

Научная статья

УДК 006.9; 543.6; 669.245

DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-3-117-131

## АНАЛИТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ГАЛЬВАНИЧЕСКИХ ЭЛЕКТРОЛИТОВ НИКЕЛИРОВАНИЯ МЕТОДАМИ АЭС ИСП И МС ИСП

*Р.М. Дворецков<sup>1</sup>, Ф.Н. Карачевцев<sup>1</sup>, С.А. Демин<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

**Аннотация.** Данная работа посвящена вопросам определения химического состава гальванических электролитов никелирования с использованием методов атомно-эмиссионной спектроскопии и масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой. Определена массовая доля компонентов в модельных растворах электролитов при разном разбавлении. Проведена оценка метрологических характеристик полученных результатов. Выбраны диапазоны концентраций, до которых оптимально разбавлять исходные растворы, чтобы получать воспроизводимые и достоверные результаты.

**Ключевые слова:** аналитический контроль, гальваническое никелирование, сульфат никеля, хлорид никеля, электролиты, атомно-эмиссионная спектроскопия с индуктивно связанной плазмой (АЭС ИСП), масс-спектрометрия с индуктивно связанной плазмой (МС ИСП)

**Для цитирования:** Дворецков Р.М., Карачевцев Ф.Н., Демин С.А. Аналитический контроль химического состава гальванических электролитов никелирования методом АЭС ИСП и МС ИСП // Труды ВИАМ. 2023. № 3 (121). Ст. 11. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-3-117-131.

Scientific article

## ANALYTICAL CONTROL OF THE CHEMICAL COMPOSITION OF GALVANIC ELECTROLYTES OF NICKEL PLATING BY THE ICP AES AND ICP MS METHODS

*R.M. Dvoretzky<sup>1</sup>, F.N. Karachevtsev<sup>1</sup>, S.A. Demin<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

**Abstract.** This work is devoted to the issues of determining the chemical composition of galvanic nickel plating electrolytes using the methods of atomic emission spectrometry and inductively coupled plasma mass spectrometry. The mass fraction of components in model electrolyte solutions at different dilutions was determined. The metrological characteristics of the obtained results were evaluated. Concentration ranges were chosen to which it is optimal to dilute stock solutions in order to obtain reproducible and reliable results.

**Keywords:** analytical control, galvanic nickel plating, nickel sulfate, nickel chloride, electrolytes, inductively coupled plasma atomic emission spectrometry (ICP AES), inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP MS)

**For citation:** Dvoretzky R.M., Karachevtsev F.N., Demin S.A. Analytical control of the chemical composition of galvanic electrolytes of nickel plating by the ICP AES and ICP MS methods. *Trudy VIAM*, 2023, no. 3 (121), paper no. 11. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-3-117-131.

### **Введение**

Никелирование – это процесс нанесения на поверхность изделия покрытия, осажденного из электролитов на основе никеля, которое улучшает или придает изделию новые свойства [1, 2]. Большая часть из всего производимого никеля используется именно в виде покрытий [3]. Существуют следующие технологии никелирования: электролитическое (гальваническое) и химическое [4]. Гальваническое никелирование представляет собой один из наиболее важных и широко применяемых процессов электроосаждения металлов [5]. Как правило, никелированием обрабатывают металлические изделия, изготовленные из стали либо других металлов и сплавов, в частности меди, цинка, алюминия и др. [6–8].

Благодаря склонности к пассивации никель оказывается химически стойким во многих средах и защищает изделия от коррозии, как в атмосфере, так и в воде, растворах щелочей и солей, а также в растворах органических и минеральных кислот [9–11].

Однако изделия никелируют не только с целью антикоррозионной защиты, но и для придания характерного декоративного вида обработанной поверхности [12]. Никель и сплавы на основе никель-олова наряду с такими металлами, как золото, платина, серебро, родий, хром или их сплавы, обладают высокими декоративными свойствами.

