannyh stalyah [Effect of austenite grain diversity on the kinetics of perlite transformation in low-and medium-carbon low-alloy steels]. *Materialovedenie = Materials science*, 2014, no. 7, pp. 23-26 (In Russ.).

18. Gvozdev A.E., Sergeev N.N., Minaev I.V., Tihonova I.V., Kolmakov A.G. Rol' processa zarodysheobrazovaniya v razvitii nekotoryh fazovyh perekhodov vtorogo roda [The role of the embryo formation process in the development of some phase transitions of the second kind]. *Materialovedenie = Materials science*, 2015, no. 1, pp. 15-21 (In Russ.).

19. Breki A.D., Gvozdev A.E., Kolmakov A.G., Starikov N.E., Provotorov D.A., Sergeyev 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. Sergeev N.N., Gvozdev A.E., Sergeev A.N., Tihonova I.V., Kutepov S.N., Kuzovleva O.V., Ageev E. V. Perspektivnye stali dlya kozhuhov domennyh agregatov [Promising steels for blast furnace casings]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*., 2017, vol. 7, no. 2(23), pp. 6-15 (In Russ.).

21. ZHuravlev G.M., Gvozdev A.E., Sapozhnikov S.V., Kutepov S.N., Ageev E.V. Prinyatie reshenij po statisticheskim modelyam v upravlenii kachestvom produkcii [Decisions on Statistical Models in Quality Control of Products]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University,* 2017, vol. 21, no. 5(74), pp. 78-92 (In Russ.). https://doi.org/10.21869/2223-1560-2017-21-5-78-92.

22. Sergeev N.N., Sergeev A.N., Kutepov S.N., Gvozdev A.E., Ageev E.V. Diffuziya vodoroda v svarnyh soedineniyah konstrukcionnyh stalej [Diffusion of hydrogen in welded joints of structural steels]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University,* 2017, vol. 21, no. 6(75), pp. 85-95 (In Russ.). https://doi.org/10.21869/2223-1560-2017-21-6-85-95.

23. Gvozdev A.E., Sergeyev N.N., Minayev I.V., Tikhonova I.V., Sergeyev A.N., Khonelidze D.M., Maliy 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.

24. ZHuravlev G.M., Gvozdev A.E., CHeglov A.E., Sergeev N.N., Gubanov O.M. Variant opredeleniya maksimal'nogo plasticheskogo uprochneniya v instrumental'nyh stalyah [Variant of determination of maximum plastic hardening in tool steels]. *Stal' = Steel*, 2017, no. 6, pp. 26-39 (In Russ.).

Информация об авторах / Information about the Authors

Сергеев Николай Николаевич, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого», Тула, Российская Федерация
e-mail: technology@tspu.tula.ru

Nikolay N. Sergeev, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Tula State Pedagogical University named after Lev Tolstoy, Tula, Russian Federation
e-mail: technology@tspu.tula.ru

Извольский Валерий Владимирович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Строительства, строительных материалов и конструкций», ФГБОУ ВО «Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого», Тула, Российская Федерация,
e-mail: kafedrassmik@mail.ru

Valeriy V. Izvolsky, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of the Construction, Building Materials and Structures Department, Tula State Pedagogical University named after Lev Tolstoy, Tula, Russian Federation,
e-mail: kafedrassmik@mail.ru)

Сергеев Александр Николаевич, доктор педагогических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого», Тула, Российская Федерация
e-mail: ansergueev@mail.ru

Aleksandr N. Sergeev, Cand. of Sci. (Pedagogical) Sciences, Professor, Tula State Pedagogical University named after Lev Tolstoy, Tula, Russian Federation
e-mail: ansergueev@mail.ru

Кутепов Сергей Николаевич, кандидат педагогических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого», Тула, Российская Федерация
e-mail: kutepov.sergei@mail.ru

Sergey N. Kutepov, Cand. of Sci. (Pedagogical), Tula State Pedagogical University named after Lev Tolstoy, Tula, Russian Federation
e-mail: kutepov.sergei@mail.ru

Гвоздев Александр Евгеньевич, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого», Тула, Российская Федерация
e-mail: gwozdew.alexandr2013@yandex.ru

Aleksandr E. Gvozdev, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Tula State Pedagogical University named after Lev Tolstoy, Tula, Russian Federation
e-mail: gwozdew.alexandr2013@yandex.ru

Агеева Екатерина Владимировна, кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», Курск, Российская Федерация
e-mail: ageeva-ev@yandex.ru

Ekaterina V. Ageeva, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Southwest State University, Kursk, Russian Federation
e-mail: ageeva-ev@yandex.ru

Клементьев Денис Сергеевич, магистрант, ФГБОУ ВО «Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого» Тула, Российская Федерация
e-mail: denis.klementev.93@mail.ru

Denis S. Klement'yev, Undergraguate, Tula State Pedagogical University named after Lev Tolstoy, Tula, Russian Federation
e-mail: denis.klementev.93@mail.ru

Кругляков Олег Викторович, аспирант, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», Курск, Российская Федерация,
e-mail: krug_ov@yandex.ru

Oleg V. Kruglyakov, Post-Graduate Student, Southwest State University, Kursk, Russian Federation,
e-mail: krug_ov@yandex.ru