

ПО МАТЕРИАЛАМ МЕЖДУНАРОДНОЙ
КОНФЕРЕНЦИИ «НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ
ШКОЛА ДЛЯ МОЛОДЫХ МЕТАЛЛУРГОВ» – 2023

ON THE MATERIALS OF THE INTERNATIONAL
CONFERENCE “SCIENTIFIC AND PRACTICAL
SCHOOL FOR YOUNG METALLURGISTS” – 2023



УДК 620.193:669.1.017

DOI 10.17073/0368-0797-2024-2-229-236



Оригинальная статья

Original article

ПОДХОДЫ К ВЫБОРУ МАТЕРИАЛЬНОГО ИСПОЛНЕНИЯ ИНФРАСТРУКТУРНЫХ ОБЪЕКТОВ ТРАНСПОРТА И ЗАКАЧКИ CO₂

А. С. Ровбо¹, И. А. Голубев¹, Н. О. Шапошников¹,
А. В. Пенигин², А. С. Федоров¹

¹ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (Россия, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29)

² Научно-технический центр «Газпром нефти» (Россия, 190000, Санкт-Петербург, наб. реки Мойки, 75–79, литер Д)

✉ harchenko.annna@yandex.ru

Аннотация. Работа посвящена исследованию зависимости скорости углекислотной коррозии от микроструктуры материального исполнения трубопровода для транспорта и закачки CO₂. На сегодняшний день существует задача выбора материального исполнения инфраструктурных объектов транспорта и закачки CO₂. Для строительства трубопроводов наиболее экономически эффективными материалами являются углеродистые стали, однако для их применения необходимо уделять повышенное внимание проблеме углекислотной коррозии, которая интенсифицируется во влажных неосушенных потоках CO₂. При этом выбор материала должен проводиться обоснованно, учитывая баланс между коррозионной стойкостью, механическими характеристиками и экономической стороной вопроса. В данной работе проведено исследование влияния особенностей микроструктурного состояния на скорость коррозии низколегированных малоуглеродистых сталей для транспорта и закачки CO₂. В ходе исследования изучены особенности сталей с ферритно-бейнитной, бейнитно-ферритно-перлитной и ферритно-перлитной микроструктурой. Испытания на стойкость к коррозии проведены на стендовом автоклавном комплексе, позволяющем воссоздавать условия высокого давления и температуры и моделировать реальные среды. Показано, что микроструктурное состояние стали оказывает значительное влияние на скорость коррозии, которая возрастает при увеличении объемной доли перлита. Понимание взаимосвязи микроструктурных особенностей сталей и скорости коррозии может значительно облегчить выбор материала для инфраструктурных объектов и способствовать более эффективному и надежному использованию низколегированных углеродистых сталей в проектах по улавливанию, использованию и хранению углерода. Данное исследование будет полезно при выборе благоприятной микроструктуры для низколегированных малоуглеродистых сталей, которые могут применяться для строительства инфраструктурных объектов CCUS (Carbon Capture, Use and Storage).

Ключевые слова: улавливание углерода, хранение углерода, CCUS, декарбонизация, углекислотная коррозия, взаимосвязь структура – свойства, микроструктура, химический состав, скорость коррозии

Благодарности: Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках программы Исследовательского центра мирового уровня: Передовые цифровые технологии (соглашение № 075-15-2022-311 от 20.04.2022).

Для цитирования: Ровбо А.С., Голубев И.А., Шапошников Н.О., Пенигин А.В., Федоров А.С. Подходы к выбору материального исполнения инфраструктурных объектов транспорта и закачки CO₂. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2024;67(2):229–236.
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2024-2-229-236>

APPROACHES TO THE SELECTION OF MATERIAL DESIGN OF INFRASTRUCTURE FACILITIES FOR TRANSPORT AND INJECTION OF CO₂

A. S. Rovbo¹, I. A. Golubev¹, N. O. Shaposhnikov¹,
A. V. Penigin², A. S. Fedorov¹

¹ Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (29 Politekhnikeskaya Str., St. Petersburg 195251, Russian Federation)

² Gazprom Neft Scientific and Technical Center (75–79 D Moika Quay, St. Petersburg 190000, Russian Federation)

✉ harchenko.annna@yandex.ru

Abstract. The article is devoted to the study of dependence of carbon dioxide corrosion rate on the microstructure of material design of the pipeline for CO₂ transport and injection. Today there is a task of choosing such material design. For pipeline construction the most cost-effective materials are carbon steels, but for their application it is necessary to pay increased attention to the problem of carbon dioxide corrosion, which is intensified in wet, undrained CO₂ flows. At the same time, the choice of material should be made reasonably, taking into account the balance between corrosion resistance, mechanical characteristics and economic aspect of the issue. In this paper, the influence of microstructural state features on the corrosion rate of low-alloy mild steels for CO₂ transport and injection was investigated. The authors studied the features of steels with ferritic-bainitic, bainitic-ferritic-perlitic and ferritic-perlitic microstructures. Tests on corrosion resistance were carried out on the bench autoclave complex, which allows to recreate conditions of high pressure and temperature and to simulate real environments. It was determined that the microstructural state of steel has a significant effect on the corrosion rate, which increases with increasing volume fraction of pearlite. Understanding the relationship between the microstructural characteristics of steels and corrosion rates can simplify material selection for infrastructure facilities and contribute to more efficient and reliable use of low-alloy carbon steels in carbon capture, use, and storage projects. This study will be useful in selecting favorable microstructures for low-alloy mild steels that can be used for CCUS (Carbon Capture, Use and Storage) infrastructure projects.