Хром часто наносят по никелевому подслою, который в свою очередь наносят на поверхность осажденного слоя меди. Такое трехслойное осажденное покрытие является самым распространенным из защитно-декоративных и наносится обычно на различные марки сталей, хотя может применяться и в случае цинковых сплавов.

Никель (толщиной не менее 6 мкм) или сплавы на основе никель-олова применяют в качестве барьерных (антидиффузионных) слоев [13]. Кроме того, сплав на основе никель-олова является также распространенным антифрикционным покрытием. Такие покрытия способны лучше удерживать на поверхности изделия смазку [14, 15].

Никелевое электролитическое осаждение может применяться, в том числе для нанесения на детали, подвергаемые пайке как низкотемпературными, так и высокотемпературными припоями; при этом никель обеспечивает возможность не только пайки, но и сварки – например, аргоно-дуговой. С этой целью никель (или медь по никелевому подслою) наносят на изделия из молибдена и вольфрама [16].

Осаждение никеля или хрома по подслою никеля, а также из сплавов типа никель-вольфрам и никель-олово, наряду с палладием, родием, рением и сплавами медь-олово применяют для повышения твердости и износостойкости поверхности деталей [17].

Кроме того, никель или сплавы с высоким содержанием никеля используют для частичной замены золота в печатных платах при замене нижележащего слоя золота.

Никелевое покрытие достаточно просто получить на катоде в виде осажденного слоя из раствора какого-либо растворимого соединения, содержащего никель [18], – например, из сульфата никеля, который широко применяется в индустрии начиная с 1840 г. Однако сам по себе он не пригоден для высококачественного поверхностного никелирования, так как однокомпонентные электролиты редко позволяют получать покрытия нужного качества: металлы из них часто выделяются в виде порошка или дендритов. Первый удачный многокомпонентный электролит был создан в 1916 г. и представлял собой смесь сульфата и хлорида никеля с борной кислотой.

В настоящее время растворы электролитов, применяемые на практике, содержат, как правило, несколько компонентов, каждый из которых вводится с какой-либо целью и имеет в процессе осаждения определенное значение, а иногда выполняет несколько функций [19, 20].

Например, в качестве специальных добавок можно применять смачиватели. Водород, выделяющийся одновременно с нанесением на поверхность металлического покрытия, нередко приводит к так называемому питтингу – образованию точечных язвочек в местах, где к поверхности прикрепляются пузырьки водорода. Для подавления этого явления в растворы добавляют вещества-смачиватели, которые облегчают отделение пузырьков.

Еще одним примером являются специальные поверхностно-активные добавки, которые содержатся почти во всех современных ваннах для электроосаждения металлов и сплавов [21]. В этом качестве применяются специализированные композиции, индивидуальные для каждого процесса и выпускаемые обычно под фирменными названиями [22]. Каждая такая добавка обычно содержит специально подобранную смесь нескольких веществ, которая способствует получению блестящих выровненных покрытий (под выравниванием имеется в виду заравнивание дефектов типа мелких царапин) [23]. Эти добавки нередко способствуют и большей твердости покрытий в результате их включения в осажденный слой. Многие из добавок являются ингибиторами процесса выделения металла.

Таким образом, сам термин «добавки» охватывает очень широкий спектр веществ, которые могут влиять на процесс электроосаждения никеля самыми разнообразными способами. Такие добавки, как правило, относят к одной из пяти основных групп:

- вещества, способствующие измельчению зерен в покрытии, т. е. увеличению скорости образования кристаллических зародышей;
- вещества, препятствующие образованию дендритов, т. е. блокирующие наиболее активно растущие места поверхности в результате избирательной адсорбции на них;
- выравнивающие агенты, которые снижают скорость осаждения на выступах поверхности сильнее, чем на впадинах, в результате чего поверхность постепенно сглаживается;
- блескообразователи – вещества, модифицирующие морфологию поверхности так, что она становится зеркально-блестящей;
- смачиватели, способствующие более эффективному удалению пузырьков водорода.

