

Исследование коррозионной стойкости металла вблизи сварных соединений при возведении зданий и сооружений из сборных конструкций

П.В. ЗГОННИК ✉, А.А. КУЖАЕВА, И.В. БЕРЛИНСКИЙ

Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

✉ piter_cat@mail.ru, zgonnik@spmi.ru

Ссылка для цитирования оригинальной статьи: Zgonnik, P.V.; Kuzhaeva, A.A.; Berlinskiy, I.V. The Study of Metal Corrosion Resistance near Weld Joints When Erecting Building and Structures Composed of Precast Structures. *Appl. Sci.* 2022, 12, 2518. <https://doi.org/10.3390/app12052518>

Аннотация: Коррозионные процессы наиболее распространенных марок стали в различных средах являются предметом многочисленных исследований. В то же время коррозия сварных соединений, скрытых в толще бетона, до сих пор не изучена. Авторы поставили перед собой задачу исследовать этот процесс. Для этого коррозионную стойкость нескольких металлов (марок Ст.3, У7 и их сварных соединений) изучали в стандартных тестовых растворах, имитирующих поровую жидкость бетона, содержащих карбонаты и гидрокарбонаты натрия, хлориды натрия. Получены данные по сравнительной коррозионной стойкости в солевых средах для указанных материалов. Показано, что скорость коррозии зависит от легкости проникновения CO_2 в раствор и, в меньшей степени, от микроструктуры металла. Характер поверхности металлических образцов и состав продуктов коррозии исследованы с помощью сканирующей электронной микроскопии и рентгеноструктурного анализа. Определены химические формы поверхностных соединений. Впервые наглядно показано, что натекающее при сварке электродное покрытие не всегда защищает сварной шов от коррозии, как считалось ранее. Скорость коррозии в этом случае такая же, как и на поверхности металлической пластины аналогичного состава. В заключение данной работы подчеркивается, что в случае щелочных и хлоридсодержащих сред защитное покрытие, падающее с электрода на сварной шов, не защищает его в достаточной степени от коррозии.

Ключевые слова: бетон; поровая жидкость; углекислый газ; растровая электронная микроскопия; рентгеноструктурный анализ; гравиметрия; кинетика потери массы; поверхностные дефекты; коррозионная стойкость; сварочный узел.

The Study of Metal Corrosion Resistance near Weld Joints When Erecting Building and Structures Composed of Precast Structures

Pyotr V. ZGONNIK ✉, Alyona A. KUZHAIEVA and Igor V. BERLINSKIY

Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia

✉ piter_cat@mail.ru, zgonnik@spmi.ru

Abstract: Corrosion processes of the most common steel grades in various environments are the subject of numerous studies. At the same time, the corrosion of welded joints hidden in concrete thickness has not yet been studied. The authors set themselves the task of investigating this process. For this purpose, the corrosion resistance of several metals (grade St.3, U7 and their weld joints) was studied in standard test solutions, simulating a concrete pore liquid, containing sodium carbonates and hydrocarbonates, and sodium chlorides. Data on comparative corrosion resistance in saline media for specified materials were obtained. It was shown that the corrosion rate depends on the ease of CO_2 ingress into the solution, and, to a lesser degree, on the metal microstructure. The surface character of the metal samples and the composition of corrosion products were investigated by scanning electron microscopy and an X-ray diffraction analysis. Chemical forms of surface compounds were determined. For the first time, it is clearly shown that the electrode coating flowing during welding does not always protect the weld from corrosion, as was previously believed. The corrosion rate, in this case, is just the same as at the surface of the metal plate of a similar composition. In the conclusion of this work, it is emphasized that in the case of alkaline and chloride-containing media, the protective coating falling from the electrode to the weld does not protect it sufficiently from corrosion.

Keywords: corrosion resistance; welding unit; concrete; concrete pore liquid; carbon dioxide; scanning electron microscopy; X-ray diffraction analysis; gravimetry; weight loss kinetics; surface defects.

* Перевод подготовлен для повышения интереса русскоязычной аудитории к данной статье.

1. Введение

Коррозия находится под постоянным вниманием исследователей [1, 2]. По средним оценкам, в настоящее время прямые потери металла от коррозии составляют около 4-5 % национального дохода промышленно развитых стран и не менее 10 % выплавленного металла, то есть 20 млн т в год. Инженеры-практики предпринимают максимум необходимых мер по защите от коррозии технологического оборудования и инженерных сооружений [3-6]. В статье [3] рассматривается коррозия подземных трубопроводов и предлагаются новые способы защиты от нее. В работе [4] изучается влияние сдвиговых напряжений на стенке технологических трубопроводов на интенсивность углекислотной коррозии. В статьях [5, 6] рассматривается химико-термическая обработка стали в низкоплавких растворах. Авторы статьи [7] сравнивают данные по коррозии в различных континентальных регионах Земли. Статья [8] посвящена ремонту сборного железобетонного жилого здания. Статья содержит важную информацию о процессах коррозии стальной арматуры в железобетоне. Монография [9] содержит обширный материал, также посвященный коррозии стальной арматуры. Авторы монографии [9] обобщают материалы по этой теме. Монография [10] посвящена коррозии бетона и содержит многочисленные примеры разрушения бетона в морской воде. На многочисленных примерах рассматривается взаимосвязь разрушения бетона и арматуры. Статья [11] приведена в качестве хорошей иллюстрации такого рода исследований.

В настоящее время продолжают исследования в области коррозии биметаллических соединений металлов, хорошим примером которых являются работы [12, 13]. Ряд работ связан с общими проблемами оценки механической прочности материалов, в том числе сварных швов [14, 15] и практическими методами контроля [16, 17]. Современная техника контроля коррозии также рассматривается в работах [18, 19]. Для описания процесса коррозии используются различные математические модели, в частности теория графов [20]. В работе [21] рассматривается защита от коррозии стальных труб в нефтехимическом производстве. Максаров и др. уделяли большое внимание повышению качества последующей обработки сварных изделий [22-25]. Работа [26] посвящена исследованиям коррозии в атмосфере.

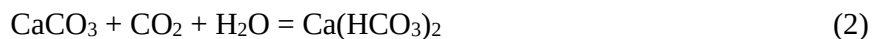
В настоящее время проводимые исследования в основном затрагивают явления атмосферной коррозии, хорошим примером тому служит обширная и скрупулезная работа в [7]. Как показывает опыт эксплуатации зданий из сборного железобетона, со временем в бетоне появляются различные трудноустраняемые дефекты, которые вызывают коррозию арматуры [8]. Существенной является проблема коррозии, когда корродирует та или иная металлическая деталь конструкции, недоступная для визуального и инструментального контроля. В частности, это относится к процессу сборки зданий и сооружений из сборного железобетона. Общий объем выпускаемой продукции на заводах-изготовителях находится в рамках производственного регламента и под строгим контролем заводских лабораторий. В подавляющем большинстве случаев на заводах изделия производятся методом автоклавирования, при котором схватывание бетона происходит при повышенной температуре (191°C) и давлении, превышающим атмосферное давление на 10 % [9]. Однако монтаж происходит на открытом воздухе, что делает невозможным строгий контроль качества герметизации швов между сопрягаемыми конструкциями, температуры высыхания цементного раствора или бетона [10, 11]. Это определяет сравнительно низкое качество бетона в швах. Для соединения двух элементов сборных конструкций обычно используется электросварка. Характерной особенностью электросварки является быстрый нагрев и охлаждение металла, что приводит к образованию микротрещин вблизи сварного шва. Зачастую такой нагрев осуществляется многократно. Кроме того, при сварке происходит изменение микроструктуры сопрягаемых металлов вблизи шва [12, 13]. Все вышеперечисленные факторы могут усиливать коррозию металла. В настоящее время уже разработаны эффективные методы контроля качества сварных соединений [13-23], а также дистанционного мониторинга эксплуатационных характеристик конструкций. В последнее время также ведутся интенсивные исследования, направленные на раннее обнаружение коррозии [18, 19]. Однако при сборке элементов из железобетона практически невозможно проконтролировать коррозию вблизи сварного шва после заделки стыка между бетонными изделиями цементным раствором [9].

