



Электролит радионуклидного никелирования полной выработки

Н.А. Ершова^{1✉}, Н.А. Поляков²

¹Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева,
РФ, 125047, г. Москва, Миусская площадь, д. 9

²Институт физической химии и электрохимии имени А.Н. Фрумкина РАН,
РФ, 119071, г. Москва, Ленинский проспект, д. 31

e-mail: nadineershova@gmail.com

Аннотация. Настоящая работа освещает отличительные особенности процесса разработки комплексного электролита радионуклидного никелирования. Разработка электрохимических методов получения радионуклидных покрытий связана с рядом технологических и метрологических затруднений, обусловленных радиохимической спецификой процесса, такой как: применение истощаемых ультраразбавленных по металлу электролитов, особый контроль промывных вод, малый объем электролитических ванн вкпе с крайне высокой ценой изотопно обогащенного материала, необходимость получения специальных разрешений и лицензий. Предложен состав электролита, позволяющий ведение электрохимического осаждения никеля до полного истощения ванны по металлу, что не только позволяет точно контролировать количественные характеристики осадков, но и избегать образования жидких радиоактивных отходов. В работе также демонстрируется целесообразность определения, прямо или косвенно, на основе данных прямого радиометрического контроля ванн и покрытий таких параметров процесса, как полнота выработки электролита по целевому металлу, скорость падения концентрации металла в растворе, выход по току для реакции осаждения. Практический материал собран в процессе разработки комплексного щелочного электролита переменной концентрации для осаждения радиоактивных изотопов металлов группы железа.

Ключевые слова: никель, электроосаждение, радионуклид, никель-63, щелочной электролит

Для цитирования: Ершова Н.А., Поляков Н.А. Электролит радионуклидного никелирования полной выработки // Практика противокоррозионной защиты. – 2024. – Т. 29, № 3. – С. 50-60. <https://doi.org/10.31615/j.corros.prot.2024.113.3-5>

Статья получена 12.06.2024. Принята к публикации 16.08.2024. Опубликовано 01.09.2024.

Конфликт интересов. Поляков Н.А. является членом редакционной коллегии журнала «Практика противокоррозионной защиты» с 2010 г., но не имеет отношения к решению опубликовать данную статью. Статья прошла принятую в журнале процедуру рецензирования. Об иных конфликтах интересов авторы не заявляли.

Fully Developed Radionuclide Nickel Plating Electrolyte

Nadezhda A. Ershova^{1✉}, Nikolay A. Polyakov²

¹D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia,
9, square, Miuskaya Ploshchad, Moscow, 125047, Russian Federation

²A.N. Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry of RAS,
31, Leninskiy pr., Moscow, 119071, Russian Federation

e-mail: nadineershova@gmail.com

Abstract. The present work highlights the distinctive features of the process of developing an electrolyte for radionuclide nickel plating. The development of electrochemical methods for producing radionuclide coatings is associated with a number of technological and metrological difficulties caused by the radiochemical specificity of the process, such as: the use of depletable electrolytes ultra-diluted in metal, special control of wash waters, a small volume of electrolytic baths coupled with an extremely high price of the isotopically enriched material, the need to obtain special permits and licenses. An electrolyte composition is proposed that allows electrochemical deposition of nickel until the bath is completely depleted in metal, which not only allows precise control over the quantitative characteristics of the deposits, but also avoids the formation of liquid radioactive waste. The paper also demonstrates the feasibility of determining, directly or indirectly, based on direct radiometric monitoring of baths and coatings, such process parameters as the



completeness of electrolyte depletion by target metal, the rate of decrease in metal concentration in the solution, the current efficiency for the deposition reaction. Practical material was collected in the process of developing a complex alkaline depletable electrolyte for the precipitation of radioactive isotopes of iron group metals.

Keywords: nickel, electrodepositon, radionuclide, nickel-63, alkaline electrolyte

For citation: Ershova, N. A., Polyakov, N. A. (2024). Fully Developed Radionuclide Nickel Plating Electrolyte. *Theory and Practice of Corrosion Protection*, 29(3), 50-60. <https://doi.org/10.31615/j.corros.prot.2024.113.3-5>

Received June 12, 2024. Accepted for publication August 16, 2024. Published September 01, 2024.

Conflict of interest. Polyakov N.A. has been a member of the editorial board of the journal "Theory and Practice of Corrosion Protection" since 2010, but was not involved in the decision to publish this article. The article passed the journal's peer review procedure. The authors declared no other conflicts of interest.

Введение

Процессы радионуклидной металлизации крайне востребованы в радиохимических производствах как в процессе очистки радиоактивного материала, так и при изготовлении изотопной продукции [1], однако, в силу преимущественно коммерческой основы соответствующих разработок, информации о них сравнительно мало. В то же время, специфика работы с радионуклидами (количественная ограниченность и дороговизна материала, лицензионный и технический контроль со стороны государства, запрет на использование одного и того же оборудования и оснастки для разных изотопов с целью недопущения перекрестного загрязнения продуктов даже в молекулярных количествах и пр.) приводит к нецелесообразности использования широкоизвестных методов получения покрытий способами напыления или электролиза из ванн постоянной концентрации [2].