Keywords: carbon capture, carbon storage, CCUS, decarburization, carbon dioxide corrosion, structure–property relationship, microstructure, chemical composition, corrosion rate

Acknowledgements: The research was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation under the World Class Research Centre Programme: Advanced Digital Technologies (agreement No. 075-15-2022-311 dated 20.04.2022).

For citation: Rovbo A.S., Golubev I.A., Shaposhnikov N.O., Penigin A.V., Fedorov A.S. Approaches to the selection of material design of infrastructure facilities for transport and injection of CO₂. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2024;67(2):229–236.

<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2024-2-229-236>

ВВЕДЕНИЕ

Улавливание, использование и хранение углерода – это область исследований, направленных на снижение выбросов CO₂ и борьбу с изменением климата. В процессе CCUS (*Carbon Capture, Use and Storage*) [1; 2] происходит улавливание CO₂, выбрасываемого в атмосферу из различных источников, таких как промышленные предприятия, энергетические установки и автотранспорт, и его дальнейшее хранение в подземных пластах [3; 4]. Это позволяет изолировать углекислый газ от атмосферы и предотвратить его негативное воздействие на климат.

На сегодняшний день существует задача выбора материального исполнения инфраструктурных объектов транспорта и закачки CO₂ в условиях повышенных экологических и экономических рисков [5; 6]. Подбор материала должен осуществляться в балансе между эффективностью в предотвращении развития интенсивной углекислотной коррозии [7] и стоимостью итогового решения [8].

Обзор открытых источников, посвященных вопросам выбора материала для объектов CCUS [3; 9], показал, что углеродистые стали являются наиболее экономически выгодными материалами для строительства трубопроводов [10], однако для их применения необ-

ходимо уделять повышенное внимание проблеме углекислотной коррозии [11], которая интенсифицируется во влажных потоках CO₂ [12]. Также на сегодняшний день в литературе нет единого мнения о влиянии микроструктуры стали и режимов термомеханической обработки на механизм и кинетику процессов коррозии [13 – 16]. Это связано с тем, что условия могут отличаться от объекта к объекту как по минерализации, компонентному составу сред, так и парциальному давлению и температуре. Все это ведет к тому, что на поверхности стали образуются отложения продуктов коррозии различной морфологии, которые могут являться как защитными, так и наоборот, ускорять коррозионный процесс. Поэтому при выборе того или иного материала необходимо учитывать особенности эксплуатации и реальные среды с объекта. В этой связи, целью настоящей работы является исследование влияния особенностей микроструктурного состояния на скорость коррозии низколегированных малоуглеродистых сталей для транспорта и закачки CO₂ в пласт, исходя из условий конкретного объекта.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для воспроизведения условий реальных объектов используют различные стендовые установки, напри-

мер замкнутого типа («flow-loop»-стенды), либо автоклавные установки, позволяющие воссоздавать условия повышенного давления и температур. В данной работе использовали автоклавную установку с сосудом емкостью 3 л. На сегодняшний день стандартные методики проведения коррозионных испытаний в автоклавах отсутствуют, поэтому опишем методику, использованную в данном эксперименте ниже. Условия испытаний подбирались, исходя из ситуации на реальном объекте.

Сущность метода коррозионных испытаний заключается в определении потери массы образцов за время их пребывания в коррозионной среде. При гравиметрическом методе скорость коррозии определяется массовым показателем ρ , выраженным в г/м² ч:

$$\rho = \frac{m_1 - m_2}{S\tau}, \quad (1)$$

где m_1 – масса образца до испытания, г; m_2 – масса образца после испытания, г; S – площадь поверхности образца, м²; τ – продолжительность испытания, ч.

Если изменение массы прямо пропорционально глубине проникновения коррозии в условиях общей коррозии, то скорость коррозии пересчитывают в глубинный показатель v , выраженный в мм/год. Такой показатель характеризует равномерные коррозионные потери (утонение) образца в единицу времени:

$$v = \frac{8760\rho}{7,85 \cdot 10^3}, \quad (2)$$

где v – глубинный показатель скорости коррозии, мм/год; 8760 – количество часов в году; 7,85 – плотность исследуемой стали, г/см³.

Гравиметрический метод позволяет получать результаты высокой точности, так как взвешивание является одной из наиболее точных операций количественного анализа. Доверительная норма при определении погрешности измерений составляла 95 %.