Известно, что поровая жидкость бетона имеет рН около 12, что обеспечивает пассивацию арматурной стали и предотвращает ее коррозию в основной массе бетона. В процессе эксплуатации

влаги и CO_2 диффундируют внутрь бетона, при этом сильнощелочные растворы поровой жидкости бетона (с $\text{pH} \approx 11,3-12,5$) реагируют с CO_2 с образованием карбоната кальция [9]:



Дальнейшее развитие процесса приводит к образованию гидрокарбоната, смещению значения pH в сторону нейтральных растворов, достигая pH 9, что приводит к депассивации защитного оксидного покрытия на металле, создавая благоприятные условия для коррозии. Известно, что коррозия железа наиболее интенсивно протекает в диапазоне pH от 4 до 10 [27,28].



Коррозия арматуры приводит к образованию рыхлой массы гидратированных оксидов железа, объем которой превышает объем исходного металла-армирующего элемента.

Это, в свою очередь, приводит к механическому разрушению бетона [29].

Коррозии бетона посвящено большое количество исследований [30] (обзор приведен в работе [27]) и коррозии в насыщенных известковых растворах [31], однако они не касаются особенностей коррозии сварных швов и соединений арматуры при сборке железобетонных изделий. Целью данной работы является изучение коррозии металла вблизи сварного шва в стандартной тестовой среде с pH , близким к pH раствора в порах бетона.

2. Материалы

Перечень исследуемых конструкционных материалов и их состав приведены в табл. 1. Для приготовления солевых растворов использовали дистиллированную воду, хлорид натрия (химически чистый), карбонат натрия $\text{Na}_2\text{CO}_3 \times 10\text{H}_2\text{O}$ (чистый) и гидрокарбонат натрия (химически чистый). Состав солевых сред приведен в таблице 2.

Таблица 1

Состав исследуемых конструкционных материалов

Параметры управления	Класс материала		
	У7	Ст3	АНО-4
Компоненты	ГОСТ 1435–99	ГОСТ 380–2005	ГОСТ 5.1215–72
As	-	до 0,08	-
C	0,66–0,73	0,14–0,22	до 0,10
Cr	до 0,2	до 0,3	-
Cu	до 0,25	до 0,3	-
Fe	основа	основа	основа
Mn	0,17–0,33	0,4–0,65	0,6–0,8
Ni	до 0,25	до 0,3	-
N	-	до 0,008	-
P	до 0,03	до 0,04	до 0,035
S	до 0,028	до 0,05	до 0,035
Si	0,17–0,33	0,05–0,17	до 0,18

Таблица 2

Сводные данные по исследованию коррозионной стойкости конструкционных материалов

№ образца	Материал образца	Состав солевой среды, масс. %			Начальная скорость коррозии в первый день, $\text{г/см}^3 \text{ день} \cdot 10^4$
		Na_2CO_3	NaHCO_3	NaCl	
1	Ст3	4,2	33,6	3,5	3,4
		4,2	33,6	-	1,8
2	У7	4,2	33,6	3,5	1,2
		4,2	33,6	-	0,95
3	Сварной шов Ст3-Ст3	4,2	33,6	3,5	3,2
		4,2	33,6	-	2,13
4	Сварной шов Ст3-У7	4,2	33,6	3,5	3,42
		4,2	33,6	-	2,4
5	Сварной шов Ст3-Ст3	4,2	33,6	3,5	3,3
		4,2	33,6	-	2,10

3. Методы

Исследование коррозии конструкционных материалов в растворах проводилось как в статических условиях, так и при перемешивании. В экспериментах с перемешиванием периодическое перемешивание раствора проводилось один раз в сутки в течение 1 ч погружным перемешивающим устройством со скоростью ≈ 600 об/мин. Методика проведения эксперимента с перемешиванием подробно описана в наших предыдущих работах [32, 33]. Образцы листового металла сваривали электродами АНО-4 диаметром 2 мм² при сварочном токе 40 А. Затем поверхность механически очищали и вырезали пластины площадью 10 см². Полученные пластины площадью 10 см² помещали в раствор (табл. 2) и подвергали воздействию в течение 1-62 суток. pH модельного раствора составлял около 11,2-11,5 и незначительно изменялся с течением времени. Одновременно проводились две параллельные экспериментальные серии в динамическом режиме и три – в статическом. Мониторинг скорости коррозии осуществляли путем взвешивания на аналитических весах ВЛО-200 (Россия). Скорость реакции определяли по потере массы пластины за указанный промежуток времени:

$$v = \frac{\Delta m}{S \cdot \Delta \tau} \quad (3)$$

где: v – скорость коррозии; Δm – изменение массы образца; S – площадь образца; τ – время экспозиции.

Концентрацию железа в растворе определяли спектрофотометрическим методом [29]. Спектрофотометрическое определение железа (III) в растворе проводили с использованием сильно-окрашенных комплексов с тиоцианат-ионами. Фотометрический анализ проводили на приборе КФК-3 (Россия) при длине волны 480 нм (при которой наблюдается максимум поглощения тиоцианат-иона). Фотометрирование проводили по двухлучевой схеме с использованием раствора сравнения с длиной кюветы 2 см. Количественное определение проводили по заранее построенной калибровочной зависимости со стандартными растворами. Данный метод является очень чувствительным и позволяет уверенно определять концентрации ионов железа (III) до 10⁻⁵ моль/л.

Как показывают полученные данные (табл. 2), образцы со сварным швом оказались более подвержены коррозии, чем исходные образцы. Как и ожидалось, сталь марки Ст3 показала меньшую коррозионную стойкость по сравнению с У7, что хорошо видно по скорости коррозии (табл. 2). Среди сварных соединений более высокую коррозионную стойкость продемонстрировало соединение двух пластин из стали марки Ст3. Основной причиной наблюдаемой особенности, вероятно, являются дефекты в структуре металла, возникшие в результате теплового удара при электродуговой сварке.

Химический и фазовый состав поверхностных соединений, образующихся в процессе коррозии, изучался методом рентгеновского дифракционного фазового анализа.

Измерения проводились на порошковом рентгеновском дифрактометре D2 Phaser (Брюкер, Германия) с использованием излучения CoKa. Количественный анализ рентгенограмм проводился методом полнопрофильного уточнения (метод Ритвельда) с помощью программы Topas 5.0. Для каждого из образцов было получено хорошее соответствие без введения в модели аморфных фаз, хотя перекрытие широких (из-за малого размера кристаллитов и микродеформации) отражений могло создать впечатление о частичной аморфизации.

Элементный состав поверхности был определен с помощью энергодисперсионного рентгеновского микроанализа. Микрорельеф поверхности изучен с помощью сканирующей электронной микроскопии.

