



DOI: 10.22363/2312-8143-2026-27-1-109-121

EDN: HYVDAO

Научная статья / Research article

Коррозионный износ тонкостенных элементов конструкций под воздействием магнитного поля

Р.Р. Гиниятуллин¹, С.Н. Якупов¹, Н.М. Якупов¹, Г.Х. Низамова²

¹ Институт механики и машиностроения ФИЦ Казанский научный центр РАН, Казань, Российская Федерация

² Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва, Российская Федерация

✉ yzsr@mail.ru

История статьи

Поступила в редакцию: 30 марта 2025 г.

Доработана: 20 июля 2025 г.

Принята к публикации: 27 сентября 2025 г.

Заявление о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Аннотация. Металлические элементы конструкций продолжают оставаться основным конструкционным материалом многих современных конструкций, к которым предъявляются высокие требования по обеспечению безаварийной и безотказной работы. В процессе эксплуатации элементы конструкций деформируются и находятся под воздействием физических полей и сред. Особую опасность представляют случаи, когда имеют место два и более источника разрушения. В работе приведены некоторые результаты экспериментально-теоретических исследований влияния электромагнитного поля и направление его силовых линий на коррозионный износ стальных тонкостенных элементов, а также влияние магнитного поля на коррозию деформированных тонкостенных образцов. Эксперименты выполнялись в городских условиях и за пределами города. Образцы выдерживались в исследуемой среде в течение заданного времени. Деформации образцов создавались различными подходами. Для оценки степени коррозионного износа и определения механических свойств образцов используется экспериментально-теоретический подход. Для вычисления тангенциальных и изгибных жесткостей образцов используются соотношения для случая среднего изгиба. Установлено, что коррозионный износ образцов без воздействия магнитного поля выше, чем образцов, находившихся под воздействием магнитного поля. Больше коррозии подвержены образцы, поверхности которых параллельны силовым линиям магнитного поля Земли. Установлено также, что тангенциальная жесткость недеформированных образцов под воздействием магнитного поля несколько выше соответствующих жесткостей растянутых образцов, при этом изгибная жесткость растянутых образцов больше изгибных жесткостей недеформированных образцов. Обнаружены новые эффекты, имеющие важное теоретическое и практическое значение.

Ключевые слова: коррозия, деформированные образцы, силовые линии магнитного поля, остаточная намагниченность, деформация поверхности

Вклад авторов

Гиниятуллин Р.Р. — экспериментальные исследования, обработка и обсуждение результатов, выводы; Якупов С.Н. — экспериментальные исследования, обработка и обсуждение результатов, выводы, написание текста; Якупов Н.М. — постановка задачи, обзор, обработка и анализ результатов, выводы; Низамова Г.Х. — материалы для обзора, обсуждение результатов, подготовка статьи для публикации. Все авторы ознакомлены с окончательной версией статьи и одобрили ее.

© Гиниятуллин Р.Р., Якупов С.Н., Якупов Н.М., Низамова Г.Х., 2026








This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>

Для цитирования


Гиниятуллин Р.Р., Якупов С.Н., Якупов Н.М., Низамова Г.Х. Коррозионный износ тонкостенных элементов конструкций под воздействием магнитного поля // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2026. Т. 27. № 1. С. 109–121. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2026-27-1-109-121> EDN: HYVDAO

Corrosion Wear of Thin-Walled Structural Elements Under Magnetic Field Exposure

Rishat R. Giniyatullin¹, Samat N. Yakupov¹,
Nukh M. Yakupov¹, Guzial Kh. Nizamova²

¹ Federal Research Center “Kazan Scientific Center of Russian Academy of Sciences”, *Kazan, Russian Federation*

² Moscow State University of Civil Engineering, *Moscow, Russian Federation*

 yzsrr@mail.ru

Article history

Received: March 30, 2025

Revised: July 20, 2025

Accepted: September 27, 2025

Conflicts of interest

The author declares that there is no conflict of interest.

Abstract. Metal structural elements remain the primary construction material in many modern structures, which are subject to stringent requirements for safe and reliable operation. During service, structural elements undergo deformation and are exposed to various physical fields and environmental conditions. Situations involving two or more concurrent degradation factors pose particular risks. This study presents selected results of experimental and theoretical studies on the influence of an electromagnetic field and the orientation of its field lines on the corrosion wear of thin-walled steel elements. It also examines the effect of a magnetic field on the corrosion behavior of deformed thin-walled samples. The experiments were conducted in both urban and rural environments. The samples were exposed to the test environment for a specified period. Deformation was introduced using different methods. An experimental — theoretical approach was employed to evaluate the degree of corrosion wear and to determine the mechanical properties of the samples. Tangential and bending stiffness were calculated using relationships derived for the case of pure bending. The results indicate that corrosion wear is greater in samples not subjected to a magnetic field than in those exposed to magnetic field effects. Samples with surfaces oriented parallel to the Earth’s magnetic field lines exhibit more pronounced corrosion. It was also found that the tangential stiffness of undeformed samples under magnetic field exposure is slightly higher than that of tensile-deformed samples, whereas the bending samples of tensile-deformed samples exceeds that of undeformed ones. The study reveals new effects of both theoretical and practical significance.

Keywords: corrosion, deformed samples, magnetic field lines, residual magnetization, surface deformation

Authors’ contribution

Giniyatullin R.R. — experimental research, processing and discussion of results, conclusions; *Yakupov S.N.* — experimental research, processing and discussion of results, conclusions; *Yakupov N.M.* — statement of the problem, review, processing and analysis of results, conclusions; *Nizamova G.Kh.* — materials for the review, discussion of results, preparation of the article for publication. All authors read and approved the final version of the article.

For citation

Giniyatullin RR, Yakupov SN, Yakupov NM, Nizamova GK. Corrosion wear of thin-walled structural elements under magnetic field exposure. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2026;27(1):109–121. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2026-27-1-109-121> EDN: HYVDAO

Введение

Конструкции и сооружения предназначены для выполнения заданных функций. Если природные конструкции восхищают нас своим совершенством, то рукотворные конструкции далеки от совершенства. Методом проб и ошибок человек познавал тайны конструкций и материалов, оценивал их прочность и долговечность, устанавливал причины разрушения [1–4].

Несмотря на широкий ассортимент используемых материалов в настоящее время, железо и его сплавы продолжают оставаться основным конструкционным материалом многих современных конструкций и сооружений. Изделия из железа были известны уже в XIV в. до н.э. в государствах Малой Азии. Известна информация об удивительном сплаве «булате» на Востоке (V–VI вв.), о литейном производстве наших предков в Волжской Болгарии (X–XII вв.), о чугунных мостах и железных дорогах в Западной Европе (XVIII в.) и т.д. [5–7].

С появлением металлических изделий возникла и проблема коррозии. Коррозия конструкций и сооружений наносит большой вред: помимо загрязнения окружающей среды она приводит к существенному снижению их несущей способности. Происходит утонение и изменение механических свойств по толщине элементов конструкций, образованию на поверхности элементов конструкций локальных углублений, вызывающих концентрацию напряжений. Концентраторы напряжений в свою очередь могут ускорять износ конструкций [8–13]. Возрастает необходимость углубления знаний в изучении коррозии как явления, с учетом влияния различных факторов, а также изыскание новых и совершенствование известных способов защиты от коррозии.

