

УДК: 539.3, 624.014
DOI: 10.48612/NewsKSUAE/73.22
EDN: UESDVU



Коррозия тонкостенного элемента конструкций в водной среде при вибрации

С.Н. Якупов¹, Илшат Т. Мирсаяпов²

¹Институт механики и машиностроения ФИЦ КазНЦ РАН,
Казань, Российская Федерация

²Казанский государственный архитектурно-строительный университет,
Казань, Российская Федерация

Аннотация. *Постановка задачи.* Конструкции, работая в различных средах, воспринимают вибрационные нагрузки. Практически не уделяется внимание исследованиям влияния вибрации на коррозию. *Цель работы* оценка влияния вибрации на коррозионный износ. *Задачи* – выполнить экспериментальные исследования по изучению явления коррозии при вибрационных нагрузках, выполнить обработку экспериментальных данных на базе экспериментально - теоретического метода и скорректировать модель изменения толщины пассивирующего слоя. *Результаты.* Приведена информация о кинетике процессов на поверхности металла и о модели влияния механических деформаций на изменения пассивирующего слоя. Представлены результаты исследований влияния вибрации на коррозию в водной среде. Предложена модель тонкостенного элемента конструкций, находящейся в водной среде при наличии вибрации, описывающая и учитывающая изменения толщины пассивирующего слоя. Установлено, что вибрационные нагрузки ускоряют коррозию. Поэтому необходимо учитывать результаты описанных исследований в процессе эксплуатации стальных конструкций.

Ключевые слова: тонкостенные стальные элементы конструкции, пассивация поверхности металла, коррозионный износ, водная среда, вибрация

Для цитирования: Якупов С.Н., Мирсаяпов Илшат Т. Коррозия тонкостенного элемента конструкций в водной среде при вибрации // Известия КГАСУ, 2025, № 3 (73), с. 270-278, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/73.22, EDN: UESDVU

Corrosion of a thin-walled structural element in an aquatic environment under vibration

S.N. Yakupov¹, Ilshat T. Mirsayapov²

¹Institute of Mechanics and Engineering, Federal Research Center KazSC RAS,
Kazan, Russian Federation

²Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

Abstract. *Problem statement.* Modern structures operating in various environments perceive vibration loads. Almost no attention is paid to studies of the effect of vibration on corrosion. *The purpose of the work* is to assess the influence of vibration on corrosive wear. *The objectives of the study* are to carry out experimental studies on the phenomenon of corrosion under vibration loads, to process experimental data based on the experimental-and-theoretical method and to adjust the model of changing the thickness of the passivation layer. *Results.* The study provides information on the kinetics of processes occurring on the metal surface and on the model of change in the passivation layer depending on mechanical deformations. The results of studies of vibration influence on corrosion in an aquatic environment are presented. A model is proposed for changing the thickness of the passivation layer of a thin-walled structural element located in an aquatic environment in the presence of vibration. It is established that the presence of vibration loads

increases corrosion wear. The need to take into account the obtained data when designing and operating steel structures is noted.

Keywords: thin-walled steel structural elements, metal surface passivation, corrosive wear, aquatic environment, vibration

For citation: Yakupov S.N., Mirsayapov Ilshat T. Corrosion of a thin-walled structural element in an aquatic environment under vibration // News of KSUAE, 2025, № 3 (73), p. 270-278, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/73.22, EDN: UESDVU

1. Введение

Сталь – один из важных конструкционных материалов современных конструкций и сооружений. Металлические изделия были известны еще до нашей эры. Человечество постепенно осваивало различные металлы и технологии их обработки. История сохранила информацию о булате – уникальном сплаве железа, о литейной технологии в Волжской Болгарии; о первых чугунных мостах и железных дорогах в Европе [1]. Стальные конструкции, обладая уникальными свойствами, получили широкое распространение в XX веке как самостоятельно, так и в композиции с бетоном.

К современным стальным конструкциям и сооружениям, воспринимающим большие статические, вибрационные и динамические нагрузки, и работающим в различных средах, предъявляются высокие требования. Все их элементы должны удовлетворять функциональным назначениям и качественно отработать запланированный срок эксплуатации [2]. Однако наличие агрессивной среды и различных нагрузок приводит к существенному износу элементов конструкций.

