DOI: 10.25283/2587-9707-2024-4-21-30 УДК 620.193, 620.193.8

ГАЛЬВАНИЧЕСКИЕ ПОКРЫТИЯ СТАЛИ МАРКИ СТ3 ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЕЕ КОРРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ В УСЛОВИЯХ ПГЗРО

Е. С. Абрамова, С. В. Клещева, О. В. Трипачев, А. В. Кузов, А. В. Сафонов

ФГБУН Институт физической химии и электрохимии им. А. Н. Фрумкина РАН, Москва, Россия

Статья поступила в редакцию 25 июня 2024 г.

В статье представлены результаты исследования антикоррозионных характеристик металлических покрытий стали, выполненных гальваническим методом, на основе кадмия, цинка, меди и никеля в модельных условиях участка «Енисейский». Высокая устойчивость отмечена для образцов, содержащих Cd *и* Zn. *Низкие показатели выявлены для медного композиционного покрытия, которое совместно с углеродистой сталью образовало гальваническую пару, реализуемую внутри его микропор, что приводит к ускорению коррозии данных образцов.*

Ключевые слова: *радиоактивные отходы, металлические контейнеры, гальванический метод, антикоррозионные свойства, микробная коррозия.*

Введение

Размещение радиоактивных отходов (РАО) в геологических формациях является наиболее безопасной стратегией обращения с ними. Основой российской концепции захоронения РАО высокого уровня активности (ВАО) является их размещение в виде стеклянной матрицы в стальных контейнерах в скальном массиве на глубине 450—500 метров [1]—[2]. Контакт материалов контейнеров и стеклянных матриц с влагой является наиболее важным негативным фактором, способным вызвать их ускоренную деградацию и вынос радионуклидов, поэтому в качестве основных барьеров безопасности планируется использование бентонитовых глин, обладающих высокими сорбционными и противофильтрационными свойствами [3], [4]. Оценка долговременной надежности барьерных материалов является важной задачей для реализации проекта по сооружению ПГЗРО [5]. Важным этапом работ по данному направлению является изучение эволюции материалов контейнеров при их контакте с геологической средой. В российской концепции захоронения в качестве основного материала для изготовления такого контейнера рассматривается углеродистая сталь марки Ст3, которая обладает рядом преимуществ, среди которых пластичность и невысокая стоимость. Однако этот тип стали имеет низкую химическую устойчивость в водных средах [6], поэтому разработка антикоррозионных покрытий для увеличения срока службы контейнера является актуальной задачей.

Одним из перспективных способов создания таких покрытий является нанесение инертных металлов и их соединений гальваническим методом, поскольку он не требует высоких температур

и дает возможность инструментального контроля толщины защитного слоя [7]. В сравнении с другими данная технология обладает рядом важных достоинств [8]: равномерная толщина покрытия, нанесение его на конструкции любой формы, возможность получения композиционных материалов с улучшенными характеристиками, а также экономичность. Основными требованиями для гальванических покрытий являются высокие твердость, стойкость к механическому повреждению и стабильность в различных физико-химических условиях, отсутствие возможных редокс-пар с элементами стали, радиационная и химическая стойкость. Кроме того, немаловажным фактором является микробиологическая стабильность материалов покрытий, поскольку этот вид коррозии может значительно ускорить процесс разрушения стали [9].

Для антикоррозионных защитных покрытий чаще всего используют гальванические покрытия на основе кадмия, меди, цинка и никеля.

Кадмий обладает уникальными биоцидными свойствами, высокой стойкостью и твердостью [10].

Никель используется как в качестве компонента нержавеющих сталей, так и виде монометаллического катодного гальванического покрытия [11]. В сравнении с кадмием и медью его коррозионная стойкость несколько ниже, однако он легко наносится на поверхность стали как электрохимически, так и химически [12].

Покрытие стальной подложки слоем меди, нанесенным гальванически либо путем напыления, широко используется, в частности, уже в коммерциализованных технологиях, где толщина медного слоя достигает несколько миллиметров [13]. Благодаря значительной коррозионной стойкости медь является одним из самых перспективных металлов используемых для этих целей в условиях почвенной коррозии, однако не лишена и некоторых недостатков. Ими остаются довольно высокая стоимость, ускоренная коррозия при наличии в среде сульфид-аниона, ее мягкость. К тому же при сквозном механическом повреждении медного (как и любого катодного) покрытия образуется гальваническая пара, многократно ускоряющая деградацию стали [14].

Целью данной работы была оценка коррозионной устойчивости стали марки Ст3 с различными металлическими покрытиями (на основе Cu, Ni, Cd, Zn), нанесенными гальваническим методом в геохимических условиях, моделирующих условия предполагаемого участка размещения ПГЗРО.

Материалы и методы

В ходе экспериментов исследовали устойчивость 5 металлических покрытий на основе кадмия, никеля, цинка и меди. Они, а также их маркировки, используемые в работе, приведены ниже:

1) кадмий матовый (Cd);
2) цинк блестящий (Zn);
3) медное композиционное электрохимические покрытие (Cu/SiO_2);
4) медь блестящая (Cu);
5) никель блестящий (Ni).

Проводили обработку образцов из Ст3 размером 30 × 10 × 3 мм, площадь поверхности около 8,5 см^2. Способ соответствует промышленным методам нанесения гальванических покрытий [15], [16]. Подготовку поверхности осуществляли следующим образом: образцы обезжиривали в растворе «Лабомид-203» концентрацией 30 г/л в течение 10 мин при температуре 70 °С. В его составе содержатся (в весовых процентах): Na_2CO_3 — 50 %, $Na_5P_3O_{10}$ — 30 %, Na_2SiO_3 — 10 %, синтанол ДС-10 — 8 %, алкилсульфонаты — 2 %. Травление проводили в растворе HCl с концентрацией 250 г/л при температуре 20 °С в течение 2 мин. Снятие травильного шлама осуществляли в растворе CrO_3 — 100 г/л, H_2SO_4 — 20 г/л, NaCl — 4 г/л в течение 3 мин при 20 °С. Декапирование перед нанесением покрытий проводили в растворе HCl 100 г/л при 20 °С в течение 20 секунд. Для промежуточных промывок, а также для приготовления указанных растворов использовали деионизованную воду.