Природа предусмотрела способ защиты поверхности металла от коррозии образованием тонкого защитного пассивирующего слоя, который не позволяет кислороду воздуха и воде проникнуть в более глубокие слои, предохраняя металл от окисления. Явление пассивации исследовано М. Фарадеем [14], сделавшим

заключение об образовании на границе «металл — кислота» защитного слоя. В дальнейшем явление пассивации оформилось в виде теории, согласно которой на поверхности металла образуется тонкая оксидная пленка. Некоторые модели коррозионного износа отмечены в [15–20].

Коррозионный износ металла на деформированных и недеформированных элементах конструкций характеризуется зависимостью скорости i его анодного растворения от величины анодного потенциала φ . Эта зависимость задаётся потенциалами пассивации φ_p , активации φ_a и перепассивации φ_{pp} (рис. 1).

Пассивирующий слой до некоторого потенциала φ_{pp} замедляет коррозию и тем самым защищает поверхность металла от износа. На сохранность защитного слоя влияют различные факторы. Для обеспечения необходимого качества конструкций на срок эксплуатации необходимо учитывать эти факторы.

Изучению влияния магнитного поля на коррозионный износ уделяется определенное внимание [21–38].

Исследования подтверждают, что магнитные поля могут оказывать различное влияние на процесс коррозии, изменяя поведение электрохимических процессов и механизмы разрушения материала.

Влияние магнитных полей на коррозионный износ тонкостенных конструкций имеет большое практическое значение. В частности, влияние приложенного магнитного поля на растворение и пассивацию железа в серной кислоте исследовано в [21], коррозионное поведение низкоуглеродистой стали в водопроводной воде, обработанной постоянным магнитным полем, рассмотрено в [22]. Некоторые аспекты влияния на разрушение защитного слоя магнитного поля рассмотрены в [23; 24; 28], а ультрафиолетового излучения в [29]. Реже встречаются работы по исследованию ориентации силовых линий магнитного поля относительно поверхности материала [31] и влияния остаточного магнитного поля на коррозию тонкостенных элементов конструкций [32; 36].

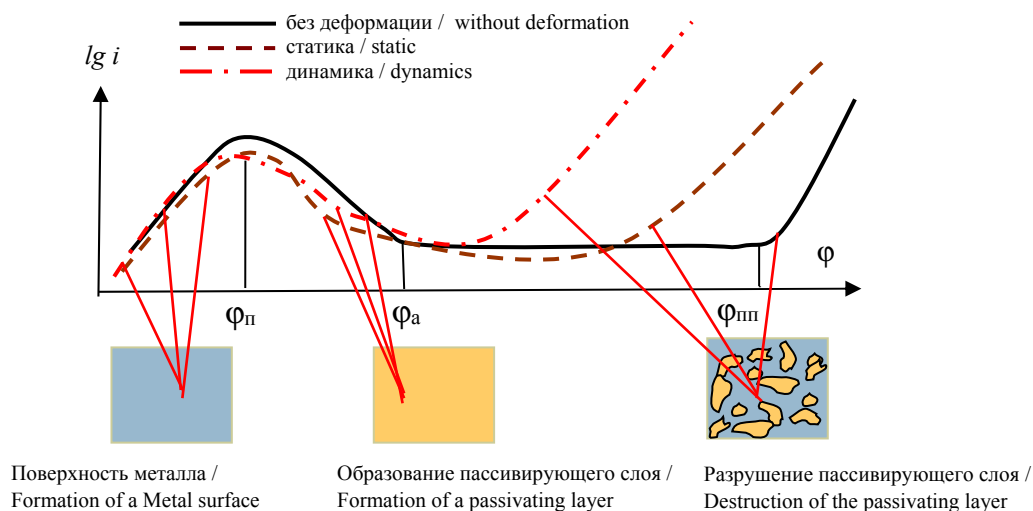


Рис. 1. Характерная зависимость скорости анодного растворения металла i от потенциала ϕ
Источники: выполнено С.Н. Якуповым.

Figure 1. Characteristic dependence of the rate of anodic dissolution of metal i on the potential ϕ
Source: by S.N. Yakupov.

Результаты исследований влияния магнитного поля на коррозию стали в растворе хлорида натрия (NaCl) и активного растворения приведены в [25–26]. Влияние магнитных полей на анодное поведение и локальную коррозию железа в растворах серной кислоты рассмотрено в [27]. Результаты исследования коррозионного воздействия потока Li-Pb на поверхность стали P91 в присутствии магнитного поля приведены в [29]. Отсутствуют работы по изучению влияния магнитного поля на деформированные тонкостенные элементы конструкции. Известны также патенты на изобретение, в частности № 2175737, посвященные рассматриваемой теме. Комбинированное влияние магнитного поля и потока на процесс коррозии углеродистой стали API 5L X65 исследовано в [34]. Морфология поверхности корродированных образцов была изучена с помощью сканирующего электронного микроскопа. Влияние магнитных полей на коррозию сплава LaFe13.9Si1.4 рассмотрено в [35]. Установлено, что присутствие магнитных полей оказывает значительное влияние на скорость коррозии: погружение в магнитные поля 1 Тл в течение

72 ч привело к значительному снижению скорости коррозии.

В [37] исследовано коррозионное поведение сплава La(Fe,Si) с помощью электрохимических измерений в условиях с нулевым, параллельным и перпендикулярным магнитными полями. Установлено, что как параллельные, так и перпендикулярные магнитные поля оказывают подавляющее воздействие на скорость коррозии из-за комбинированного влияния магнитогидродинамических сил и градиентных сил магнитного поля; при этом эффективность параллельного поля снижалась с увеличением периода воздействия, в то время как эффективность перпендикулярного поля продолжала увеличиваться с течением времени. Такой эффект для конструкционной стали установлен авторами статьи еще в 2015 г. [31].

Знание закономерностей коррозии при воздействии различных физических полей может быть использовано при создании новых конструкционных материалов, проектировании и эксплуатации конструкций и сооружений, а также при разработке эффективных способов защиты конструкций от износа.

Результаты и обсуждение

Влияние электромагнитного поля на коррозионный износ

Выполнены исследования по изучению влияния магнитного поля на коррозию стальных тонкостенных элементов толщиной 0,5 и 0,6 мм в воде и в кислой среде соответственно. Схема установки приведена на рис. 2. На обмотки катушки прикладывалось напряжение 50 В. Контрольные образцы размещались вне зоны действия электромагнита. В первом цикле исследования средняя толщина образцов, выдержанных в среде 79 сут, составила 0,475 мм, а во втором цикле — выдержанных в среде 72 сут — 0,590 мм; толщины контрольных образцов составили соответственно 0,452 и 0,577 мм.

Для определения жесткостных свойств образцов использовался экспериментально-теоретический подход [38–39], патент РФ № 2296976¹; для вычисления тангенциальных B и изгибных D жесткостей образцов использовались соотношения для случая сред-негоизгиба по классификации профессора Х.М. Муштари.