Электронно-микроскопические исследования проводились на сканирующем электронном микроскопе Supra 55 VP фирмы Карл Цейс (Германия). Образцы для электронно-микроскопических исследований покрывались платиной на установке высоковакуумного напыления Q150T компании Кворум Текнолоджис (Великобритания). Энергодисперсионный рентгеновский микроанализ проводили на приставке EDX 80 фирмы Оксфорд Инструментс Нано Анализ (Великобритания) к растровому электронному микроскопу Supra 55 VP, Карл Цейс (Германия).

4. Результаты и обсуждение

Как показано на рис. 1, существенный вклад в механизм коррозии внесло перемешивание. При статическом воздействии в стандартном растворе (кривая 1) реакция протекала под диффузионным контролем, а при насыщении поверхностного слоя вблизи металла происходило замедление процесса.

Как и следовало ожидать, снижение скорости коррозии в течение первых 20 дней, по-видимому, было связано с постепенным экранированием поверхности металла гидратированными оксидами и другими продуктами коррозии. Вероятно, перемешивание снимало диффузионные ограничения на скорость реакции [30, 31]. Мы предполагаем, что увеличение скорости коррозии через 40 дней было связано с кинетическими особенностями. С каждым последующим перемешиванием происходило насыщение солевого раствора кислородом и CO_2 до постоянных значений концентрации. Аналогичный характер зависимости скорости коррозии от времени экспозиции для образца со сварным швом (рис. 2) показал, что микрорельеф металла и вероятная стандартная разность электрических потенциалов двух разных сплавов также не являются причиной наблюдаемой особенности.

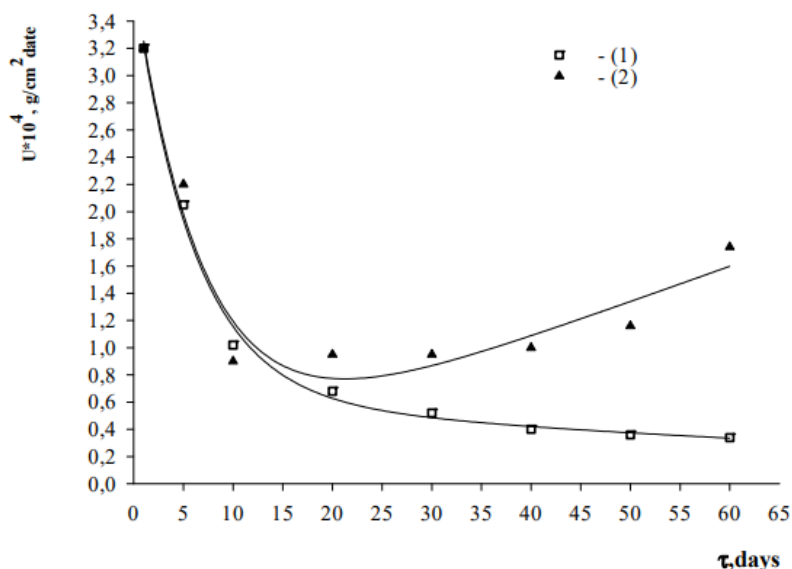


Рис. 1. Изменение скорости коррозии Ст3 (образец № 1) в растворе, содержащем NaCl. 1 – в статических условиях; 2 – при перемешивании

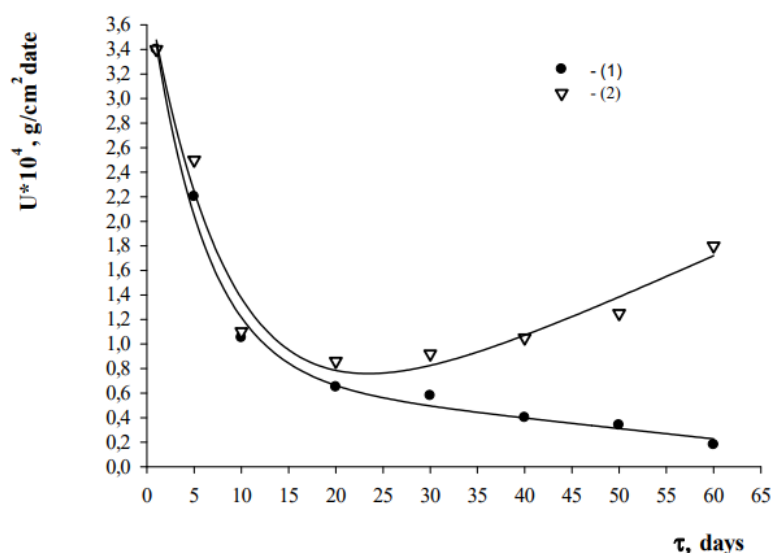
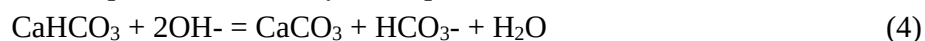


Рис. 2. Изменение скорости коррозии пластины со сварным швом (образец № 4) в растворе, содержащем NaCl. 1 – в статических условиях; 2 – при перемешивании

Вышеупомянутые факторы влияли на общую скорость растворения, но это влияние было неизменным во времени. Можно осторожно предположить, что в данном случае имели место кинетические трудности, вызванные протеканием следующей реакции:



При этом, скорее всего, произойдет пассивация поверхности металла за счет осаждения образовавшегося карбоната кальция. Постепенно она прекратится, так как стандартный тестовый

раствор будет поглощать CO_2 из воздуха в количествах, достаточных для реакции, описываемой уравнением (2).

Другой возможной причиной резкого изменения скорости реакции при прерывистом перемешивании через 20 дней было развитие пористости на поверхности образца по мере окисления металла. В рамках этих представлений легко объяснить существенную разницу в динамике изменения скорости коррозии во времени для случаев с периодическим перемешиванием и без него. Именно перемешивание способствовало насыщению пор «свежими» порциями раствора. Существующие методы порометрии требуют обезвоживания поверхности. К сожалению, высушивание образца приводило к очень значительным изменениям в химической структуре гидратированных оксидов на поверхности металла. Полное обезвоживание поверхностных соединений неизбежно приводит не только к изменению размера пор, но и к полному изменению рельефа поверхности. Эти обстоятельства привели к тому, что корректно учесть изменение пористой структуры продуктов коррозии в среде раствора оказалось невозможным. В силу этого не удалось также дать адекватную математическую интерпретацию диффузии в рассматриваемом случае.

Не исключено, что отмеченная особенность процесса при периодическом перемешивании связана с переходом иона железа в раствор и дальнейшим завершением его окисления. Однако данные по содержанию железа в растворе (рис. 3 и 4) не позволяют утверждать это с уверенностью.