Наиболее близким к радионуклидному никелированию является процесс подготовки изотопнообогащенных никелевых мишеней для ядерной медицины, где, по ряду причин, наиболее широко применяемым методом производства является электрохимическое осаждение на металлическую подложку из водного электролита с применением нерастворимых платиновых анодов и комплексных электролитов переменной концентрации [3-6]. При этом радиоактивность материала вносит ряд дополнительных ограничений [7].

Типичная толщина слоев изотопнообогащенного металла, заявленная для использования в медицинских ускорителях и радионуклидных источниках, варьируется от долей мкм до долей мм в зависимости параметров облучения или требуемого по-

тока излучения [8], а площадь нанесения обычно не превышает пары квадратных сантиметров. Значение толщины осаждаемого слоя радиоизотопа Ni-63 определяется желаемой величиной плотности нанесенной активности [7] и лимитируется его самоэкранированием [9], т. е. варьируется в диапазоне от 0,15 мкм до 2,25 мкм.

Электрохимическое осаждение на металлическую подложку из водного электролита является наиболее часто применяемым способом изготовления изотопнообогащенных мишеней и радионуклидных покрытий и имеет ряд преимуществ перед другими методами: относительная простота и отсутствие потребности в сложном и дорогостоящем оборудовании; высокая эффективность; легкое управление процессом через плотность тока или катодный потенциал; электроосажденные слои не требуют дальнейшей постобработки; можно работать с небольшими количествами материала и получать осадки в широком диапазоне толщин [2, 3, 10, 11]. Однако получаемые покрытия могут иметь неоднородную толщину [11, 12], а осаждение из раствора с низким содержанием металлов может быть время- и трудоемким (например, [1, 3, 10]).

В большинстве случаев, катод (подложка) имеет плоскую форму (например, дискообразную) и обычно располагается в нижней части электролизера [2-5], хотя может быть расположен и как компонент стенки ячейки [13].

Электроосаждение обычно проводят в гальваностатическом (контролируемом постоянном токе) [1, 3, 8, 11] или потенциостатическом (контролируемом постоянном напряжении) режиме [10, 14]. Большинство авторов сообщают об электроосаждении, используя одно значение тока (гальваноста-

тический режим) или напряжения (потенциостатический режим). Редко сообщается о целевом электроосаждении металлов группы железа с использованием сложных программ тока или напряжения или с использованием импульсного тока [3, 6].

Изотопно-обогащенный металл (как стабильный, так и радиоактивный) дорог и, как правило, доступен в ограниченных количествах. В результате, его электрохимическое осаждение обычно проводят в небольшом объеме (от единиц до 10 мл) электролитической ванны, содержащей низкую или умеренную концентрацию изотопа (от нескольких десятков до долей ммоль/л) в целях избегания возможного изотопного разбавления получаемых покрытий [3]. Поэтому концентрация целевого компонента подбирается таким образом, чтобы при осаждении всего содержащегося в ванне материала образовался слой осадка необходимой толщины [1, 8].

Методики экспериментов

Совокупность упомянутых выше факторов приводит к тому, что наиболее перспективным представляется упрощенный состав ванны, который включает в себя только необходимые компоненты, такие как фоновый электролит, регуляторы pH и ингибиторы выделения водорода. Работа с радиоактивным изотопом, испытывающим бета-распад, делает крайне затруднительным длительное и/или повторное использование ванн, а также использование не водной основы электролита из-за возможных последствий процесса радиолитического разложения компонентов раствора. Дополнительно, применение ультраразбавленных вырабатываемых составов обосновывается существующей производственной необходимостью нанесения слоев материала субмикронной толщины при высоких требованиях к количественной точности.

В целях минимизации потерь радиоактивного материала, первичная разработка метода нанесения велась на стабильном материале (природном никеле) с применением метода меченных атомов, когда наносимый металлический слой содержал лишь следовые количества изотопа никель-63, позволяющие, тем не менее, применять методы радиометрического контроля как к со-

ставу рабочей ванны, так и к получаемым покрытиям.

Все химикаты имели заявленную производителем химическую чистоту свыше 99% и дополнительной обработке или очистке не подвергались. В качестве подложки использовалась никелевая фольга марки НПО-Эви, имеющая заявленную химическую чистоту 99,9%, подготовленная непосредственно перед каждым опытом методом химической полировки в смеси концентрированных (максимальная коммерческая концентрация) фосфорной, серной, азотной и этановой кислот, взятых в соотношении 3:3:7:8 частей и подогретых до 55...60 °С, в течение 45...60 сек с последующей тщательной промывкой дистиллированной водой комнатной температуры. По расположению, подложка представляла собой боковую стенку прямоугольной электролитической ячейки, противоположной стенкой которой выступал анод. В качестве анода использовалась платиновая фольга чистотой 99,9%.

Электролит на основе комплексов никеля с ионами аммония и кислотными остатками слабых органических кислот состоял из аммиака, водного раствора гидразин-гидрата, малоната аммония и сульфата аммония в концентрациях 1,5...3,5 моль/л, 0,5...2,5 моль/л и по 0,1...0,3 моль/л соответственно. В качестве водной основы электролита использовалась дистиллированная деионизованная вода. Целевой металл, в виде концентрированного раствора хлорида никеля-63 в 0,5 M соляной кислоте, добавлялся непосредственно в электролитическую ванну в расчетном количестве, обеспечивающем желаемую плотность нанесения активности при известной удельной активности радионуклидного препарата.