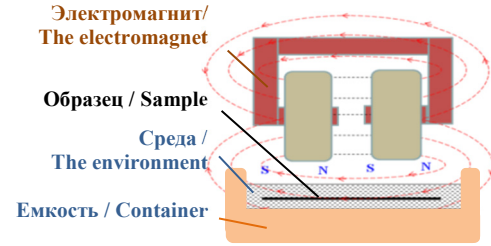


Рис. 2. Схема установки
Источник: выполнено С.Н. Якуповым.
Figure 2. Installation diagram
Source: by S.N. Yakupov.

На рис. 3 и 4 представлены изменения тангенциальных B и изгибных D жесткостей образцов от давления P для первого и второго циклов исследований соответственно.

Как видно из графиков на рис. 3 и 4, тангенциальные и изгибные жесткости контрольных образцов существенно ниже, чем тангенциальные жесткости образцов, находившихся в агрессивной среде под воздействием магнитного поля. Таким образом, коррозионный износ образцов в водной и кислой средах без воздействия магнитного поля выше, чем образцов, находившихся в агрессивной среде под воздействием магнитного поля.

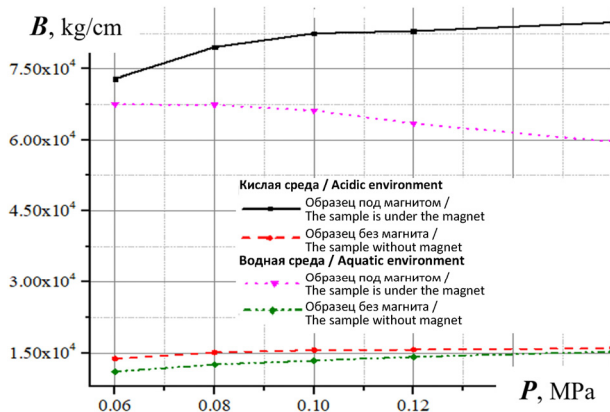


Рис. 3. Зависимость «давление P — жесткость B »
Источник: выполнено Р.Р. Гиниятуллиным.

Figure 3. The relationship “pressure P — stiffness B ”
Source: made by R.R. Giniyatullin

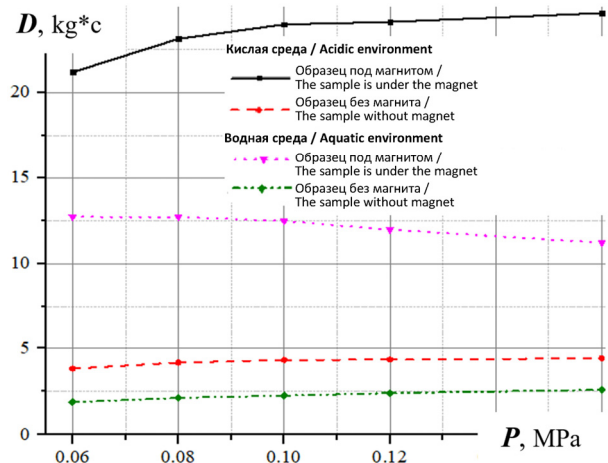


Рис. 4. Зависимость «давление P — жесткость D »
Источник: выполнено Р.Р. Гиниятуллиным.

Figure 4. The relationship “pressure P — stiffness D ”
Source: made by R.R. Giniyatullin

¹ Нурғалиев А.Р., Нуруллин Р.Г., Якупов Н.М., Якупов С.Н. Способ испытаний образцов металлических мембран под напряжением и устройство для его осуществления. Патент № 2296976. 2007. URL: <https://allpatents.ru/patent/2296976.html> (дата обращения: 20.05.2025).

Можно также отметить, что как тангенциальные, так и изгибные жесткости контрольных образцов остаются практически на одном уровне, а жесткости образцов, подверженных воздействию магнитного поля, с увеличением давления изменяются: для образцов, находившихся в кислой среде, наблюдается упрочнение, а для образцов, находившихся в водной среде, — снижение жесткости.

Влияние направления силовых линий магнитного поля Земли на коррозию

Практически не встречаются исследования влияния направления силовых линий магнитного поля Земли на процесс коррозии металлических образцов. Выполнены исследования по изучению влияния направления силовых линий магнитного поля на коррозию стальных тонкостенных элементов толщиной 0,5 и 0,6 мм в воде и в кислой среде.

Выполнены одновременно два независимых эксперимента: в городских условиях и за пределами города. В частности, две группы исследуемых тонких круглых образцов (по десять в каждой) размещаются в одной емкости с агрессивной средой. При этом силовые линии земного магнитного поля пронизывают первую группу (*N-S*) образцов перпендикулярно поверхности, а вторую (*W-E*) — по касательной к поверхности (рис. 5).

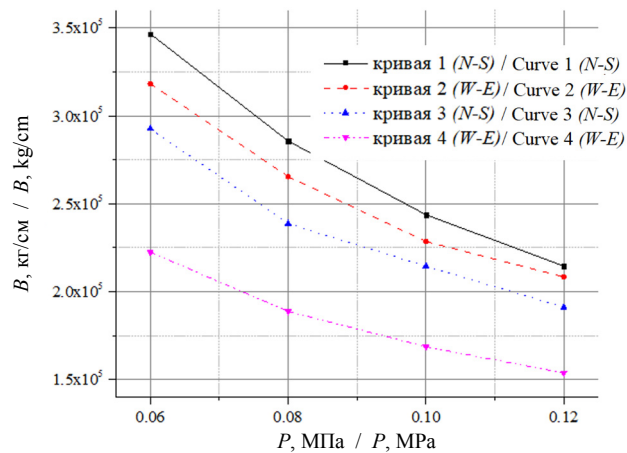


Рис. 6. Зависимость «давление P — жесткость B »
Источники: выполнено Р.Р. Гиниятуллиным

Figure 6. «Pressure P — stiffness B » relationship
Source: by R.R. Giniyatullin

Образцы выдерживаются в исследуемой среде в течение заданного времени.

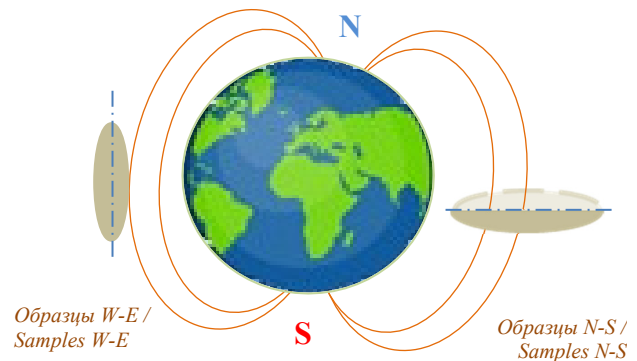


Рис. 5. Схема расположения образцов к магнитному полю Земли
Источники: выполнено Р.Р. Гиниятуллиным.

Figure 5. Layout of the samples relative to the Earth's magnetic field
Source: by R.R. Giniyatullin.

В каждом эксперименте рассматривались образцы из стали марки Ст3 с исходной толщиной $h = 0,6$ мм, которые подвергались коррозионному износу в среде 16 % гипохлорита натрия в течение 30 сут. Для каждого образца экспериментально-теоретическим методом [38–39] по средним значениям прогибов построены кривые «давление P — прогиб H », вычислены тангенциальные B (рис. 6) и изгибные D (рис. 7) жесткости образцов от давления P .