На подготовленные описанным способом образцы наносили гальванические покрытия толщиной 10—15 мкм. Среднюю толщину покрытия определяли по изменению массы образцов.

Далее приведены составы электролитов и режимы нанесения покрытий:

- электролит слабокислого блестящего цинкования: $ZnCl_2$ — 70 г/л, KCl — 165 г/л, H_3BO_3 — 20 г/л; добавки: Superbright Zn A — 9 г/л, Superbright Zn B — 0,4 г/л; pH 5,8; 20 С°; $i_{кат.}$ = 2 А/дм^2; перемешивание, аноды цинковые;
- электролит сернокислого полублестящего кадмирования: $CdSO_4 \cdot 8/3H_2O$ — 50 г/л, H_2SO_4 — 50 г/л; метацид — 4,0 г/л; 20 °С; $i_{кат.}$ = 2 А/дм^2; перемешивание, аноды кадмиевые;
- электролит блестящего сернокислого меднения: $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ — 220 г/л, H_2SO_4 — 60 г/л, HCl — 0,265 мл/л (ρ = 1,16 г/мл); добавки: Cupramax AC 9282 — 5 мл/л, Cupramax AC 9283 — 0,5 мл/л, Cupramax AC 9284 — 0,5 мл/л; 20 °С; $i_{кат.}$ = 2 А/дм^2; перемешивание, аноды медные.

Также было проведено нанесение медного композитного электрохимического покрытия (КЭП) из электролита, дополнительно содержащего 1 г/л SiO_2 с размером частиц 0,5—1,0 мкм.

Нанесение никелевого покрытия проводили из электролита блестящего никелирования состава $NiSO_4 \cdot 7H_2O$ — 300 г/л, $NiC_{l2} \cdot 6H_2O$ — 50 г/л, H_3BO_3 — 40 г/л, добавки: сахарин 1,5 г/л, 2-бутиндиол-1,4 — 0,2 г/л, лаурилсульфат натрия — 0,1 г/л; 55 °С, $i_{кат.} = 2$ А/дм^2; перемешивание, аноды никелевые.

Перед проведением экспериментов образцы отмывали в ультразвуковой ванне «Сапфир–0,8 ТЦ» (производство Россия) в смеси $C_2H_5OH : C_7H_8 = 1:1$ в течение 25 минут. Образец помещали в модельный раствор, который имитировал состав подземных вод участка «Енисейский» [17]—[18]. Состав модельного раствора, $\times 10^{-4}$, моль/л: K^+ — 1,15, Mg^{2+} — 4,95, Ca^{2+} — 12,2, Cl^- — 25,6, SO_4^{2-} — 4,95, HCO_3^- — 8,87; pH доводили до значений 7,0 добавкой 0,1 М NaOH.

Оценку устойчивости металлических покрытий осуществляли тремя методами: потенциометрия, микроскопия, весовой анализ.

Для проведения потенциометрии была использована установка (рис. 1А), на которой рабочим электродом выступала пластинка углеродистой стали с различными металлическими покрытиями, электродом сравнения был взят хлорид серебряный. В качестве жидкой фазы был использован модельный раствор участка ПГЗРО «Енисейский», состав которого приведен выше. Определение потенциала коррозии разомкнутой цепи электрохимическим методом выполняли на приборе Elins Potentiostat P-8 с помощью программного обеспечения PS_Pack. Длительность эксперимента составила 24 часа.

Для проведения *in situ* микроскопии был использована установка (рис. 1Б) с микроскопом G1000 (Китай) с 2-кратным увеличением и программное обеспечение CamRec Expert — 009 2D. Разрешение камеры в пикселях составляло 2048 × 1536, площадь наблюдаемого изображения — 2 см^2, продолжительность экспериментов — 24 часа, периодичность съемки — 10 минут.

Для проведения весового (гравиметрического) анализа образец и 15 мл модельного раствора помещали в стеклянный пенициллиновый флакон объемом 25 мл, который закрывали резиновой пробкой и алюминиевой крышкой. Длительность данного этапа составила 45 суток. После проведения эксперимента образец помещали в смесь соляной кислоты с уротропином в соотношении 1 : 1 для снятия продуктов коррозии. Время травления составило 5 минут. Затем пластины взвешивали и оценивали изменение массы по которой рассчитывалась скорость коррозии в данных условиях (1).

$$K_m^- = \frac{\Delta m}{S \times t} = \frac{m_0 - m_1}{S \times t}, \qquad (1)$$

где m_0 и m_1 — массы образца до и после коррозионных испытаний и удаления продуктов коррозии соответственно, [г]; S — площадь окисленной поверхности металла, [м^2]; t — время испытаний, [ч]. Скорость коррозии выражают в г/(м^2·ч).

Для оценки биологической устойчивости металлических покрытий вместо модельного раствора была использована подземная вода из скважины Р-8, взятая непосредственно с участка «Енисейский» (табл. 1). Скорость коррозии рассчитывалась аналогично вышеописанному.

Филогенетическое разнообразие микробного сообщества пробы воды участка «Енисейский»

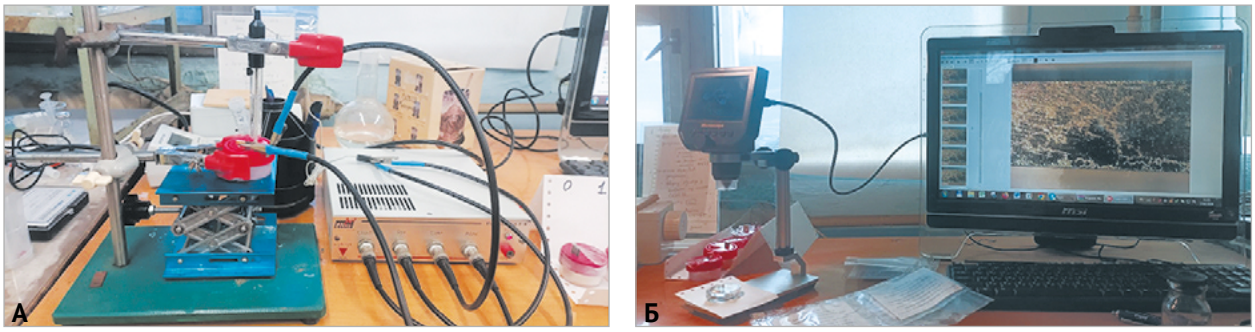

Рис. 1. Установки для проведения: А) потенциометрического анализа, Б) in situ микроскопии