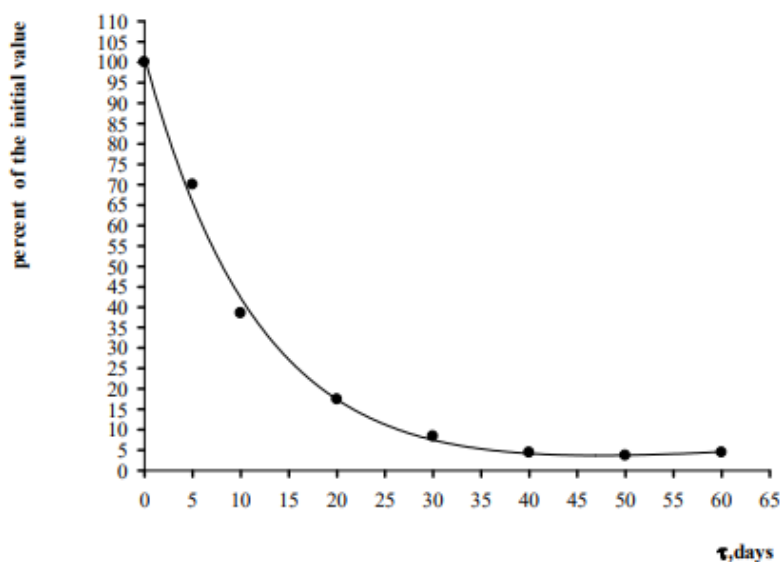


Рис. 3. История скорости коррозии стали марки Ст3 (образец № 1) в растворе, содержащем NaCl, определенная по наличию железа в солевом растворе без перемешивания

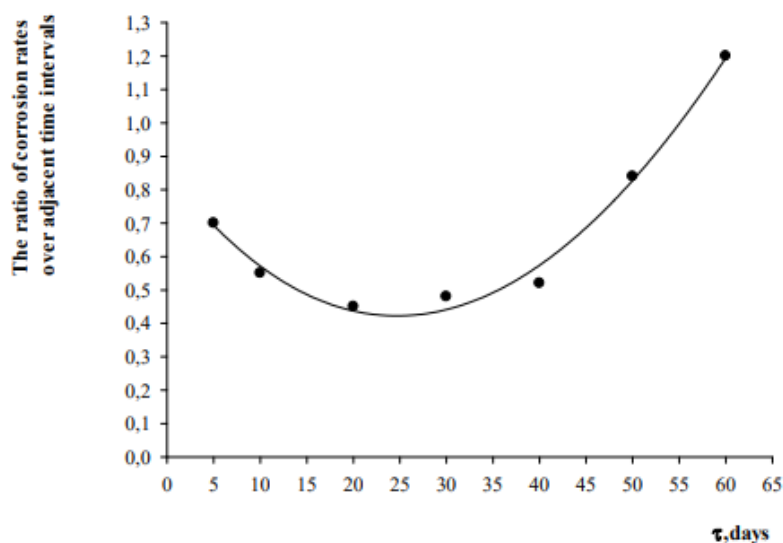


Рис. 4. История скорости коррозии стали марки Ст3 (образец № 1) в NaCl-содержащем растворе, определяемая по наличию железа в солевом растворе при перемешивании

Кстати, известно, что оксиды железа имеют нестехиометрическую структуру, и степень коррозии во времени зависит от остаточной пористости (капиллярности) FeO [34]. До недавнего времени публиковались новые сведения о влиянии FeCO₃ на процесс коррозии железа [35, 36].

Типичные результаты элементного анализа поверхностного слоя представлены в табл. 3. Как следует из данных табл. 3, основными поверхностными соединениями являются оксиды железа (III). Относительно высокое содержание углерода, вероятно, связано с присутствием карбонатов.

Таблица 3

Сводные данные по исследованию элементного состава поверхности образцов, сваренных между собой сталью Ст3 и сталью У7 после выдержки в течение 60 суток, по данным энергодисперсионного рентгеновского микроанализа

Спектр No	Содержание на поверхности материала образца, мас. %							Total
	B Stat.	C	O	Na	S	Cl	Fe	
1	Y	6,95	34,19	0,14	0,49	0,31	57,93	100,00
2	Y	8,14	31,65	0,13	0,56	0,27	59,24	100,00
3	Y	7,44	35,01	0,00	0,50	0,31	56,74	100,00
4	Y	8,62	34,13	0,20	0,46	0,27	56,32	100,00
5	Y	5,15	32,87	0,21	0,98	0,47	60,32	100,00
6	Y	5,44	34,00	0,15	0,86	0,25	59,30	100,00
7	Y	5,15	33,58	0,08	0,30	0,26	60,63	100,00
8	Y	7,74	31,19	0,13	0,36	0,22	60,36	100,00
9	Y	7,43	31,63	0,15	0,37	0,22	60,21	100,00
10	Y	6,04	31,06	0,15	0,70	0,41	61,65	100,00
Среднее		6,81	32,93	0,13	0,56	0,30	59,27	100,00
Стандартное отклонение		1,28	1,44	0,06	0,22	0,08	1,75	
макс.		8,62	35,01	0,21	0,98	0,47	61,65	
мин.		5,15	31,06	0,00	0,30	0,22	56,32	

Электронно-микроскопическое исследование поверхности образцов после 60 дней экспозиции показало наличие на их поверхности рыхлой неупорядоченной структуры с различными размерами кристаллитов (рис. 5-8). На микрофотографиях можно было наблюдать сферулиты карбоната кальция, линейные структуры соединений железа (III) (см. также табл. 4) и (в случае сварного соединения) углубления, связанные с выделением газа, предположительно, в процессе электродуговой сварки. Однако в структуре поверхностного слоя образцов Ст3, У7 и, особенно, сварных соединений наблюдались определенные различия.

Фазовый состав ржавчины исследуемых образцов после 60-суточной экспозиции представлен в табл. 4. Как видно, продукты коррозии Ст3, У7 и сварного шва содержали, в целом, оксиды-гидроксиды, причем некоторые качественные и количественные различия были связаны с составом исходных металлов. Присутствие альбита и, возможно, следов мусковита было связано с покрытием сварочного электрода. Количественные определения не следует считать слишком точными, поскольку основные фазы были плохо кристаллизованы. Что касается кристалличности дефектных фаз, то можно было ожидать, что именно их дефектность (дефицит кислорода, вакансии, напряжения и т.д.) препятствует образованию крупных кристаллов. Как было показано выше (табл. 2), присутствие этих компонентов не оказывало решающего влияния на процесс коррозии. Типичные дифрактограммы приведены на рис. 9-11.

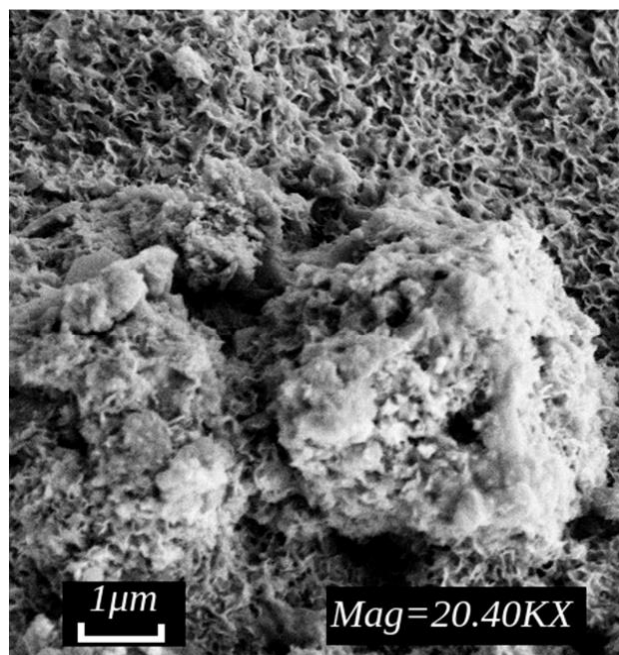


Рис. 5. Электронная микрофотография поверхности стали Ст3 после 60 дней воздействия. Линейная структура – $\text{FeO}(\text{OH})$; объемная структура – CaCO_3 и его сокристаллизованные компоненты