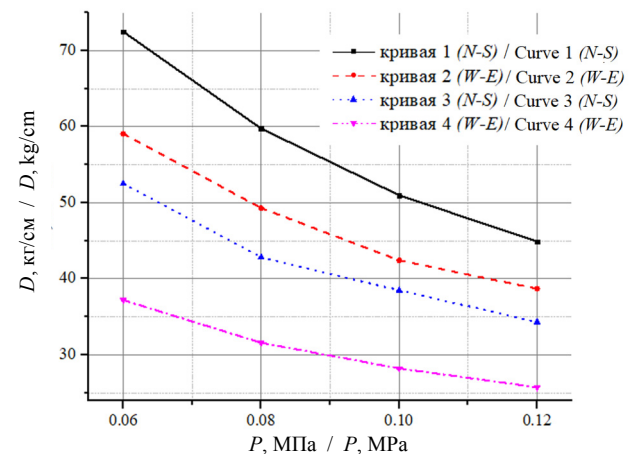


Рис. 7. Зависимость «давление P — жесткость D »
Источники: выполнено Р.Р. Гиниятуллиным

Figure 7. «Pressure P — stiffness D » relationship
Source: by R.R. Giniyatullin.

Впервые обнаружено влияние направления силовых линий магнитного поля Земли на процесс коррозии металлических образцов: большому износу подвержены образцы, поверхности которых параллельны силовым линиям магнитного поля Земли. Полученные результаты включены в следующие работы:

- Отчет о деятельности РАН в 2006 г.
- Основные результаты в области естественных, технических, гуманитарных и общественных наук. Механика. Москва : Наука, 2007. С. 62;
- Отчетный доклад Президиума Российской академии наук «Научные достижения РАН в 2009 году». Москва : Наука, 2010. С. 137.

О степени износа рассмотренных образцов свидетельствует изменение значений толщин образцов: среднее значение толщины образцов из первого эксперимента для группы (*N-S*) составило 0,464 мм, а для группы (*W-E*) — 0,448 мм; среднее значение толщины образцов

из второго эксперимента — соответственно 0,501 и 0,472 мм. Этот эффект можно объяснить, в частности, тем, что магнитное поле, возникающее на поверхности образца из группы (*N-S*), создает дополнительную силу притяжения пассивирующего слоя к основе образца.

Влияние магнитного поля на коррозию деформированных образцов

Деформации на поверхностях образцов создавались на базе патентов на изобретения РФ № 2296976, № 2439537, № 2437077³: путем подачи поверхностного давления на закрепленный по контуру круглый образец (рис. 8, *a*), путем стягивания двух противоположных контуров прямоугольного образца (рис. 8, *б*) и путем деформирования двух круглых образцов по круговому контуру, подкладывая между образцами эллипсоидальную шайбу (рис. 8, *в*). При этом производилась покраска одной из сторон образца.

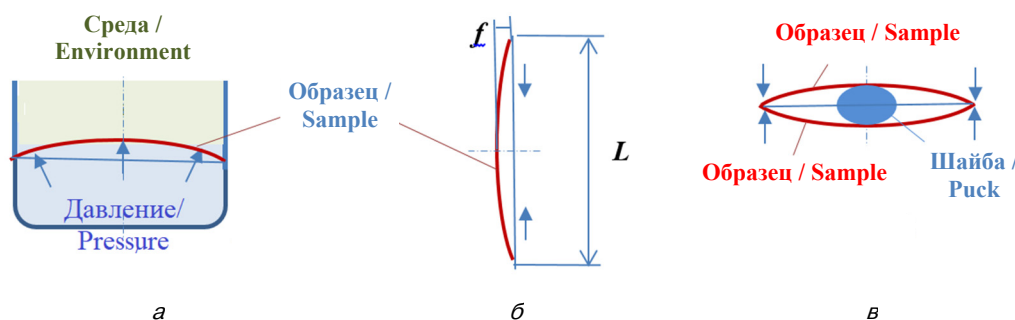


Рис. 8. Схемы деформирования образцов:

a — круглый образец; *б* — прямоугольный образец; *в* — эллипсоидальная шайба

Источни к: выполнено Р.Р. Гиниятуллиным.

Figure 8. Deformation patterns of the samples:

a — round sample; *б* — round sample; *в* — ellipsoidal puck

Source: by R. R. Giniyatullin.

³ Нургалиев А.Р., Нуруллин Р.Г., Якупов Н.М., Якупов С.Н. Способ испытаний образцов металлических мембран под напряжением и устройство для его осуществления. Патент №2296976. 2007. URL: <https://allpatents.ru/patent/2296976.html> (дата обращения: 20.05.2025); Гиниятуллин Р.Р., Нуруллин Р.Г., Якупов Н.М., Якупов С.Н. Способ испытания тонкостенных образцов под напряжением и устройство «летающая тарелка» для его осуществления. Патент № 2437077. 2012. URL: <https://allpatents.ru/patent/2439537.html> (дата обращения: 20.05.2025); Антонов В.Г., Велиюлин И.И., Гиниятуллин Р.Р., Нуруллин Р.Г., Якупов Н.М., Якупов С.Н. Способ испытания тонкостенных образцов под напряжением и устройство «летающая тарелка» для его осуществления. Патент № 2437077. 2011. URL: <https://allpatents.ru/patent/2437077.html> (дата обращения: 20.05.2025).

При исследовании коррозионного износа деформированных образцов под воздействием магнитного поля был рассмотрен вариант деформирования по рис. 8, б: рассматривались пластины толщиной 0,5 мм и размером в плане 240×140 мм ($f/L = 15/240 = 0,0625$).

Деформированные образцы помещались в агрессивную среду на основе соляной кислоты, и на эту систему прикладывалось магнитное

поле напряженностью 70 Гс. Для оценки степени коррозионного износа и определения механических свойств образцов, выдержанных заданное время в среде, использовался экспериментально-теоретический подход [38–39].

На рис. 9 представлены фотоснимки поверхности деформированных образцов после воздействия магнитного поля и коррозионной среды при 4-кратном увеличении.

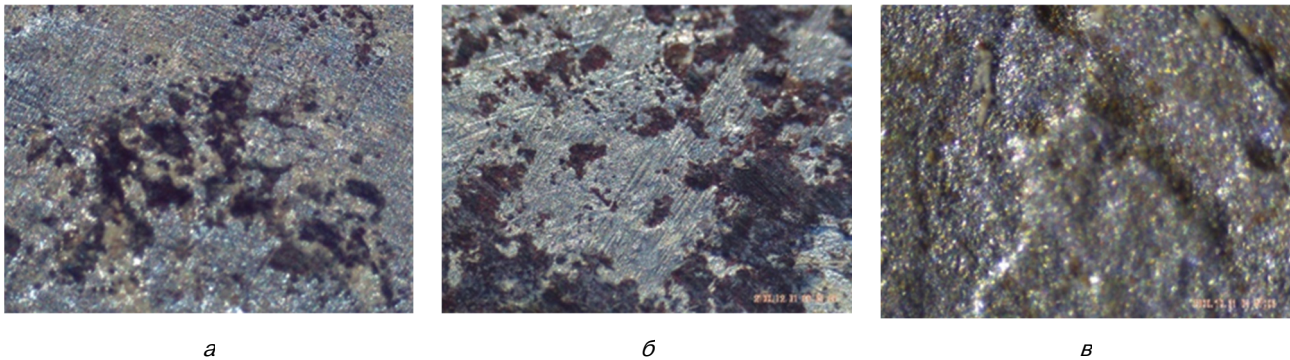


Рис. 9. Фотоснимки образцов:
a — недеформированные; *б* — сжатая поверхность; *в* — растянутая поверхность
 Источник: выполнено С.Н. Якуповым