Перед проведением испытаний образцы обезжиривали при помощи ультразвуковой мойки в ацетоне, высушивали на воздухе и помещали на подвесе в автоклав, который затем герметизировали и деаэрировали 60 мин с расходом инертного газа 100 мл/мин на 1 л

емкости. Далее проводили насыщение деаэрированного испытательного раствора CO₂. Общее давление в автоклаве составляло 6 МПа, парциальное давление CO₂ – 0,3 МПа. Температура поддерживалась постоянной и равнялась 25 °С. Продолжительность испытаний составляла 96 ч. Для проведения коррозионных испытаний от каждой стали отбирали по три образца.

Испытательный раствор представлял собой 133 г/л CaCl₂, 31 г/л MgCl₂, 0,5 г/л NaHCO₃, 0,1 г/л Na₂SO₄ в дистиллированной воде. Общая минерализация составила 164,6 г/л. Данный состав соответствует составу жидкости в скважине, закачиваемой в подземные пласты CO₂. После испытания образцы промывали и высушивали на воздухе, а затем очищали от продуктов коррозии при помощи ластика. Исследуемые стали соответствуют классу прочности K52, химический состав представлен в табл. 1.

Микроструктуру сталей оценивали с помощью оптического микроскопа Reichert-Jung MEF3A. Для проведения количественной оценки фазовых составляющих необходимо подобрать травление, обеспечивающее получение контрастного изображения фаз без выявления межзеренных границ для последующего автоматического распознавания анализатором изображений Thixomet Pro [17]. Для этого проводили травление 4 %-ным спиртовым раствором пикриновой кислоты, которое позволяет выявить перлит. Для выявления общей микроструктуры использовали 3 %-ный раствор азотной кислоты в спирте.

Традиционным способом оценки величины зерна является метод, описанный в ГОСТ 5639 – 82, недостатком которого является невозможность оценки разнотерности исследуемого материала. На сегодняшний день известно множество методов оценки зеренной структуры материала [18; 19]. Так, в работе [20] предложен способ расчета фактора разнотерности F_Z по формуле

$$F_Z = \frac{f_{\max} Z_{\max}}{\sum f_i Z_i}, \quad (3)$$

где $f_{\max}$ – доля зерна, занимающего максимальную площадь на шлифе, %; $Z_{\max}$ – балл зерна, занимающего мак-

Таблица 1. Химический состав исследуемых сталей

Table 1. Chemical compositions of the studied steels

Номер	Количество, мас. %							
	C	Cr	Cu	Mn	Ni	P	S	Si
1	0,039	0,66	0,50	0,98	0,22	0,0074	0,0011	0,22
2	0,062	0,51	0,10	0,50	0,12	0,0055	0,0015	0,17
3	0,080	0,62	0,34	0,49	0,38	0,0037	0,0014	0,24
4	0,050	0,65	0,14	0,75	0,07	0,0031	0,0018	0,24
5	0,056	0,63	0,16	0,64	0,21	0,0042	0,0019	0,28

симальную площадь на шлифе; f_i – доля зерна с определенным баллом, %; Z_i – балл зерна.

РЕЗУЛЬТАТЫ КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ОЦЕНКИ СТРУКТУРНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ И КОРРОЗИОННЫХ ИСПЫТАНИЙ

Исследуемые в работе материалы были получены на различных отечественных металлургических предприятиях по технологии, включающей выплавку в конвертере, внепечную обработку и непрерывную разливку с последующей термомеханической обработкой. Микроструктуры сталей исследовали в поперечном сечении (рис. 1).

Микроструктура стали 1 характеризуется как ферритно-бейнитная. Содержание перлита в этой стали самое низкое среди всех исследуемых сталей и составляет 2,20 об. %, а зеренная структура (по номерам баллов, занимающим на шлифе площадь более 10 %) оценивается номерами G_{10} (30 %) и G_{11} (28 %). Микроструктура стали 2 характеризуется как ферритно-перлитная с преимущественно неполигональным ферритом, зеренная структура которого оценивается номерами G_9 (13 %) и G_{10} (21 %). Содержание перлита в этой стали составляет 3,57 об. %. Микроструктура стали 3 также характеризуется как ферритно-перлитная. Структура оценивается номерами G_{11} (32 %) и G_{12} (32 %), а содержание перлита в ней составляет 6,72 об. %. При этом распределение перлитных колоний неравномерное в виде отдельных скоплений с грубой морфологией, как

и в стали 2 (рис. 2). Микроструктура стали 4 характеризуется как ферритно-перлитно-бейнитная, содержание перлита в ней составляет 7,51 об. %. Распределение перлита в этой стали довольно равномерное, структура оценивается четырьмя номерами G_9 (14 %), G_{10} (28 %), G_{11} (29 %) и G_{12} (18 %). Микроструктура стали 5 характеризуется как ферритно-перлитная. При этом в данной стали после травления пикриновой кислотой обнаружено наибольшее содержание перлита – 13,80 об. %. Структура оценивается номерами G_{10} (21 %), G_{11} (32 %) и G_{12} (25 %).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В ферритно-перлитных сталях перлит представляет собой пластинчатую структуру, состоящую из чередующихся слоев феррита и карбида железа (цементита). При взаимодействии с агрессивными средами, содержащими CO₂, феррит перлита становится анодом и быстро растворяется, в то время как цементит остается нетронутым (рис. 4). При этом с увеличением содержания углерода прямо пропорционально увеличивается содержание перлита. Результаты коррозионных испытаний на рис. 3, а демонстрируют, что с увеличением доли перлита в микроструктуре снижается общая коррозионная стойкость сталей.

