

## ОЦЕНКА КОРРОЗИОННЫХ СВОЙСТВ ВОЛЬФРАМОВОГО ПОКРЫТИЯ КОНТЕЙНЕРОВ ДЛЯ РАО, НАНЕСЕННОГО ГАЗОФАЗНЫМ МЕТОДОМ

В. В. Душик, Е. С. Абрамова, Н. А. Шапагина, А. В. Сафонов

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

Статья поступила в редакцию 1 февраля 2024 г.

*В работе приведено исследование антикоррозионных характеристик вольфрамовых покрытий, полученных методом химического осаждения из газовой фазы в растворе, моделирующем геохимические условия участка «Енисейский». Установлено, что при толщине 30 мкм оно является достаточно устойчивым и имеет среднюю скорость коррозии 1,4 мкм/год. Отмечена высокая прочность вольфрамовых покрытий в условиях микробного обрастания.*

**Ключевые слова:** радиоактивные отходы, металлические контейнеры, вольфрамовое покрытие, антикоррозионные свойства, микробная коррозия.

### Введение

Коррозия металлов и сплавов при контакте с окружающей средой является основным фактором их разрушения [1]. Одним из наиболее распространенных методов защиты материалов от этого процесса является применение защитных металлических покрытий, которые, в зависимости от их строения, позволяют реализовать различные принципы противокоррозионной защиты, в том числе барьерный принцип, когда материал основы изолирован от воздействия разрушающей среды слоем коррозионно-стойкого материала. Такие элементы, как никель, хром, цинк и кобальт, наиболее часто применяются в качестве покрытий. Деградация металлического оборудования и контейнеров с радиоактивными отходами (РАО) при экстремальных физических и химических нагрузках является одной из проблем ядерной энергетики [2]. В зарубежных

странах проблемы коррозии металлических контейнеров с отработанным ядерным топливом (ОЯТ) решают путем использования толстостенных медных упаковок (Финляндия и Швеция) [3] и ингибирующих покрытий, например, фосфида никеля [4]. Во Франции используют нержавеющие стали, титановые сплавы и сплавы на основе никеля [5]. Все они имеют свои преимущества и недостатки, одним из которых часто является высокая стоимость.

В настоящее время производятся работы по проектированию подземного хранилища радиоактивных отходов в Енисейском районе (Красноярский край, РФ), где стальные контейнеры со стекломатрицей планируется помещать в специальные скважины и тоннели на глубине 400–500 метров в кристаллическом массиве. В предполагаемых условиях эксплуатации

таких упаковок для скальных репозиторий возможны повышенные температуры (45–90 °С) и отсутствие кислорода в составе коррозионной среды. При попадании влаги возможно протекание химической и электрохимической реакции с кислородной деполяризацией, способной существенно снизить срок эксплуатации материалов металлических контейнеров, а также микробно-индуцированной коррозии [6]. Выбор метода защиты упаковки от комплексного разрушения в условиях повышенных температур является нетривиальной задачей, поскольку предполагает не только поиск коррозионно-стойкого покрытия, но и составление прогноза срока службы данного материала на значительный период времени, превышающий 10 000 лет. Вольфрам является тяжелым и самым тугоплавким металлом, что и определило его основное применение в промышленности как жаропрочного и термостойкого защитного материала для электронных вакуумных приборов [7], [8], высокотемпературных термопар [9], а также обращенных к плазме элементов в установках термоядерного синтеза и прочих применений в топливно-энергетическом комплексе [9]–[15]. Хорошо известны жаропрочные сплавы и быстрорежущие стали, содержащие вольфрам, а также твердые сплавы с карбидом вольфрама [7]. Однако современные методы производства позволяют использовать вольфрам и сплавы на его основе в качестве самостоятельных антикоррозионных материалов и покрытий, обладающих уникальными характеристиками. Они могут быть получены методом химического осаждения из газовой фазы [16], [17] на медных, никелевых [18] и стальных подложках через посредство опорного слоя никеля, полученного осаждением из растворов [19]–[21]. По этой причине представляет интерес рассмотрение антикоррозионных свойств новых покрытий, которые могут найти потенциальное применение для решения задач по защите материалов контейнеров или вторичных оболочек (пеналов) для захоронения РАО. Исследованию их характеристик в условиях микробиологической коррозии посвящена настоящая статья.

### Методика и материалы

**Получение вольфрамового покрытия.** Вольфрамовые покрытия были получены методом химического осаждения из газовой фазы смеси гексафторида вольфрама и водорода на медные пластинки с использованием установки для химического газофазного осаждения (рис. 1). Химический процесс, лежащий в основе синтеза

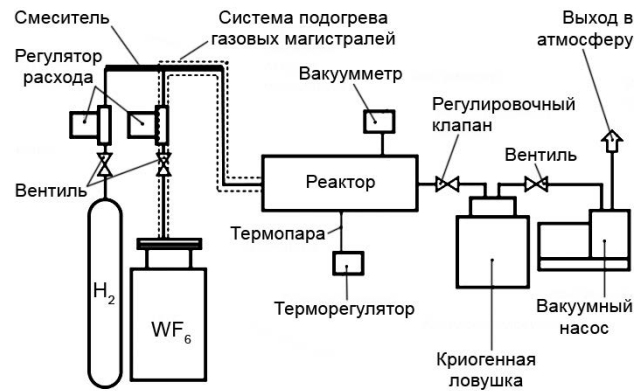
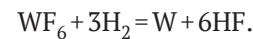