Проблема защиты конструкций от коррозии и остается одной из актуальных проблем современности. Физико-химико-механическое взаимодействие металла с жидкой и воздушной средой приводит к его коррозии. В результате образуются химические соединения, называемые продуктами коррозии, происходит изменение геометрических параметров, а также снижение механических характеристик приповерхностных слоев элементов конструкций. В тонкостенных элементах характерно существенное снижение их несущей способности. Коррозионный износ элементов конструкций, являясь предвестником аварий и катастроф, наносит огромный экономический ущерб. В связи с этим возрастает необходимость изучения коррозии как явления с учетом влияния различных факторов.

Известна устойчивость к коррозии некоторых античных железных предметов. Очевидно, причиной этого факта является низкое содержание в этих предметах серы. Возможно, в те далекие годы при плавлении железа применяли древесный уголь, а не каменный уголь, содержащий серу. Другое объяснение этого факта – метеоритное происхождение железа.

Несмотря на большую работу, проводимую в области защиты металлов от коррозии, наблюдается рост числа техногенных аварий и экологических катастроф, вызванных коррозионными разрушениями металлоконструкций.

Коррозия и проблема защиты конструкций и оборудования является одним из актуальных проблем современности.

Различают различные виды коррозии.

Наиболее распространены точечная, щелевая, межкристаллитная, ножевая, эрозионная и подземная коррозия металла. Динамические нагрузки то же могут породить коррозионное разрушение.

В простейших моделях коррозионного износа предполагается, что скорость коррозии не меняется по времени.

В [2] отмечается классификация исследований по двум направлениям: многофакторные модели, учитывающие метеорологические параметры атмосферы; модели, описывающие коррозию как функцию по времени с подбором параметров.

Известны исследования по изучению влияния магнитного поля на коррозионный износ. Некоторые вопросы влияния магнитного поля на разрушение защитного слоя рассмотрены, например, в [3]. Установлено, в частности, что магнитные поля могут

оказывать различное влияние на процесс коррозии, изменяя поведение электрохимических процессов и механизмы разрушения материала [4-6]. В [7-9] исследовано влияние магнитного поля на коррозию сплавов.

Влияние магнитного поля на коррозию углеродистой стали API 5L X65 исследовано в [10]; на коррозионное поведение трубопроводной стали X70 с V-образными дефектами в [11]. Влияние зеленого ингибитора на коррозию трубопровода API X70 в синтетической промышленной воде рассмотрено в [12]. Вопросы мониторинга коррозии арматуры с использованием магнитного градиента рассмотрены в [13]. Влияние магнитного поля на коррозионное поведение индийской ферритно-мартенситной стали с пониженной активацией в жидком Pb–Li рассмотрено в [14]. Численное моделирование магнитного детектора коррозии для обнаружения коррозии стальной арматуры в бетоне приведено в [15]. Исследования по методу пространственной локализации коррозионных дефектов в мостовом тросе с учетом эффекта рассеяния собственного магнитного потока рассмотрено в [16]. Влияние магнитного поля на коррозию и электрохимическую коррозию сплава Fe83Ga17 рассмотрено в [17].

Морфология поверхности корродированных образцов была изучена современным электронным микроскопом. На коррозионный износ влияют также деформации элементов конструкций и ультрафиолетовое излучение [2].

Нормальная эксплуатация конструкции возможна лишь при достаточном замедлении коррозии металлов, достигаемом при помощи многообразных способов и средств защиты от коррозии.

Вибрации возникают в различных промышленных агрегатах, колоннах, трубопроводах, в емкостях для хранения сжиженных газов и нефтепродуктов и т.д. Источником вибрации могут быть также колебания потоков жидкости и упругость конструкций, которая обтекается жидкой и газообразной средой. Проблемы, возникающие от совместного воздействия вибрационных нагрузок и среды, мало изучены [18].

Известно, что на поверхности стальных элементов конструкций, находящихся в агрессивной среде, включая водную среду, образуется защитный пассивирующий слой, при разрушении которого начинается коррозионный износ [2]. В результате которого изменяются свойства материала и происходит ухудшение функциональных свойств металла – происходит поверхностный износ, а также появляются локальные углубления, имеющие сложную геометрию. В элементах конструкций возникают области с неоднородностью механических свойств. При этом наряду с изменением геометрических параметров, в тонкостенных элементах конструкций происходит изменение жесткостных характеристик.