Figure 9. Photographs of the samples:
a — unreformed; *б* — compressed surface; *в* — stretched surface
 Source: by S. N. Yakupov

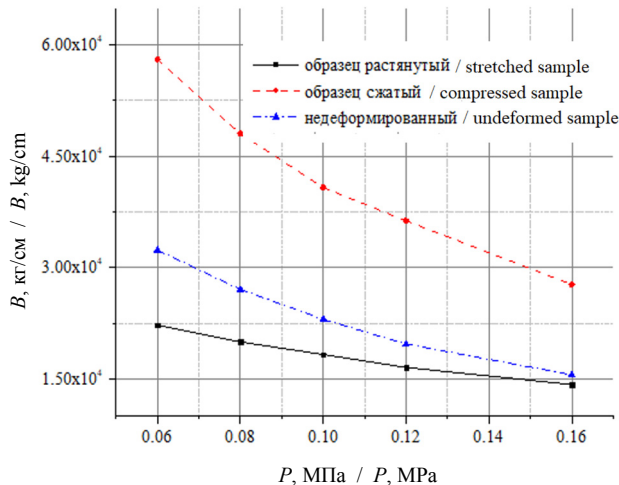


Рис. 10. Зависимость тангенциальной жесткости B от давления P
 Источник: выполнено Р.Р. Гиниятуллиным.

Figure 10. Dependence of tangential stiffness B on pressure P
 Source: by R. R. Giniyatullin.

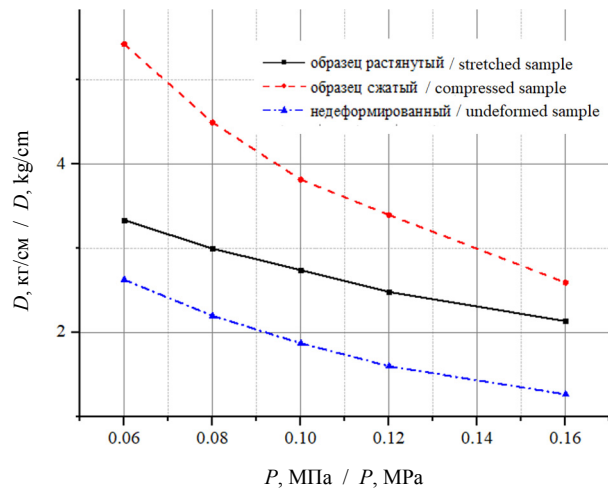


Рис. 11. Зависимость изгибной жесткости D от давления P
 Источник: выполнено Р.Р. Гиниятуллиным.

Figure 11. Dependence of bending rigidity D on pressure P
 Source: by R. R. Giniyatullin.

На рис. 10 и 11 представлены изменения тангенциальных B и изгибных D жесткостей образцов от давления P соответственно.

Как видно из графиков (рис. 10 и 11), тангенциальные и изгибные жесткости сжатых образцов имеют максимальные значения. При этом тангенциальная жесткость недеформированных образцов несколько выше соответствующих жесткостей растянутых образцов, а изгибная жесткость растянутых образцов больше изгибных жесткостей недеформированных образцов.

Можно также отметить, что как тангенциальные, так и изгибные жесткости рассмотренных образцов с увеличением давления падают.

Заключение

К современным тонкостенным конструкциям предъявляются высокие требования по обеспечению безаварийной и безотказной работы конструкций. Особую опасность для тонкостенных конструкций представляют случаи, когда имеют место два и более источника разрушения. Экспериментально-теоретическим методом выполнены исследования влияния магнитного поля и направление его силовых линий на коррозионный износ стальных тонкостенных элементов, а также влияние магнитного поля на коррозию деформированных тонкостенных образцов. Жесткости контрольных образцов, находившихся в агрессивной среде без воздействия магнитного поля, существенно ниже, чем жесткости образцов, подверженных воздействию магнитного поля. Таким образом, коррозионный износ образцов без воздействия магнитного поля выше, чем образцов, находившихся в агрессивной среде под воздействием магнитного поля. Жесткости образцов, находившихся в кислой среде, с увеличением давления увеличиваются, а для образцов, находившихся в водной среде, наблюдается снижение жесткости. Тонкостенные образцы, поверхности которых параллельны силовым линиям магнитного поля Земли, подвержены большей коррозии, чем образцы, поверхности которых перпендикулярны линиям магнитного поля. Тангенциальная жест-

кость недеформированных образцов под воздействием магнитного поля несколько выше соответствующих жесткостей растянутых образцов, при этом изгибная жесткость растянутых образцов больше изгибных жесткостей недеформированных образцов. Обнаруженные эффекты имеют важное теоретическое и практическое значение.

Список литературы

1. Afzal M., Liu Y., Cheng J.C.P., Gan V.J.L. Reinforced concrete structural design optimization: A critical review // Journal of Cleaner Production. 2020. Vol. 260. Article no. 120623. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120623> EDN: QRLJNG
2. Pilla D.R. Elementary Structural Analysis and Design of Buildings a Guide for Practicing Engineers and Students. CRC Press, 2019. 272 p. ISBN 9780367028046
3. Yakupov S.N., Kiyamov H.G., Yakupov N.M. Mukhamedova I.Z. A new variant of the fem for evaluation the strenght of structures of complex geometry with heterogeneous material structure // Case Studies in Construction Materials. 2023. Vol. 19. Article no. e02360. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02360> EDN: GBELQN
4. Li D.Y. Corrosive Wear // Encyclopedia of tribology / Q.J. Wang, Y.W. Chung (eds). Boston: Springer, MA, 2013. https://doi.org/10.1007/978-0-387-92897-5_866
5. Cast-Iron Steel // Scientific American Magazine. 1847. Vol. 2. No. 31. P. 244. URL: <https://www.scientificamerican.com/issue/sa/1847/04-24/> (дата обращения: 20.09.2025).
6. Якупов Н.М., Галявиев Ш.Ш., Нургалеев А.Р., Якупов С.Н. Состояние конструкций градирен и предотвращение их разрушения // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2006. № 7–8. С. 36–42. EDN: KFQKHL
7. Семькин Ю.А. Черная металлургия и кузнечное производство Волжской Булгарии в VIII — начале XIII вв. Казань : Отечество, 2015. 228 с. ISBN 978-5-9222-1001-0
8. Collins J.A. Collins Failure of materials in mechanical design: analysis, prediction, prevention: 2nd ed. New York : Wiley Publ., 1993. 629 p. ISBN 10 0471050245
9. Якупов Н.М., Нургалеев А.Р. Влияние механических дефектов на свойства нагруженных тонкостенных элементов конструкций в агрессивной среде // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2008. № 3. С.14–18. EDN: JWQEVV
10. Hansson C.M. The Impact of Corrosion on Society // Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science. 2011. Vol. 42. No. 10. P. 2952–2962. <https://doi.org/10.1007/s11661-011-0703-2> EDN: FOWORA