Существенную сложность исследования процессов с применением радионуклидов составляет поиск лаборатории для метрологического обеспечения работ. Помимо оборудования, непосредственно обеспечивающего определение того или иного параметра, работа с образцами, содержащими никель-63, требует контроля уровня радиоактивного загрязнения поверхности низкоэнергетическими бета-распадчиками и наличие у лаборатории лицензий и разрешений на работу с данным радионуклидом в открытом

виде. Поэтому, в целях минимизации числа сложных и дорогостоящих измерений, представляется обоснованным проводить анализ таких параметров покрытия, как, например, профиль поверхности, уже после предварительной оценки равномерности нанесения осадка. В рамках данной работы для первичной грубой оценки этого параметра было предложено использовать радиометрическое картографирование образцов на полупроводниковых и сцинтилляционных спектрометрах-радиометрах с использованием коллиматоров и масок, а также метода сравнения с эталонными источниками излучения соответствующих изотопов. Для этого была собрана установка из воздушной ионизационной камеры с плоскопараллельным расположением электродов и пикоамперметра Keithley 6485/E. Таким образом, при картографировании определялся ионизационный ток, создаваемый потоком электронов от того или иного участка радионуклидного покрытия. Площадь измеряемой области образца обуславливалась порогами чувствительности приборов и подбиралась метрологической службой АО «РИТ-ВЕРЦ» (г. Санкт-Петербург) по критерию минимально необходимой для измерения с погрешностью не более 5%.

Визуально поверхность образцов исследовалась при помощи оптического микроскопа БЛМ М-1 (производство ООО "ЛОМО-МА", г. Санкт-Петербург) с комплексом цифровой визуализации MC HDMI ULTRA-HD-4K (производство то же) на 1000-кратном оптическом увеличении в режиме отраженного неполяризованного света.

В рамках данной работы такие параметры, как шероховатость и трещиноватость поверхности покрытий, оценивались лишь качественно. Линейные размеры неровностей поверхности первично грубо оценивались по разности положений калиброванного микровинта микроскопа при фокусировке на выступах и углублениях видимого поля поверхности образца. В выбранных на основании такой оценки областях повышенной шероховатости делались шлифы, равномерность профиля которых оценивалась использованием окуляр-микрометра. Шкала окуляр-микрометра калибровалась посредством поверенного объект-микрометра к

ценой деления 5 мкм. Трещиноватость и хрупкость покрытия определялась радиометрически путем оценки изменения уровня радиоактивного загрязнения поверхности нанесенного металла методами сухого и влажного мазка, согласно ГОСТ Р 50830-95. Оценка проводилась как для образцов, находящихся на хранении, так и для образцов, подвергнутых изгибу, в соответствии с номенклатурами коммерческих радионуклидных источников, содержащих никель-63.

Общепринятым методом контроля концентрации компонентов в составе электролита в процессе работы ванны являются титриметрические методы анализа [15], недоступные в рассматриваемых процессах как по причине существенного удорожания процесса, так и, в случае использования радионуклидного материала, с точки зрения нежелательности образования дополнительных радиоактивных отходов в виде оттитрованных смесей и использованной для титрования оснастки. Электролиты осаждения металлов группы железа, преимущественно, являются комплексными с характерной цветной окраской целевого комплекса, что позволяет при использовании истоцаемых электролитов вести контроль концентрации металла в растворе с использованием оптических методов анализа [3, 11]. Например, широко освещена методика ведения процесса электролиза до обесцвечивания при работе с щелочными водными электролитами никелирования, содержащими ряд комплексов катиона Ni^{2+} с NH_3 , окрашенных в синий цвет по максимумам поглощения примерно при 612 и 373 нм [3, 16].

Учет таких факторов, как ультранизкие концентрации раствора по металлу, малый объем электролитических ванн и излучающая природа радионуклида определил также целесообразность применения радиометрических методов контроля состава ванны с использованием жидкосцинтилляционного спектрометрического комплекса «СКС-07П-Б11» «Кондор».

Следующим значимым параметром процесса катодной электрохимической обработки, учитываемым при разработке и оценке методик получения покрытий, является выход по току реакции осаждения. Классический подход [11, 15] предполагает

применение гравиметрических методов для оценки количества осажденного металла за определенный временной промежуток, но в случае с покрытием толщиной порядка микронов и площадью в пару сантиметров это не представляется возможным даже с допущением плотной упаковки, позволяющим не вводить понижающие коэффициенты для плотности материала. Обусловлено это тем, что для радионуклидных источников с максимальной оправданной плотностью нанесения активности 370 МБк/см^2 при самой распространенной в промышленности удельной активности радионуклида 370 ГБк/г [1] масса получаемого покрытия будет, соответственно, 1 мг/см^2 , т.е., согласно открытым данным номенклатур производителей, не превысит 3 мг/источник за все время нанесения. Эта величина существенно ниже рекомендуемых методиками пороговых значений в 50 мг и при использовании стандартных аналитических весов с погрешностью в доли мг не обеспечит желаемой точности метода. Поэтому авторами было предложено определять выход по току расчетным методом на основе данных, полученных в ходе радиометрического контроля содержания радионуклида в ванне.