Для увеличения электропроводности в химический состав электролитов вводят добавки, которые не участвуют в катодном процессе, но являются переносчиками электричества [24]. В состав кислых электролитов можно добавлять кислоты с одноименным анионом основной соли, а в щелочные – гидроксиды натрия или калия.

Благодаря использованию растворимых анодов в большинстве химических составов электролитов концентрация ионов металлов поддерживается постоянной. Их основным недостатком является пассивация, которая уменьшает поверхность анода, увеличивая их поляризацию, и приводит к высвобождению кислорода. Для устранения пассивации в электролит добавляют депассиваторы – вещества, которые препятствуют образованию труднорастворимых соединений на поверхности анода.

Многие электролиты работают только в определенном интервале показателя рН раствора. Для его регулирования вводят буферные добавки – это чаще всего борная и уксусная кислоты или ацетат натрия.

Электролиты никелирования особенно многообразны, поэтому за длительную историю развития этого технологического процесса были предложены многие десятки различных электролитов. Наиболее распространенные и характерные для настоящего времени представлены в табл. 1 [25].

**Составы часто используемых электролитов никелирования  
и условия осаждения покрытий**

Компоненты* и условия осаждения	Содержание компонентов, г/л, в электролите с условным номером								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Сульфат никеля	250–300	–	250–300	120–140	140–200	–	–	–	200–250
Хлорид никеля	–	300–400	40–60	3–4	30–40	12–15	200–250	6–30	2–3
Сульфат никеля	–	–	–	–	–	300–360	–	–	–
Ацетат никеля	–	–	–	–	–	–	–	75–185	–
Борная кислота	30–35	25–30	30–35	–	25–40	30–35	–	–	30–35
Соляная кислота	–	–	–	–	–	–	60–80	–	–
Хлорид натрия	10–20	–	–	–	–	–	–	–	–
Сульфат натрия	–	–	–	50	60–80	–	–	–	40–60
Сульфат магния	–	–	–	30	–	–	–	–	–
Фторид калия	–	–	–	–	–	–	–	–	1,5–2,5
Сахарин	–	–	0,5–1,5	–	–	0,8–1,5	–	–	–
pH	4,5–5,5	2,5–3,0	4,5–5,2	4,5–5,3	5,2–5,8	3,6–4,2	–	4,0–4,5	4,0–5,5
Температура, °С	35–55	50–70	45–50	18–25	20–55	30–60	15–30	45–50	40–60
Плотность тока, А/дм <sup>2</sup>	0,5–4,0	2,0–8,0	2,0–8,0	0,5–1,5	0,5–2,0	5–12	0,5–4,0	2–20	0,5–2,0

\* Под сульфатом никеля в данном случае понимается семиводная соль NiSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O, а под хлоридом никеля – шестиводная соль NiCl<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O, под ацетатом и сульфатом никеля – четырехводные соли, под сульфатами магния и натрия – соответственно семиводная соль MgSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O и десятиводная соль Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>·10H<sub>2</sub>O. В электролиты также могут вводиться смачиватели и блескообразующие добавки – лаурилсульфат натрия, фталимид, бутиндиол и др.

Поскольку никелевое покрытие используется не только как декоративное, но и как защитное, антидиффузионное, антифрикционное, износостойкое и т. д., то качество покрытия во многом определяет и качество всего изделия. В свою очередь качество покрытия зависит не только от условий осаждения, но и от правильности приготовления применяемого электролита, т. е. от химического состава раствора.

На рис. 1 представлены фотографии, сделанные с помощью растрового электронного микроскопа, поверхности с никелевым осажденным покрытием, полученным из электролитов с разным соотношением сульфата и хлорида никеля. Видно, что при увеличении этого соотношения, структура покрытия становится менее плотной и более рыхлой, увеличивается размер зерна и шероховатость поверхности, что существенно уменьшает его прочность и ухудшает качество покрытия.