В работе [21] показано, что наиболее уязвимым местом являются границы между ферритом и цементитом, где в первую очередь и начинаются коррозион-

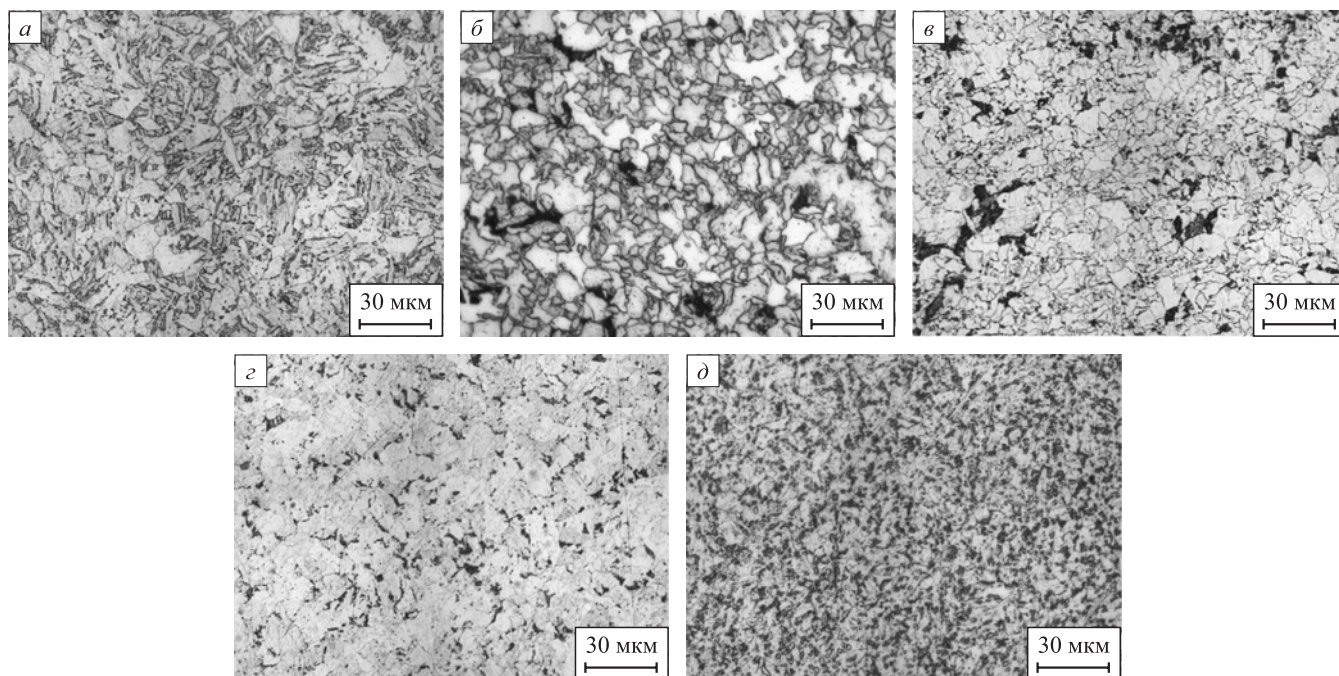


Рис. 1. Общий вид микроструктур исследуемых сталей: состав 1 (а); состав 2 (б); состав 3 (в); состав 4 (г); состав 5 (д)

Fig. 1. General view of microstructures of the studied steels: composition 1 (a); composition 2 (б); composition 3 (в); composition 4 (г); composition 5 (д)

