УДК 67.02
https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-2(37)-98-106 EDN: ILVGBI

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МЕХАНИЗИРОВАННОЙ СВАРКИ С КАПЛЕПЕРЕНОСОМ ПРИ РЕМОНТЕ ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

М.З. ЗАРИПОВ, канд. техн. наук
З.Р. МУХАМЕТЗЯНОВ✉, д-р техн. наук
А.Н. ПУДОВКИН, канд. техн. наук
ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет», ул. Космонавтов, д. 1, г. Уфа, 450064, Российская Федерация

Аннотация

Введение. Ремонт трубопроводов, находящихся под давлением перекачиваемой среды, с применением сварки актуален для снижения трудоемкости выполнения работ. Но при этом возрастает риск снижения безопасности производства работ. Для решения этой проблемы в статье рассматривается возможность применения технологических процессов механизированной сварки с управляемым переносом капель.

Цель исследования: определение основных параметров технологических процессов механизированной сварки с управляемым переносом капель, влияющих на безопасность сварочных работ.

Материалы и методы. Для достижения поставленной задачи была использована разработанная авторами теоретическая модель расчета рабочей толщины стенки трубопровода, находящегося под давлением, при расчетах на прочность в процессе сварки. Также использовалась зависимость толщины стенки трубы у края проплавленного отверстия от внутреннего давления.

Результаты. Установлено, что применение сварочных процессов механизированной сварки с управляемым переносом капель металла позволяет управлять глубиной проплавления стенки за счет изменения параметров режима. Это значительно повышает безопасность проведения сварочных работ на трубопроводах, находящихся под давлением перекачиваемых сред, по сравнению с другими видами сварки. Разработанные нами технологические процессы сварки обеспечивают безопасность производства сварочных работ за счет достижения плавного и точного контролирования глубины проплавления стенки трубопровода. Достигается это правильным подбором базового и пикового токов, управлением процессом переноса капель по напряжению на дуге, управлением количеством наплавляемого металла и температуры нагрева свариваемых конструкций.

Выводы. За последнее время разработан ряд ремонтных технологий, предназначенных для повышения качества сварных швов при строительстве и ремонте магистральных трубопроводов. Полученные с высокой степенью достоверности результаты исследований по разработке технологии механизированной сварки с управляемым переносом капель позволяют рекомендовать эту технологию в качестве эффективного способа повышения безопасности производства сварочных работ на трубопроводах, находящихся под давлением перекачиваемых сред.

Ключевые слова: ремонт трубопроводов, механизированная сварка, управляемый каплеперенос, безопасность сварочных работ, глубина проплавления

Для цитирования: Зарипов М.З., Мухаметзянов З.Р., Пудовкин А.Н. Особенности применения механизированной сварки с каплепереносом при ремонте эксплуатируемых трубопроводов. *Вестник НИЦ «Строительство».* 2023;37(2):98–106. https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-2(37)-98-106

Вклад авторов
Зарипов М.З. – определена, обоснована и разработана технология механизированной сварки с управляемым переносом капель для трубопроводов, находящихся под давлением перекачиваемых сред.
Мухаметзянов З.Р. – исследованы и предложены способы повышения безопасности производства сварочных работ на трубопроводах, находящихся под давлением перекачиваемых сред.
Пудовкин А.Н. – моделирование параметров технологии механизированной сварки с управляемым переносом капель.

Финансирование
Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 03.04.2023
Поступила после рецензирования 21.04.2023
Принята к публикации 25.04.2023

SPECIFIC FEATURES OF APPLYING MACHINE WELDING WITH DROP TRANSFER IN REPAIR OF OPERATING PIPELINES

M.Z. ZARIPOV, Cand. Sci. (Engineering)
Z.R. MUKHAMETZYANOV✉, Dr. Sci. (Engineering)
A.N. PUDOVKIN, Cand. Sci. (Engineering)
Ufa State Petroleum Technological University, Kosmonavtov str., 1, Ufa, 450064, Russian Federation

Abstract

Introduction. Repair of pipelines under pressure of pumped media by means of welding is relevant to reduce the complexity of work. However, it may reduce the safety of work. To solve this issue, the authors consider applying the technological processes of machine welding with controlled drop transfer.

Aim. To determine the main parameters of technological processes of machine welding with controlled drop transfer, affecting the safety of welding.