Рис. 1. Схема установки для химического газофазного осаждения вольфрама

вольфрама из его фторида, может быть представлен следующей реакцией:



Подаваемые из баллонов через регуляторы расхода газа гексафторид вольфрама (3 л/ч) и водород (10 л/ч) поступали в вакуумный химический реактор с горячей стенкой, где на нагретой до 550 °С поверхности при общем давлении 50 мм рт. ст., создаваемом вакуумным насосом, протекал процесс осаждения вольфрама, который продолжался в течение 2 часов. Продукты реакции поступали в криогенную ловушку и впоследствии были нейтрализованы слабощелочным раствором. В качестве материала подложки была использована медь марки М1.

Толщину покрытия определяли методом оптической микроскопии при помощи измерительной системы микротвердомера ПМТ-3М по поперечному шлифу на образцах-свидетелях, обработанных в том же процессе.

**Коррозионные эксперименты.** Для исследования коррозионных процессов были использованы прямоугольные пластины меди М1 размером 10×15×1 мм с вольфрамовым покрытием. Перед проведением исследований образцы отмывали в ультразвуковой ванне «Сапфир-0,8 ТЦ» (Россия) в смеси  $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}:\text{C}_7\text{H}_8 = 1:1$  в течение 25 минут.

В стерильные стеклянные флаконы объемом 200 мл налили 50 мл стерильной модельной воды (МВ), содержащей (мг/л)  $\text{NaHCO}_3$  — 272,  $\text{CaCl}_2$  — 71,8,  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  — 70, pH 7,1 и имитирующей состав пластовых вод участка «Енисейский» [22]. Образцы пластин были подвешены в среде, после чего флаконы герметично закрыли, вакуумировали в ультразвуковой ванне, а затем в газовую фазу добавили аргон для создания анаэробных условий.

Для оценки влияния микробиологического фактора на коррозию в жидкую фазу была внесена

накопительная культура подземной биоты пластовых вод, взятых непосредственно с участка «Енисейский». Характеристика микроорганизмов опубликована в работе [6]. Для стимулирования роста вносили глюкозу в концентрации 500 мг/л.

Оценку скорости коррозии проводили гравиметрическим методом. Для снятия ее продуктов применяли разбавленный раствор плавиковой кислоты. Для этого 500 мл HF добавляли в 500 мл воды. Длительность травления составила 3 минуты при комнатной температуре.

Скорость коррозии образцов, мкм/год, была рассчитана по формуле (1):

$$V_{\text{кор}} = \Delta m \cdot 8760 / (S \cdot t \cdot \rho), \quad (1)$$

где  $\Delta m$  — средняя массовая разница образцов до/после испытаний, г,  $S$  — площадь поверхности металла, м<sup>2</sup>;  $t$  — время испытаний, ч,  $\rho$  — плотность металла, г/см<sup>3</sup>.

Средняя площадь коррозионных поражений на основании внешнего вида вольфрамового покрытия, после проведения испытаний в течение 120 суток, рассчитывалась с помощью программы CamRec-009 2D (TechSmith, США).

Химический анализ состава поверхностных слоев, формируемых на металлах во время их выдержки в коррозионных средах, был проведен с помощью рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС). Полученные РФЭ-спектры поверхностных слоев

регистрировали на приборе OMICRON ESCA+ (OMICRON, ФРГ). Давление в камере анализатора поддерживалось не выше  $8 \cdot 10^{-10}$  мбар, источником  $AlK_{\alpha}$ -излучения служил Al-анод ( $h\nu = 1486,6$  эВ). Энергия пропускания анализатора составляла 20 эВ. Для учета зарядки образцов положение РФЭ-пиков стандартизировали по максимуму C1s углеводородных загрязнений ( $E_{\text{св}} = 285,0$  эВ). Разложение спектров на составляющие проводили в программе UNIFIT 2009. Фон определяли по методу Ширли.

## Результаты и обсуждение

### Характеристика вольфрамового покрытия

На рис. 2 представлены внешний вид и состав покрытия, полученного методом химического осаждения из газовой фазы.

Покрытие имеет достаточно развитую морфологию (рис. 2а), связанную с характерным для CVD-покрытий (chemical vapor deposition, химическое осаждение из паровой фазы) столбчатым строением, его единственный компонент — вольфрам (рис. 2б). Размер структурных элементов оценивается в величину порядка 5 мкм, что сопоставимо с поперечным габаритом столбчатого зерна вольфрама, полученного по данному режиму. Такое строение в контексте его использования в качестве антикоррозионного может быть негативным фактором, поскольку