Таблица 1. Характеристика пробы подземной воды скважины Р-8 участка «Енисейский»

Скважина	Глубина пробоотбора	pH	Концентрация ионов, мг/л								
			Cl^-	SO_4^{2-}	NO_3^-	HCO_3^-	Cl^-	K^+	Na^+	Mg^{2+}	Cl^-
Р-8	26	7,8	8,9	Р-8	26	7,8	8,9	Р-8	26	7,8	8,9

получено с помощью высокопроизводительного секвенирования генов 16S рРНК, результаты приведены в табл. 2 [19]. Определено, что 60 % представителей относится к роду *Hydrogenophaga*, способных к метанообразованию, сбраживанию органических веществ до молекулярного водорода и органических кислот. Помимо этого, в качестве донора электронов используют молекулярный водород. Акцепторами электронов является окисное железо, образующееся при растворении железистых минералов, в том числе оксидных продуктов коррозии.

Для оценки биологического воздействия подземной микробиоты на металлические покрытия применялся коэффициент биологического воздействия ($K_{биo}$), рассчитанный по формуле (2):

$$K_{биo} = \frac{K_m^-(\text{в подземной воде})}{K_m^-(\text{в модельном растворе})}, \qquad (2)$$

где $K_{биo}$ — коэффициент биологического воздействия; K_m^- (в подземной воде) — отрицательный показатель изменения массы в подземной Р-8, г/(м^2·ч); K_m^- (в модельном растворе) — отрицательный показатель изменения массы в модельном растворе, г/(м^2·ч).

Таблица 2. Филогенетическое разнообразие микробного сообщества пробы пластовой жидкости из наблюдательной скважины Р-8 участка «Енисейский» на основании последовательности генов 16S рРНК

Родовая принадлежность	OTU, %	Родовая принадлежность	OTU, %
Hydrogenophaga	60	*Brevundimonas*	1
Rhodoferax	3	*Dethiosulfatibacter*	1
Polaromonas	3	*Clostridiales*	2
Acidovorax	1	*Erysipelothrix*	2
Cupriavidus	1	*Flavobacterium*	1
Ralstonia	1	*Coriobacteriia*	6
Xantomonadales	1	*Arthrobacter*	2
Pseudomonas	2	*Actinobacteria*	1
Roseomonas	1	*Micrococcales*	2
Rhodobacter	1	*Verrukomikrobia*	1
Rhizobiales	1	*неизвестные*	6

Результаты

1. Оценка устойчивости металлических покрытий на углеродистой стали методом потенциометрии

Для экспресс-оценки поведения различных покрытий углеродистой стали был применен метод потенциометрии. На рис. 2 приведены результаты изменений потенциалов в течение 24 часов. За первые три часа наблюдаются наибольшие изменения потенциала коррозии, что свидетельствует об интенсивном процессе образования коррозионных отложений. В случае покрытий с Cu, Cu/SiO_2 и Zn зарегистрированы падения потенциала, для Ст3 и Cd — его рост. Для Ni значимых изменений не зафиксировано.

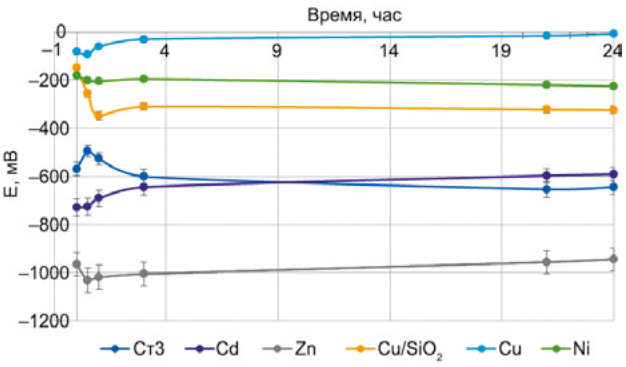

Рис. 2. Кинетические кривые изменения потенциала покрытий

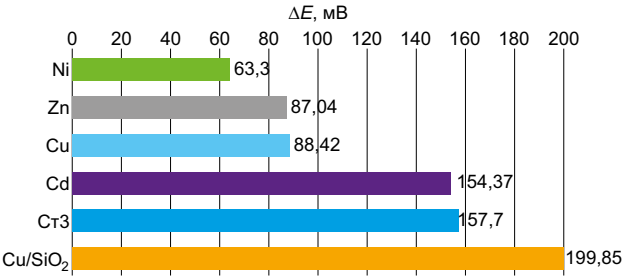

Рис. 3. Абсолютные значения изменения потенциала покрытий на углеродистой стали за 24 часа

Для наглядной оценки было рассчитано абсолютное значение изменения потенциала (рис. 3) как модуль разности наибольшего и наименьшего отклонений в эксперименте за 24 часа. У всех покрытий, кроме Cu/SiO_2, изменение данного показателя ниже, чем у углеродистой стали без покрытия: для Zn и Cu — на 44 %, для Ni — на 62 %. В случае медного композиционного электрохимического покрытия в модельных условиях участка «Енисейский» абсолютное значение было выше на 20 % (ΔE = 199,86 мВ). Это свидетельствует об образовании гальванической пары между медным композиционным покрытием и Ст3. В данном случае это сопряжено, по-видимому, с формированием большого количества сквозных пор при создании покрытия, что вызвано наличием достаточно крупных частиц диоксида кремния, по границам которых сплошность его ухудшается. Это способствует формированию каналов, заполненных

электролитом, внутри которых образуется гальваническая пара Cu–Fe, что вызывает ускоренное разрушение стальной подложки. Очевидно, предложенный для этого покрытия метод его нанесения является непригодным для использования в данных условиях, и необходимо изменение технологии его нанесения для формирования беспористого покрытия.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что покрытия Cu, Cu/SiO_2, Zn и Cd менее устойчивы, чем Ni.