Materials and methods. The authors developed a theoretical model for calculating the working thickness of a pipeline wall under pressure which they used for calculating the strength during welding. The dependence of the pipeline wall thickness at the edge of the penetrated hole on the internal pressure was also used in the calculations.

Results. It was found that machine welding with controlled transfer of metal drops allows the wall penetration depth to be regulated by changing the welding variables. This significantly increases the safety of welding on pipelines under pressure of pumped media, compared to other types of welding. The developed welding processes ensure the safety of welding operations by means of a smooth and accurate control of the wall penetration depth. This is achieved by the correct selection of the background and peak current, control of the drop transfer process by arc voltage, control of the amount of weld metal and the heating temperature of welded structures.

Conclusion. Recently, a number of repair technologies have been developed to improve the quality of welds in the construction and repair of trunk pipelines. The highly significant results of research on the development of machine welding technology with controlled drop transfer allow this technology to be recommended as an effective way to improve the safety of welding operations on pipelines under pressure of pumped media.

Keywords: pipeline repair, machine welding, controlled drop transfer, welding safety, penetration depth

For citation: Zaripov M.Z., Mukhametzyanov Z.R., Pudovkin A.N. Specific features of applying machine welding with drop transfer in repair of operating pipelines. *Vestnik NIC Stroitel'stvo = Bulletin of Science and Research Center of Construction*. 2023;37(2):98–106. (In Russian). https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-2(37)-98-106

Author contribution statements
Zaripov M.Z. – determining, substantiating and developing the technology of machine welding with controlled drop transfer for pipelines under the pressure of pumped media.
Mukhametzyanov Z.R. – investigating and proposing ways to improve the safety of welding operations on pipelines under the pressure of pumped media.
Pudovkin A.N. – modeling parameters for machine welding technology with controlled drop transfer.

Funding
No funding support was obtained for the research.

Conflict of interest
The authors declare no conflict of interest.

Received 03.04.2023
Revised 21.04.2023
Accepted 25.04.2023

Для изготовления трубопроводов часто применяют низкоуглеродистую сталь. Она хорошо сваривается, почти не закаливается, слабо подвержена коррозии и потому весьма удобна для работы в элементах конструкций [1–4]. Разработка процессов механизированной сварки с управляемым переносом капель позволила управлять процессом сварки и сделать его в меньшей степени зависимым от квалификации сварщика [5]. Настройка режимов сварки конкретного сварного шва гарантирует получение требуемой глубины проплавления (провара) стенки трубопровода [6–9]. При этом формируется необходимая форма сварного шва.

При сварочных работах на трубопроводах, находящихся под давлением перекачиваемых сред, допустимая толщина стенки трубопровода, при которой возможна сварка, равна сумме глубины проплавления ($\delta_{пр}$) и рабочей толщины (1)

$$\delta = \delta_{пр} + \delta_{раб}. \quad (1)$$

$\delta_{раб}$ зависит от внутреннего давления и определяется по формуле (1):

$$\delta_{раб} = \frac{P \times r}{\sigma^T},$$

где P – внутреннее давление, МПа;

r – радиус области нагрева сварочной дугой (10^{-3} м) [1];

σ^T – предел прочности металла при максимальной температуре нагрева принимается равным 5,0 МПа [1].

Данная формула выведена на основе следующей теоретической модели (рис. 1).

На рис. 2 показана форма проплавленного сваркой отверстия в стенке трубопровода, находящегося под давлением перекачиваемой среды (нефти).

Глубина проплавления (провар) ($\delta_{пр}$) при ручной сварке зависит от техники сварки (скорости перемещения сварочной дуги, угла наклона электрода). Этот параметр может колебаться от 1,5 до 2,6 мм (электроды диаметром 3 мм с основным видом покрытия),

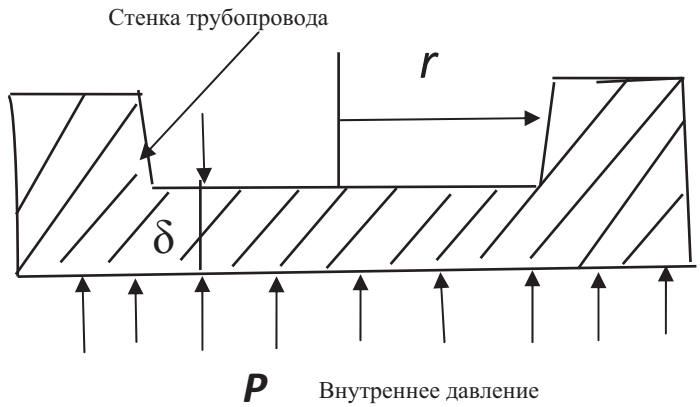

Рис. 1. Расчетная модель рабочей толщины стенки трубопровода, находящегося под давлением (*P*), при расчетах на прочность в процессе сварки
Fig. 1. Calculation model of working wall thickness of a pipeline under pressure (*P*), when calculating the strength in the welding process