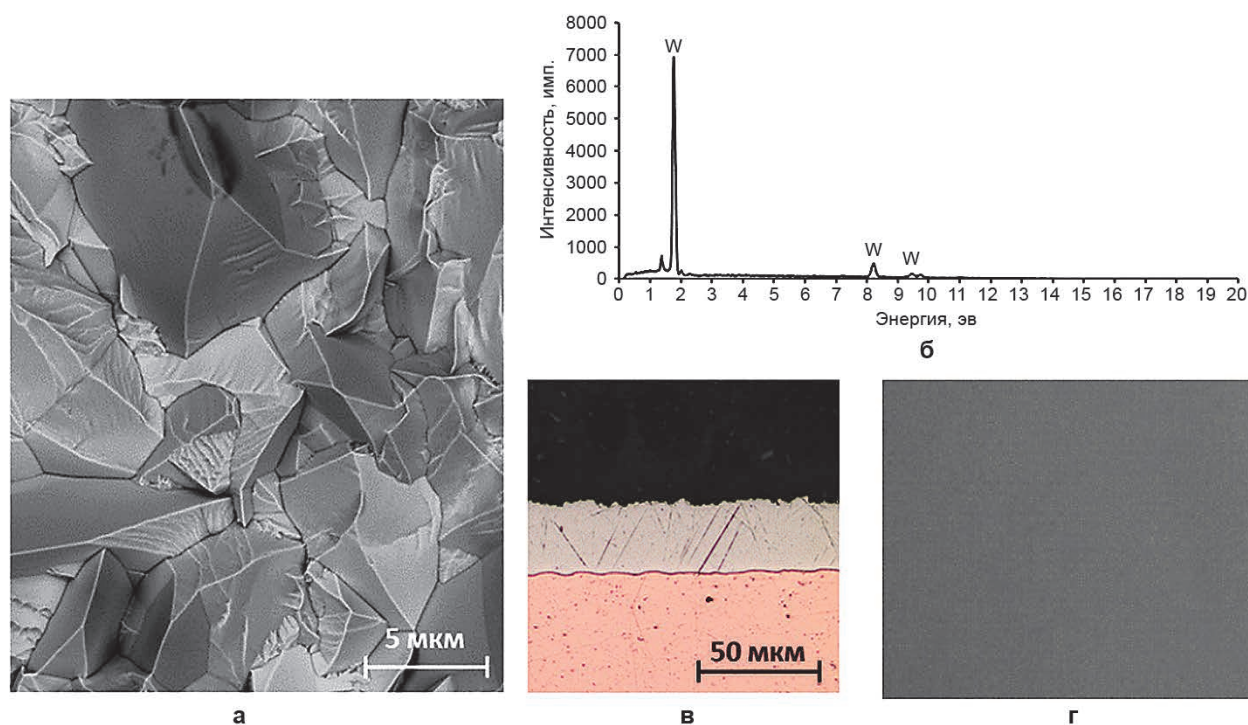


Рис. 2. Вольфрамовое покрытие, полученное методом химического газозафазного осаждения: а) электронно-микроскопическое изображение морфологии; б) энергодисперсионный рентгеновский спектр с поверхности; в) оптическое изображение поперечного шлифа; г) фотография поверхности

способно привести к возникновению сквозных отверстий по междолинным областям, однако в исходном состоянии (рис. 2в) такая пористость отсутствует, что является благоприятным фактором для коррозионно-защитных свойств покрытия, которое имеет равномерный серый цвет и матовую поверхность (рис. 2г), обусловленную его шероховатостью.

### Результаты коррозионных испытаний

На рис. 3 представлены результаты коррозионных испытаний вольфрамовых образцов, претерпевших выдержку в течение 120 суток в различных средах. Во всех случаях на поверхности не было зафиксировано очагов локального растворения металла, но обнаружено общее растравление вольфрама (рис. 3, МВ). В случае микробного воздействия (рис. 3, МВ+глюкоза) на поверхности были выявлены участки, покрытые и непокрытые продуктами коррозии.

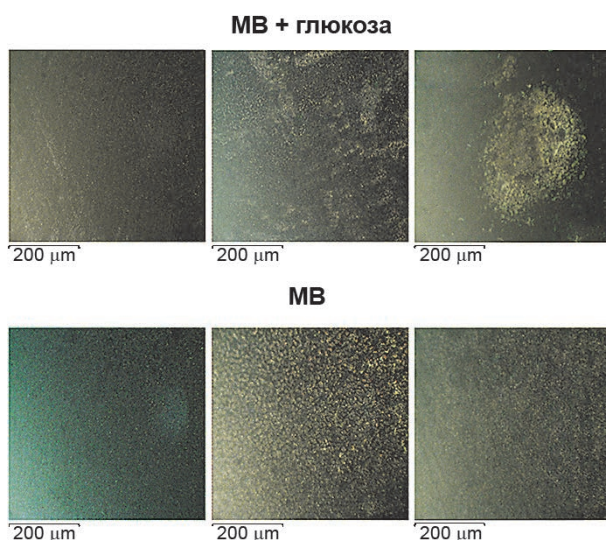
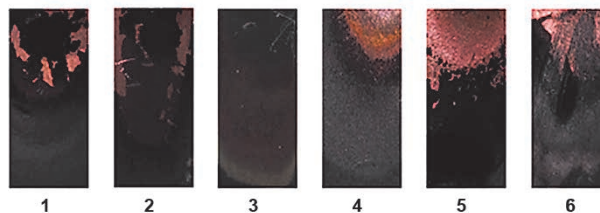