2. Исследование металлических покрытий на углеродистой стали методом in situ микроскопии

Метод *in situ* микроскопии дает возможность наблюдения за изменением состояния поверхности образца в реальном времени (рис. 4). На 24-й час эксперимента: на покрытиях с Cd — ярко выраженных очагов коррозии не обнаружено; у покрытия с Zn — отмечено образование белесых плохо сцепленных продуктов коррозии; для покрытия с Ni — характерна площадная коррозия начиная с третьего часа эксперимента, спустя 24 часа площадь повреждения составила более 40 %. В случае покрытий с Cu и Cu/SiO_2 — наблюдается образование питтингов и язв, что может указывать на роль пор в данном процессе. Среднее количество питтингов у медного покрытия составило 3 штуки на 1 $см^2$. На образце Cu/SiO_2 отмечено активное развитие одной язвы диаметром более 1 $см^2$. Такой тип коррозии может быть связан с образованием гальванической пары Cu/SiO_2 с подложкой из стали марки Ст3, а также с пористостью покрытия.

Таким образом, по результатам *in situ* микроскопии покрытие углеродистой стали, выполненное

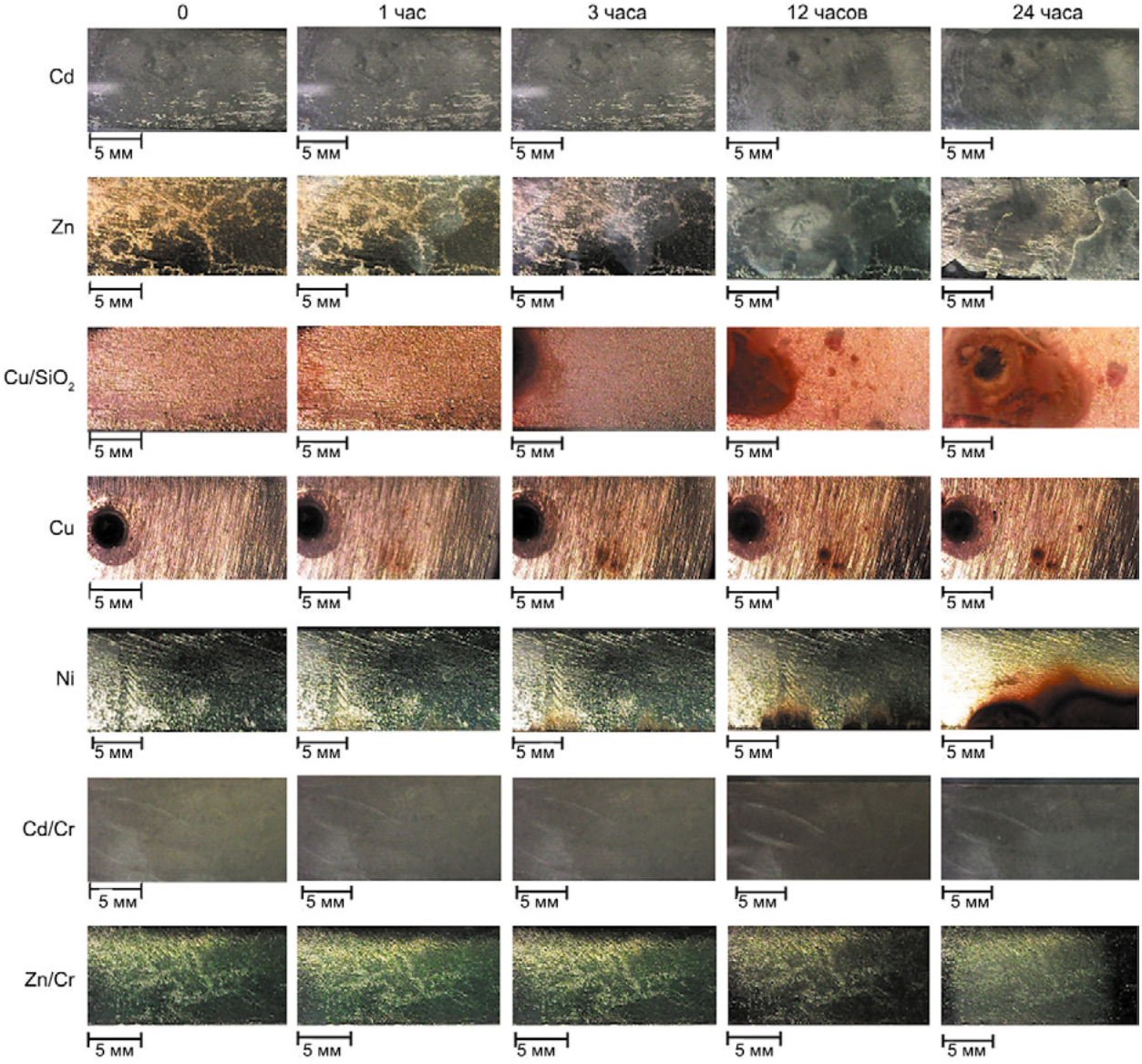

Рис. 4. Фотографии поверхности образцов после проведения коррозионных испытаний в модельном растворе в течение 24 часов, полученные с помощью in situ микроскопии