Результаты и обсуждение

Так как выбранный набор метрологических средств подразумевал прямой радиометрический контроль электролита, для осуществления модельной отработки режимов электролиза был применен метод меченых атомов. Радионуклидный препарат, в количествах, минимально обеспечивающих возможность радиометрии раствора, вносился в уже подготовленную электролитическую ванну, содержащую соли природного никеля, непосредственно перед запуском процесса. Полученные временные зависимости уровня радиоактивности раствора были пересчитаны в кривые изменения концентрации электролита по металлу и послужили опорными данными для определения величины выхода по току катодной реакции осаждения (табл.).

Однако стоит отметить, что модельный метод с заменой радионуклидного материала стабильными изотопами имеет ограниченную применимость.

Так, например, освещенные в литературе цитратные модельные растворы демонстрировали стабильную эффективную работу вплоть до снижения pH ванны до $7,8$. Но при работе с радиоактивным никелем без изотопного разбавления уже падение pH электролита до $9,2$ (что соответствует осаждению около 80% материала) привело к изменению цвета раствора с голубого на горчичный, что свидетельствует об изменении комплексного состава раствора. Конкурирующее комплексообразование не изменяет скорости процесса осаждения, но сказывается на предельной выработке раствора по металлу, не поднимающейся выше $99,98\%$ (недопустимо низкое значение из-за ограничений по содержанию никеля-63 в жидких отходах), а, преимущественно, равной $99,5\%$ (рис. 1).

Растворы, содержащие малонатные комплексы, не демонстрируют столь значимых различий в устойчивости стабильных и радиоактивных никелевых комплексов. Данный факт послужил причиной рассмотрения

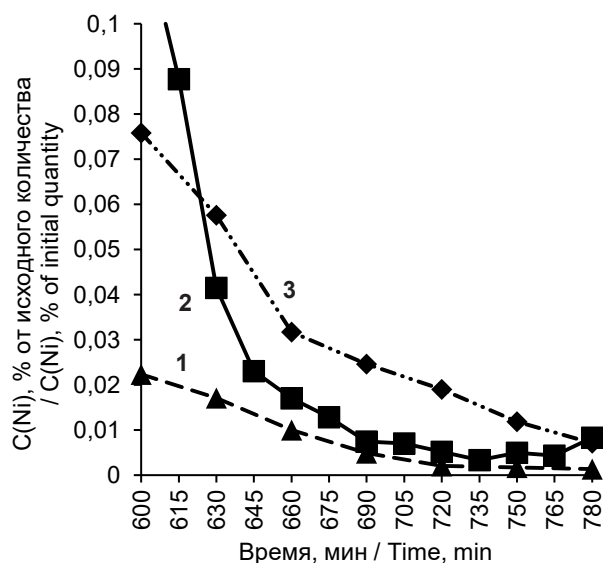


Рис. 1. Радиометрические кривые зависимости выработки цитратного электролита от времени в отсутствие корректировки pH (завершающая стадия):
1 – $5,0 \text{ мА/см}^2$; 2 – $2,5 \text{ мА/см}^2$; 3 – $0,5 \text{ мА/см}^2$

Fig. 1. Radiometric curves of the dependence of citrate electrolyte production on time in the absence of pH correction (final stage): – 5.0 mA/cm^2 ; 2 – 2.5 mA/cm^2 ; 3 – 0.5 mA/cm^2

Таблица. Расчетные данные выхода по току осаждения никеля из предлагаемого малонатного электролита, основанные на данных прямого радиометрического контроля содержания радионуклида в электролитической ванне

Table. Calculated data on the current efficiency of nickel deposition from the proposed malonate electrolyte, based on the data of direct radiometric monitoring of the radionuclide content in the electrolytic bath

Малонатный электролит, гальваностатический режим, плотность тока 5 мА/см ² Malonate electrolyte, galvanostatic mode, current density 5 mA/cm ²						
Время электролиза, ч / Electrolysis time, h	Масса Ni в растворе, г / Ni mass in solution, g	Δмассы, г / Δmass, g	% высадки / % deposition	Масса осадка теор. (Ni), г / teor.coating mass, g	Δмассы, г Δmass, g	BT, % / Faradaic efficiency, %
0,0	0,0407	±0,0004		0,0000		
0,5	0,0404	±0,0004	0,61	0,1465		0,2
1,0	0,0381	±0,0004	6,46	0,2929		0,9
1,5	0,0349	±0,0004	14,27	0,4394		1,3
2,0	0,0336	±0,0004	17,37	0,5858		1,2
2,5	0,0302	±0,0004	25,82	0,7323		1,4
3,0	0,0273	±0,0003	32,93	0,8787	±0,0003	1,5
3,5	0,0262	±0,0003	35,63	1,0252		1,4
4,0	0,0218	±0,0003	46,50	1,1716		1,6
5,0	0,0133	±0,0002	67,19	1,4645		1,9
6,0	0,0028	±0,0002	93,04	1,7574		2,2
7,0	0,0009	±0,0002	97,78	2,0503		1,9
8,0	0,0002	±0,0002	99,54	2,3432		1,7

в дальнейшем именно аммиачно-малонатного состава электролита.

Вторым значимым отклонением получаемого результата нанесения чистого радионуклида от достигнутого на модельной

металлической смеси является чрезмерная шероховатость получаемого покрытия (рис. 2), а также его хрупкость и трещиноватость, что хорошо фиксируется как микроскопическими, так и радиометрическими методами.