Рис. 3. Микрофотографии поверхности W после ее экспозиции в течение 120 суток в растворах: МВ (модельная вода, контрольный образец), МВ+глюкоза (модельная вода с добавлением микроорганизмов)

Результаты гравиметрических исследований образцов представлены на рис. 4 и в табл. 1. Согласно результатам гравиметрического анализа, средняя скорость коррозии вольфрамового покрытия в низкоминерализованной МВ составила 1,4 мкм/год, при микробном воздействии она увеличилась до значения 3,8 мкм/год. Средняя площадь коррозионных поражений в МВ участка «Енисейский» составила  $(7,0 \pm 0,4)\%$  на основании внешнего вида вольфрамового покрытия, после проведения испытаний в течение 120 суток, при микробном воздействии —  $(12,0 \pm 0,7)\%$ .

### После коррозионных испытаний



### После травления

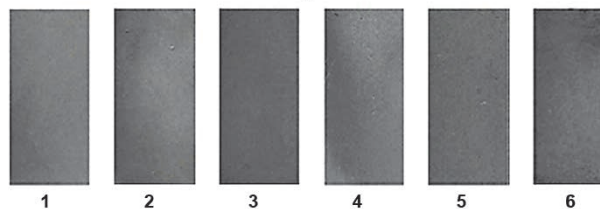


Рис. 4. Внешний вид вольфрамового покрытия после коррозионных испытаний на 120 суток и после проведения травления: МВ+глюкоза (модельная вода с добавлением микроорганизмов) — образцы 1–3, МВ (модельная вода, контрольный образец) — образцы 4–6

Таблица 1. Скорости коррозии вольфрамового покрытия образцов

| № | Донор      | $V_{кор}$ <sup>р</sup><br>мкм/год | $V_{кор ср}$ <sup>р</sup><br>мкм/год | Средняя площадь коррозионных поражений, % |
|---|------------|-----------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------------|
| 1 | МВ+глюкоза | 5,02                              | 3,8                                  | $12,0 \pm 0,7$                            |
| 2 |            | 3,85                              |                                      |                                           |
| 3 |            | 2,47                              |                                      |                                           |
| 4 | МВ         | 1,02                              | 1,4                                  | $7,0 \pm 0,4$                             |
| 5 |            | 1,85                              |                                      |                                           |
| 6 |            | 1,47                              |                                      |                                           |

### Оценка поверхности образца методом РФЭ

Согласно результатам РФЭ-исследований на поверхности образца до коррозионных испытаний наблюдается ряд состояний вольфрама, которые можно соотнести по энергии связи с металлическим W<sup>0</sup> (31,2 эВ), карбидным (32,2 эВ), а также оксидами — WO<sub>2</sub> (33,9 эВ) и WO<sub>3</sub> (35,8 эВ) (рис. 4). Последние два состояния также подтверждаются спектрами O1s и C1s, на которых присутствуют пики для O1s — WO<sub>3</sub> (529,8 эВ) и WO<sub>2</sub> (530,9 эВ) и для C1s — WC (283,3 эВ).

На обзорных спектрах образцов после коррозии, кроме увеличения количества поверхностных загрязнений, при сохранении основных линий главного элемента появляются линии, характерные для меди, алюминия и серы, спектр которой можно разложить на три дублета в случае образца с микроорганизмами, относящихся к WS<sub>2</sub> (161,4 эВ), Cu<sub>2</sub>S (162,4 эВ) и CS<sub>2</sub> (163,5 эВ), и два дублета — WS<sub>2</sub> и CS<sub>2</sub> — с аналогичными энергиями связи. Спектр вольфрама W4f в данном случае также претерпевает изменения:

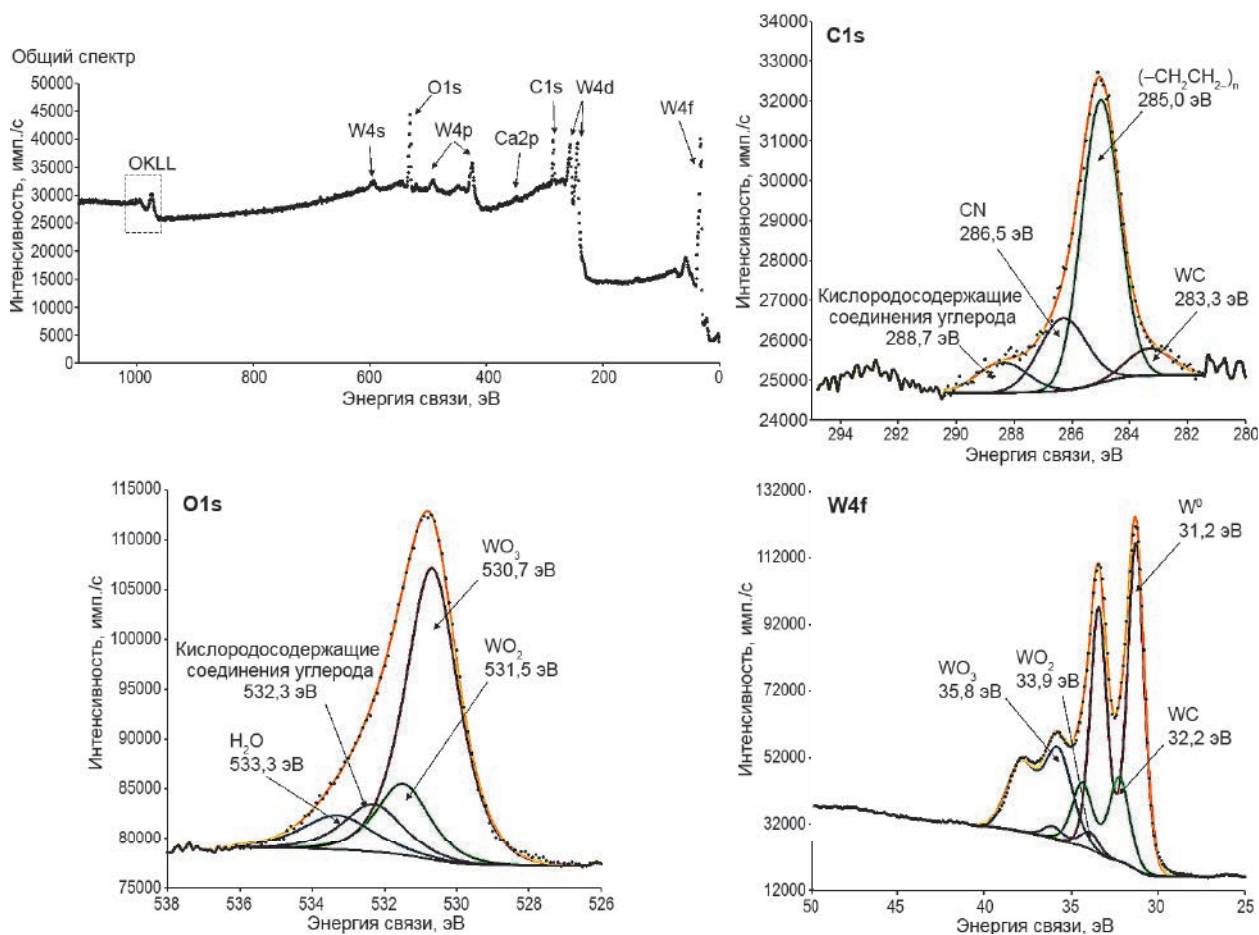


Рис. 5. РФЭ-спектры поверхности вольфрама

металлическое состояние не обнаруживается, зато наблюдаются дополнительные состояния  $WS_2$  с энергией связи 32,3 эВ и вольфраматов (37,5 эВ). На спектре кислорода O1s также виден наплыв в области меньших энергий связи, который может быть компенсирован пиком с положением 529,9 эВ и соотнесен с  $Me^{n+}(WO_4)_n$ . Фосфора в образцах обнаружено не было.

**Заклучение**

Методом газофазного осаждения при расходах гексафторида вольфрама 3 л/ч и водорода 10 л/ч, давлении 50 мм рт. ст. и температуре 550 °С на медную подложку было нанесено вольфрамовое покрытие толщиной 30 мкм, которое является достаточно устойчивым в модельных условиях участка «Енисейский» и имеет среднюю скорость коррозии 1,4 мкм/год. При этом можно отметить общий характер коррозионного растворения таких покрытий без локальных очагов, что является важным отличием от других материалов. Согласно данным РФЭ-спектроскопии, на поверхности вольфрама после экспозиции 120 суток отсутствуют рефлексы меди, являющейся веществом подложки,

что свидетельствует о низкой пористости этих покрытий и высокой эффективности экранирования материала от воздействия коррозионной среды. Следует добавить, что продуктом коррозии вольфрама является  $WO_3$ , который гораздо более инертен по сравнению с металлическим вольфрамом, оксидами железа и меди в диапазонах pH 5–8. Важно отметить сравнительно высокую устойчивость вольфрамовых покрытий в условиях микробного обрастания. При активном развитии микрофлоры отмечен двукратный рост скорости коррозии по сравнению со сталью марки Ст3, для которой ранее нами отмечался ее 5–10-кратный рост [23]. Метод химического газофазного осаждения позволяет наносить вольфрам на изделия различной конфигурации, включая контейнеры для хранения РАО, изготовленные как из меди, так и из низколегированной стали. Оценка себестоимости вольфрамового покрытия толщиной 100 мкм на всей площади внутренней поверхности контейнера емкостью 200 л показывает, что его стоимость составит около 150 тысяч рублей, и, с учетом антикоррозионной эффективности покрытия, такой подход можно считать экономически целесообразным.