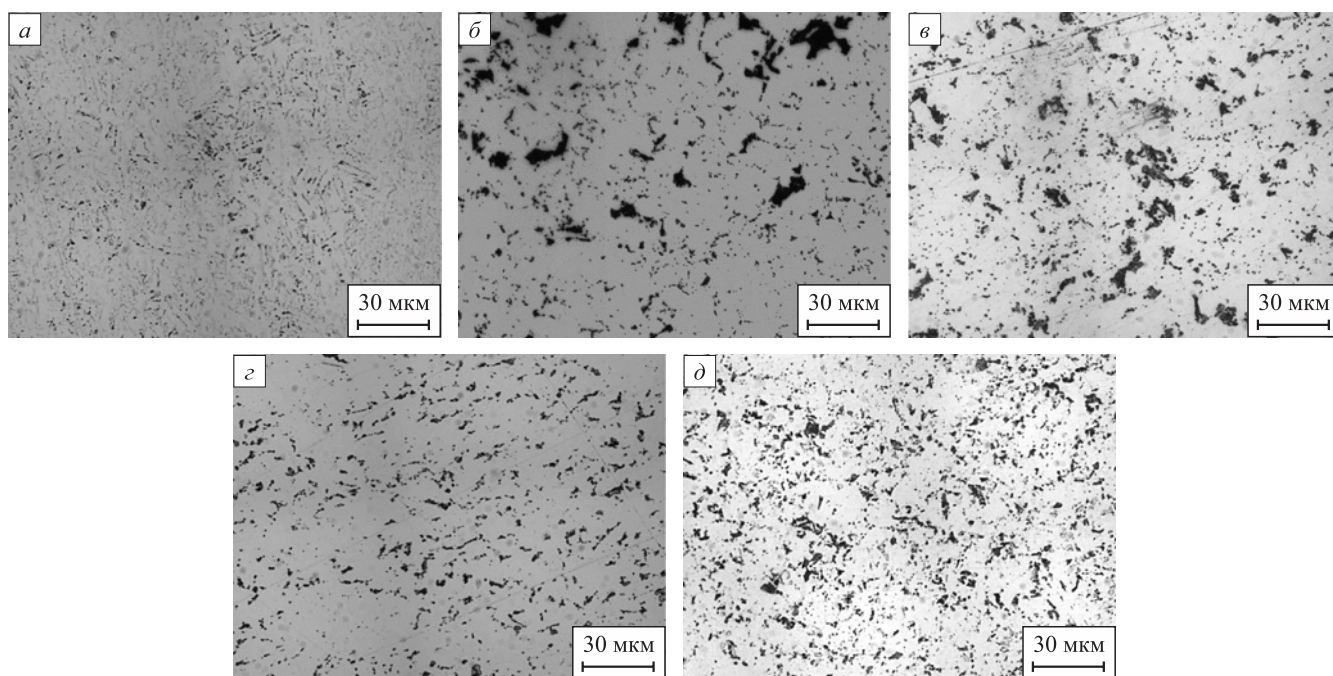


Рис. 2. Выявление перлита в исследуемых сталях:
состав 1 (а); состав 2 (б); состав 3 (в); состав 4 (г); состав 5 (д)

Fig. 2. Detection of perlite in the studied steels:
composition 1 (a); composition 2 (б); composition 3 (в); composition 4 (г); composition 5 (д)