В начальный момент взаимодействия стальных элементов конструкций со средой на его поверхности образуется пассивирующий слой из оксидов железа, которая препятствует кислороду, содержащийся в воздухе и в воде, проникать во внутрь элемента, предохраняя тем самым металл от окисления. Защитный пассивирующий слой замедляет электрохимические реакции и тем самым защищает элемент конструкций от коррозионного износа. Однако с разрушением пассивирующего слоя начинается коррозия [2]. Явление пассивации исследовано М. Фарадеем [2] – он пришел к выводу об образовании на границе «металл - кислота» защитного слоя.

Условно, при взаимодействии поверхности элемента конструкций со средой, можно разделить на три характерных этапа: чистая металлическая поверхность, образование на поверхности защитного слоя и её разрушение (рис. 1).

В [19] предложена модель изменения защитного пассивирующего слоя в зависимости от характера деформаций – толщина пассивирующего слоя на поверхности металла определяется по формуле:

$$\delta_{\varepsilon}(\varphi) = \delta(\varphi) (1 \pm \nu \varepsilon_i \pm k_{\varepsilon} \varepsilon^2) (1 - k_y), \quad (1)$$

где $\delta(\varphi)$, мкм – толщина исходного образовавшегося пассивирующего слоя на недеформированной поверхности, ε_i – интенсивность деформации поверхности, ν – коэффициент Пуассона, k_{ε} , k_y – коэффициенты динамичности и упругости защитного слоя: при растягивающих усилиях толщина пассивирующего слоя уменьшается (знак « - »), а при сжимающих возрастает (знак « + »).



Рис. 1. Характерные этапы поверхности металлических элементов: *a* – исходная чистая поверхность; *b* – образование пассивирующего слоя; *c* – разрушение пассивирующего слоя (иллюстрация авторов)

Fig. 1. Characteristic stages of the surface of metal elements: *a* – initial clean surface; *b* – formation of a passivation layer; *c* – destruction of the passivation layer (illustration by the authors)

Цель данного исследования заключается в оценке влияния коррозии тонкостенных конструкций при воздействии вибрации. Для достижения поставленной цели решить следующие задачи: провести экспериментальные исследования по изучению явления коррозии тонкостенных стальных элементов конструкций в водной среде при вибрационных нагрузках, выполнить обработку экспериментальных данных на базе экспериментально - теоретического метода и скорректировать модель изменения толщины пассивирующего слоя.

2. Материалы и методы

Круглые тонкостенные металлические образцы размещаются в емкости с исследуемой средой (рис. 2). Одну емкость с образцами размещается на вибрирующей площадке, прикрепленной к компрессору, другая емкость с контрольной группой образцов находится в исследуемой среде и не подвергается вибрационной нагрузке.

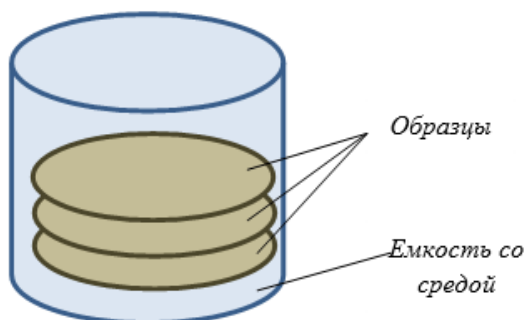


Рис. 2. Схема размещения образцов в емкости со средой – длительность эксперимента два месяца: образцы, подверженные вибрации, испытывались в режиме: 20 сек. под вибрацией и 3 мин. 40 сек. без вибрации (иллюстрация авторов)

Fig. 2. Scheme of sample placement in a container with a medium – duration of the experiment is two months: samples subjected to vibration were tested in the following mode: 20 sec. under vibration and 3 min. 40 sec. without vibration (illustration by the authors)

Для исследования жесткостных свойств исследуемых образцов после экспериментальных исследований использовался метод, основанный на синтезе экспериментальных данных и теоретических соотношений, полученных из нелинейной теории тонких оболочек.