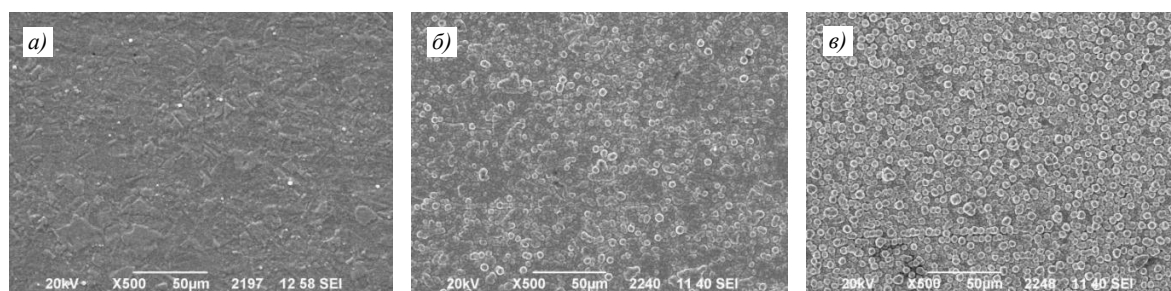


Рис. 1. Структура поверхности никелирования при разном соотношении сульфата и хлорида никеля

В растворе гальванического электролита никелирования могут содержаться от 2 до 7 компонентов. Кроме того, к нежелательным примесям в ряде растворов никелирования относятся ионы некоторых металлов – в частности, цинка, меди, железа, олова и др. [26]. Очевидно, что для определения химического состава гальванических электролитов никелирования необходимо использовать надежные методы аналитического контроля [27–29].

Ранее для определения массовой концентрации компонентов электролитов никелирования использовали методики, подробно описанные в ОСТ 3-6444-88 и ОСТ 1 904(11-15)-92 с применением следующих моноэлементных методов анализа:

аргентометрического, комплексонометрического, фотометрического, гравиметрического, объемно-хроматографического, потенциометрического, ацидеметрического, полярографического и атомно-абсорбционного. Все перечисленные методы являются одноэлементными, а описанные методики применимы только для обозначенных в них узких интервалов содержаний компонентов, кроме того, перечисленные методы достаточно длительные и трудоемкие.

Для одновременного и оперативного определения состава гальванических электролитов никелирования в широком диапазоне концентраций выбран метод атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой (АЭС ИСП).

Метод АЭС ИСП позволяет определять одновременно легирующие и примесные элементы в широких диапазонах концентраций с высокой точностью. Преимуществами метода, в том числе, являются низкие пределы обнаружения и определения веществ, градуировка прибора с использованием стандартных растворов чистых ионов-элементов, а также возможность использования модельных растворов для разработки методик измерений, контроля правильности анализа и исследования метрологических характеристик.

Большие концентрации солей в исходных растворах электролитов могут отрицательно влиять на ход и результаты анализа, поэтому необходимо исследовать фактор разбавления исходных растворов и определить оптимальное разбавление для одновременного определения основных компонентов и примесей.

Следует отметить, что сложность для аналитического контроля компонентов электролитов представляет то, что в одном составе электролита могут содержаться разные соли одного элемента – например, никеля (сульфат  $\text{NiSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  и хлорид  $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ). Авторами данной работы на первом этапе аналитического контроля предложено определять в растворах электролитов общее количество никеля ( $\text{NiSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O} + \text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ), а для того, чтобы рассчитать концентрацию каждого компонента – сульфата и хлорида, на втором этапе определять серу и хлор и далее рассчитывать концентрацию сульфата никеля, а по разнице с общим никелем – и хлорида никеля, или, наоборот, в зависимости от состава электролита.

Для определения серы и хлора авторами данной работы предложено в дополнение к методу АЭС ИСП использовать метод масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (МС ИСП) [30].