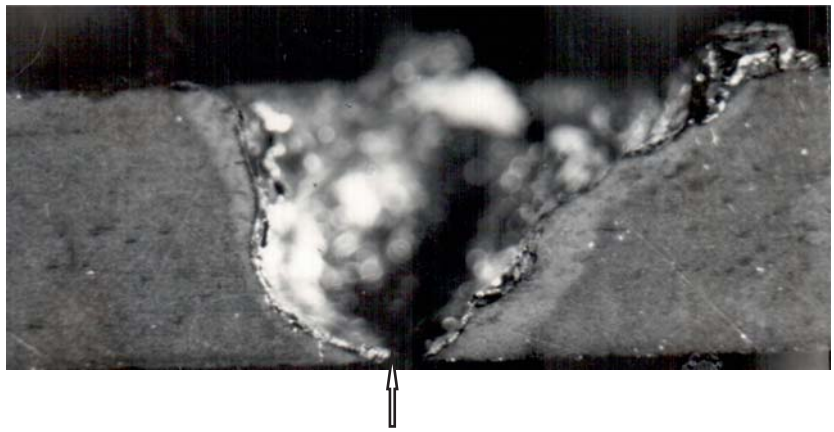

Рис. 2. Форма отверстия, возникающего в стенке трубопровода, находящегося под давлением, при сквозном проплавлении в процессе сварки
Fig. 2. Shape of hole in pipeline wall under pressure due to penetration in the welding process

что ограничивает возможности проведения сварочных работ, так как при этом требуется увеличивать толщину стенки трубопровода.

Рабочая толщина стенки трубопровода ($\delta_{раб}$) при внутреннем давлении P = 6,0 МПа равна 0,5 мм (рис. 3) [1].

Поэтому общая предельная толщина (δ) равна 2,6 + 0,5 = 3,1 (мм). Принимая запас по величине проплавления стенки равный двум, получим допустимую толщину стенки трубопровода при сварке на трубопроводе, находящемся под давлением до 6,0 МПа, равную

$$2{,}6 \times 2 + 0{,}5 = 5{,}7 \text{ (мм)}.$$

Сварка методами управляемого переноса капель (STT, ВКЗ, УКП) позволяет установить такие параметры режима сварки, которые гарантируют требуемую величину проплавления металла независимо от техники сварки.

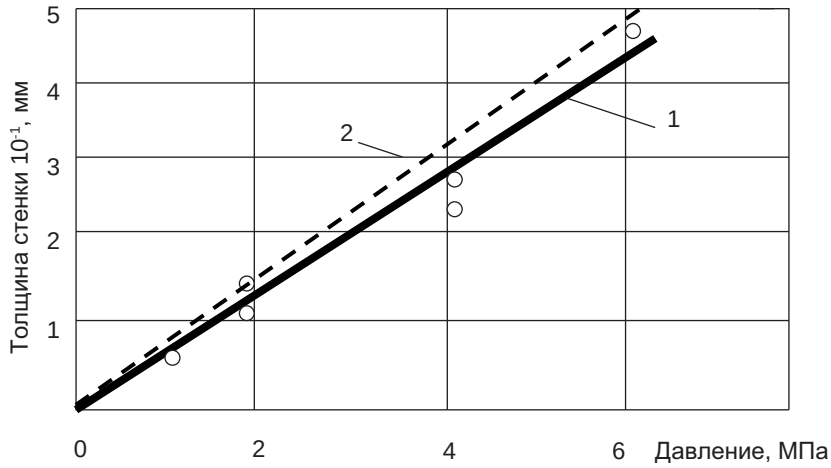

Рис. 3. Зависимость толщины стенки трубы у края проплавленного отверстия от внутреннего давления (*1* – эксперимент; *2* – расчет)
Fig. 3. Dependence of pipeline wall thickness at the edge of penetrated hole on internal pressure (*1* – experiment; *2* – calculation)

В этих процессах управление переносом капель осуществляется за счет подбора базового и пикового токов (STT, УКП), которые обеспечивают заданную форму шва и глубину проплавления стенки трубопровода. В процессе ВКЗ получение заданной формы шва и глубины проплавления обеспечивается изменением напряжения на сварочной дуге.