Вначале определяется экспериментальная кривая «давление p - прогиб H ». Зная прогиб H при давлении p и соотношения теории оболочек, можно построить кривые деформирования, определить модуль упругости и составить заключение о свойствах вновь создаваемых тонкостенных и тонкослойных элементов конструкций сложной структуры, а также о степени износа исследуемых образцов с различными дефектами, возникающих в процессе производства, транспортировки, монтажа и эксплуатации.

Соотношения для тонких образцов, гибких упругих мембран приведены в частности в [20]. При упругой деформации для определения тангенциальной жесткости B и модуля упругости E можно использовать, например формулу [21]. Способы испытаний и устройства, используемые в экспериментально-теоретическом методе, запатентованы (изобретения РФ: №№ 2184361, 2296976, 2310184, 2387973, 2403556).

3. Результаты и обсуждение

Несмотря на то, что современные конструкции эксплуатируются, как правило, в различных средах и подвержены воздействию вибрационных нагрузок, практически трудно найти научные исследования, в которых рассматриваются эти вопросы.

Были выполнены серии экспериментально – теоретических исследований, посвященных изучению влияния вибрационных нагрузок на коррозионный износ стальных образцов, с толщиной $h = 0,6$ мм в водной среде.

Круглые образцы размещались в емкости с водой (рис. 2). Одна емкость с образцами размещалась на вибрирующей площадке, другая емкость с контрольной группой образцов находилась в водной среде и не подвергалась вибрационной нагрузке.

Длительность эксперимента два месяца; компрессор работал по 20 сек., с остановкой 3 мин. 40 сек.

На рис. 3 приведены фотоизображения корродированных образцов в водной среде: на рис. 3а- образцы, подверженные воздействию вибрации; на рис. 3б - образцы, не подверженные вибрации. Как видно из рис. 3 образцы, подверженные воздействию вибрации имеют больше коррозионных углублений, чем образцы, не подверженные вибрации.

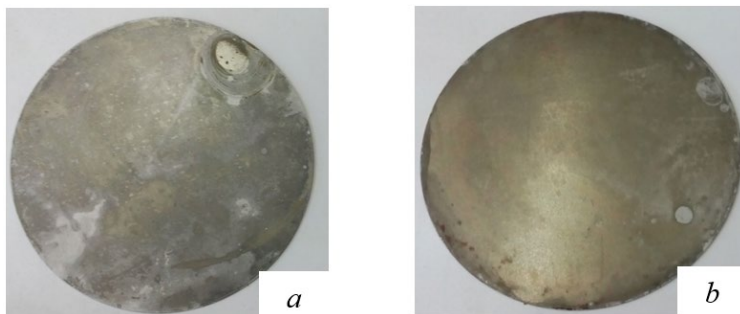


Рис. 3. Фотоизображение образцов, подверженных коррозии:
а–под вибрацией; б– без вибрации (фото авторов)

Fig. 3. Photographic images of samples subjected to corrosion:
а– under vibration; б– without vibration (photo by the authors)

Об этом же говорят замеры геометрических параметров: среднее значение толщины образцов, подверженных воздействию вибрации, составило 0.588 мм, в то время как для контрольной группы – 0.593 мм. То есть вибрация приводит к увеличению коррозионного износа тонкостенных стальных образцов.

Степень коррозии образцов определялся также экспериментально-теоретическим методом: для каждого исследованного образца была получена зависимость максимального прогиба H от давления p . Результаты приведены в таблице 1.

Таблица 1

Прогибы образцов, находившихся в воде (мм)

p , МПа	Без вибрации / С вибрацией			
	1	2	3	$H_{ср., мм} (безвибр.) / H_{ср., мм} (с вибр.)$
0.025	0.37 / 0.41	0.34 / 0.42	0.43 / 0.51	0.380 / 0.447
0.030	0.42 / 0.46	0.39 / 0.47	0.47 / 0.55	0.427 / 0.493
0.035	0.45 / 0.50	0.42 / 0.51	0.53 / 0.61	0,467 / 0.540
0.040	0.49 / 0.56	0.46 / 0.55	0.58 / 0.66	0,510 / 0.590
0.045	0.54 / 0.59	0.49 / 0.61	0.61 / 0.69	0,547 / 0.630

Из таблицы 1 видно, что прогибы образцов после вибрации больше, чем у образцов из контрольной группы при одном и том же давлении. То есть образцы, подверженные вибрации корродируют больше, чем образцы, не подверженные вибрации.