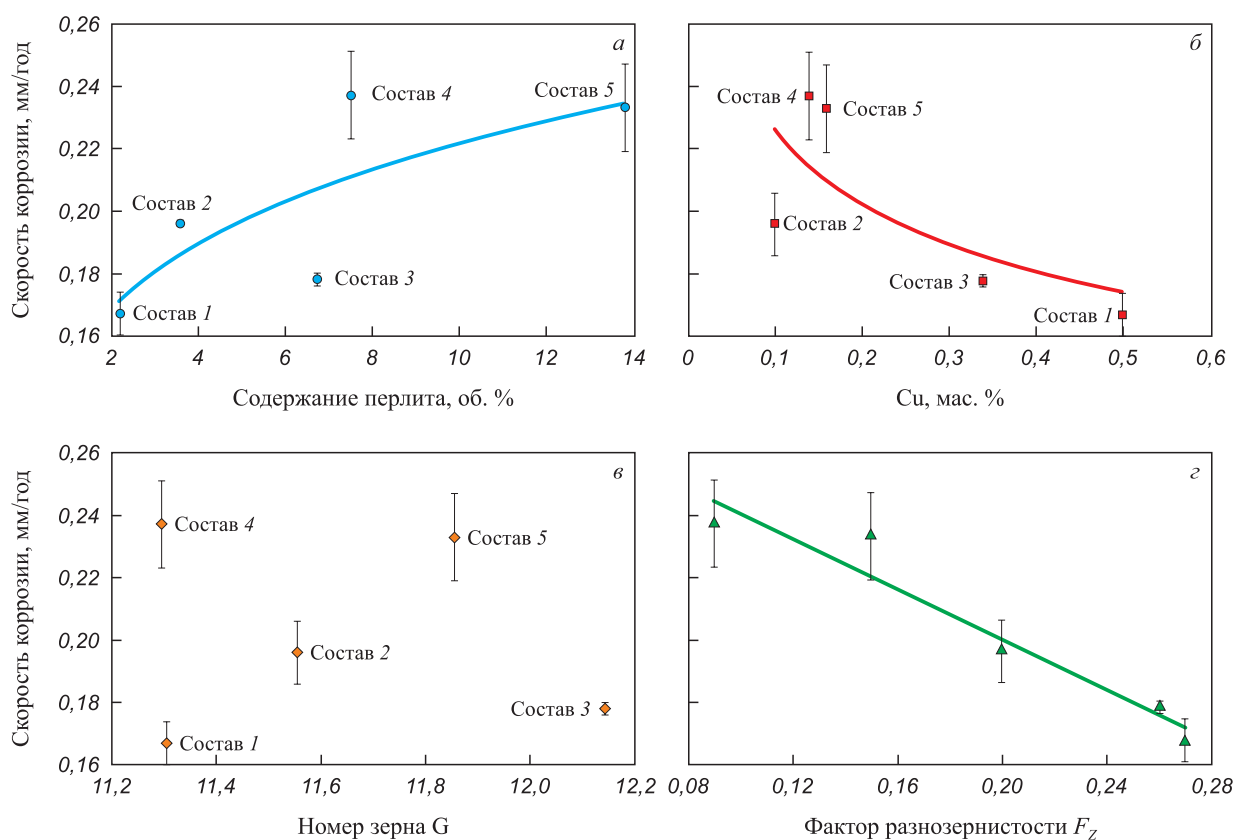


Рис. 3. Зависимость скорости коррозии исследуемых сталей от:
содержания перлита (а); содержания Cu в стали (б); номера зерна G (в); фактора разноразмерности F_z (г)

Fig. 3. Dependence of corrosion rate of the studied steels on:
perlite content (a); content of Cu in the steel (б); grain size number G (в); grain size variation factor F_z (г)

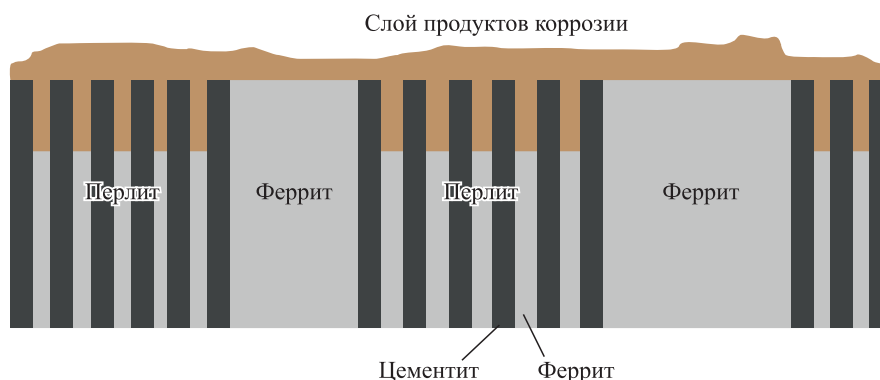


Рис. 4. Механизм коррозии ферритно-перлитных сталей в CO₂-содержащих средах [22]

Fig. 4. Mechanism of corrosion of ferritic-perlitic steels in CO₂-containing environments

ные процессы. По-видимому, увеличение количества областей перлитных колоний приводит к тому, что растет количество уязвимых с точки зрения коррозионных процессов межфазных границ феррит – цементит, а также пластинок феррита, которые впоследствии становятся анодом и быстро растворяются.

Стоит также отметить положительное влияние меди на коррозионную стойкость – увеличение содержания меди с ~0,12 до 0,50 мас. % привело к снижению скорости коррозии с 0,237 до 0,167 мм/год (рис. 3, б). Положительное влияние меди на коррозионные свойства сталей отмечается во многих исследованиях. Так, в работе [23] установлено, что введение небольшого количества меди (как правило, до 1 %) значительно повышает коррозионную стойкость низкоуглеродистых сталей. К тому же в высокопрочных низколегированных сталях медь является легирующим элементом, который обеспечивает высокую вязкость и хорошую свариваемость. Однако, несмотря на показанные в данной работе преимущества введения меди в состав стали, а также коррозионные особенности ферритно-перлитных микроструктур, использовать низколегированные малоуглеродистые стали при выборе материального исполнения инфраструктурных объектов транспорта и закачки CO₂ нужно с осторожностью и только при строгом контроле наличия свободной воды в транспор-

тируемом газе – ее количество должно быть минимальным. В противном случае необходимо использовать материалы в коррозионностойком исполнении.

По результатам оценки параметров микроструктуры исследуемых сталей, приведенным в табл. 2, можно сделать вывод, что размер зерна не оказывает определяющего влияния на коррозионную стойкость исследуемых сталей (рис. 3, в). Однако разнородность, оцененная по уравнению (3), оказывает существенное влияние на коррозионную стойкость (рис. 3, г). Таким образом, можно сделать вывод о том, что чем выше однородность структуры (и, соответственно, значение фактора F_z), тем выше коррозионная стойкость материала.