11. Якупов С.Н., Тамеев И.М., Якупов Н.М. Диагностика и лечение трубопроводов. Казань : АО «ИД «Казанская недвижимость», 2018. 180 с. ISBN 978-5-9909918-8-0
12. Linardi E., Tordoya D.V., Collet-Lacoste J.R. About the electrochemical mechanism of aluminium corrosion in acid media by electrochemical impedance spectroscopy // *Materials and Corrosion*. 2025. Vol. 76. No. 9. P. 1353–1364. <https://doi.org/10.1002/maco.202514809>
13. Bender R., Féron D., Mills D., Ritter S., Bäßler R., Bettge D., De Graeve I., Dugstad A., Grassini S., Hack T., Halama M., Han En.H., Harder T., Hinds G., Kittel J., Krieg R., Leygraf Ch., Martinelli L., Mol A., Neff D. et al. Corrosion challenges towards a sustainable society // *Materials and Corrosion — Werkstoffe und Korrosion*. November 2022. Vol. 73. Issue 11. P. 1730–1751. <https://doi.org/10.1002/maco.202213140> EDN: DITDFO
14. Weinberger P., Weinberger P. Faraday and the Philosophical Magazine // *Philosophical Magazine A*. 2013. Vol. 93. No. 13. P. 1455–1467. <https://doi.org/10.1080/14786435.2012.74488115>.
15. Сидоренко С.Н., Якупов Н.М. Коррозия — союзник аварий и катастроф. Москва : РУДН, 2002. 93 с. ISBN 5-209-02197-1
16. Велиюлин И.И., Кантюков Р.А., Якупов Н.М., Тамеев И.М., Якупов С.Н., Кантюков Р.Р., Гиниятуллин Р.Р., Нургалиев А.Р. Модели коррозионного износа // *Наука и техника в газовой промышленности*. 2015. № 1. С. 57–67. EDN: TYNWKV
17. Акимов Г.В. Основы учения о коррозии и защите металлов. Москва : URSS, 2021. 464 с.
18. Корнишин М.С., Карпунин В.Г. К устойчивости пластин и оболочек с учетом общей коррозии // *Сборник трудов семинара по теории оболочек*. Казань : КФТИ АН СССР, 1975. С. 58–66.
19. Гутман Э.М. Механохимия металлов и защита от коррозии. Москва : Металлургия, 1981. 271 с.
20. Овчинников И.Г., Сабитов Х.А. К определению НДС и долговечности цилиндрических оболочек с учетом коррозионного износа // *Строительная механика и расчет сооружений*. 1986. № 1. С.13–17.
21. Lu Z., Huang D., Yang W., Congleton J. Effects of an applied magnetic field on the dissolution and passivation of iron in sulphuric acid // *Corrosion Science*. 2003. Vol. 45. Issue 10. P. 2233–2249. [https://doi.org/10.1016/S0010-938X\(03\)00045-3](https://doi.org/10.1016/S0010-938X(03)00045-3) EDN: LVZWSH
22. Bikul'chyus G., Ruchinskene A., Deninis V. Corrosion behavior of low-carbon steel in tap water treated with permanent magnetic field // *Protection of metals*. 2003. Vol. 39. Issue 5. P. 443–447. <https://doi.org/10.1023/A:1025890601669> EDN: LVZWTV
23. Tang Y.Ch., Davenport A.J. Magnetic Field Effects on the Corrosion of Artificial Pit Electrodes and Pits in Thin Films // *Journal of the Electrochemical Society*. 2007. Vol. 154. No. 7. P. 362–370. <https://doi.org/10.1149/1.2736662>
24. Alimi F., Tlili M., Ben Amor M., Maurin G., Gabrielli C. Influence of magnetic field on calcium carbonate precipitation in the presence of foreign ions // *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2009. Vol. 45. No. 1. P. 56–62. <https://doi.org/10.3103/S1068375509010104>
25. Nasher L.S.H., Salash L.A.B.T. Study the effect of magnetic field on the corrosion of steel in sodium chloride solution (NaCl) // *Misan Journal Academic Studies*. 2010. Vol. 9. P. 30.
26. Sueptitz R., Tschulik K., Uhlemann M., Schultz L., Gebert A. Magnetic field effects on the active dissolution of iron // *Electrochimica Acta*. 2011. Vol. 56. No. 17. P. 5866–5871. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2011.04.126>
27. Sueptitz R., Tschulik K., Uhlemann M., Schultz L., Gebert A. Effect of high gradient magnetic fields on the anodic behaviour and localized corrosion of iron in sulphuric acid solutions // *Corrosion Science*. 2011. Vol. 53. No. 10. P. 3222–3230. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2011.05.070>
28. Якупов Н.М., Гиниятуллин Р.Р., Якупов С.Н. Влияние магнитного поля на коррозионный износ // *Доклады Академии наук*. 2012. Т. 443. № 2. С.173–175. EDN: OWXKEL
29. Yakupov N.M., Giniyatullin R.R., Yakupov S.N. Effect of ultraviolet radiation on the corrosive wear of steel samples // *Doklady Physics*. 2012. Vol. 57. No. 10. P. 393–395. <https://doi.org/10.1134/S1028335812100096> EDN: RGJNWH
30. Platadis E., Ziks A., Poznjak A., Muktepavela F., Shisko A., Sree S., Chakraborty P., Sanjay K., Vrushank M., Fotedar R., Rajendra E.K., Suri A.K. Investigation of the Li-Pb flow corrosion attack on the surface of P91 steel in the presence of magnetic field // *Magnetohydrodynamics*. 2012. Vol. 48. No. 2. P. 343–350.
31. Yakupov N.M., Giniyatullin R.R., Yakupov S.N. Effect of the Direction of the Earth's Magnetic Field Lines on Corrosive Wear // *Doklady Physical Chemistry*. 2015. Vol. 463. Part 2. P. 188–190. <https://doi.org/10.1134/S0012501615080072> EDN: UZWWHN
32. Ильясова А.И. Анализ влияния магнитного поля на свойства стали линейной части магистральных трубопроводов // *Нефтегазовое дело*. 2019. № 2. С. 156–167. <https://doi.org/10.17122/ogbus-2019-2-156-168> EDN: ZDSLGX
33. Zhao Sh., Wang Y., Zhao Y., Sun X., Zhang H., Piao H.-G., Zhang Y., Huang Y. The effect of magnetic field pretreatment on the corrosion behavior of carbon steel in static seawater. *RSC Advances*. 2020. Issue 4. P. 2060–2066. <https://doi.org/10.1039/C9RA09079G> EDN: UZVBIB
34. Parapurath Sh., Ravikumar A., Vahdati N., Shiryayev O. Effect of Magnetic Field on the Corrosion of API-5L-X65 Steel Using Electrochemical Methods in

a Flow Loop // *Applied Science*. 2021. Vol. 11. No. 19. Article no. 9329. <https://doi.org/10.3390/app11199329> EDN: IKYGCN

35. Zhu C., Miao L., Xie J., Xu H., Han Y., Liu J., Ryan M.P., Guo L. Magnetic field effects on the corrosion behavior of magnetocaloric alloys $\text{LaFe}_{13.9}\text{Si}_{1.4}\text{H}_y$ under paramagnetic states // *Journal of Alloys and Compounds*. 2023. Vol. 968. Article no. 171901 <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2023.171901> EDN: STRCUY