Используя экспериментальную зависимость «прогиб H - давление p » для стальных образцов, вычисляются приведенная тангенциальная жесткость на растяжение - сжатие B и приведенная жесткость на изгиб D :

$$B = 0.304F, \quad D = 0.025Fh^2, \quad F = \frac{pa^4}{H^3}, \quad (2)$$

где p (МПа) – поверхностное давление; a (см) – радиус рабочей части образца; h (см) и H (см) – толщина образца и ее прогиб (высота подъема купола).

По формулам (2) вычислены зависимости «жесткость B - давление p » (рис.4) и «жесткость D - давление p » (рис.5).

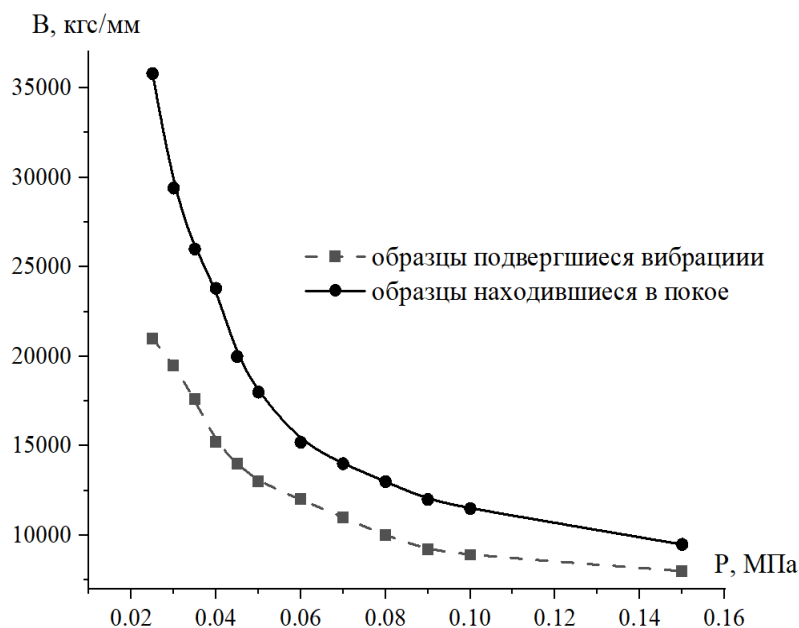


Рис. 4. Зависимость « $B-p$ » для образцов (иллюстрация авторов)

Fig. 4. « $B-p$ » dependence for samples (illustration by the authors)

Из рис. 4 и рис. 5 видно, что жесткости образцов, подверженных вибрации, на растяжение B и на изгиб D , существенно падают.

Таким образом, установлено, что вибрация способствует более быстрому разрушению защитного пассивирующего слоя и тем самым способствует ускоренной коррозии. Эффект имеет большое практическое значение.