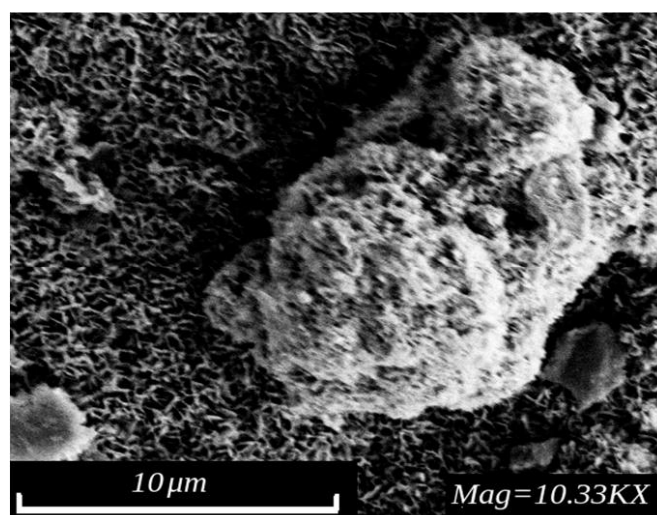


Рис. 6. Электронная микрофотография поверхности стали Ст3 после 60 дней воздействия. Линейная структура – $\text{FeO}(\text{OH})$; объемная структура – CaCO_3 и его сокристаллизованные компоненты

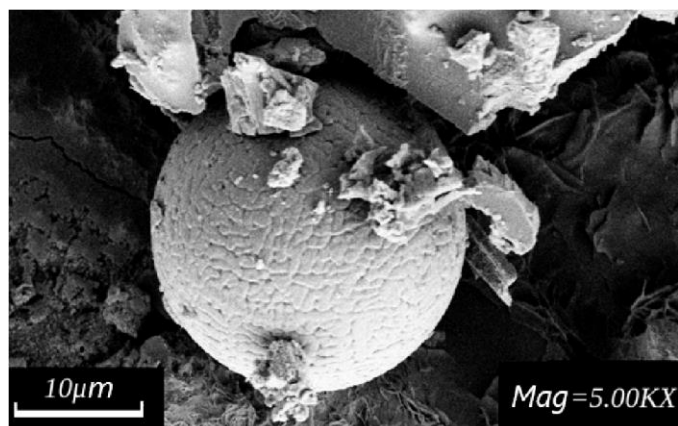


Рис. 7. Электронная микрофотография сварного шва между сталью Ст3 и сталью У7 (поверхность после 60 дней выдержки). Структура «осиное гнездо» – сферуллит карбоната кальция, угловатая пластинчатая структура – $\text{FeO}(\text{OH})$

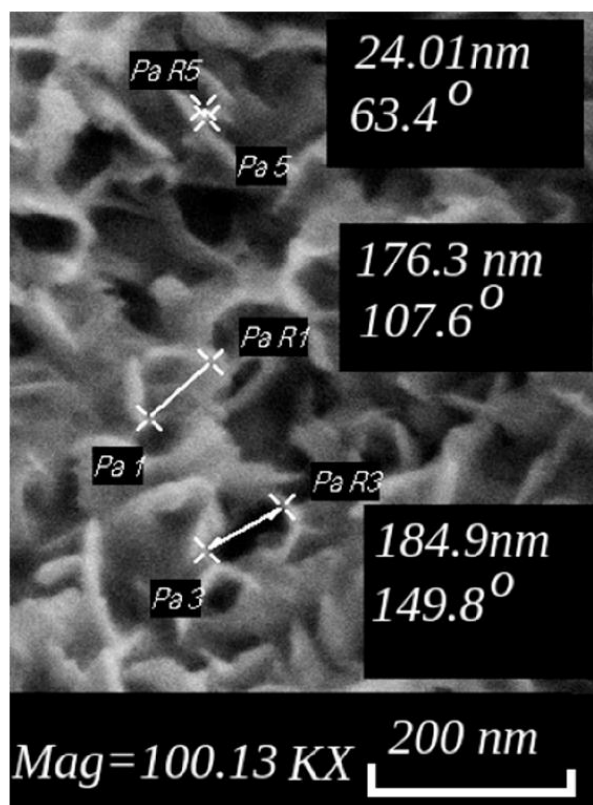


Рис. 8. Электронная микрофотография поверхности стали Ст3 после 60 дней воздействия с измерением структурных элементов

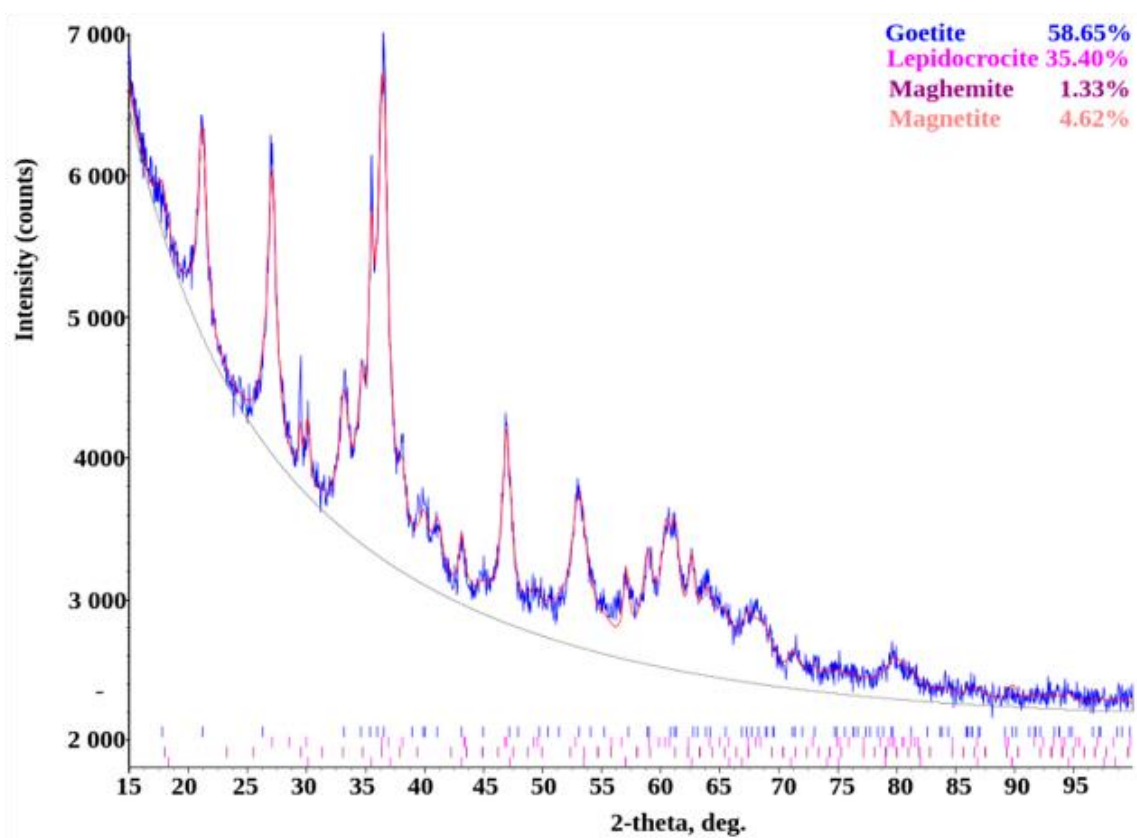


Рис. 9. Дифрактограмма поверхностных соединений Ст3. Вертикальные полосы в нижней части графика отмечают положения пиков идентифицированных фаз