При сварке на трубопроводах, находящихся под давлением перекачиваемых сред, данные процессы должны применяться при выполнении первого (корневого) шва, так как глубина проплавления корневого шва должна быть наименьшей (1,0–1,5 мм). Заполняющие и облицовочные слои могут быть также выполнены с помощью этого процесса. Однако низкие скорости наплавки снижают производительность сварочных работ.

Настройка параметров режима сварки производится на специальных образцах в виде катушки, вырезанной из трубы. Глубина проплавления стенки катушки будет больше, чем стенки трубы, заполненной перекачиваемой средой, из-за отсутствия теплоотвода в перекачиваемую среду. Поэтому режимы сварки на «катушке» должны обеспечивать провар не более 2,0 мм.

Режим сварки методом STT следующий [2]:

– диаметр сварочной проволоки 1,14 мм;

– расход газа 10–16 л/мин (100 % углекислый газ высшего сорта по ГОСТ 8050 [10]);

– вылет проволоки 10–15 мм;

– колебательные движения сварочной горелки в нижнем положении сварного шва. Без поперечных колебаний в вертикальном и потолочном положениях;

– направление сварки – «на спуск»;

– полярность – обратная;

– параметр горячего старта 1,5–3,0 А;

– скорость подачи проволоки 90–120 (нижнее положение), 120–160 (вертикальное, потолочное) дюйм/мин;

– пиковый ток 400–420 А;

– базовый ток 45–55 А.

Обратная полярность увеличивает величину расплавления сварочной проволоки и уменьшает нагрев свариваемых труб, что снижает глубину проплавления стенки труб.

Технология механизированной сварки методом УКП требует большего расхода защитного газа (15–20 л^3/мин), что дополнительно охлаждает сварочную ванну и уменьшает величину проплавления стенки трубопровода. В этой технологии применяется меньший вылет электродной проволоки (5–10 мм) и низкий пиковый ток (25–270 А), что снижает производительность сварки (коэффициент наплавки), но увеличивает запас прочности по глубине проплавления.

Сварка методом ВКЗ производится на постоянном токе обратной полярности. Модуляция осуществляется по напряжению от 16,5 до 18,5 В. При напряжении 16,5 В происходит касание электродной проволокой сварочной ванны и расплавление проволоки на определенную длину. При напряжении 18,5 В реализуется капельный перенос электродного металла в сварочную ванну. Поэтому модуляция по напряжению также обеспечивает заданную глубину проплавления стенки трубопровода требуемой величины (до 2 мм).

При сварке с управляемым переносом капель сварочная дуга горит в сварочной ванне, поэтому металл электрода наплавляется на стенку трубы, при этом расплавляет только поверхность стенки трубы, а расплавленный металл закрывает отверстие, которое может появиться в стенке трубопровода при сквозном проплавлении [11–14].

Для полуавтоматической сварки трубопроводов с управляемым переносом капель фирмой Lincoln Electric разработаны инверторные источники питания типа Invertec STT [3]. Они не являются ни источниками с жесткой характеристикой, ни источниками с крутопадающей характеристикой. Аппарат имеет обратную связь, которая отслеживает основные этапы переноса капли в сварочную ванну и реагирует на процессы, происходящие между электродом и сварочной ванной, изменяя величину сварочного тока. Данное оборудование может применяться как в стационарных, так и в полевых условиях.

За базовое оборудование в процессе ВКЗ были выбраны серийно выпускаемые установки типа ДК (ВД-306ДК, ВД-506ДК) с комбинированной внешней вольтамперной характеристикой для механизированной сварки. В зависимости от размеров капли электродного металла и фазы перехода капли в сварочную ванну вольтамперная характеристика может быть жесткой или падающей. Управление процессом переноса капель производится не по величине тока, а по напряжению на дуге.

Во всех процессах в качестве защитного газа используется углекислый газ, который подавляет горение, поэтому этот газ можно использовать для тушения возможного загорания при случайной разгерметизации трубопровода и выхода перекачиваемого продукта.

Для снятия остаточных напряжений в сварных швах, выполненных на трубопроводах, находящихся под давлением перекачиваемого продукта, наиболее эффективным является применение вибрационной обработки [4–6], так как термическая обработка сварных швов неэффективна из-за теплоотвода в перекачиваемый продукт.