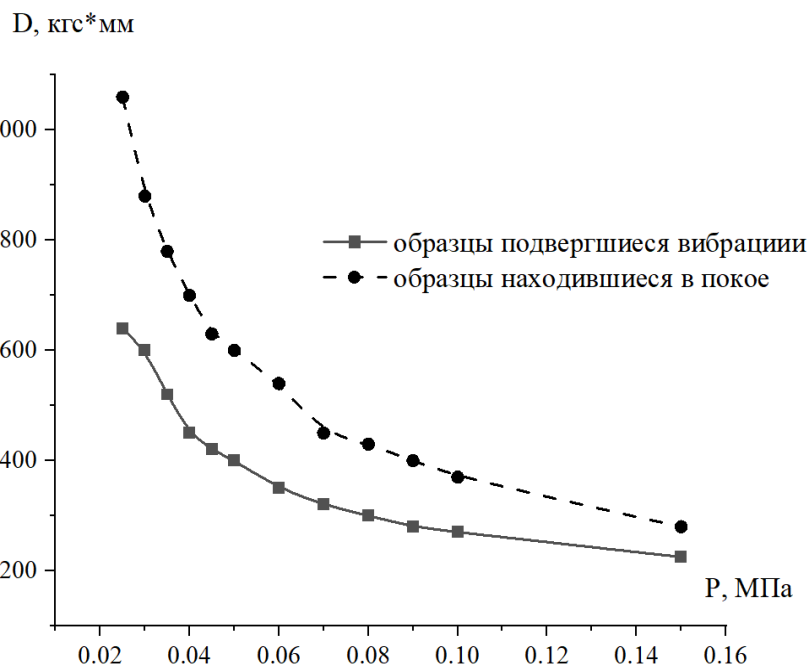


Рис. 5. Зависимость « $D-p$ » для образцов (иллюстрация авторов)

Fig. 5. « $D-p$ » dependence for samples (illustration by the authors)

Выполненные исследования позволяют скорректировать модель изменения толщины пассивирующего слоя $\delta_{\text{ew}}(\varphi)$ в зависимости от механических деформаций с учетом влияния вибрации:

$$\delta_{\text{ew}}(\varphi) = \delta_{\text{e}}(\varphi)[1 - k_w(n)], \quad (3)$$

где $\delta_{\text{e}}(\varphi)$ – толщины (мм) пассивирующего слоя с учетом механических деформаций, определяемый по формуле (1); $k_w(n)$ – коэффициент влияния вибрации.

Коэффициент влияния вибрации $k_w(n)$, зависит от вибрационных характеристик, в частности от частоты вращения компрессора, от среды, от исходных геометрических параметров; в первом приближении $k_w(n)$ можно оценить по формуле:

$$k_w(n) = H_{\text{ср}}(\text{без вибраций}) / H_{\text{ср}}(\text{с вибрацией}). \quad (4)$$

Для рассмотренного случая $k_w(n) = 0,86$.

Очевидно, при вибрации тонкостенные элементы конструкций испытывают знакопеременные нагрузки.

Как показывает сопоставление изложенных результатов с результатами исследований [22], прогибы образцов, которые испытывали коррозию на растянутых поверхностях, больше, чем прогибы образцов, которые испытывали коррозию на сжатых поверхностях. При этом коэффициент влияния деформации k_d , вычисляемой по формуле:

$$k_d = H(\text{без деформаций}) / H(\text{с деформацией}), \quad (5)$$

для рассмотренных случаев составил: на растянутых поверхностях $k_d \approx 0,79$, на сжатых поверхностях $k_d \approx 1,42$. То есть, благодаря наличию сжатия при вибрационной нагрузке, коэффициент влияния вибрации $k_w(0,86)$ несколько выше коэффициента влияния деформации $k_d(0,79)$.

Полученный эффект необходимо учитывать при проектировании конструкций.

4. Заключение

Выполнены экспериментальные исследования по изучению коррозионного износа тонкостенных стальных элементов конструкций в водной среде при вибрационных нагрузках.

Определены тангенциальные и изгибные жесткости исследованных образцов; так тангенциальная и изгибная жесткости для рассмотренного примера при давлении 0.04 МПа для образцов, подверженных вибрации, в ~1,5 раза меньше соответствующих жесткостей образцов без вибраций.

Уточнена математическая модель изменения толщины пассивирующего слоя в зависимости от механических деформаций с учетом влияния вибрации.

Установлено, что вибрация ускоряет коррозионный износ тонкостенных стальных элементов конструкций в водной среде – для рассмотренного примера почти в 1,5 раза.

Полученный эффект необходимо учитывать как при проектировании, так и при эксплуатации металлических конструкций.

Благодарности

Якупов Самат Нухович выполнил работу за счет гранта Академии наук Республики Татарстан, предоставленного молодым кандидатам наук (пост докторантам) с целью защиты докторской диссертации.

