

УДК 539.3:624.014

## ВЛИЯНИЕ ОСТАТОЧНОЙ НАМАГНИЧЕННОСТИ НА КОРРОЗИЮ СТАЛЬНЫХ ОБРАЗЦОВ

© 2024 г. С. Н. Якупов<sup>1\*</sup>, Р. Р. Кантюков<sup>2</sup>, Г. Г. Гумаров<sup>1</sup>, Н. М. Якупов<sup>1</sup>

Представлено академиком РАН И.Г. Горячевой 23.08.2023 г.

Поступило 21.09.2023 г.

После доработки 21.09.2023 г.

Принято к публикации 13.11.2023 г.

Приводятся результаты экспериментально-теоретических исследований влияния остаточной намагниченности на коррозию стальных образцов в водной среде. Описываются алгоритмы исследования и обработки результатов. Рассмотрены три случая исходной намагниченности образцов. Установлено, что до критической намагниченности стальных образцов коррозионный износ в водной среде уменьшается, а затем начинает расти. Обнаруженный эффект имеет важное теоретическое значение при изучении явления коррозии с учетом исходной остаточной намагниченности, а также большое практическое значение, в частности, при проектировании и эксплуатации различных конструкций и сооружений из стали для их защиты от коррозионного разрушения.

*Ключевые слова:* коррозионный износ, стальные образцы, водная среда, остаточная намагниченность, экспериментально-теоретический метод, тангенциальная жесткость

DOI: 10.31857/S2686740024010078, EDN: OPDVAN

Известно, что на поверхности металла, находящегося в водной или другой среде, образуется тонкий защитный пассивирующий слой, разрушение которого приводит к коррозионному износу [1, 2]. Среди факторов, влияющих на разрушение защитного слоя, можно отметить воздействие физических и механических полей. Так, ультрафиолетовое излучение (УФ) влияет на механические свойства металлических элементов конструкции, в том числе на коррозионную стойкость [3–5]. Известно влияние деформации поверхности образца [6] и вибрации [7] на процесс коррозии. Влияние активного магнитного поля на процесс коррозии отмечено в [8–11]. При этом на процесс коррозии оказывают влияние

направления силовых линий магнитного поля [12]. Мало исследовано влияние пассивного магнитного поля (остаточного магнитного поля) на процесс коррозии [13].

### АЛГОРИТМ ИССЛЕДОВАНИЯ

Тонкие круглые образцы из стали подвергаются воздействию магнитного поля различной напряженности, производится замер исходной остаточной намагниченности  $M_{RN}$  образцов. Далее образцы размещаются в емкость со средой (рис. 1) и выдерживаются в ней в течение заданного времени.

### АЛГОРИТМ ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для оценки степени коррозии образцов, выдержанных заданное время в водной среде, используется экспериментально-теоретический метод [14], патент РФ №2310184. Образцы поочередно закрепляются по контуру на установке и нагружаются равномерным давлением  $P$ . В процессе увеличения давления  $P$

<sup>1</sup>Институт механики и машиностроения  
Федерального исследовательского центра  
“Казанский научный центр  
Российской академии наук”, Казань, Россия  
<sup>2</sup>ООО “Научно-исследовательский институт  
природных газов и газовых технологий”,  
Московская обл., Россия  
\*E-mail: tamas\_86@mail.ru

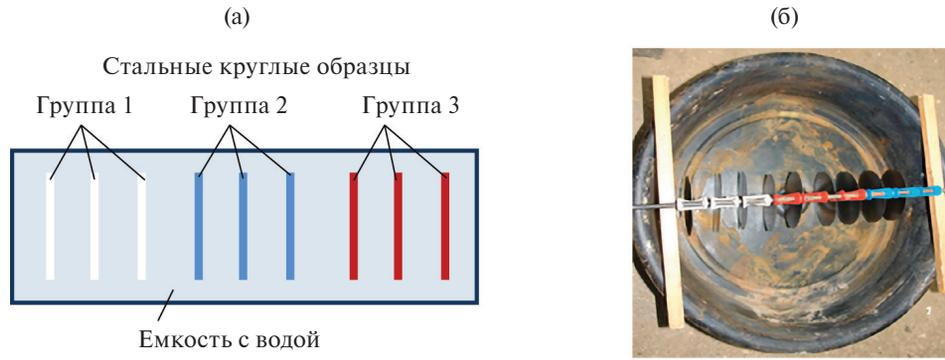


Рис. 1. Размещение образцов: а – схема; б – образцы в емкости до заливки (фото).