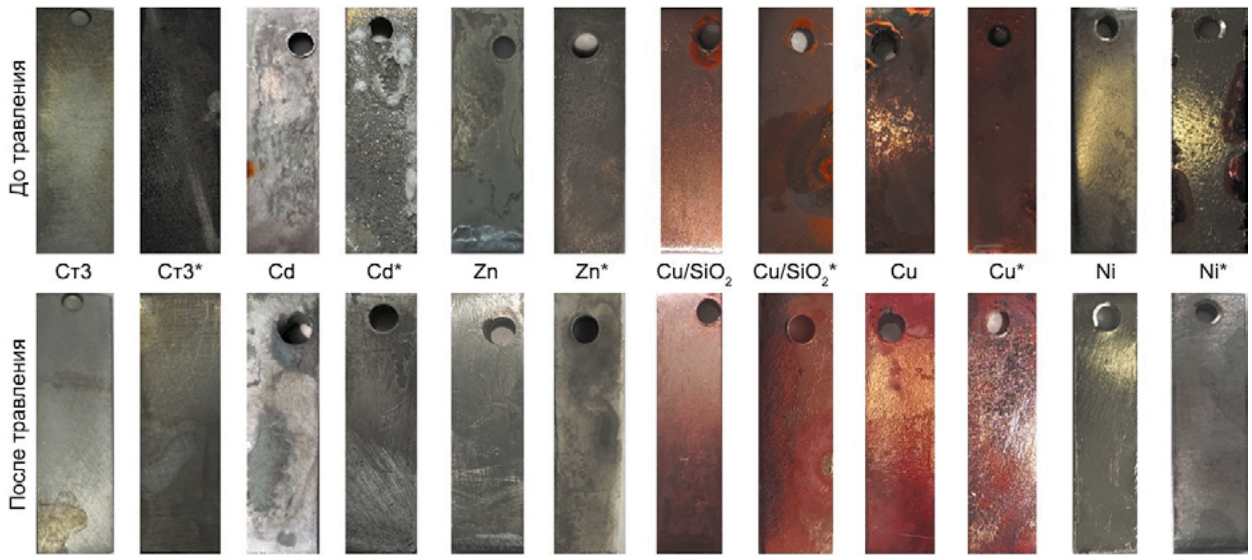

*Рис. 5. Поверхность пластин с различными покрытиями до и после травления по окончании проведения коррозионных испытаний в модельном растворе и подземной воде (*образцы выдерживались в подземной воде, содержащей микробное сообщество. отобранной из скважины Р-8)*

на основе меди по стандартным методикам, из-за его пористости является непригодным в условиях ПГЗРО на участке «Енисейский». Наиболее перспективными являются покрытия Zn и Cd.

3. Оценка устойчивости металлических покрытий на углеродистой стали в модельном растворе и при биологическом воздействии

Оценка устойчивости покрытий проводилась весовым методом в условиях модельного раствора и подземной воды. Внешний вид поверхности металлических пластин до и после травления приведен на рис. 5. В табл. 3 даны скорости их коррозии, рассчитанные по изменению их массы.

Таблица 3. Отрицательный показатель изменения массы, г/(м^2·ч), образцов в модельном растворе и подземной воде на 45-е сутки эксперимента

Образец	$K_m^-\times10^{-2}$, г/(м^2·ч) модельный раствор	$K_m^-\times10^{-2}$, г/(м^2·ч) подземная вода Р-8	$K_{биo}$
сталь Ст3	24,4	32,9	1,35
Cu	7,5	7,6	1,01
Zn	2,3	2,2	0,96
Cu/SiO_2	7,8	8	1,03
Cd	0,1	0,1	1
Ni	2,5	2,6	1,04

По результатам гравиметрического анализа в модельной воде наибольшая скорость коррозии наблюдается у стали марки Ст3 без покрытия и составляет $24{,}4\cdot10^{-2}$ г/(м^2·ч). В случае медного покрытия скорость коррозии в 3 раза меньше, с Ni и Zn — в 10 раз. Минимальная скорость коррозии наблюдалась для образцов с покрытием из Cd — $0{,}11\cdot10^{-2}$ г/(м^2·ч), что говорит о хорошей перспективе его применения.

Для оценки влияния подземной микробиоты на металлические покрытия по формуле (2) был посчитан коэффициент биологического воздействия ($K_{биo}$). Наиболее подверженной биодеструкции является чистая сталь марки Ст3, $K_{биo}=1{,}35$. В случае всех примененных покрытий биологическое воздействие не наблюдалось.

Заключение

Все рассмотренные в работе покрытия стали Ст3, нанесенные гальваническим способом, снижают скорость ее коррозии в модельных условиях ПГЗРО, однако наиболее перспективными металлами являлись Cd и Zn. Отмечено, что использование меди как в чистом виде, так и в сочетании с оксидом кремния (композиционное электрохимическое покрытие) приводит к образованию гальванической пары Cu–Fe, что может являться причиной нестабильности материала в условиях ПГЗРО.

Для применения медных гальванических покрытий необходимо подбирать их оптимальные толщину и плотность. Использованный метод получения медных покрытий в данной работе не позволил нанести их с необходимой плотностью, предотвращающей пористость.

Для всех покрытий биологический вклад в коррозию поверхности был минимален, так как кадмий, никель, цинк и медь относят к группе тяжелых металлов, проявляющих токсический

эффект по отношению к микроорганизмам. Накапливаясь внутри и на поверхности клетки, они приводят к денатурации мембранных белков [20], повышению проницаемость мембран [21], изменению морфологических характеристик организмов [22] и, как следствие, к их гибели.

Литература

1. *Бейгул В. П.* О вариантах технических решений по обращению с радиоактивными отходами класса 1 при создании и эксплуатации ПГЗРО // Радиоактивные отходы. 2023. № 3 (24). С. 92—102. DOI: 10.25283/2587-9707-2023-3-92-102.

2. *Мартынов К. В. Захарова Е. В., Кулюхин С. А.* Альтернативная концепция устройства защитных барьеров при глубинном захоронении РАО класса 1 на Енисейском участке Нижнеканского массива // Радиоактивные отходы. 2022. № 2 (19). С. 68—84. DOI: 10.25283/2587-9707-2022-2-68-84.

3. *Stefanovsky S. V., Skvortsov M. V., Stefanovsky O. I., Nikonov B. S., Presniakov I. A., Glazkova I. S., Ptashkin A. G.* Preparation and Characterization of Borosilicate Glass Waste Form for Immobilization of HLW from WWER Spent Nuclear Fuel Reprocessing // MRS Advances. 2017. Vol. 2 (11). Pp. 583—589. DOI: 10 .1557/ad .2016.62.