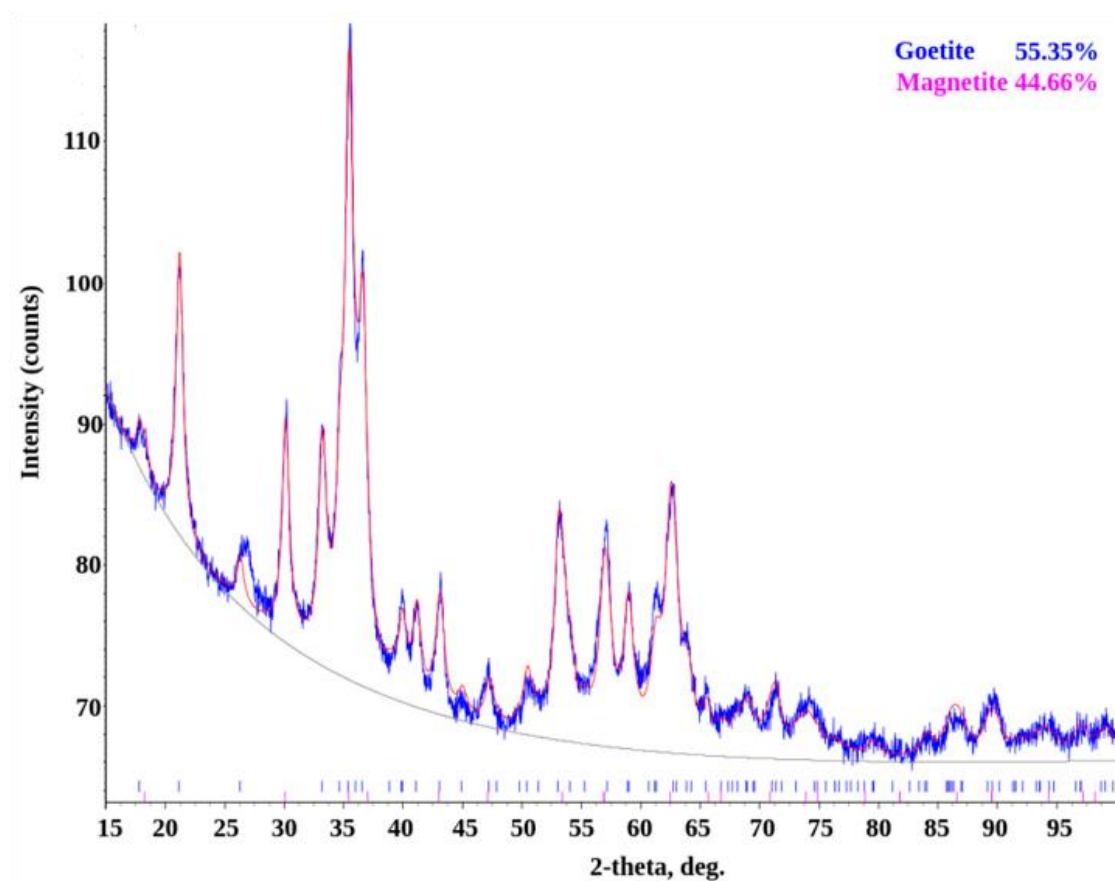


Рис. 10. Дифрактограмма поверхностных соединений сварного соединения У7.
Вертикальными полосами в нижней части графика отмечены положения пиков идентифицированных фаз

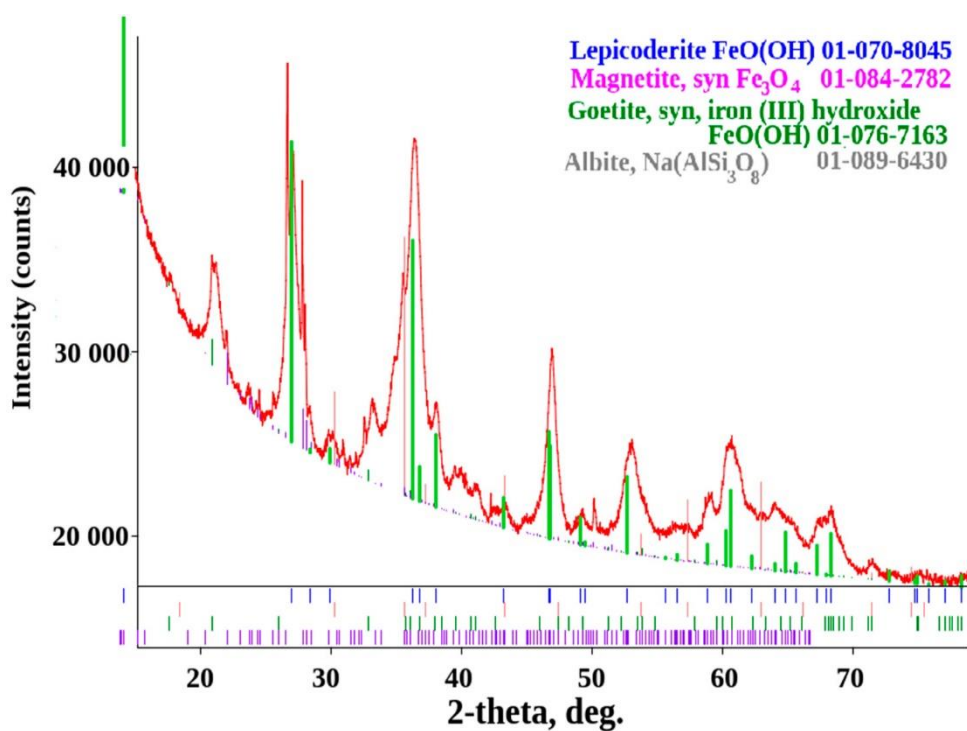


Рис. 11. Дифрактограмма поверхностных соединений сварного соединения Ст3-У7.
Вертикальными полосами в нижней части графика отмечены положения пиков идентифицированных фаз

Таблица 4

Сводные данные по исследованию фазового состава образцов после выдержки в течение 60 суток по данным рентгенофазового исследования

Фаза			Содержится на поверхности материала образца, %		
№	Наименование	Формула	Ст3	У7	Сварной шов Ст3-У7
1	Гётит, окись-гидроокись железа	$\text{FeO}(\text{OH})$	58,65	55,35	44,51
2	Лепидосерит	$\text{FeO}(\text{OH})$	35,40	-	38,29
4	Магнетит	Fe_3O_4	4,62	44,65	4,16
5	Магемит	Fe_3O_4	1,33	-	-
6	Альбит	$\text{Na}[\text{AlSi}_3\text{O}_8]$	-	-	13,03
7	Мувсквит	$\text{KAl}_2[\text{AlSi}_3\text{O}_{10}](\text{OH})_2$	-	-	следы

5. Выводы

В данной работе было показано, что процесс коррозии в модельных щелочных и щелочно-хлоридных средах протекает по сложному механизму. Преобладание кинетического или диффузионного контроля традиционно определялось наличием или отсутствием перемешивания. Однако, вероятно, это был не единственный фактор. На скорость коррозионного процесса влияли также рельеф поверхности, особенности существования поверхностных фаз переменного состава, а также условия равновесного существования поверхностных соединений. Ситуация осложнялась тем, что прямой порометрический анализ поверхности в таких условиях исследования был сопряжен со значительными трудностями, хотя и был возможен.