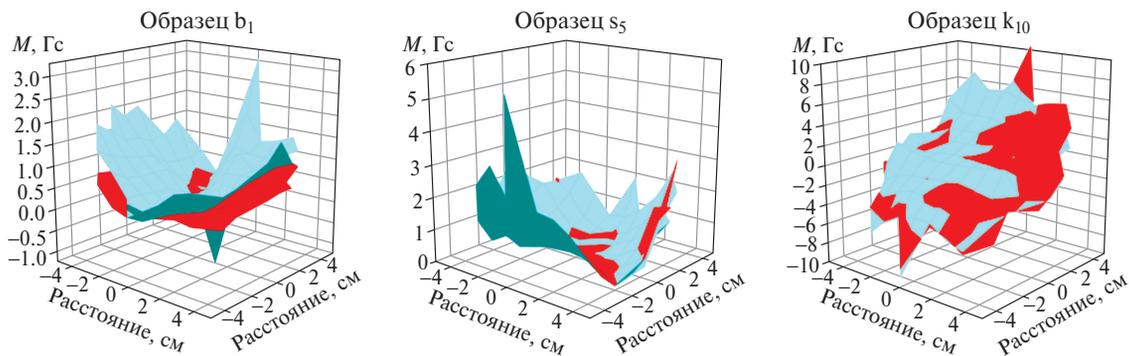


Рис. 2. Распределение  $M_{RN}$  для образцов  $b_1$ ,  $s_5$ ,  $k_{10}$ .

производится мониторинг формы образуемого купола, в частности, за высотой подъема вершины купола  $H$ , и получается зависимость: давление  $P$  – прогиб  $H$ .

Далее, для упругой области деформирования стального образца для случая среднего изгиба тангенциальная жесткость  $B$  оценивается по формуле

$$B = 0.30695 Pa \left( \frac{a}{H} \right)^3, \quad (1)$$

полученной из соотношений нелинейной теории оболочек [15], где  $P$  – распределенное давление;  $a$  и  $H$  – радиус и прогиб мембраны в центре купола.

### ХАРАКТЕР ВЛИЯНИЯ ОСТАТОЧНОЙ НАМАГНИЧЕННОСТИ НА ПРОЦЕСС КОРРОЗИОННОГО ИЗНОСА СТАЛЬНЫХ ОБРАЗЦОВ В ВОДНОЙ СРЕДЕ

Выполнены экспериментальные исследования круглых образцов из стали Ст3 с исходной толщиной  $h = 0.6$  мм. Рассмотрены три группы

образцов, условно названные: Группа 1 – “Белые образцы”, Группа 2 – “Синие образцы” и Группа 3 – “Красные образцы”. Образцы подвергались предварительному воздействию магнитного поля различной напряженности.

Далее проведены замеры исходных нормальных компонент остаточной намагниченности  $M_{RN}$  образцов с двух сторон с использованием магнитометра GM2 фирмы AlphaLab Inc (точность измерения  $\pm 0.01$  Гс) на прямоугольной сетке с шагом 1 см. На рис. 2 приведены изображения картины распределения  $M_{RN}$  для одного образца из каждой рассмотренной группы.

Наблюдается достаточно сложная картина распределения исходной остаточной намагниченности  $M_{RN}$ . Средние значения модулей  $M_{RN}$ , вычисленных по 85 точкам замеров на верхней и нижней поверхности образцов, а также средние значения  $M_{RN}$  для каждой группы образцов приведены в табл. 1.