Метод МС ИСП позволяет проводить качественный и количественный анализ сложных смесей неорганических соединений с высокой чувствительностью и разрешающей способностью. Метод масс-спектрометрии основан на превращении определяемых компонентов в ионизированные частицы и их разделении в газовой фазе в соответствии с их массовыми числами – отношениями массы к заряду. Таким образом детектируется не излучение на характеристических длинах волн, как в методе АЭС ИСП, а отношение массы иона к его заряду. Метод МС ИСП позволяет определять элементы с атомной массой от 7 до 250, т. е. от Li до U в диапазоне содержаний от нанограммов на литр до 10–100 миллиграмм на литр.

Следует также отметить, что сульфат и хлорид никеля являются высокотоксичными и канцерогенными солями, а плазменные методы (такие как АЭС ИСП и МС ИСП) позволяют использовать сильно разбавленные растворы и при этом получать воспроизводимые и достоверные результаты. Таким образом, используя плазменные методы, можно также свести к минимуму этапы работы с концентрированными высокотоксичными соединениями. Для этого необходимо исследовать метрологические характеристики результатов анализа при разных разбавлениях исходных растворов гальванических электролитов никелирования [31].

Аналитический контроль и статистическая оценка технологических процессов позволяют своевременно выявлять факторы, которые приводят к дестабилизации и увеличению брака [32].

Целью данной работы является исследование следующих метрологических характеристик при анализе разных разбавлений модельных растворов электролитов никелирования с концентрациями и компонентами, близкими к наиболее часто используемым никелевым электролитам в промышленности:

- показатель повторяемости – стандартное квадратическое отклонение (СКО) повторяемости, выраженное в относительных процентах;
- показатель точности – погрешность в виде доверительного интервала (далее  $\Delta$ , выраженная, в абсолютных процентах).

При этом составы с добавлением смачивателей и блескообразователей не исследовались, так как главная цель представленной работы – показать возможности плазменных методов при анализе сильно разбавленных электролитов.

Поскольку существует большое разнообразие составов электролитов, применяемых для никелирования, то для упрощения исследования взяли два модельных варианта состава, включающих наиболее часто применяемые компоненты и возможные «вредные» примеси, для того чтобы показать возможности плазменных методов в аналитическом контроле электролитов и отработать методику анализа, выбрав оптимальное разбавление для одновременного определения макрокомпонентов и примесей.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ в рамках реализации комплексной научной проблемы 2.1. «Фундаментально-ориентированные исследования» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [33].

### **Материалы и методы**

В данной работе использованы следующие исходные вещества: борная кислота ОСЧ (99,995 %, ТУ 6-09-597–87); магний сернокислый семиводный ХЧ (99,5 %, ГОСТ 4523–77); никель сульфат (сернокислый) семиводный ХЧ (99 %, ГОСТ 4465–74); никель дихлорид шестиводный ОСЧ (99,99 %, ТУ 6-09-02-331–80); калий хлористый ХЧ (99,8 %, ГОСТ 4234–77); натрия сульфат десятиводный (99–102 %, ГОСТ 4171–76), а также моноэлементные растворы ионов хрома, меди, железа, олова и цинка.

Состав исходных модельных растворов электролитов никелирования представлен в табл. 2.

*Таблица 2*

**Состав исходных модельных растворов электролитов никелирования**

Условный номер состава электролита	Концентрация компонентов, мг/л					
	H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	MgSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O	NiSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O	NiCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	KCl	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ·10H <sub>2</sub> O
№ 1	30000	–	300000	20000	20000	–
№ 2	50000	30000	150000	300000	–	50000

Методика исследования состояла в том, чтобы провести элементный анализ модельных растворов электролитов методом АЭС ИСП при разных разбавлениях (в 50, 100, 250, 500, 1000, 2000, 4000 раз) и сравнить метрологические характеристики полученных результатов, а затем по полученным концентрациям элементов рассчитать концентрации компонентов в исходных неразбавленных растворах.