Долгое время считалось, что электродное покрытие, расплавляясь при электросварке, стекает на поверхность металла и защищает шов от коррозии. Однако, как следует из наших результатов, это полезное явление было характерно не для всех случаев. В частности, это касалось щелочных и (или) хлоридсодержащих сред. Одним из решений проблемы является обеспечение более надежной антикоррозионной защиты сращивания арматуры для железобетонных изделий, а также повышение качества бетонного уплотнения стыков блоков. В отдельных случаях следует применять дополнительные изоляционные материалы на металлах, как это предлагается в работе [37]. При этом необходимо учитывать тот факт, что гидрофобные покрытия ослабляют адгезию бетона к металлу. Данная работа была только началом изучения коррозии сварных швов в толще бетона. Мы рассчитываем продолжить эти исследования в дальнейшем. В настоящее время разрабатываются и применяются бетоны на основе многокомпонентных вяжущих [38, 39], которые могут приводить к изменению pH жидкой фазы в структуре бетона и, соответственно, влиять на коррозию сварных соединений арматуры [40]. Это требует дальнейшего углубленного изучения процессов коррозии сварных соединений в толще бетона.

Вклад авторов: концептуализация, П.В.З. и А.А.К.; методология, П.В.З.; валидация, П.В.З. и А.А.К.; формальный анализ, П.В.З.; исследование, П.В.З. и А.А.К., графическое оформление, И.В.Б. и П.В.З.; написание – подготовка первоначального проекта, П.В.З.; написание – рецензирование и редактирование, П.В.З. и А.А.К.; визуализация, И.В.Б.; руководство, П.В.З. и А.А.К.; администрирование проекта, А.А.К.; получение финансирования – централизованно через систему распределения университета. Все авторы прочитали и согласились с опубликованной версией рукописи.

Финансирование: исследование выполнено за счет средств субсидии на выполнение государственного задания в сфере научной деятельности на 2021 г. № ФСРВ-2020-0014 (Россия).

Заявление о доступности данных: Все данные, приведенные в статье, являются результатами оригинальных исследований, проведенных авторами, и не взяты из общедоступных баз данных или архивов.

Благодарности: авторы выражают благодарность доценту Ивану Ивановичу Иванову, бывшему сотруднику кафедры общей химии Санкт-Петербургского горного университета, за участие в обсуждении работы и ценные советы. Авторы также признательны сотруднику Ресурсного центра СПбГУ «Рентгенодифракционные методы исследования» Игорю Александровичу Касаткину за советы по интерпретации результатов.

Конфликты интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ЛІТЕРАТУРА

1. Balasubramaniam, R. On the corrosion resistance of the Delhi iron pillar. *Corros. Sci.* 2000, 42, 2103–2129. [http://doi.org/10.1016/S0010-938X\(00\)00046-9](http://doi.org/10.1016/S0010-938X(00)00046-9)
2. Dwivedi, D.; Mata, J.P.; Salvemini, F.; Rowles, M.R.; Becker, T.; Lepková, K. Uncovering the superior corrosion resistance of iron made via ancient Indian iron-making practice. *Sci. Rep.* 2021, 11, 4221. <http://doi.org/10.1038/s41598-021-81918-w>, <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/33608578>
3. Goldobina, L.A.; Orlov, P.S. Analysis of the corrosion destruction causes in underground pipelines and new solutions for increasing corrosion steel's resistance. *J. Min. Inst.* 2016, 219, 459. <http://doi.org/10.18454/pmi.2016.3.459>
4. Ponomarev, A.I.; Yusupov, A.D. Effect of shear stress on the wall of technological pipelines at a gas condensate field on the intensity of carbon dioxide corrosion. *J. Min. Inst.* 2020, 244, 439–447. <http://doi.org/10.31897/pmi.2020.4.6>
5. Sivenkov, A.V. Chemical-thermal treatment of steel in an environment of low-melting solutions. *J. Min. Inst.* 2014, 209, 244–249.
6. Dzhabbarov, S.N.; Pryakhin, E.I. Using the Diffusion Saturation Technology for the Surface of Different Steel Products from Melts of Low-Melting Metals. *Key Eng. Mater.* 2020, 836, 36–40. <http://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.836.36>
7. Panchenko, Y.M.; Marshakov, A.I.; Nikolaeva, L.A.; Igonin, T.N. Estimating the First-year Corrosion Losses of Structural Metals for Continental Regions of the World. *Siv. Eng. J.* 2020, 6, 1503–1518. <http://doi.org/10.28991/cej-2020-03091563>
8. Shannag, M.J.; Higazy, M. Strengthening and Repair of a Precast Reinforced Concrete Residential Building. *Civ. Eng. J.* 2020, 12, 2457–2473. <http://doi.org/10.28991/cej-2020-03091630>
9. Dvorkin, L.I. (Ed.) *Betonovedenie (Concrete study). Monograph. In Osnovnye Raznovidnosti Betonov (Major Concrete Varieties); Infra-Inzheneriya Publ.: Vologda, Russia, 2021; Volume 2, pp. 152–608. (In Russian)*
10. Moskvina, V.M.; Ivanov, F.M.; Alekseev, S.N.; Guzev, E.A. *Korroziya Betona i Zhelezobetona, Metody Ikh Zashchity (Corrosion of Concrete and Reinforced Concrete, the Methods of Their Protection); Stroyizdat Publ.: Moscow, Russia, 1980; pp. 533–536. (In Russian)*
11. Belentsov, Y.A.; Smirnova, O.M.; Kazanskaya, L.F. Improvement of competitive edge of precast reinforced concrete by increasing the reliability level and quality control. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 2019, 666, 012037. <http://doi.org/10.1088/1757-899X/666/1/012037>
12. Piskarev, P.Y.; Gervash, A.A.; Vologzhanina, S.A.; Ermakov, B.S.; Kudryavceva, A.M. Study of the Bimetallic Joint CuCrZr/316L(N). *Mater. Sci. Forum* 2021, 1040, 8–14. <http://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.1040.8>
13. Sharapova, D.M.; Sharapov, M.G.; Sharonov, N.I. Structure Formation of Butt Joints Made of Aluminum Alloys to Ensure the Quality of Mechanical Engineering Products. *Mater. Sci. Forum* 2021, 1022, 119–126. <http://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.1022.119>
14. Nosov, V.V.; Grigoriev, E.V.; Peretyatko, S.A.; Artyushchenko, A.P. Nanotechnologies of Strength Control of Materials. *Mater. Sci. Forum* 2021, 1040, 101–108. <http://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.1040.101>
15. Nosov, V.V.; Zelenskii, N.A. Estimating the strength of welded hull elements of a submersible based on the micromechanical model of temporal dependences of acoustic-emission parameters. *Mater. Sci. Forum* 2017, 53, 89–95. <http://doi.org/10.1134/S1061830917020036>
16. Nosov, V.V. On the principles of optimizing the technologies of acoustic-emission strength control of industrial objects. *Mater. Sci. Forum Russ.* 2016, 52, 386–399. <http://doi.org/10.1134/S1061830916070068>
17. Pecherskaya, E.A.; Golubkov, P.E.; Artamonov, D.V.; Pecherskiy, A.V.; Mel'nikov, O.A.; Shepeleva, A.E. The Model of the Relationship of the of Micro-arc Oxidation Process Parameters Based on Graph Theory. In *Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies (MWENT-2020); Publishing House of the National Research University Higher School of Economics: Moscow, Russia, 2020. http://doi.org/10.1109/MWENT47943.2020.9067487*
18. Liu, Z.; Jia, R.; Chen, F.; Yan, G.; Tian, W.; Zhang, J.; Zhang, J. Electrochemical process of early-stage corrosion detection based on N-doped carbon dots with superior Fe³⁺ responsiveness. *J. Colloid Interface Sci.* 2021, 606 Pt 1, 567–576. <http://doi.org/10.1016/j.jcis.2021.08.058>, <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/34411829>
19. Potapov, I.A.; Kondrat'ev, A.V. Remote monitoring of pipelines using tele communications technology. *J. Min. Inst.* 2014, 209, 138–143.
20. Issa, B.; Bazhin, V.Y.; Telyakov, N.M.; Telyakov, A. Increasing of corrosion resistance of welded radiant and convection coiled-pipes in tubular furnaces at kinef crude oil refinery, Technical Sessions Proceedings. In *Proceedings of the 6th Youth Forum of the World Petroleum Council—Future Leaders Forum, Saint Petersburg, Russia, 23–28 June 2019; pp. 243–249. http://doi.org/10.1201/9780429327070-33*
21. Syzrantseva, K.V.; Syzrantsev, V.N.; Dvoynikov, M.V. The application of finite element analysis during development of the Integral Strain Gauges calibration method for the study of the welded construction. *Mater. Sci. Forum* 2017, 177, 12133. <http://doi.org/10.1088/1757-899X/177/1/012133>
22. Maksarov, V.V.; Vasin, S.A.; Efimov, A.E. Dynamic Stabilization in Reaming Internal Surfaces of Welded Components. *Russ. Eng. Res.* 2021, 41, 939–943. <http://doi.org/10.3103/S1068798X2110018X>
23. Maksarov, V.V.; Efimov, A.E.; Olt, J.J. Improving the quality of hole processing in welded products made of dissimilar materials with a new boring tool. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2021, 118, 1027–1042. <http://doi.org/10.1007/s00170-021-07975-7>
24. Maksarov, V.; Khalimonenko, A.; Olt, J. Managing the process of machining on machines on the basis of dynamic modelling for a technological system. *J. Silic. Based Compos. Mater.* 2017, 69, 66–71. <http://doi.org/10.14382/epitoanyag-jsbcm.2017.12>
25. Maksarov, V.V.; Vasin, S.A.; Efimov, A.E.; Keksins, A.I. Influence of the Microstructure on the Damping Properties of Stress-Strain Tool Systems in the Processing of Welded Structures from Dissimilar Steels. *Mater. Sci. Forum* 2021, 1022, 7–16. <http://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.1022.7>
26. Popova, K.; Prošek, T. Corrosion Monitoring in Atmospheric Conditions: A Review. *Metals* 2022, 12, 171. <http://doi.org/10.3390/met12020171>