Далее образцы были размещены в емкость с водой (рис. 1) и выдерживались в ней в течение 7 мес (апрель–ноябрь). Используя экспериментально-теоретический метод для каждого

**Таблица 1.** Остаточная намагниченность  $M_{RN}$  образцов, Гс

Номер образцов №	Группа 1 “Белые образцы”			Группа 2 “Синие образцы”			Группа 3 “Красные образцы”		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Поверхность верхняя, Гс	0.85	0.19	0.16	1.85	0.97	1.24	2.24	2.65	2.02
Поверхность нижняя, Гс	0.46	0.16	0.12	1.99	0.93	1.25	2.21	2.43	1.93
Среднее значение, Гс	0.32			1.37			2.25		

**Таблица 2.** Зависимости прогибов  $H_{cp}$  и жесткости  $B$  образцов от давления  $P$ 

$P$ , кг/см <sup>2</sup>	Группа 1 “Белые образцы” (1–3)		Группа 2 “Синие образцы” (4–6)		Группа 3 “Красные образцы” (7–9)	
	$H_{cp}$ , см	$B$ , кг/см	$H_{cp}$ , см	$B$ , кг/см	$H_{cp}$ , см	$B$ , кг/см
0.2	0.0363	328562.3	0.0323	466369.4	0.0387	271146.9
0.4	0.0570	169723.9	0.0530	211125.2	0.0603	143355.9
	$B_{cp} = 249143.1$		$B_{cp} = 338747.3$		$B_{cp} = 207251.4$	

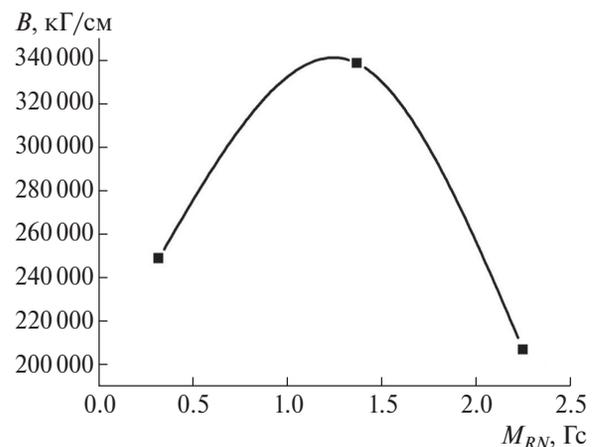
образца, определена зависимость максимально-го прогиба  $H$  от давления  $P$ .

Средние значения максимального прогиба по группам  $H_{cp}$  от давления  $P$  приведены в табл. 2. Там же приведены вычисленные по (1) соответствующие тангенциальные жесткости на растяжение  $B$ .

По средним значениям жесткости на растяжение построена зависимость тангенциальной жесткости образцов  $B_{cp}$  от среднего значения исходной остаточной намагниченности  $M_{RN}$  (рис. 3).

Как видно из рис. 3, жесткость образцов до определенной намагниченности, в частности до  $M_{RN} = 1.37$  Гс, растет, затем начинает падать. Обнаруженный эффект можно объяснить тем, что имеется критическая величина исходной остаточной намагниченности  $M_{RN}$ , до достижения которой пассивирующий слой не разрушается, а при превышении этой величины начинается разрушение пассивирующего слоя в электрохимическом процессе коррозии.

Таким образом, исходная остаточная намагниченность влияет на коррозионный износ — при превышении критической величины  $M_{RN}$  начинается существенный коррозионный износ стальных образцов в водной среде. Износ существенно влияет на жесткость тонкостенных элементов конструкции. Установленный факт

**Рис. 3.** Зависимость тангенциальной жесткости  $B_{cp}$  от исходной намагниченности  $M_{RN}$ .

имеет важное теоретическое и практическое значение, учитывая условия работы многих конструкций, изготовленных из металла.

#### ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена за счет государственного задания Федерального исследовательского центра “Казанский научный центр Российской академии наук”.

#### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Frumkin A.N.* // Phys. Chem. 1932. V. 44. № 7. P. 116.
2. *Колотыркин Я.М., Фрумкин А.Н.* // ДАН СССР. 1941. Т. 33. № 7/8. С. 446–450.
3. *Thompson E.A., Burleigh T.D.* // Corrosion Eng., Sci. and Technol., 2007. V. 42. No 3. P. 237–241. <https://doi.org/10.1179/174327807X214581>
4. *Якупов Н.М., Гиниятуллин Р.Р., Якупов С.Н.* // ДАН. 2012. Т. 446. № 6. С. 624–626. <https://doi.org/10.1134/S102833581203007X>
5. *Shu-hao Deng, Hao Lu & D.Y. Li* // Scientific Reports. 2020. V. 10. 3049. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-59420-6>
6. *Якупов Н.М., Гиниятуллин Р.Р., Якупов С.Н.* // Пробл. прочности. 2012. № 2. С. 76–84. <https://doi.org/10.1007/s11223-012-9369-2>
7. *Якупов Н.М., Якупов С.Н.* // ДАН. 2018. Т. 479. № 6. С. 626–628. <https://doi.org/10.1134/S1028335818040109>
8. *Yee Chin Tang, Davenport A.J.* // J. Electrochem. Soc. 2007. V. 154. No 7. P. 362–370. <https://doi.org/10.1149/1.2736662>
9. *Alimi F., Tlili M., Ben Amor M., et al.* // Surface Engineering and Applied Electrochemistry. 2009. V. 45. № 1. P. 56–62. <https://doi.org/10.3103/S1068375509010104>
10. *Якупов Н.М., Гиниятуллин Р.Р., Якупов С.Н.* // ДАН. 2012. Т. 443. № 2. С. 173–175. <https://doi.org/10.1134/S102833581203007X>
11. *Ильясова А.И.* // Нефтегазовое дело. 2019. № 2. С. 156–168.
12. *Якупов Н.М., Гиниятуллин Р.Р., Якупов С.Н.* // ДАН. 2015. Т. 463. № 6. С. 684–686. <https://doi.org/10.1134/S0012501615080072>
13. *Кузьмин М.И., Катрич Н.М., Гумеров Р.Р. и др.* // Нефтяное хозяйство. 2012. № 12. С. 66–68.
14. *Галимов Н.К., Якупов Н.М., Якупов С.Н.* // Известия Академии наук. Механика твердого тела. 2011. № 3. С. 58–66. <https://doi.org/10.3103/S0025654411030058>
15. *Галимов Н.К., Нуруллин Р.Г., Леонтьев А.А.* // Актуальные проблемы механики сплошной среды. ИММ КазНЦ РАН. Казань: Изд-во КГУ, 2004. С. 129–139.

## EFFECT OF RESIDUAL MAGNETIZATION CORROSION OF STEEL SAMPLES

S. N. Yakupov<sup>a</sup>, R. R. Kantyukov<sup>b</sup>, G. G. Gumarov<sup>a</sup>, N. M. Yakupov<sup>a</sup>

<sup>a</sup>*Institute of Mechanics and Mechanical Engineering of the Federal Research Center “Kazan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences”, Kazan, Russia*  
<sup>b</sup>*LLC “Scientific Research Institute of Natural Gases and Gas Technologies – Gazprom VNIIGAZ”, Moscow Region, Russia*

Presented by Academician of the RAS I.G. Goryacheva

The results of experimental studies of the effect of residual magnetization on the corrosion of steel samples in an aqueous medium are presented. Algorithms of research and processing of results are described. Three cases of initial magnetization of samples are considered. It is established that before the critical magnetization of steel samples, the corrosion wear in the aqueous medium decreases, and then begins to grow. The discovered effect is of great theoretical importance in studying the phenomenon of corrosion, taking into account the initial residual magnetization, as well as of great practical importance, in particular, in the design and operation of various structures and structures made of steel to protect them from corrosion destruction.

*Keywords:* corrosion wear, steel samples, aqueous medium, residual magnetization, experimental-theoretical method, tangential rigidity