Список литературы / References

1. Семькин Ю.А. Черная металлургия и кузнечное производство Волжской Булгарии в VIII – начале XIII вв. Вып.21 / Ф.Ш. Хузин, А.Г. Ситдигов. Казань: Отечество, 2015; Институт археологии им. А.Х. Халикова АН РТ, 2015. 168 с.
Semikin Yu.A. Ferrous metallurgy and forging production of Volga Bulgaria in the 8th – early 13th centuries. Issue 21 / F.Sh. Khuzin, A.G. Sitdikov Kazan: "Motherland"

- publishing house, 2015; Institute of Archaeology named after Khalikov A.H., Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan, 2015. 168 p.
2. Якупов С.Н., Тамеев И.М., Якупов Н.М. Диагностика и лечение трубопроводов, Казань, Изд-во АО «ИД «Казанская недвижимость», 2018. 180 с.
Yakupov S.N., Tameev I.M., Yakupov N.M. Diagnostics and treatment of pipelines, Kazan, JSC “Kazan real estate” Publishing house, 2018. 180 p.
 3. Yee Chin Tang, Davenport A.J. Surface properties and electrochemistry of highly oriented pyrolytic graphite electrodes modified with iron-based catalysts for oxygen reduction // J. Electrochem. Soc. 2007. V.154. No 7. P.362-370.
 4. Shuanzhu Zhao, Yaxin Wang, Yunxiu Zhao, Xiaotong Sun, Huijuan Zhang, Hong-Guang Piao, Yujiao Zhang and Yanliang Huang. The effect of magnetic field pretreatment on the corrosion behavior of carbon steel in static seawater // RSC Advances, 2020, 10, 2060-2066, <https://doi.org/10.1039/C9RA09079G>
 5. Shahid Parapurath, Arjun Ravikumar, Nader Vahdati, Oleg Shiryayev. Effect of Magnetic Field on the Corrosion of API-5L-X65 Steel Using Electrochemical Methods in a Flow Loop // Appl. Sci. 2021, 11(19), 9329; <https://doi.org/10.3390/app11199329>
 6. Caiyu Zhu, Liya Miao, Jiahao Xie, Huiwei Xu, Yulong Han, Jian Liu, Mary P. Ryan, Liya Guo. Magnetic field effects on the corrosion behavior of magnetocaloric alloys LaFe_{13.9}Si_{1.4}Hy under paramagnetic states // ELSEVIER. Journal of Alloys and Compounds, V.968, 25, 2023, 179001 <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2023.171901>
 7. Liya Guo, Caiyu Zhu, Haiyang Wang, Liya Miao, Jian Liu, Junwan Li, Siyang Wang, Edmund Lovell, Neil Wilson, Lesley F. Cohen, Mary P. Ryan. Magnetic field effects on the corrosion behavior of magnetocaloric alloys LaFe_{13.9}Si_{1.4}Hy under ferromagnetic states // ELSEVIER. Journal of Alloys and Compounds Volume 1017, 25 February 2025, 179002 <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2025.179002>
 8. Ильясова А.И. Анализ влияния магнитного поля на свойства стали линейной части магистральных трубопроводов // Нефтегазовое дело. №2, 2019. С. 156-168.
Ilyasova A.I. Analysis of the influence of magnetic field on the properties of steel of the linear part of main pipelines // Oil and Gas Business. No. 2, 2019. P. 156-168.
 9. Якупов С.Н., Кантюков Р.Р., Гумаров Г.Г., Якупов Н.М. Влияние остаточной намагниченности на коррозию стальных образцов // Доклады Академии наук // Доклады Российской академии наук. Физика, технические науки, 2024. Т. 514. С.46 - 49. <https://doi.org/10.31857/S2686740024010078>.
Yakupov S.N., Kanyukov R.R., Gumarov G.G., Yakupov N.M. Influence of residual magnetization on the corrosion of steel samples // Reports of the Academy of Sciences // Reports of the Russian Academy of Sciences. Physics, technical sciences, 2024. Vol. 514. P. 46-49.
 10. Shahid Parapurath, Arjun Ravikumar, Nader Vahdati, Oleg Shiryayev. Effect of Magnetic Field on the Corrosion of API-5L-X65 Steel Using Electrochemical Methods in a Flow Loop // Appl. Sci. 2021, 11(19), 9329; <https://doi.org/10.3390/app11199329>.
 11. Haoli Cheng, Yanchao Liang, Haiyan Yang, Dan Wang. Effect of magnetic field on corrosion behavior of X70 pipeline steel with V-Shaped Defects // International Journal of Electrochemical Science. Volume. 20, Issue 11, 2025, 101203 <https://doi.org/10.1016/j.ijoes.2025.101203>
 12. T.S. Ajmal, Shashi Bhushan Arya, L.R. Thippeswamy, M.A. Quraishi, Jiyaul Haque Influence of green inhibitor on flow-accelerated corrosion of API X70 line pipe steel in synthetic oilfield water // Corros. Eng. Sci. Technol., 55 (2020), P. 487-496, 10.1080/1478422x.2020.1745355.
 13. Shenghua Jiang, Hao Wang, Aozhou Liu. Rebar corrosion monitoring using magnetic gradient and partial modulus // Measurement, 164 (2020), 10.1016/j.measurement.2020.107994.
 14. P. Chakraborty, V. Singh, P. Trivedi, S. Malhotra, K. Singh, P. Mukherjee, V. Kain, R. Tewari Effect of magnetic field on corrosion behavior of Indian reduced activation ferritic/martensitic steel in liquid Pb–Li // Nucl. Fusion, 59 (2019), 10.1088/1741-4326/ab388c.