36. Якупов С.Н., Кантюков Р.Р., Гумаров Г.Г., Якупов Н.М. Влияние остаточной намагниченности на коррозию стальных образцов // Доклады Российской академии наук. Физика, технические науки. 2024. Т. 514. С. 46–49. <https://doi.org/10.31857/S2686740024010078> EDN: OPDVAN

37. Guo L., Zhu C., Wang H., Miao L., Liu J., Li Ju., Wang S., Lovell E., Wilson N., Cohen L.F., Ryan M.P. Magnetic field effects on the corrosion behavior of magnetocaloric alloys $\text{LaFe}_{13.9}\text{Si}_{1.4}\text{H}_y$ under ferromagnetic states // *Journal of Alloys and Compounds*. 2025. Vol. 1017. Article no. 179002. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2025.179002> EDN: OUZWPI

38. Якупов Н.М., Галимов Н.К., Якупов С.Н. Методика исследования неплоских пленок и мембран сложной структуры // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2019. Т. 85. № 2. С. 55–59. <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2019-85-2-55-59> EDN: YAHYTE

39. Yakupov S.N. Influence of Scratches on the Stiffness Properties of Thin-walled Elements // *Lobachevskii Journal of Mathematics*. 2019. Vol. 40. No. 6. P. 834–839. <https://doi.org/10.1134/S1995080219060258> EDN: GAIKNQ

References

1. Afzal M, Liu Yu, Cheng JCP, Gan VJL. Reinforced concrete structural design optimization: A critical review. *Journal of Cleaner Production*. 2020;260:120623. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120623> EDN: QRLJNG

2. Pilla DR. *Elementary structural analysis and design of buildings a guide for practicing engineers and students*. CRC Press, 2019. ISBN 9780367028046

3. Yakupov SN, Kiyamov HG, Yakupov NM, Mukhamedova IZ. A new variant of the fem for evaluation the strength of structures of complex geometry with heterogeneous material structure. *Case Studies in Construction Materials*. 2023;19:e02360. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02360> EDN: GBELQN

4. Li DY. Corrosive wear. In: Wang QJ, Chung YW, editors. *Encyclopedia of Tribology*. Boston Springer Publ.; 2013. p. 590–596. https://doi.org/10.1007/978-0-387-92897-5_866

5. Cast-Iron Steel. *Scientific American Magazine*. 1847;2(31):244. <https://www.scientificamerican.com/issue/sa/1847/04-24/6>

6. Yakupov NM, Galyaviev ShSh, Nurgaliev AR, Yakupov SN. Condition of cooling tower structures and prevention of their failure. *Power Engineering: Research, Equipment, Technology*. 2006;7-8:36–42. (In Russ.) EDN: KFQKHL

7. Semykin YuA. *Ferrous metallurgy and blacksmithing in Volga Bulgaria in the VIII — early XIII centuries*. Kazan: Otechestvo Publ.; 2015. (In Russ.) ISBN 978-5-9222-1001-0

8. Collins JA. *Collins Failure of materials in mechanical design: analysis, prediction, prevention*. 2nd ed. New York: Wiley Publ.; 1993. ISBN 10 0471050245

9. Yakupov NM, Nurgaliev AR. Influence of mechanical defects on properties of the loaded thin-walled elements of designs in the excited environment. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2008;3:14–18. (In Russ.) EDN: JWQEVN

10. Hansson CM. The Impact of Corrosion on Society. *Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science*. 2011;42(10):2952–2962. <https://doi.org/10.1007/s11661-011-0703-2> EDN: FOWORA

11. Yakupov SN, Tameev IM, Yakupov NM. *Diagnostics and treatment of pipelines*. Kazan: Kazanskaya nedvizhimost Publ.; 2018. (In Russ.) ISBN 978-5-9909918-8-0

12. Linardi EM, Tordoya DV, Collet-Lacoste JR. About the electrochemical mechanism of aluminum corrosion in acid media by electrochemical impedance spectroscopy. *Materials and Corrosion*. 2025;76(9):1353–1364. <https://doi.org/10.1002/maco.202514809>

13. Bender R, Féron D, Mills D, Ritter S, Bäßler R, Bettge D, De Graeve I, Dugstad A, Grassini S, Hack T, Halama M, Han EnH, Harder T, Hinds G, Kittel J, Krieg R, Leygraf Ch, Martinelli L, Mol A, Neff D. et al. Corrosion challenges towards a sustainable society. *Materials and Corrosion — Werkstoffe und Korrosion*. 2022;73(11):1730–1751. <https://doi.org/10.1002/maco.202213140> EDN: DITDFO

14. Weinberger P. Faraday and the Philosophical Magazine. *Philosophical Magazine*. 2013;93(13):1455–1467. <https://doi.org/10.1080/14786435.2012.744881>

15. Sidorenko SN. *Corrosion as a contributor to accidents and catastrophes*. Moscow: RUDN Publ.; 2002. (In Russ.) ISBN 5-209-02197-1

16. Veliyulin II, Kantyukov RA, Yakupov NM, Tameev IM, Yakupov SN, Kantyukov RR, Giniyulin RR, Nurgaliev AR. Corrosion wear models. *Science and Technology in the Gas Industry*. 2015;1:57–67. EDN: TYNWKV

17. Akimov G.V. *Fundamentals of corrosion and protection of metals*. 2nd ed. Moscow: URSS Publ.; 2021. (In Russ.)

18. Kornishin MS, Karpunin VG. On the stability of plates and shells, taking into account general corrosion. *Proceedings of the Shell Theory Seminar are in the collection*. Kazan: KFTI AN SSSR, 1975;(6):58–66. (In Russ.)