## Литература

1. Iannuzzi M., Frankel G. S. The carbon footprint of steel corrosion // *Npj Materials Degradation*. 2022. Vol. 6 (1). P. 101. DOI: 10.1038/s41529-022-00318-1.
2. Крючков Д. В., Болдырев К. А. Принципы комплексного учета процессов эволюции инженерных барьеров безопасности при оценке распространения радионуклидов за пределы объекта // *Радиоактивные отходы*. 2019. № 4 (9). С. 106—115. DOI: 10.25283/2587-9707-2019-4-106-115.
3. King F., Lilja C., Pedersen K., Pitkaenen P., Vaehaenen M. An update of the state-of-the-art report on the corrosion of copper under expected conditions in a deep geologic repository (SKB-TR-10-67). Sweden, 2010.
4. Deyab M. A., Ouarsal R., Lachkar M., El Bali B., Essehli R. Phosphites compound: Novel corrosion inhibitor for radioactive waste container (carbon steel) in simulated Callovo-Oxfordian (COx) groundwater // *Journal of Molecular Liquids*. 2016. Vol. 219. Pp. 994—999. DOI: 10.1016/j.molliq.2016.04.027.
5. King F. Container Materials for the Storage and Disposal of Nuclear Waste // *Corrosion*. 2013. Vol. 69. No. 10. Pp. 986—1011. DOI: 10.5006/0894.
6. 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.
7. Зеликман А. Н., Никитина Л. С. Вольфрам. — М.: Металлургия, 1978. 272 с.
8. Lassner E., Schubert W.-D. Tungsten: Properties, chemistry, technology of the element, alloys, and chemical compounds. Springer, 1999. 422 p.
9. Kim H., Lee H. J., Kim S. H., Jang C. Plasma thermal performance of a dual-process PVD/PS tungsten coating on carbon-based panels for nuclear fusion application // *Fusion Engineering and Design*. 2016. Vol. 109—111. Part A. Pp. 590—595. DOI: 10.1016/j.fusengdes.2016.02.040.
10. García Gallardo J. A., Giménez M. A. N., Gervasoni J. L. Nuclear properties of Tungsten under 14 MeV neutron irradiation for fusion-fission hybrid reactors // *Annals of Nuclear Energy*. 2020. Vol. 147. P. 107739. DOI: 10.1016/j.anucene.2020.107739.
11. Xie J., Lu H., Lu J., Song X., Wu Sh., Lei J. Additive manufacturing of tungsten using directed energy deposition for potential nuclear fusion application // *Surface and Coatings Technology*. 2021. Vol. 409. P. 126884. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2021.126884.
12. Pitts R. A. et al. Physics basis for the first ITER tungsten divertor // *Nuclear Materials and Energy*. 2019. Vol. 20. P. 100696. DOI: 10.1016/j.nme.2019.100696.
13. Bachmann C. et al. Issues and strategies for DEMO in-vessel component integration // *Fusion Engineering and Design*. 2016. Vol. 112. Pp. 527—534. DOI: 10.1016/j.fusengdes.2016.05.040.
14. Harutyunyan Z., Ogorodnikova O., Gasparyan Y., Efimov V., Sorokin I., Sergeev N. et al. Tungsten fuzz annealing effect on deuterium retention in polycrystalline tungsten // *Journal of Nuclear Materials*. 2022. Vol. 567. P. 153811. DOI: 10.1016/j.jnucmat.2022.153811.
15. Zalavutdinov R., Novokhatsky A., Gusev V. et al. Electron beam treatment of tungsten mock-ups // *Physica Scripta*. 2017. Vol. 2017. No. T170. P. 014043. DOI: 10.1088/1402-4896/aa8b00.
16. Красовский А. И., Чужко Р. К., Балаховский О. А., Трегулов В. П. Фторидный процесс получения вольфрама. Физико-химические основы. Свойства металла. — М.: Наука, 1981. 261 с.
17. Королев Ю. М., Столяров В. И. Восстановление фторидов тугоплавких металлов водородом. — М.: Металлургия, 1981. 184 с.
18. Dushik V. V., Rozhanskii N. V., Lifshits V. O. et al. The formation of tungsten and tungsten carbides by CVD synthesis and the proposed mechanism of chemical transformations and crystallization processes // *Materials Letters*. 2018. Vol. 228. Pp. 164—167. DOI: 10.1016/j.matlet.2018.06.003.
19. Dushik V. V., Ruban E. A., Drovosekov A. B. et al. Synergetic Effect in Ni-P-W and W-C Multilayer Coating Systems Obtained by Chemical-Catalytic Metallization and Chemical-Vapor Deposition // *Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*. 2023. Vol. 17. Pp. 1364—1371. DOI: 10.1134/S1027451023060265.
20. Dushik V. V., Ruban E. A., Shaporenkov A. A. et al. Mechanical Properties and Corrosion-Electrochemical Behavior of Multilayer Coatings of the Ni-P and W-C Systems Obtained by Chemical-Catalytic Metallization and Chemical Vapor Deposition. Part 1: Structure and Mechanical Properties of Coatings // *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*. 2022. Vol. 58. No. 7. Pp. 1301—1306. DOI: 10.1134/S2070205122070048.
21. Душик В. В., Левдикова К. С., Шапоренков А. А. и др. Механические свойства и коррозионно-электрохимическое поведение многослойных покрытий системы Ni-P и W-C, получаемых методами химико-каталитической металлизации и химического газофазного осаждения. Ч. 2: Коррозионно-электрохимическое поведение покрытий // *Коррозия: материалы, защита*. 2022. № 2. С. 43—48. DOI: 10.31044/1813-7016-2022-0-2-43-48.
22. Rozov K. B., Rumynin V. G., Nikulenkov A. M., Leskova P. G. Sorption of  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $\text{Se}$ ,  $^{99}\text{Tc}$ ,  $^{152(154)}\text{Eu}$ ,  $^{239(240)}\text{Pu}$  on fractured rocks of the Yeniseysky site (Nizhne-Kansky massif, Krasnoyarsk

region, Russia) // Journal of Environmental Radioactivity. 2018. Vol. 192. Pp. 513–523. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2018.08.001.