Выводы

1. Применение сварочных технологий механизированной сварки при сварочных работах на трубопроводах, находящихся под давлением перекачиваемых сред, позволит значительно повысить безопасность производства работ. Данные способы сварки делают возможным плавное и точное контролирование глубины проплавления стенки трубопровода в процессе сварки за счет изменения параметров режимов сварки, то есть контролировать параметр, определяющий безопасность проведения сварочных работ.

2. Дополнительным фактором, увеличивающим безопасность работ, является использование углекислого газа для защиты сварочной дуги, что позволяет локализовать и подавить возможное загорание выходящего пожароопасного перекачиваемого продукта.

Список литературы

1. *Собачкин А.С.* Проблемы безопасности сварочных работ на трубопроводах, находящихся под давлением перекачиваемых сред. Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. 2018;(3):135–140. https://doi.org/10.17122/ntj-oil-2018-3-135-142

2. РД 25.160.00-КТН-037-14. с изм. Сварка при строительстве и ремонте магистральных нефтепроводов. Москва: ОАО «АК "Транснефть"»; 2014.

3. *Мустафин Ф.М., Блехерова Н.Г., Быков Л.И.* Современные технологии сварки трубопроводов. 2-е изд., перераб. и доп. СПб.: Недра; 2010.

4. *Ризванов Р.Г., Файрушин А.М., Зарипов М.З., Карпов А.Л.* Повышение качества изготовления нефтехимических аппаратов применением вибрационной обработки в процессе сварки. Башкирский химический журнал. 2005;12(1):27–29.

5. *Gusev E.V., Mukhametzyanov Z.R., Razyapov R.V.* Technique for Determination of Rational Boundaries in Combining Construction and Installation Processes Based on Quantitative Estimation of Technological Connections. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (MSE). 2017;262:012140. https://doi.org/10.1088/1757-899X/262/1/012140

6. *Файрушин А.М., Каретников Д.В., Зарипов М.З., Абдуллин Т.З., Ахтямов Р.М., Фазылов М.Р.* Способ снижения остаточных сварочных напряжений в сварных соединениях металлов. Патент № RU 2424885 C1. Опубл. 27.07.2011.

7. *Tronskar J.P., Guan O.H., Tomqvist R.*, *Bruce W.A.* «Live» repair of gas pipeline with deep girth weld crack. In: ASME 2015 Pressure Vessel & Piping Conference, July 19-23, 2015, Boston, Massachusetts, USA. Vol. 6B: Materials and Fabrication. https://doi.org/10.1115/pvp2015-46005

8. *Bruce W.F., Etheridge B.C.* Further Development of Heat-Affected Zone Hardness Limits for In-Service Welding. In: Proceedings of IPC 2012, 9th International Pipeline Conference September 24–28, 2012, Calgary, Alberta, Canada, Vol. 3: Materials and Joining. https://doi.org/10.1115/ipc2012-90095

9. *Raschke A.* Technical safety and welding simulation of welding work on high-pressure gas pipelines in operation. In: 14th Pipeline Technology Conference, 18-21 March 2019, Berlin, Germany.

10. ГОСТ 8050-85. Двуокись углерода газообразная и жидкая. Технические условия. Москва: Издательство стандартов; 1985.

11. *Гареева О.А., Ямилев М.З., Лягов А.В., Климов П.В.* Повышение безопасности эксплуатации трубопроводов, подверженных коррозионному растрескиванию. Нефтегазовое дело. 2011;9(2):58–61.

12. *Насибуллина О.А., Гареев А.Г.* Разработка метода оценки остаточного ресурса магистральных газопроводов, имеющих дефекты коррозионного происхождения. Нефтегазовое дело. 2016;14(2):174–178.

13. *Nasibullina O.A., Gareev A.G.* Destruction patterns of ×70 steel sample, possessing cracks of corrosion-mechanical origin, under cyclic loading. Materials Science Forum. 2019;946:20–24. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.946.20

14. *Насибуллина О.А.* Введение в основы коррозии. Уфа: Нефтегазовое дело; 2019.