При этом в растворах электролита № 1 методом АЭС ИСП определяли только общее количество никеля ( $\text{NiSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O} + \text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ). Для того чтобы рассчитать концентрацию каждого компонента, методом ИСП МС определяли серу, по которой рассчитывали концентрацию сульфата никеля, затем – концентрацию никеля в сульфате, затем по разнице с общим содержанием никеля – концентрацию никеля в хлориде никеля, а затем рассчитывали непосредственно концентрацию хлорида никеля.

При этом в растворах электролита № 2 методом АЭС ИСП определяли только общее количество никеля ( $\text{NiSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O} + \text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ). Для того чтобы рассчитать концентрацию каждого компонента, методом ИСП МС определяли хлор, по которому рассчитывали концентрацию хлорида никеля, затем – концентрацию никеля в хлориде, затем по разнице с общим содержанием никеля – концентрацию никеля в сульфате никеля, а затем рассчитывали непосредственно концентрацию сульфата никеля.

Помимо перечисленных в табл. 2 компонентов в исходные модельные растворы вводили Cr, Cu, Fe, Sn, Zn, Co, Mn, Pb, Al в количестве 0,1 г/л каждого элемента для исследования возможности определения «вредных» примесей в электролитах никелирования.

Для удобства расчета, концентрации элементов в исходных и разбавленных модельных растворах выражены в мг/л, как показано в табл. 3.

Таблица 3

**Концентрации элементов в исходных модельных растворах электролитов никелирования**

Условный номер состава электролита	Концентрация элементов, мг/л							
	B	Mg	Ni	Ni	K	Na	Cr, Cu, Fe, Sn, Zn	Co, Mn, Pb, Al
э1	5245	–	62699	4939	10489	–	100	–
э2	8742	2 959	31350	74086	–	3568	–	100

Содержание B, Mg, Ni, K, Na, Cr, Cu, Fe, Sn, Zn, Co, Mn, Pb, Al определяли на спектрометре Agilent 5100. Для определения средней концентрации элементов и стандартного квадратического отклонения (СКО) для каждого разбавления отбирали от исходного раствора по шесть аликвотных частей и проводили измерения методом АЭС ИСП. Используемые в данной работе аналитические линии элементов для метода АЭС ИСП представлены в табл. 4 [34].

Таблица 4

**Аналитические линии определяемых элементов**

Элемент	Аналитическая линия, нм
B	249,77
Ni	352,45
K	766,49
Mg	279,55
Na	589,00
Cr	267,72
Cu	327,40
Fe	259,94
Sn	284,00
Zn	202,55
Co	238,89
Mn	293,93
Pb	405,78
Al	396,15

Использовали следующие рабочие параметры спектрометра Agilent 5100: мощность плазмы 1,2 кВт; расход плазмообразующего потока газа 12 л/мин; расход газа, подаваемого на распылительную камеру, 0,7 л/мин.

Для определения S и Cl использовали масс-спектрометр с индуктивно связанной плазмой iCAP Q со следующими рабочими параметрами прибора: мощность плазмы 1,4 кВт; расход плазмообразующего потока газа 13,5 л/мин; расход газа, подаваемого на распылительную камеру, 0,95 л/мин.

Градуировочные зависимости строили методом добавок.

Для каждого спектрометра в качестве плазмообразующего, распылительного и вспомогательного газа использовали аргон с чистотой 99,998 % (объемн.).

### Результаты и обсуждение

Электролит № 1. В табл. 5 представлены опорные значения концентраций элементов для каждого анализируемого разбавленного модельного раствора, полученного из исходного электролита № 1. Далее в табл. 6 приведены результаты определения элементов в исследуемых растворах из электролита № 1 методом АЭС ИСП – усредненные значения концентраций элементов и рассчитанный доверительный интервал  $\Delta$  (для  $n = 6, P = 0,95$ ).