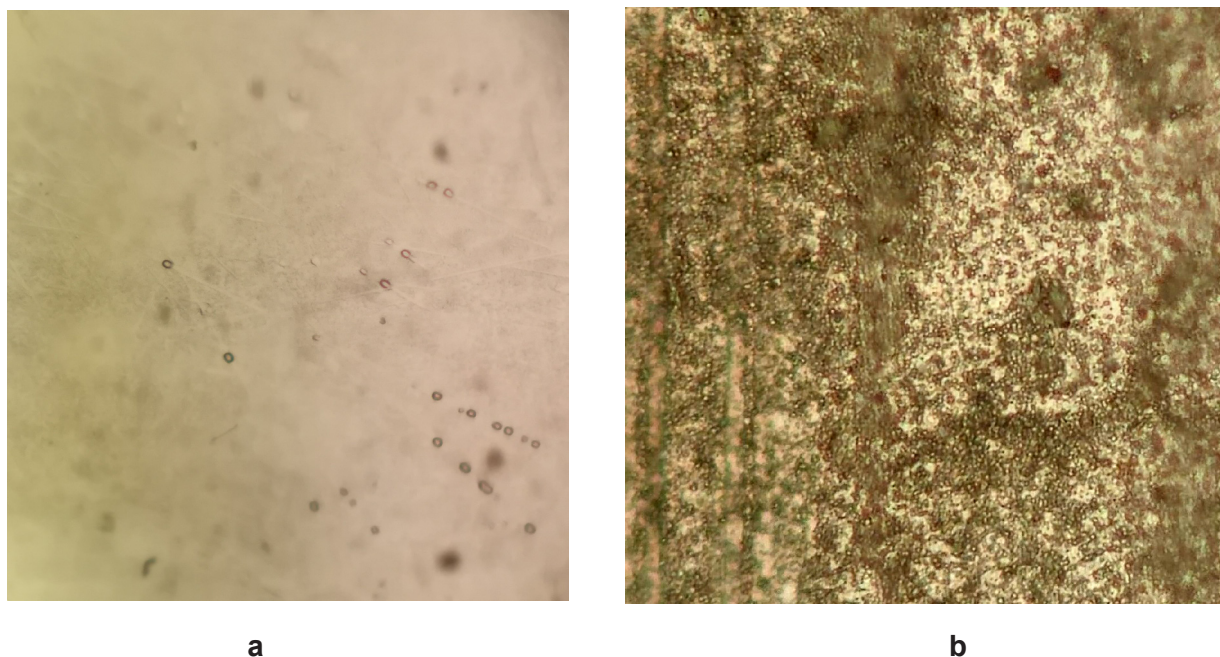


Рис. 2. Фотографии поверхности образцов, полученных из модельного (а) и радионуклидного (б) составов, с 1000-кратным увеличением

Fig. 2. Photographs of the surface of samples obtained from the model (a) and radionuclide (b) compositions, with a magnification of 1000x

Согласно предварительной оценке по описанной выше методике, наибольшая высота профиля R_z для образца, полученного из модельного раствора, составила менее 1 мкм, а для радионуклидных образцов – 2 мкм. Эти данные не могут служить количественной оценкой параметра, так как цена деления откалиброванного в описанных выше условиях окуляр-микрометра составила 1 мкм (т. е. погрешность методики достигает более 50% для отдельных образцов). Однако, в совокупности с наблюдаемым различием в матовости покрытий и количестве выступов и впадин на единицу поверхности, свидетельствует о значимом различии в шероховатости покрытий, получаемых из модельного и радионуклидного растворов.

Большая хрупкость и трещиноватость радионуклидных осадков по сравнению с модельными (природный никель с радионуклидной меткой) подтверждается ростом величины радиометрически определяемого уровня радиоактивного загрязнения поверхности (т.е. выражается в количестве молекул никеля-63, снимаемых с поверхности образца) как в процессе хранения (в

среднем, эквивалент от 5 до 10 частиц для модельного покрытия и от 40 до 240 частиц для радионуклидных образцов за 7 дней хранения), так и в процессе скручивания пластинок шириной 10 мм и толщиной порядка 0,1 мм в цилиндры диаметром 10 мм (в среднем, эквивалент от 5 до 15 частиц для модельного покрытия и от 40 до 1200 частиц для радионуклидных образцов).

При этом, предлагаемый состав позволяет вести процесс при комнатной температуре (18...30 °С) как в гальванодинамическом, так и в гальваностатическом режиме при pH 8,8 и выше без корректировки ванны в ходе процесса.

Примечательно, что радиометрический анализ истощенного, согласно данным УФ-ВИД спектрофотометрии, электролита радионуклидного никелирования (рис. 3) показал 3...8% содержание никеля-63 в растворе.