23. 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. DOI: 10.25283/2587-9707-2021-3-103-113.

### Информация об авторах

*Душик Владимир Владимирович*, кандидат химических наук, ведущий научный сотрудник, ФГБУН Институт физической химии и электрохимии им. А. Н. Фрумкина РАН (119071, Москва, Ленинский пр-т, д. 31, корпус 4), e-mail: v.dushik@gmail.com.

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

*Шапагина Наталья Андреевна*, кандидат химических наук, старший научный сотрудник, ФГБУН Институт физической химии и электрохимии им. А. Н. Фрумкина РАН (119071, Москва, Ленинский пр-т, д. 31, корпус 4), e-mail: fuchsia32@bk.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-т, д. 31, корпус 4), e-mail: alexeysafonof@gmail.com.

### Библиографическое описание статьи

*Душик В. В., Абрамова Е. С., Шапагина Н. А., Сафонов А. В.* Оценка коррозионных свойств вольфрамового покрытия контейнеров для РАО, нанесенного газофазным методом // Радиоактивные отходы. 2024. № 2 (27). С. 50–58. DOI: 10.25283/2587-9707-2024-2-50-58.

## TUNGSTEN COATING APPLIED TO RADIOACTIVE WASTE CONTAINERS BY THE GAS-PHASE METHOD: ASSESSMENT OF CORROSION PROPERTIES

**Dushik V. V., Abramova E. S., Shapagina N. A., 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 February 1, 2024

*The article summarizes the study exploring the anti-corrosion characteristics of tungsten coatings produced by chemical gas-phase deposition in a solution simulating the geochemical conditions at the Yeniseiskiy site. The study shows that a 30-micron-thick tungsten-based coating appears to be quite stable with an average corrosion rate of 1.4 microns/year. It also notes the high stability of tungsten coatings under microbial fouling conditions.*

**Keywords:** radioactive waste, metal containers, tungsten coating, anti-corrosion properties, microbial corrosion.

### References

1. Iannuzzi M., Frankel G. S. The carbon footprint of steel corrosion. *Npj Materials Degradation*, 2022, vol. 6 (1), p. 101. DOI: 10.1038/s41529-022-00318-1.

2. Kryuchkov D. V., Boldyrev K. A. Printsipy kompleksnogo ucheta protsessov ehvolyutsii inzhenernykh bar'erov bezopasnosti pri otsenke rasprostraneniya radionuklidov za predely ob'ekta [Principles Ensuring Comprehensive Accounting of