4. *Крупская В. В., Тюпина Е. А., Закусин С. В., Ильина О. А., Савельева Е. А.* Обоснование выбора глинистых материалов для разработки инженерных барьеров безопасности при изоляции РАО в ПГЗРО на участке недр «Енисейский» // Радиоактивные отходы. 2023. № 2 (23). С. 98—112. DOI: 10.25283/2587-9707-2023-2-98-112.

5. *Kursten B., Smailos E., Azkarate I., Werme L., Smart N. R., Santarini G.* COBECOMA, State-of-the-art Document on the COrrosion BEhaviour of COntainer Materials. European Commission, Contract No. FIKW-CT-20014-20138, Final Report, 2004.

6. *Marsh G. P.* Materials for High-Level Waste Containment // Nuclear Energy. 1982. Vol. 21 (4). P. 253—265.

7. *Гамбург Ю. Д.* Гальванопокрытия: справочник по применению. — М. : Техносфера, 2006. 216 с.

8. *Кондратов Л. П., Божко Н. Н.* Технология материалов и покрытий. — М. : МГУП, 2008. 226 с.

9. *Болдырев К. А., Сафонов А. В., Абрамова Е. С., Гладких Н. А., Крючков Д. В.* Исследование коррозии углеродистой стали Ст3 в присутствии микроорганизмов, выделенных из подземных вод на участке «Енисейский» // Радиоактивные отходы. 2021. № 3 (16). С. 103–113.

10. *Mawarani L. J., Septiana A., Fadila M.* Electrolytic cadmium plating for cadmium coating as the AISI 4130 steel corrosion protector // The 4th International Conference on Materials and Metallurgical Engineering and Technology (ICOMMET) 2020, AIP Conf. Proc. 2384, 070007-1-070007-7; https://doi.org/10.1063/5.0073016.

11. *Лебедев А. С., Еремяшев В. Е., Рассомахин М. А., Кориневская Г. Г.* Влияние защитного покрытия на процессы коррозии металлических контейнеров для иммобилизации высокоактивных радиоактивных отходов // Радиоактивные отходы. 2024. № 1 (26). С. 47—56.

12. *Fayomi O. S. I., Akande I. G., Sode A. A.* Corrosion Prevention of Metals via Electroless Nickel Coating: A review // J. Phys.: Conf. Ser. 2019. 1378. 022063 DOI: 10.1088/1742-6596/1378/2/022063.

13. *Keech P. G., Vo P., Ramamurthy S., Chen J., Jacklin R., Shoesmith D. W.* Design and development of copper coatings for long term storage of used nuclear fuel // Corr. Engineer. Sci. and Tech. 2014. V. 49(6). P. 425—430. DOI:10.1179/1743278214Y.0000000206.

14. *Standish Th., Chen J., Jacklin R., Jakupi P., Ramamurthy Sr., Zagidulin D., Keech P., Shoesmith D.* Corrosion of copper-coated steel high level nuclear waste containers under permanent disposal conditions // Electrochim. Acta. 2016. V. 211. P. 331—342. DOI: 10.1016/j.electacta.2016.05.135.

15. ГОСТ 9.305-84. Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия металлические и неметаллические неорганические. Операции технологических процессов получения покрытий. — М. : ИПК Издательство стандартов, 1986. 102 с.

16. ОСТ 107.460092.001-86. Покрытия металлические и неметаллические неорганические. Типовые технологические процессы. — Москва, 1986.

17. *Laverov N. P., Yudintsev S. V., Kochkin B. T., Malkovsky V. I.* The Russian Strategy of using Crystalline Rock as a Repository for Nuclear Waste // Elements. 2016. Vol. 12. Pp. 253—256. DOI: 10.2113/gselements.12.4.253.

18. *Rozov K. B., Rumynin V. G., Nikulenkov A. M., Leskova P. G.* Sorption of ^{137}Cs, ^{90}Sr, Se, ^{99}Tc, $^{152(154)}$Eu, $^{239(240)}$Pu on fractured rocks of the Yeniseysky site (Nizhne-Kansky massif, Krasnoyarsk region, Russia) // J. Environ. Radioact. 2018. Vol. 192. Pp. 513—523. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2018.08.001.

19. *Abramova E., Popova N., Artemiev G., Boldyrev K., Kazakov K., Kryuchkov D., Safonov A.* Biological factors affecting the evolution of safety barrier materials in the Yeniseisky deep geological repository // Engineering Geology. 2023. Vol. 312. P. 106931. DOI: 10.1016/j.enggeo.2022.106931.

20. *Фокина А. И., Ашихмина Т. Я., Домрачева Л. И., Горностаева Е. А., Огородникова С. Ю.* Тяжелые металлы как фактор изменения метаболизмау микроорганизмов (обзор) // Теоретические проблемы экологии. 2015. № 2. С. 5–18.

21. *Krumova E. T., Stoitsova S. R, Paunova-Krasteva T. S., Pashova S. B., Angelova M. B.* Copper stress

andfilamentous fungus Humicola lutea 103 — ultrastruturalchanges and activities of key metabolic enzymes // Can. J. Microbiol. 2012. 58(12). P. 1335—1343.

22. *He Y. F., Xiao X. Z., Wang J. W.* Effects of Heavy Metal Pollution on the Structure of Microbial Communities in Different Habitats // Huan Jing Ke Xue (in Chinese). 2023. 44(4). P. 2103—2112.

Информация об авторах

Абрамова Елена Сергеевна, инженер 1 категории, ФГБУН Институт физической химии и электрохимии им. А. Н. Фрумкина РАН (119071, Москва, Ленинский пр-кт, д. 31, корпус 4), e-mail: gorchicta246@mail.ru.

Клещева Софья Вячеславовна, студент 4-го курса, Российский химико-технологический университет им. Д. И. Менделеева (125047, Москва, Миусская пл., д. 9), e-mail: sonya_kleshova@mail.ru.

Трипачев Олег Васильевич, старший научный сотрудник, ФГБУН Институт физической химии и электрохимии им. А. Н. Фрумкина РАН (119071, Москва, Ленинский пр-кт, д. 31, корпус 4), e-mail: tripachevov@mail.ru.