Такая неточность метода измерения допустима технологиями изготовления мишеней для ядерной медицины, накапливающих и перерабатывающих отработанные составы ванн, но неприемлема при содержании в растворе радиоактивных элементов не только в силу ускоренного старения

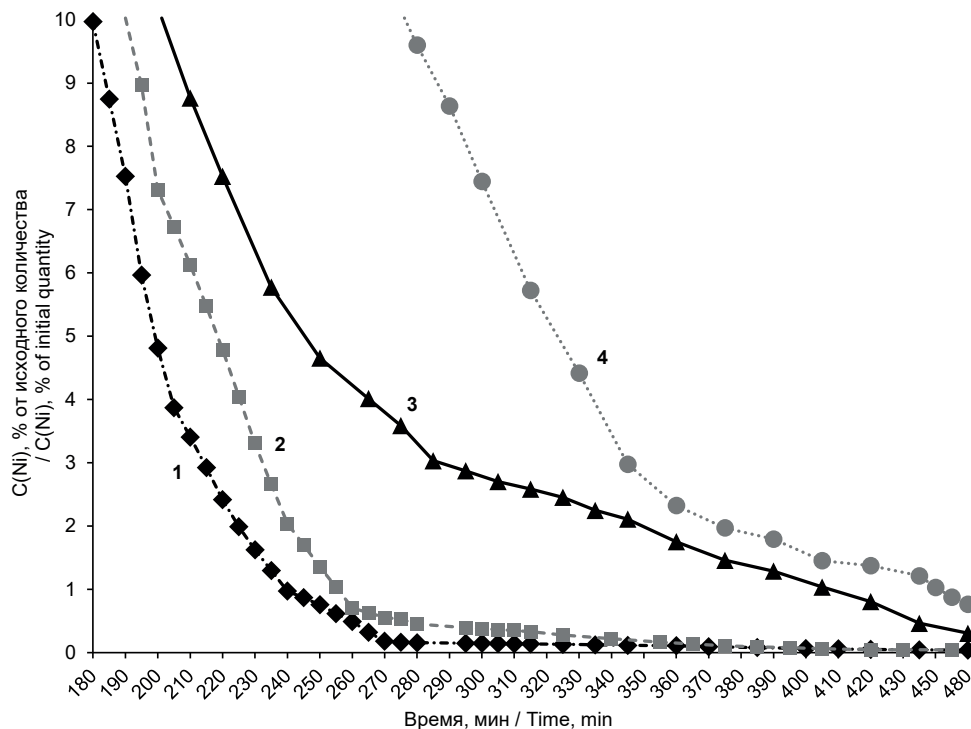


Рис. 3. Кривые осаждения металла, полученные методами УФ-спектроскопии (1, 3) и прямой радиометрии (2, 4): 1, 2 – 5,0 мА/см²; 3, 4 – 2,5 мА/см²

Fig. 3. Metal deposition curves obtained by UV spectroscopy (1, 3) and direct radiometry (2, 4): 1, 2 – 5.0 mA/cm²; 3, 4 – 2.5 mA/cm²

таких электролитов [2], приводящего к невозможности повторного или длительного использования ванны, но в виду необходимости строго контроля за образованием или отсутствием на производстве жидких радиоактивных отходов. В то же время контроль содержания в растворе никеля-63 с использованием жидкосцинтилляционной радиометрии позволяет отслеживать падение концентрации радионуклида в электролите вплоть до присутствия отдельных единиц, что соответствует выработке ванны в диапазоне от 99,99% до 99,9999% в зависимости от стартовой концентрации, а периодический контроль позволяет получить графики зависимости концентрации радионуклида от времени ведения процесса для выбранного режима электролиза (например, рис. 4).

Дополнительно, построение достаточно точной кривой падения концентрации радионуклида в растворе посредством радиометрического контроля позволяет определить массу осажденного за выбранный период времени металла без учета гравиметрической погрешности весов, а дополнительным

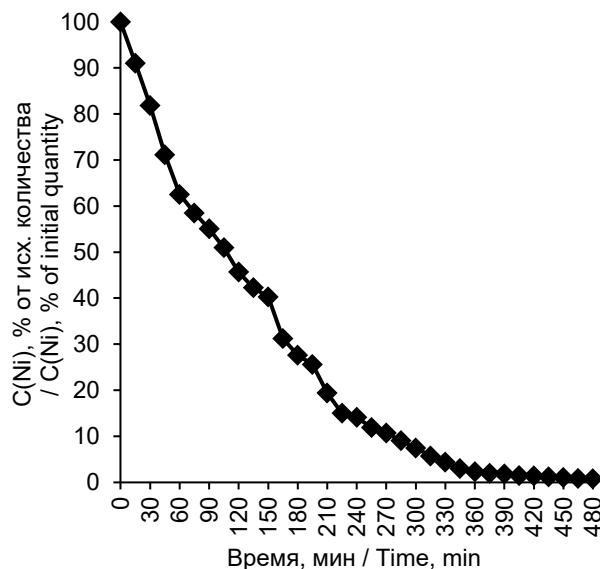


Рис. 4. Радиометрическая кривая зависимости выработки предлагаемого электролита от времени гальваностатическом режиме электролиза при плотности тока 2,5 мА/см²

Fig. 4. Radiometric curve of the dependence of the production of the proposed electrolyte on time in the galvanostatic electrolysis mode at a current density of 2.5 mA/cm²

преимуществом предлагаемого подхода служит отсутствие необходимости ступенчатого ведения процесса электролиза, так как радиометрические измерения, в противовес гравиметрическим, не требуют извлечения исследуемого образца из ванны. Как видно, предложенный метод является достаточно эффективным для первичной оценки равномерности нанесения радионуклидных покрытий.

Выводы

1. Предложен состав истощаемого электролита, позволяющий получать количественно контролируемые никелевые покрытия микронной и субмикронной толщины без необходимости корректировки состава ванны в процессе электролиза. При этом малонатно-аммиачная вариация состава показала наименьшую зависимость качества покрытия от уровня изотопного обогащения осаждаемого металла радионуклидом никель-63.