- Processes Associated with Engineered Safety Barriers' Evolution: Assessing Radionuclide Spread Beyond Site Boundaries]. *Radioaktivnye otkhody — Radioactive Waste*, 2019, no. 4 (9), pp. 106—115. DOI: 10.25283/2587-9707-2019-4-106-115.
3. King F., Lilja C., Pedersen K., Pitkaenen P., Vae-haenen M. *An update of the state-of-the-art report on the corrosion of copper under expected conditions in a deep geologic repository* (SKB-TR-10-67). Sweden, 2010.
4. Deyab M. A., Ouarsal R., Lachkar M., El Bali B., Essehli R. Phosphites compound: Novel corrosion inhibitor for radioactive waste container (carbon steel) in simulated Callovo-Oxfordian (COx) groundwater. *Journal of Molecular Liquids*, 2016, vol. 219, pp. 994—999. DOI: 10.1016/j.molliq.2016.04.027.
5. King F. Container Materials for the Storage and Disposal of Nuclear Waste. *Corrosion*, 2013, vol. 69, no. 10, pp. 986—1011. DOI: 10.5006/0894.
6. 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.
7. Zelikman A. N., Nikitina L. S. *Vol'fram* [Tungsten]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1978. 272 p.
8. Lassner E., Schubert W.-D. *Tungsten: Properties, chemistry, technology of the element, alloys, and chemical compounds*. Springer, 1999. 422 p.
9. Kim H., Lee H. J., Kim S. H., Jang C. Plasma thermal performance of a dual-process PVD/PS tungsten coating on carbon-based panels for nuclear fusion application. *Fusion Engineering and Design*, 2016, vol. 109—111. Part A. Pp. 590—595. DOI: 10.1016/j.fusengdes.2016.02.040.
10. García Gallardo J. A., Giménez M. A. N., Gervasoni J. L. Nuclear properties of Tungsten under 14 MeV neutron irradiation for fusion-fission hybrid reactors. *Annals of Nuclear Energy*, 2020, vol. 147, p. 107739. DOI: 10.1016/j.anucene.2020.107739.
11. Xie J., Lu H., Lu J., Song X., Wu Sh., Lei J. Additive manufacturing of tungsten using directed energy deposition for potential nuclear fusion application. *Surface and Coatings Technology*, 2021, vol. 409, p. 126884. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2021.126884.
12. Pitts R. A. et al. Physics basis for the first ITER tungsten divertor. *Nuclear Materials and Energy*, 2019, vol. 20, p. 100696. DOI: 10.1016/j.nme.2019.100696.
13. Bachmann C. et al. Issues and strategies for DEMO in-vessel component integration. *Fusion Engineering and Design*, 2016, vol. 112, pp. 527—534. DOI: 10.1016/j.fusengdes.2016.05.040.
14. Harutyunyan Z., Ogorodnikova O., Gasparyan Y., Efimov V., Sorokin I., Sergeev N. et al. Tungsten fuzz annealing effect on deuterium retention in polycrystalline tungsten. *Journal of Nuclear Materials*, 2022, vol. 567, p. 153811. DOI: 10.1016/j.jnucmat.2022.153811.
15. Zalavutdinov R., Novokhatsky A., Gusev V. et al. Electron beam treatment of tungsten mock-ups. *Physica Scripta*, 2017, vol. 2017, no. T170, p. 014043. DOI: 10.1088/1402-4896/aa8b00.
16. Krasovskiy A. I., Chuzhko R. K., Balakhovskiy O. A., Tregulov V. R. *Ftoridnyy protsess polucheniya vol'frama. Fiziko-khimicheskiye osnovy. Svoystva metalla* [Tungsten production by the fluoride process. Physical and chemical fundamentals. Properties of metal]. Moscow, Nauka Publ., 1981. 261 p.
17. Korolev Yu. M., Stolyarov V. I. *Vosstanovleniye ftoridov tugoplavkikh metallov vodorodom* [Fluorides from refractory metals reduced by hydrogen]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1981. 184 p.
18. Dushik V. V., Rozhanskii N. V., Lifshits V. O. et al. The formation of tungsten and tungsten carbides by CVD synthesis and the proposed mechanism of chemical transformations and crystallization processes. *Materials Letters*, 2018, vol. 228, pp. 164—167. DOI: 10.1016/j.matlet.2018.06.003.
19. Dushik V. V., Ruban E. A., Drovosekov A. B. et al. Synergetic Effect in Ni-P-W and W-C Multilayer Coating Systems Obtained by Chemical-Catalytic Metallization and Chemical-Vapor Deposition. *Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*, 2023, vol. 17, pp. 1364—1371. DOI: 10.1134/S1027451023060265.
20. Dushik V. V., Ruban E. A., Shaporenkov A. A. et al. Mechanical Properties and Corrosion-Electrochemical Behavior of Multilayer Coatings of the Ni-P and W-C Systems Obtained by Chemical-Catalytic Metallization and Chemical Vapor Deposition. Part 1: Structure and Mechanical Properties of Coatings. *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*, 2022, vol. 58, no. 7, pp. 1301—1306. DOI: 10.1134/S2070205122070048.
21. Dushik V. V., Levdikova K. S., Shaporenkov A. A. et al. Mekhanicheskiye svoystva i korrozionno-elektrokhimicheskoye povedeniye mnogoslonykh pokrytiy sistemy Ni-P i W-C, poluchayemykh metodami khimiko-kataliticheskoy metallizatsii i khimicheskogo gazofaznogo osazhdeniya. Chast' 2: Korrozionno-elektrokhimicheskoye povedeniye pokrytiy [Mechanical Properties and Corrosion-Electrochemical Behavior of Multilayer Coatings of Ni-P and W-C Systems, Obtained by Methods of Electroless Plating and Chemical Vapor Deposition. Part 2. Corrosion and Electrochemical Behavior of Coatings]. *Korroziya: materialy, zashchita — Corrosion: materials, protection*, 2022, no. 2, pp. 43—48. DOI: 10.31044/1813-7016-2022-0-2-43-48.
22. Rozov K. B., Rumynin V. G., Nikulenkov A. M., Leskova P. G. Sorption of  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{99}\text{Tc}$ ,  $^{152(154)}\text{Eu}$ ,  $^{239(240)}\text{Pu}$  on fractured rocks of the Yeniseisky site



(Nizhne-Kansky massif, Krasnoyarsk region, Russia). *Journal of Environmental Radioactivity*, 2018, vol. 192, pp. 513–523. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2018.08.001.  
23. Boldyrev K. A., Safonov A. V., Abramova E. S., Gladkikh N. A., Kryuchkov D. V. Issledovanie korrozii ughlerodistoi stali St3 v prisutstvii mikroorganizmov,

vydelennykh iz podzemnykh vod na uchastke "Eniseiskii" [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.

---

### Information about the authors

*Dushik Vladimir 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: v.dushik@gmail.com.

*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.

*Shapagina Natalia Andreevna*, Candidate of Chemical Sciences, 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: fuchsia32@bk.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

Dushik V. V., Abramova E. S., Shapagina N. A., Safonov A. V. Tungsten Coating Applied to Radioactive Waste Containers by the Gas-Phase Method: Assessment of Corrosion Properties. *Radioactive Waste*, 2024, no. 2 (27), pp. 50–58. DOI: 10.25283/2587-9707-2024-2-50-58. (In Russian).