27. Khaled, K.F.; Abdel-Rehim, S.S. Electrochemical investigation of corrosion and corrosion inhibition of iron in hydrochloric acid solutions. *Arab. J. Chem.* 2011, 4, 397–402. <http://doi.org/10.1016/j.arabjc.2010.07.006>
28. Fan, B.; Souriou, D.; Bosc, F.; Guilbert, D.; Kadkhodazadeh, S.; Ihamouten, A.; Fauchard, C.; Dérobert, X. Dielectric relaxation of iron corrosion products in limestone under saline environment. In *Proceedings of the NSG2021 2nd Conference on Geophysics for Infrastructure Planning, Monitoring and BIM*, Bordeaux, France, 9 August–2 September 2021; European Association of Geoscientists & Engineers: EAGE Publications BV: Houten, The Netherlands, 2021; pp. 1–5. <http://doi.org/10.3997/2214-4609.202120047>
29. Molodin, V.V.; Anufrieva, A.E.; Leonovich, S.N. An impact of concrete surfaces carbonization on their cohesion with newly-laid concrete. *Nauka Tekhnika Sci. Eng.* 2021, 20, 320–328. (In Russian)
30. Merzlyakov, M.Y.; Hernandez, J.R.R.; Zhapkhodayev, C.A. Development of cement slurries for oil and gas wells lining in aggressive environment. In *Youth Technical Sessions Proceedings*; Taylor and Francis Group Publishers: London, UK, 2019; pp. 387–393. <http://doi.org/10.1201/9780429327070-54>
31. Kreshkov, A.P. *Osnovy Analiticheskoy Khimii (The Fundamentals of Analytical Chemistry)*, 3rd ed.; Cengage Learning: Moscow, Russia, 1971; Volume 2, pp. 424–425. (In Russian)
32. Ivanov, I.I.; Dubovikov, O.A.; Grigor'Eva, L.V.; Kuzhaeva, A.A.; Zgonnik, P.V. Study of stability of constructional materials in melts containing lower titanium chlorides. *Russ. J. Appl. Chem.* 2011, 84, 1529–1531. <http://doi.org/10.1134/S1070427211090126>
33. Ivanov, I.I.; Dubovikov, O.A.; Grigor'Eva, L.V.; Kuzhaeva, A.A.; Zgonnik, P.V. Study of the corrosion stability of some materials in the titanium (II) and (III) chloride melts. *J. Min. Inst.* 2013, 202, 220–225.
34. Noubactep, C. Should the term 0metallic iron0 appear in the title of a research paper. *Chemosphere* 2022, 287 Pt 4, 132–134. <http://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132314>, <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/34600924>
35. Faisal, M.; Roberts, K.P. Mechanistic modeling of erosion–corrosion for carbon steel. In *Trends in Oil and Gas Corrosion Research and Technologies*; El-Sherik, A.M., Ed.; Elsevier & Woodhead Publishing: Cambridge, UK, 2017; pp. 756–759. <http://doi.org/10.1016/B978-0-08-101105-8.00031-0>
36. Hernandez, S.; Nassef, A.S. Erosion–corrosion. In *Trends in Oil and Gas Corrosion Research and Technologies*; El-Sherik, A.M., Ed.; Elsevier & Woodhead Publishing: Cambridge, UK, 2017; pp. 341–352. <http://doi.org/10.1016/B978-0-08-101105-8.00014-0>
37. Qin, Y.; Li, Y.; Zhang, D.; Zhu, X. Stability and corrosion property of oil-infused hydrophobic silica nanoparticle coating. *Surf. Eng.* 2021, 37, 206–211. <http://doi.org/10.1080/02670844.2019.1697040>
38. Smirnova, O.; Kazanskaya, L.; Koplík, J.; Tan, H.; Gu, X. Concrete Based on Clinker-Free Cement: Selecting the Functional Unit for Environmental Assessment. *Sustainability* 2021, 13, 135. <http://doi.org/10.3390/su13010135>
39. Smirnova, O.M. Low-Clinker Cements with LowWater Demand. *J. Mater. Civ. Eng.* 2020, 32, 06020008. [http://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0003241](http://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003241)
40. Yakovlev, G.; Polyanskikh, I.; Gordina, A.; Pudov, I.; Černý, V.; Gumenyuk, A.; Smirnova, O. Influence of Sulphate Attack on Properties of Modified Cement Composites. *Appl. Sci.* 2021, 11, 8509. <http://doi.org/10.3390/app11188509>