15. Inhong Lei, Xianyu Jin, Ye Tian, Xingmin Lin, Nanguo Jin, Dongming Yan, Zongjin Li, Wenbin Zheng, Xingliang Sun, Hao Lin, Yongmao Yan, Zhen Xu. Numerical simulation of a magnetic corrosion detector for corrosion detection of steel rebar in concrete // J. Civ. Struct. Health Monit., 12 (2022), P. 1-14, 10.1007/s13349-021-00521-9.
16. Runchuan Xia, Hong Zhang, Jianting Zhou, Leng Liao, Haibo Di, Zeyu Zhang. Studies on the spatial location method of corrosion defect in bridge cable considering Self-Magnetic flux leakage effect // J. Test. Eval., 49 (2021), P. 4526-4539, 10.1520/jte20200367.
17. Suli Zhao, Zifeng You, Xuewei Zhang, Jinxi Li. Magnetic field effects on the corrosion and electrochemical corrosion of Fe83Ga17 alloy // Mater. Charact., 174 (2021), 10.1016/j.matchar.2021.110994.
18. Yakupov N.M. and Yakupov S.N. Corrosion Wear under Vibrations // Doklady Physics, 2018, Vol.63, No.4, P.147-149.
19. Сидоренко С.Н., Якупов Н.М. Коррозия – союзник аварий и катастроф. М.: Изд-во РУДН, 2002. 93с.
Sidorenko S.N., Yakupov N.M. Corrosion is an ally of accidents and disasters. M.: Publishing house. RUDN, 2002. 93 p.
20. Yakupov N.M., Galimov N.K., Yakupov S.N. Methodology of studying non-planar films and membranes of complex structure. Industrial laboratory. Diagnostics of materials. 2019; 85 No.2. P.55-59. <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2019-85-2-55-59>.
21. Yakupov S.N. Influence of scratches on the stiffness properties of thin-walled elements // Lobachevskii Journal of Mathematics, 2019. V. 40. No. 6. P. 834-839. <https://doi.org/10.1134/S1995080219060258>.
22. Yakupov N.M., Giniyatullin R.R. and Yakupov S.N. The Influence the Character of Deformation Structural Element Surfaces on the Corrosive Wear // Strength of Materials, Vol. 44, No. 2, March, 2012, P.170-176.

Информация об авторах

Самат Нухович Якупов, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт механики и машиностроения ФИЦ КазНЦ РАН, г. Казань, Российская Федерация

E-mail: tamas_86@mail.ru, ORCID: 0000-0003-0047-3679

Илшат Талгатович Мирсаяпов, доктор технических наук, профессор, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация

E-mail: mirsayapovit@mail.ru, ORCID: 0000-0003-4902-6167

Information about the authors

Samat N. Yakupov, Candidate of technical sciences, Senior Researcher, Institute of Mechanics and Mechanical Engineering, FRC KazSC RAS, Kazan, Russian Federation

E-mail: tamas_86@mail.ru, ORCID: 0000-0003-0047-3679

Ilshat T. Mirsayapov, Doctor of technical sciences, Professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

E-mail: mirsayapovit@mail.ru, ORCID: 0000-0003-4902-6167

Дата поступления: 01.07.2025

Дата принятия: 31.10.2025