Выводы

Проведено исследование влияния особенностей микроструктурного состояния на скорость коррозии низколегированных малоуглеродистых сталей для транспорта и закачки CO₂ (CCUS). Показано, что в ферритно-перлитных сталях коррозионным процессам подвержен в первую очередь феррит, который, находясь в составе перлита, становится анодом и быстро растворяется. Как следствие, увеличение количества областей перлитных колоний в микроструктуре приводит к снижению общей коррозионной стойкости стали. Установ-

Таблица 2. Результаты оценки параметров микроструктуры сталей

Table 2. Results of assessment of the steels microstructure parameters

Номер	Структура	[Cu], мас. %	Содержание перлита, об. %	Скорость коррозии, мм/год	Номер ферритного зерна G	Фактор разнородности F_z
1	Ферритно-бейнитная	0,50	2,20	0,167 ± 0,007	11,31	0,27
2	Ферритно-перлитная	0,10	3,57	0,196 ± 0,010	11,56	0,20
3	Ферритно-перлитная	0,34	6,72	0,178 ± 0,002	12,15	0,26
4	Ферритно-перлитно-бейнитная	0,14	7,51	0,237 ± 0,014	11,30	0,09
5	Ферритно-перлитная	0,16	13,80	0,233 ± 0,014	11,86	0,15

лено положительное влияние меди на коррозионную стойкость – увеличение содержания меди в исследуемых составах с 0,12 до 0,50 мас. % привело к снижению скорости коррозии в 1,5 раза. Отмечено, что на коррозионную стойкость существенное влияние оказывает не размер зерна, а, в первую очередь, разнотернистость структуры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Barker R., Hua Y., Neville A. Internal corrosion of carbon steel pipelines for dense-phase CO₂ transport in carbon capture and storage (CCS) – a review. *International Materials Reviews*. 2017;62(1):1–31. <https://doi.org/10.1080/09506608.2016.1176306>
2. Zhang Y., Pang X., Qu S., Li X., Gao K. Discussion of the CO₂ corrosion mechanism between low partial pressure and supercritical condition. *Corrosion Science*. 2012;59:186–197. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2012.03.006>
3. Cecile M., Dwaipayan M., Guillaume N., Leila F. Material integrity aspects of CCS: an overview for CO₂ transport and storage. In: *Trondheim Conference on CO₂ Capture, Transport and Storage Trondheim, Norway – June 21–23, 2021*: 231–236.
4. IEAGHG. Corrosion and Selection of Materials for Carbon Capture and Storage. 2010;288.
5. Witkowski A., Majkut M., Rulik S. Analysis of pipeline transportation systems for carbon dioxide sequestration. *Archives of Thermodynamics*. 2014;35(1):117–140. <https://doi.org/10.2478/aoter-2014-0008>
6. Witkowski A., Rusin M., Majkut S., Rulik K. Advances in Carbon Dioxide Compression and Pipeline Transportation Processes. Springer Cham; 2015:134. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-18404-3>
7. Wang S., Zhao J., Gu Y., Xiong D., Zeng Q., Tian B. Experimental and numerical investigation into the corrosion performance of X100 pipeline steel under a different flow rate in CO₂-saturated produced water. *Journal of Solid State Electrochemistry*. 2021;25(3):993–1006. <https://doi.org/10.1007/s10008-020-04868-9>
8. Knoope M.M.J., Guijt W., Ramirez A., Faaij A.P.C. Improved cost models for optimizing CO₂ pipeline configuration for point-to-point pipelines and simple networks. *International Journal of Greenhouse Gas Control*. 2014;22:25–46. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2013.12.016>
9. Duong C. Quest carbon capture and storage offset project: Findings and learnings from 1st reporting period. *International Journal of Greenhouse Gas Control*. 2019;89:65–75. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2019.06.001>
10. Wang Z.M., Liu X.T., Han X., Zhang J. Managing internal corrosion of mild steel pipelines in CO₂ enhanced oil recovery multiphase flow conditions. *Energy Technology*. 2015;3(3): 225–233. <https://doi.org/doi:10.1002/ente.201402159>
11. McGrail B.P., Schaef H.T., Glezakou V.A., Dang L.X., Owen A.T. Water reactivity in the liquid and supercritical CO₂ phase: Has half the story been neglected? *Energy Procedia*. 2009;1(1):3415–3419. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2009.02.131>
12. Yoon-Seok C., Srdjan N., Young D. Effect of impurities on the corrosion behavior of CO₂ transmission pipeline steel in supercritical CO₂-water environments. *Environmental Science and Technology*. 2010;44(23):9233–9238. <https://doi.org/10.1021/es102578c>
13. Lopez D.A., Perez T., Simison S.N. The influence of microstructure and chemical composition of carbon and low alloy steels in CO₂ corrosion. A state-of-the-art appraisal. *Materials & Design*. 2003;24(8):561–575. [https://doi.org/10.1016/S0261-3069\(03\)00158-4](https://doi.org/10.1016/S0261-3069(03)00158-4)
14. Paolinelli L.D., Perez T., Simison S.N. The influence of steel microstructure, chemical composition and pre-corrosion on CO₂ corrosion inhibitor efficiency. In: *NACE CORROSION'2007*. Houston, U.S.A., March 2007:07311.
15. Xu L.N. Influence of microstructure on mechanical properties and corrosion behavior of 3% Cr steel in CO₂ environment. *Materials and Corrosion*. 2012;63(11):997–1003. <https://doi.org/10.1002/maco.201106389>
16. Ochoa N., Vega C., Pebere N., Lacaze J., Brito J.L. CO₂ corrosion resistance of carbon steel in relation with microstructure changes. *Materials Chemistry and Physics*. 2015;156:198–205. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2015.02.047>
17. Kazakov A., Kiselev D. Industrial application of thixomet image analyzer for quantitative description of steel and alloy's microstructure. *Metallography, Microstructure and Analysis*. 2016;5:294–301. <https://doi.org/10.1007/s13632-016-0289-6>
18. Гроховский В.И. Возможности цифровой микроскопии в металлографии. *Цифровая микроскопия. Материалы школы-семинара*. Екатеринбург: УГТУ-УПИ; 2001;(1):18–20.
19. Лезинская Е.Я. Методы оценки структурной неоднородности металла труб оболочек ТВЭЛ и чехлов ТВС из коррозионностойких сталей и сплавов. *Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение*. 2003;(3):108–112.
20. Лезинская Е.Я., Ключев Д.Ю., Николаенко Ю.Н. Новый метод оценки разнотернистой структуры труб из нержавеющей сталей и сплавов. *Теория и практика металлургии*. 2012;(1-2):68–73.
21. Лезинская Е.Я., Ключев Д.Ю., Николаенко Ю.Н. New method for assessing the inequigranular structure of pipes of stainless steels and alloys. *Teoriya i praktika metallurgii = Theory and Practice of Metallurgy*. 2012;(1-2):68–73. (In Russ.).
22. Murase Y., Masuda H., Katayama H. Corrosion resistance of finer/coarser pearlitic structures of carbon steel. *Journal of the Electrochemical Society*. 2021;168(4):041501. <https://doi.org/10.1149/1945-7111/abf185>
23. Akeer E.S. Effect of Carbon Steel Composition and Microstructure on CO₂ Corrosion. Diss. on degree of Dr.(Ph.). Ohio University; 2014:188.
24. Медь в черных металлах: Сб. статей / Под ред. Ле Мэя И., Шётки Л. М.-Д. Москва: Металлургия; 1988:311.