2. Показана допустимость и предпочтительность радиометрических методов контроля полноты осаждения радионуклида по сравнению с классическими методами оценки выработки комплексных никелевых электролитов по металлу.

3. Обнаружено, что метод изотопных индикаторов имеет ограниченную применимость при разработке методик электрохимического осаждения при работе с бета-излучающими радионуклидами.

Литература

1. Ershova N.A., Krasnov A.A., Legotin S.A. et al. Electrochemical deposition of a radionuclide nickel-63 on betavoltaic cells for a nuclear battery based on silicon p-i-n junctions // IOP Conf. Series: Materials Sci. and Engineering. – 2020. – V. 950. P. 1-7. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/950/1/012007>

2. Ершова Н.А., Поляков Н.А. Проблематика электрохимического радионуклидного никелирования // XVI Конференция молодых ученых, аспирантов и студентов ИФХЭ РАН «Физикохимия-2021»: сборник тезисов докладов. – М.: ИФХЭ РАН, 2021. – С. 91-92

3. Mieszkowska M., Grden M. Electrochemical deposition of nickel targets from aqueous electrolytes for medical

radioisotope production in accelerators: a review // J. of Solid State Electrochemistry. – 2021. – V. 25. – P.1699-1725. <https://doi.org/10.1007/s10008-021-04950-w>

4. Synowiecki M.A., Perk L.R., Nijssen J.F.W. Production of novel diagnostic radionuclides in small medical cyclotrons // EJNMMI radiopharm. chem. Springer. – 2018. – V. 3. <https://doi.org/10.1186/s41181-018-0038-z>

5. Chotkowski M., Połomski D., Czerwinski K., Potential application of ionic liquids for electrodeposition of the material targets for production of diagnostic radioisotopes // Materials. – 2020. – V.13(22). – P. 5069. <https://doi.org/10.3390/ma13225069>

6. Manrique-Arias J.C., Avila-Rodriguez M.A. A simple and efficient method of nickel electrodeposition for the cyclotron production of ^{64}Cu // Appl Radiat Isotop. – 2014. – V. 89. – P. 37-41. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2014.01.024>

7. Steeb J.L. Nickel-63 microirradiators and applications, Ph. D. Thesis. - Atlanta: Georgia Institute of Technology, 2010.

8. Krasnov A.A. et al. Development of betavoltaic cell technology production based on microchannel silicon and its electrical parameters evaluation // Applied Radiation and Isotopes. – 2017. – V. 121. – P.71-75 <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2016.12.019>

9. Alam Tariq R., Pierson Mark A., Prelas Mark A. Beta particle transport and its impact on betavoltaic battery modeling // Applied Radiation and Isotopes. – 2017. – V. 130. – P. 80-89 <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2017.09.009>

10. Мамаев В.И., Кудрявцев В.Н. Никелирование: учебное пособие. – М.: РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2014. – 198 с.

11. Мамаев В.И. Функциональная гальванотехника: учебное пособие. – Киров: ФГБОУ ВПО «ВятГУ», 2013. – 208 с.

12. Stolarz A., Target preparation for research with charged projectiles // J. of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. – 2014. – V. 299. – P. 913-931. <https://doi.org/10.1007/s10967-013-2652-2>

13. Soenarjo S. et al. Simulations on Nickel Target Preparation and Separation of Ni (II)-Cu (II) Matrix for Production of Radioisotope ^{64}Cu // GANENDRA Majalah IPTEK Nuklir. – 2011. – V.14(1). – P. 1-9. <https://doi.org/10.17146/>



gnd.2011.14.1.26

14. Suryanto H., Kambali I. A novel method for ^{57}Ni and ^{57}Co production using cyclotron-generated secondary neutrons // *Atom Indonesia*. – 2018. – V. 44. – P. 81-87. <https://doi.org/10.17146/aij.2018.872>

15. Орлова С.И., Абрамсон Д.С. Контроль электролитов и качества гальванопокрытий. – Уфа: Белая река, 2010. – 327 с.

16. Skitał P.M., Sanecki P.T., Saletnik D., Kalembkiewicz J. Electrodeposition of nickel from alkaline $\text{NH}_4\text{OH}/\text{NH}_4\text{Cl}$ buffer solutions // *Trans. Nonferrous Metals Soc. China*. – 2019. – V. 29. – P. 222-232. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(18\)64931-3](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(18)64931-3)

References

1. Ershova, N. A., Krasnov, A. A., Legotin, S. A., et al. (2020). Electrochemical deposition of a radionuclide nickel-63 on betavoltaic cells for a nuclear battery based on silicon p-i-n junctions. *IOP Conf. Series: Materials Sci. and Engineering*, 950, 1-7. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/950/1/012007>

2. Ershova, N. A., Polyakov, N. A. (2021). Problems of electrochemical radionuclide nickel plating. *Conference of young scientists, postgraduates and students of the Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry of the Russian Academy of Sciences «Physicochemistry-2021»: collection of abstracts of reports*. Moscow: Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry of the Russian Academy of Sciences, 91-92. (in Russ.)