References

1. *Sobachkin A.S.* Safety of welding works on pipelines under transporting medium pressure. Problemy sbora, podgotovki i transporta nefti i nefteproduktov = Problems of Gathering, Treatment and Transportation of Oil and Oil Products. 2018;(3):135–140. (In Russian).
2. RD 25.160.00-KTN-037-14. Welding during the construction and repair of oil trunk pipelines. Moscow: Transneft; 2014. (In Russian).
3. *Mustafin F.M., Blekherova N.G., Bykov L.I.* Modern pipeline welding technologies. 2 ed. Saint Petersburg: Nedra Publ.; 2010. (In Russian).
4. *Rizvanov R.G., Fairushin A.M., Zaripov M.* Z., *Karpov A.L.* Improving the manufacturing quality of petrochemical devices by using vibration treatment in the welding process. Bashkirskii khimicheskii zhurnal = Bashkir chemistry journal. 2005;12(1):27–29. (In Russian).
5. *Gusev E.V., Mukhametzyanov Z.R., Razyapov R.V.* Technique for Determination of Rational Boundaries in Combining Construction and Installation Processes Based on Quantitative Estimation of Technological Connections. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (MSE). 2017;262:012140. https://doi.org/10.1088/1757-899X/262/1/012140
6. *Fairushin A.M., Karetnikov D.V., Zaripov M.Z., Abdullin T.Z., Akhtyamov R.M., Fazylov M.R.* Method of decreasing residual strain in welded metal joints. Patent No. RU 2424885 C1. Data publ 27 July 2011. (In Russian).
7. *Tronskar J.P., Guan O.H., Tomqvist R.*, *Bruce W.A.* "Live" repair of gas pipeline with deep girth weld crack. In: ASME 2015 Pressure Vessel & Piping Conference, July 19-23, 2015, Boston, Massachusetts, USA. Vol. 6B: Materials and Fabrication. https://doi.org/10.1115/pvp2015-46005
8. *Bruce W.F., Etheridge B.C.* Further Development of Heat-Affected Zone Hardness Limits for In-Service Welding. In: Proceedings of IPC 2012, 9th International Pipeline Conference September 24–28, 2012, Calgary, Alberta, Canada, Vol. 3: Materials and Joining. https://doi.org/10.1115/ipc2012-90095
9. *Raschke A.* Technical safety and welding simulation of welding work on high-pressure gas pipelines in operation. In: 14th Pipeline Technology Conference, 18-21 March 2019, Berlin, Germany.
10. State Standard 8050-85. Gaseous and liquid carbon dioxide. Specifications. Moscow: Standards Publishing House; 1985. (In Russian).
11. *Gareeva O.A., Yamilev M.Z., Lyagov A.B., Klimov P.V.* Improving the safety of operation of pipelines subject to corrosion cracking. Neftegazovoe delo = Petroleum Engineering. 2011;9(2):58–61. (In Russian).
12. *Nasibullina O.A., Gareev A.G.* Development of a method for estimating the residual life of main gas pipelines with defects of corrosive origin. Neftegazovoe delo = Petroleum Engineering 2016;14(2):174–178. (In Russian).
13. *Nasibullina O.A., Gareev A.G.* Destruction patterns of ×70 steel sample, possessing cracks of corrosion-mechanical origin, under cyclic loading. Materials Science Forum. 2019;946:20–24. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.946.20
14. *Nasibullina O.A.* Introduction to the basics of corrosion. Ufa: Neftegazovoe delo Publ.; 2019. (In Russian).

Информация об авторах / Information about the authors

Марс Зульфатович Зарипов, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Оборудование и технологии сварки и контроля» ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет», Уфа
e-mail: mzzaripov@mail.ru
Mars Z. Zaripov, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Equipment and Technologies of Welding and Control, Ufa State Petroleum Technical University, Ufa
e-mail: mzzaripov@mail.ru

Зинур Ришатович Мухаметзянов✉**,** д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры «Автомобильные дороги, мосты и транспортные сооружения» ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет», Уфа
e-mail: zinur-1966@mail.ru
тел.: +7 (917) 780-35-05

Zinur R. Mukhametzyanov✉**,** Dr. Sci. (Engineering), Associate Professor, Professor of the Department of Highways and Structural Engineering, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa
e-mail: zinur-1966@mail.ru
tel.: +7 (917) 780-35-05

Александр Николаевич Пудовкин, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Строительные конструкции» ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет», Уфа
e-mail: 11pk@rambler.ru
Alexander N. Pudovkin, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Building Constructions, Ufa State Petroleum Technical University, Ufa
e-mail: 11pk@rambler.ru

✉ Автор, ответственный за переписку / Corresponding author