19. Gutman EM. *Metal mechanochemistry and corrosion protection*. Moscow: Metallurgy Publ.; 1981. (In Russ.)
20. Ovchinnikov IG, Sabitov KhA. Determination of VAT and durability of cylindrical shells taking into account corrosion wear. *Structural Mechanics and Analysis of Constructions*. 1986;(1):13–17. (In Russ.)
21. Lu Z, Huang D, Yang W, Congleton J. Effects of an applied magnetic field on the dissolution and passivation of iron in sulphuric acid. *Corrosion Science*. 2003;45(10):2233–2249. [https://doi.org/10.1016/S0010-938X\(03\)00045-3](https://doi.org/10.1016/S0010-938X(03)00045-3) EDN: LVZWSH
22. Bikul'chuyus G, Ruchinskene A, Deninis V. Corrosion behavior of low-carbon steel in tap water treated with permanent magnetic field. *Protection of metals*. 2003;39(5):443–447. <https://doi.org/10.1023/A:1025890601669> EDN: LVZWTV
23. Tang YCh, Davenport AJ. Magnetic Field Effects on the Corrosion of Artificial Pit Electrodes and Pits in Thin Films. *Journal of the Electrochemical Society*. 2007;154(7):362–370. <https://doi.org/10.1149/1.2736662>
24. Alimi F, Tlili M, Ben Amor M, Maurin G, Gabrielli C. Influence of magnetic field on calcium carbonate precipitation in the presence of foreign ions. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2009;45:56–62. <https://doi.org/10.3103/S1068375509010104>
25. Nasher SH, Salash Ai-Mosawi BT. Study the effect of magnetic field on the corrosion of steel in sodium chloride solution (NaCl). *Misan Journal Academic Studies*. 2010;9:30.
26. Sueptitz R, Tschulik K, Uhlemann M, Schultz L, Gebert A. Magnetic field effects on the active dissolution of iron. *Electrochimica Acta*. 2011;56(17):5866–5871. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2011.04.126>
27. Sueptitz R, Tschulik K, Uhlemann M, Schultz L, Gebert A. Effect of high gradient magnetic fields on the anodic behaviour and localized corrosion of iron in sulphuric acid solutions. *Corrosion Science*. 2011;53(10):3222–3230. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2011.05.070>
28. Yakupov NM, Giniyatullin RR, Yakupov SN. Effect of a magnetic field on corrosive wear. *Doklady Physics*. 2012;57(3):104–106. <https://doi.org/10.1134/S102833581203007X> EDN: PDRUZJ
29. Yakupov NM, Giniyatullin RR, Yakupov SN. Effect of ultraviolet radiation on the corrosive wear of steel samples. *Doklady Physics*. 2012;57(10):393–395. <https://doi.org/10.1134/S1028335812100096> EDN: RGJNWH
30. Platadis E, Ziks A, Poznjak A, Muktepavela F, Shisko A, Sree S, Chakraborty P, Sanjay K, Vrushank M, Fotedar R, Rajendra EK, Suri AK. Investigation of the Li-Pb flow corrosion attack on the surface of P91 steel in the presence of magnetic field. *Magneto hydrodynamics*. 2012;48(2):343–350.
31. Yakupov NM, Giniyatullin RR, Yakupov SN. Effect of the direction of the earth's magnetic field lines on corrosive wear. *Doklady Physical Chemistry*. 2015;463(2):188–190. <https://doi.org/10.1134/S0012501615080072> EDN: UZWWHN
32. Ilyasova AI. Magnetic field influence on the steel properties of the main pipelines linear part. *Electronic Scientific Journal Oil and Gas Business*. 2019;2:156–168. (In Russ.) <https://doi.org/10.17122/ogbus-2019-2-156-168> EDN: ZDSLGX
33. Zhao Sh, Wang Y, Zhao Y, Sun X, Zhang H, Piao H-G, Zhang Y, Huang Y. The effect of magnetic field pretreatment on the corrosion behavior of carbon steel in static seawater. *RSC Advances*. 2020;4:2060–2066. <https://doi.org/10.1039/C9RA09079G> EDN: UZVBIB
34. Parapurath Sh, Ravikumar A, Vahdati N, Shiryayev O. Effect of Magnetic Field on the Corrosion of API-5L-X65 Steel Using Electrochemical Methods in a Flow Loop. *Applied Science*. 2021;11(19):9329. <https://doi.org/10.3390/app11199329> EDN: IKYGCN
35. Zhu C, Miao L, Xie J, Xu H, Han Y, Liu J, Ryan MP, Guo L. Magnetic field effects on the corrosion behavior of magnetocaloric alloys LaFe_{13.9}Si_{1.4}H_y under paramagnetic states. *Journal of Alloys and Compounds*. 2023;968:171901. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2023.171901> EDN: STRCUY
36. Yakupov SN, Kantyukov RR, Gumarov GG, Yakupov NM. Effect of residual magnetization corrosion of steel samples. *Reports of the Russian Academy of Sciences. Physics, Technical Sciences*. 2024;514(1):46–49. (In Russ.) <https://doi.org/10.31857/S2686740024010078> EDN: OPDVAH
37. Guo L, Zhu C, Wang H, Miao L, Liu J, Li Ju, Wang S, Lovell E, Wilson N, Cohen LF, Ryan MP. Magnetic field effects on the corrosion behavior of magnetocaloric alloys LaFe_{13.9}Si_{1.4}H_y under ferromagnetic states. *Journal of Alloys and Compounds*. 2025;1017:179002. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2025.179002> EDN: OUZWPJ
38. Yakupov NM, Galimov NK, Yakupov SN. Methodology of studying non-planar films and membranes of complex structure. *Industrial Laboratory. Materials Diagnostics*. 2019;85(2):55–59. (In Russ.) <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2019-85-2-55-59> EDN: YAHYTE
39. Yakupov SN. Influence of Scratches on the Stiffness Properties of Thin-walled Elements. *Lobachevskii Journal of Mathematics*. 2019;40(6):834–839. <https://doi.org/10.1134/S1995080219060258> EDN: GAIKNQ

Сведения об авторах

Гиниятуллин Ришат Рашидович, кандидат технических наук, научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр РАН», Институт механики и машиностроения, Российская Федерация, 420111, г. Казань, ул. Лобачевского д. 2/31; eLIBRARY SPIN-код: 7606-3211, ORCID: 0000-0003-2176-6913; e-mail: true_way@mail.ru.

Якупов Самат Нухович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр РАН», Институт механики и машиностроения, Российская Федерация, 420111, г. Казань, ул. Лобачевского д. 2/31; eLIBRARY SPIN-код: 7382-4759, ORCID: 0000-0003-0047-3679; e-mail: tamas_86@mail.ru

Якупов Нух Махмудович, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр РАН», Институт механики и машиностроения, Российская Федерация, 420111, г. Казань, ул. Лобачевского д. 2/31; eLIBRARY SPIN-код: 2933-5615, ORCID: 0000-0001-8248-1589; E-mail: yzsrr@mail.ru

Низамова Гузаль Хавасовна, кандидат технических наук, доцент кафедры комплексной безопасности в строительстве, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), Российская Федерация, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; eLIBRARY SPIN-код: 3895-0028, ORCID: 0000-0002-7193-9125; e-mail: guzelnizamova2009@yandex.ru

About the authors

Rishat R. Giniyatullin, PhD in Technical Sciences, Researcher, Kazan Scientific Center of Russian Academy of Science, Institute of Mechanics and Engineering, 2/32 Lobachevskogo St, Kazan, 420111, Russian Federation; eLIBRARY SPIN-code: 7606-3211, ORCID: 0000-0003-2176-6913; e-mail: true_way@mail.ru.

Samat N. Yakupov, PhD in Technical Sciences, Senior Researcher, Kazan Scientific Center of Russian Academy of Science, Institute of Mechanics and Engineering, 2/32 Lobachevskogo St, Kazan, 420111, Russian Federation; eLIBRARY SPIN-code: 7382-4759, ORCID: 0000-0003-0047-3679; e-mail: tamas_86@mail.ru

Nukh M. Yakupov, Dr. Sci. (Eng.), Leading Researcher, Kazan Scientific Center of Russian Academy of Science, Institute of Mechanics and Engineering, 2/32 Lobachevskogo St, Kazan, 420111, Russian Federation; eLIBRARY SPIN-code: 2933-5615, ORCID: 0000-0001-8248-1589; e-mail: yzsrr@mail.ru

Guzial Kh. Nizamova, PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Integrated Safety in Construction, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), 26 Yaroslavskoye Shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; eLIBRARY SPIN-code: 3895-0028, ORCID: 0000-0002-7193-9125; e-mail: guzelnizamova2009@yandex.ru