Сведения об авторах

Information about the Authors

Анна Сергеевна Ровбо, инженер, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ORCID: 0000-0002-8312-7351

E-mail: harchenko.annna@yandex.ru

Иван Андреевич Голубев, к.т.н., инженер-исследователь, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ORCID: 0000-0001-7516-3566

E-mail: golubev_ia@spbstu.ru

Никита Олегович Шапошников, к.т.н., директор Научно-образовательного центра «Газпромнефть-Политех», Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

E-mail: shaposhn_no@spbstu.ru

Артем Витальевич Пенигин, руководитель проекта, Научно-технический центр «Газпром нефти»

E-mail: penigin.av@gazpromneft-ntc.ru

Александр Сергеевич Федоров, инженер-исследователь Научно-технологического комплекса Новые технологии и материалы, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ORCID: 0000-0003-2571-060X

E-mail: fedorov_as@spbstu.ru

Anna S. Rovbo, Engineer, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

ORCID: 0000-0002-8312-7351

E-mail: harchenko.annna@yandex.ru

Ivan A. Golubev, Cand. Sci. (Eng.), Research Engineer, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

ORCID: 0000-0001-7516-3566

E-mail: golubev_ia@spbstu.ru

Nikita O. Shaposhnikov, Cand. Sci. (Eng.), Director of the Scientific and Educational Center "Gazpromneft-Polytech", Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

E-mail: shaposhn_no@spbstu.ru

Artem V. Penigin, Project Manager, Gazprom Neft Scientific and Technical Center

E-mail: penigin.av@gazpromneft-ntc.ru

Aleksandr S. Fedorov, Research Engineer of the Scientific and Technological Complex "New Technologies and Materials", Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

ORCID: 0000-0003-2571-060X

E-mail: fedorov_as@spbstu.ru

Вклад авторов

Contribution of the Authors

А. С. Ровбо – исследование, методология, формальный анализ; написание, рецензирование и редактирование текста, визуализация.

И. А. Голубев – концептуализация, администрирование проекта.

Н. О. Шапошников – администрирование проекта, получение финансирования.

А. В. Пенигин – администрирование проекта.

А. С. Федоров – исследование, методология, формальный анализ, визуализация.

A. S. Rovbo – research, methodology, formal analysis; writing, reviewing and editing the text; visualisation.

I. A. Golubev – conceptualisation, project administration.

N. O. Shaposhnikov – project administration, obtaining funding.

A. V. Penigin – project administration.

A. S. Fedorov – research, methodology, formal analysis, visualisation.

Поступила в редакцию 10.10.2023

После доработки 07.03.2024

Принята к публикации 15.03.2024

Received 10.10.2023

Revised 07.03.2024

Accepted 15.03.2024