Кузов Алексей Владимирович, кандидат химических наук, инженер 1 категории, ФГБУН Институт физической химии и электрохимии им. А. Н. Фрумкина РАН (119071, Москва, Ленинский пр-кт, д. 31, корпус 4), e-mail: scourge@mail.ru.

Сафонов Алексей Владимирович, кандидат химических наук, ведущий научный сотрудник, ФГБУН Институт физической химии и электрохимии им. А. Н. Фрумкина РАН (119071, Москва, Ленинский пр-кт, д. 31, корпус 4), e-mail: alexeysafonof@gmail.com.

Библиографическое описание статьи

Абрамова Е. С., Клещева С. В., Трипачев О. В., Кузов А. В., Сафонов А. В. Гальванические покрытия стали марки Ст3 для повышения ее коррозионной стойкости в условиях ПГЗРО // Радиоактивные отходы. 2024. № 4 (29). С. 21—30. DOI: 10.25283/2587-9707-2024-4-21-30.

GALVANIC COATINGS FOR STEEL ST3 ENHANCING ITS CORROSION RESISTANCE UNDER DGR CONDITIONS

Abramova E. S., Kleshcheva S. V., Tripachev O. V., Kuzov A. V., Safonov A. V.

Federal State Budgetary Institution of Science A. N. Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Article received on June 25, 2024

The paper explores the anticorrosion characteristics of metal coatings based on cadmium, zinc, copper and nickel produced by galvanic method and studied under model conditions of the Yeniseiskiy site. Samples containing Cd *and* Zn *showed high stability, while those containing copper composite coating exhibited low stability, which due to galvanic coupling with carbon steel inside the coating micropores has accelerated the corrosion processes in these samples.*

Keywords: *radioactive waste, metal containers, galvanic method, anticorrosion properties, microbial corrosion.*

References

1. Beygul V. P. O variantakh tekhnicheskikh reshenii po obrashcheniyu s radioaktivnymi otkhodami klassa 1 pri sozdanii i ehkspluatatsii PGZRO [On Design Options Providing the Management of Radioactive Waste Class 1 during DGR Establishment and Operation]. *Radioaktivnye otkhody — Radioactive Waste,* 2023, no. 3 (24), pp. 92—102. DOI: 10.25283/2587-9707-2023-3-92-102.

2. Martynov K. V., Zakharova E. V., Kulyukhin S. A. Al'ternativnaya kontseptsiya ustroistva zashchitnykh bar'erov pri glubinnom zakhoronenii RAO klassa 1 na Eniseiskom uchastke Nizhnekanskogo massiva [Alternative Conceptual Designs of Safety Barriers Proposed for Deep RW Class 1 Disposal at the Yeniseiskiy Site in the Nizhnekanskiy Rock Mass]. *Radioaktivnye otkhody — Radioactive Waste,* 2022, no. 2 (19), pp. 68—84. DOI: 10.25283/2587-9707-2022-2-68-84.

3. Stefanovsky S. V., Skvortsov M. V., Stefanovsky O. I., Nikonov B. S., Presniakov I. A., Glazkova I. S., Ptashkin A. G. Preparation and Characterization of Borosilicate Glass Waste Form for Immobilization of HLW from WWER Spent Nuclear Fuel Reprocessing. *MRS Advances,* 2017, vol. 2 (11), pp. 583—589. DOI: 10.1557/ad .2016.62.

4. Krupskaya V. V., Tyupina E. A., Zakusin S. V., Ilina O. A., Saveleva E. A. Obosnovanie vybora glinistykh materialov dlya razrabotki inzhenernykh bar'erov bezopasnosti pri izolyatsii RAO v PGZRO na uchastke nedr "Eniseiskii" [On the feasibility assessment of clay material application in the development of engineered safety barrier designs for deep geological RW disposal at the Yeniseiskiy site]. *Radioaktivnye otkhody — Radioactive Waste,* 2023, no. 2 (23), pp. 98—112. DOI: 10.25283/2587-9707-2023-2-98-112.

5. Kursten B., Smailos E., Azkarate I., Werme L., Smart N. R., Santarini G. COBECOMA, State-of-the-art Document on the COrrosion BEhaviour of COntainer Materials. European Commission, Contract No. FIKW-CT-20014-20138, Final Report, 2004.

6. Marsh G. P. Materials for High-Level Waste Containment. *Nuclear Energy,* 1982, vol. 21 (4), pp. 253—265.

7. Gamburg Yu. D. *Gal'vanopokrytiya: spravochnik po primeneniyu* [Electroplating: handbook]. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2006. 216 p.

8. Kondratov L. P. Bozhko N. N. *Tekhnologiya materialov i pokrytiy* [Materials and coatings: technology]. Moscow, MGUP Publ., 2008. 226 p.

9. Boldyrev K. A., Safonov A. V., Abramova E. S., Gladkikh N. A., Kryuchkov D. V. *Issledovanie korrozii uglerodistoj stali St3 v prisutstvii mikroorganizmov, vydelennykh iz podzemnykh vod na uchastke "Enisejskij"* [Research on the St3 Carbon Steel Corrosion in the Presence of Microorganisms Isolated from the Groundwater at the Yeniseyskiy Site]. *Radioaktivnye otkhody — Radioactive Waste,* 2021, no. 3 (16), pp. 103—113. DOI: 10.25283/2587-9707-2021-3-103-113.

10. Mawarani L. J., Septiana A., Fadila M. Electrolytic cadmium plating for cadmium coating as the AISI 4130 steel corrosion protector. The 4th International Conference on Materials and Metallurgical Engineering and Technology (ICOMMET) 2020, AIP Conf. Proc. 2384, 070007-1—070007-7. DOI: 10.1063/5.0073016.

11. Lebedev A. S., Eremyashev V. E., Rassomahin M. A., Korinevskaya G. G. Vliyanie zashchitnogo pokrytiya na processy korrozii metallicheskikh kontejnerov dlya immobilizacii vysokoaktivnykh radioaktivnykh otkhodov [Protective Coating and Its Influence on Corrosion Behavior of Metal Containers for High-Level Waste Immobilisation]. *Radioaktivnye otkhody — Radioactive Waste,* 2024, no. 1 (26), pp. 47—56. DOI: 10.25283/258 -9707-2024-1-47-56.