3. Mieszkowska, M., Grden, M. (2021). Electrochemical deposition of nickel targets from aqueous electrolytes for medical radioisotope production in accelerators: a review. *J. of Solid State Electrochemistry*, 25, 1699-1725. <https://doi.org/10.1007/s10008-021-04950-w>

4. Synowiecki, M. A., Perk, L. R., Nijssen, J. F. W. (2018). Production of novel diagnostic radionuclides in small medical cyclotrons. *EJNMMI radiopharm. chem. Springer*, 3. <https://doi.org/10.1186/s41181-018-0038-z>

5. Chotkowski, M., Połomski, D., Czerwinski, K. (2020). Potential application of ionic liquids for electrodeposition of the material targets for production of diagnostic radioisotopes. *Materials*, 13(22), 5069. <https://doi.org/10.3390/ma13225069>

6. Manrique-Arias, J. C., Avila-Rodriguez, M. A. (2014). A simple and efficient method of nickel electrodeposition for the cyclotron production of ^{64}Cu . *Appl Radiat Isotop*, 89, 37-41. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2014.01.024>

7. Steeb, J. L. (2010). *Nickel-63 microirradiators and applications*, Ph. D. Thesis. Atlanta: Georgia Institute of Technology.

8. Krasnov, A. A., et al. (2017). Development of betavoltaic cell technology production based on microchannel silicon and its electrical parameters evaluation. *Applied Radiation and Isotopes*, 121, 71-75 <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2016.12.019>

9. Alam, Tariq R., Pierson, Mark A., Prelas, Mark A. (2017). Beta particle transport and its impact on betavoltaic battery modeling. *Applied Radiation and Isotopes*, 130, 80-89 <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2017.09.009>

10. Mamaev, V. I., Kudryavtsev, V. N. (2014). *Nickel plating: a tutorial*. Moscow: Mendeleev University of Chemical Technology of Russia. (in Russ.)

11. Mamaev, V. I. (2013). *Functional electroplating: a tutorial*. Kirov: Vyatka State University of Economics. (in Russ.)

12. Stolarz, A. (2014). Target preparation for research with charged projectiles. *J. of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 299, 913-931. <https://doi.org/10.1007/s10967-013-2652-2>

13. Soenarjo, S., et al. (2011) Simulations on Nickel Target Preparation and Separation of Ni (II)-Cu (II) Matrix for Production of Radioisotope ^{64}Cu . *GANENDRA Majalah IPTEK Nuklir*, 14(1), 1-9. <https://doi.org/10.17146/gnd.2011.14.1.26>

14. Suryanto, H., Kambali, I. (2018). A novel method for ^{57}Ni and ^{57}Co production using cyclotron-generated secondary neutrons. *Atom Indonesia*, 44, 81-87. <https://doi.org/10.17146/aij.2018.872>

15. Orlova, S. I., Abramson, D. S. (2010). *Control of electrolytes and quality of electroplated coatings*. Ufa: Belaya Reka. (in Russ.)

16. Skitał, P. M., Sanecki, P. T., Saletnik, D., Kalembkiewicz, J. (2019). Electrodeposition of nickel from alkaline $\text{NH}_4\text{OH}/\text{NH}_4\text{Cl}$ buffer solutions. *Trans. Nonferrous Metals Soc. China*, 29, 222-232. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(18\)64931-3](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(18)64931-3)



Информация об авторах

Ершова Надежда Александровна, аспирант, Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева, г. Москва, Российская Федерация

Поляков Николай Анатольевич, к.х.н., заведующий лабораторией, Институт физической химии и электрохимии имени А.Н. Фрумкина РАН, г. Москва, Российская Федерация

Information about authors

Nadezhda A. Ershova, postgraduate, D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia (MUCTR), Moscow, Russian Federation

Nikolai A. Polyakov, Ph.D. in Chemistry, Head of Laboratory, A.N. Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry of RAS, Moscow, Russian Federation

В.И. Вигдорович, Л.Е. Цыганкова,
Н.В. Шель, Л.Г. Князева, А.Н. Зазуля

Защита металлов от атмосферной коррозии масляными покрытиями

Объем издания: 14,5 п.л. (232 стр.)
Стоимость 520 руб.

В монографии обобщены литературные данные и результаты собственных исследований авторов, проводимых ими более пятнадцати лет и касающихся кинетики реакции восстановления растворенного кислорода и анодной ионизации металлов под тонкими пленками влаги и защитных неметаллических покрытий на основе товарных и отработанных нефтяных и синтетических масел.

Приводится классификация и свойства широкого круга защитных неметаллических составов. Рассматриваются атмосферная коррозия некоторых конструкционных материалов, защитные свойства композиций, содержащих полиамиды, безоксидная пассивация стали азотсодержащими соединениями – компонентами масляных фаз, результаты многолетних промышленных испытаний эффективности некоторых антикоррозионных покрытий подобного рода.

Впервые в отечественной литературе приводятся подобные данные для поли- α -олефиновых синтетических масел и их тонких поверхностных пленок на основе Мобил-1. Сообщаются вязкостнотемпературные и реологические характеристики неингибированных и ингибированных защитных масляных композиций и тонких пленок, их влаго- и кислородопроницаемость и структура.

Рассматривается кинетика электродных процессов на углеродистой стали, покрытой масляными пленками в нейтральных и кислых хлоридных средах с изменяющейся и постоянной ионной силой. Оцениваются кинетические параметры электродных реакций в подобных условиях.