12. Fayomi O. S. I., Akande I. G., Sode A. A. Corrosion Prevention of Metals via Electroless Nickel Coating: A review. *J. Phys.: Conf. Ser.,* 2019, vol. 1378, iss. 2, p. 022063. DOI: 10.1088/1742-6596/1378/2/022063.

13. Keech P. G., Vo P., Ramamurthy S., Chen J., Jacklin R., Shoesmith D. W. Design and development of copper coatings for long term storage of used nuclear fuel. *Corr. Engineer. Sci. and Tech.,* 2014, vol. 49, iss. 6, pp. 425—430. DOI: 10.1179/1743278214Y.0000000206.

14. Standish Th., Chen J., Jacklin R., Jakupi P., Ramamurthy Sr., Zagidulin D., Keech P., Shoesmith D. Corrosion of copper-coated steel high level nuclear waste containers under permanent disposal conditions. *Electrochim. Acta,* 2016, vol. 211, pp. 331—342. DOI: 10.1016/j.electacta.2016.05.135.

15. GOST 9.305-84. *Yedinaya sistema zashchity ot korrozii i stareniya. Pokrytiya metallicheskiye i nemetallicheskiye neorganicheskiye. Operatsii tekhnologicheskikh protsessov polucheniya pokrytiy* [Unified system of corrosion and ageing protection. Metal and non-metal inorganic coatings. Technological process operations for coating production]. Moscow, IPK Izdatel'stvo standartov Publ., 1986. 102 p.

16. OST 107.460092.001-86. *Pokrytiya metallicheskiye i nemetallicheskiye neorganicheskiye. Tipovyye tekhnologicheskiye protsessy* [Metallic and non-metallic inorganic coatings. Common production processes]. Moscow, 1986.

17. Laverov N. P., Yudintsev S. V., Kochkin B. T., Malkovsky V. I. The Russian Strategy of using Crystalline Rock as a Repository for Nuclear Waste. *Elements,* 2016, vol. 12, pp. 253—256. DOI: 10.2113/gselements.12.4.253.

18. Rozov K. B., Rumynin V. G., Nikulenkov A. M., Leskova P. G. Sorption of ^{137}Cs, ^{90}Sr, Se, ^{99}Tc, $^{152(154)}$Eu, $^{239(240)}$Pu on fractured rocks of the Yeniseysky site (Nizhne-Kansky massif, Krasnoyarsk region, Russia).

J. Environ. Radioact., 2018, vol. 192. Pp. 513—523. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2018.08.001.
19. Abramova E., Popova N., Artemiev G., Boldyrev K., Kazakov K., Kryuchkov D., Safonov A. Biological factors affecting the evolution of safety barrier materials in the Yeniseisky deep geological repository. *Engineering Geology,* 2023, vol. 312, p. 106931. DOI: 10.1016/j.enggeo.2022.106931.
20. Fokina A. I., Ashikhmina T. Ya., Domracheva L. I., Gornostayeva Ye. A., Ogorodnikova S. Yu. Tyazholyye metally kak faktor izmeneniya metabolizmau mikroorganizmov (obzor) [Heavy metals as a factor contributing to metabolic changes in microorganisms (overview)] *Teoreticheskiye problemy ekologii — Theoretical problems of ecology.* 2015, no. 2, pp. 5—18.
21. Krumova E. T., Stoitsova S. R, Paunova-Krasteva T. S., Pashova S. B., Angelova M. B. Copper stress andfilamentous fungus Humicola lutea 103 — ultrastrutural changes and activities of key metabolic enzymes. *Can. J. Microbiol,* iss. 12, pp. 1335—1343. DOI: 10.1139/w2012-112.
22. He Y. F., Xiao X. Z., Wang J. W. Effects of Heavy Metal Pollution on the Structure of Microbial Communities in Different Habitats. *Huan Jing Ke Xue.* 2023, vol. 44, no. 4, pp. 2103-2112. (in Chinese).

Information about the authors

Abramova Elena Sergeevna, engineer of the 1st category, Federal State Budgetary Institution of Science A. N. Frumkin Institute of Physical chemistry and Electrochemistry of the Russian Academy of Sciences (31, bld. 4, Leninsky prospect, Moscow, 119071, Russia), e-mail: gorchicta246@mail.ru.

Kleshcheva Sofia Vyacheslavovna, 4th year student, D. I. Mendeleev Russian University of Chemical Technology (9, Miusskaya Sq., Moscow, 125047, Russia), e-mail: sonya_kleshova@mail.ru.

Tripachev Oleg Vasilyevich, Senior Researcher, Federal State Budgetary Institution of Science A. N. Frumkin Institute of Physical chemistry and Electrochemistry of the Russian Academy of Sciences (31, bld. 4, Leninsky prospect, Moscow, 119071, Russia), e-mail: tripachevov@mail.ru.

Kuzov Alexey Vladimirovich, Candidate of Chemical Sciences, engineer of the 1st category, Federal State Budgetary Institution of Science A. N. Frumkin Institute of Physical chemistry and Electrochemistry of the Russian Academy of Sciences (31, bld. 4, Leninsky prospect, Moscow, 119071, Russia), e-mail: scourge@mail.ru.

Safonov Aleksej Vladimirovich, Candidate of Chemical Sciences, Leading Researcher, Federal State Budgetary Institution of Science A. N. Frumkin Institute of Physical chemistry and Electrochemistry of the Russian Academy of Sciences (31, bld. 4, Leninsky prospect, Moscow, 119071, Russia), e-mail: alexeysafonof@gmail.com.

Bibliographic description

Abramova E. S., Kleshcheva S. V., Tripachev O. V., Kuzov A. V., Safonov A. V. Galvanic coatings for steel St3 enhancing its corrosion resistance under DGR conditions. *Radioactive Waste,* 2024, no. 4 (29), pp. 21—30. DOI: 10.25283/2587-9707-2024-4-21-30. (In Russian).