Таблица 5

**Опорные значения концентраций элементов в анализируемых разбавленных модельных растворах, полученных из исходного электролита № 1**

Обозначение раствора	Концентрация элементов, мг/л							
	B	Ni	K	Cr	Cu	Fe	Sn	Zn
э1-4000	1,31	16,9	2,62	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025
э1-2000	2,62	33,8	5,24	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050
э1-1000	5,25	67,6	10,5	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
э1-500	10,5	135,3	21,0	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20
э1-250	21,0	250,8	42,0	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40
э1-100	52,5	627,0	104,9	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
э1-50	104,9	1254,0	209,8	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00

Таблица 6

**Усредненные результаты определения методом АЭС ИСП концентраций элементов в разбавленных модельных растворах электролита № 1 и доверительный интервал  $\Delta$  (для  $n = 6, P = 0,95$ )**

Обозначение раствора	Концентрация элементов, мг/л							
	B	Ni	K	Cr	Cu	Fe	Sn	Zn
э1-4000	1,22±0,01	18,1±0,1	2,38±0,02	0,016±0,002	0,024±0,001	0,011±0,002	0,019±0,005	0,019±0,001
э1-2000	2,46±0,01	36,0±0,3	4,49±0,01	0,045±0,001	0,051±0,002	0,045±0,004	0,039±0,014	0,044±0,003
э1-1000	4,94±0,01	73,4±0,4	8,58±0,04	0,095±0,001	0,100±0,001	0,110±0,001	0,089±0,007	0,094±0,001
э1-500	9,90±0,01	150,0±0,4	17,8±0,1	0,188±0,001	0,198±0,001	0,190±0,003	0,169±0,002	0,184±0,002
э1-250	19,3±0,1	274,7±2,3	33,1±0,2	0,392±0,002	0,397±0,002	0,390±0,004	0,366±0,006	0,380±0,002
э1-100	46,7±0,3	719,3±9,8	81,2±0,9	0,97±0,01	1,02±0,01	0,99±0,01	0,96±0,01	0,99±0,01
э1-50	91,2±0,9	1514,6±33,7	152,6±2,2	1,96±0,01	2,02±0,01	2,00±0,01	1,95±0,03	2,04±0,01

По полученным данным из табл. 6 построены мини-диаграммы, на которых показано:

– изменение относительного СКО концентраций элементов при изменении фактора разбавления исходного раствора электролита № 1 (рис. 2);

– изменение относительной погрешности  $\Delta$  для значений концентраций элементов при изменении фактора разбавления исходного раствора электролита № 1 (рис. 3).

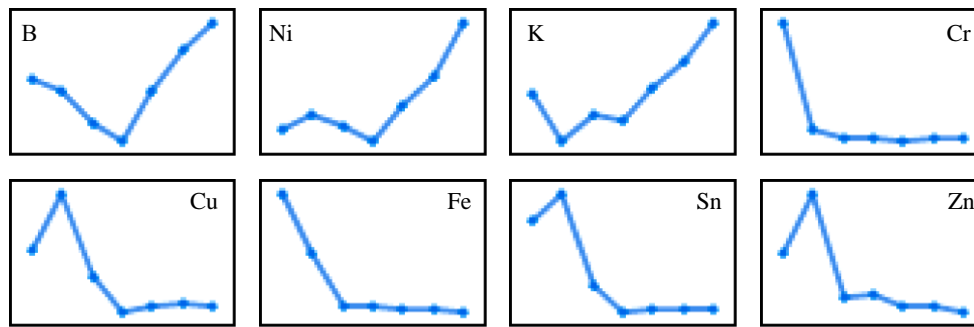


Рис. 2. Мини-диаграммы в виде графиков, на которых показано изменение относительного стандартного квадратического отклонения концентраций элементов при изменении фактора разбавления исходного раствора электролита № 1 – от 4000 до 50 раз (слева направо)

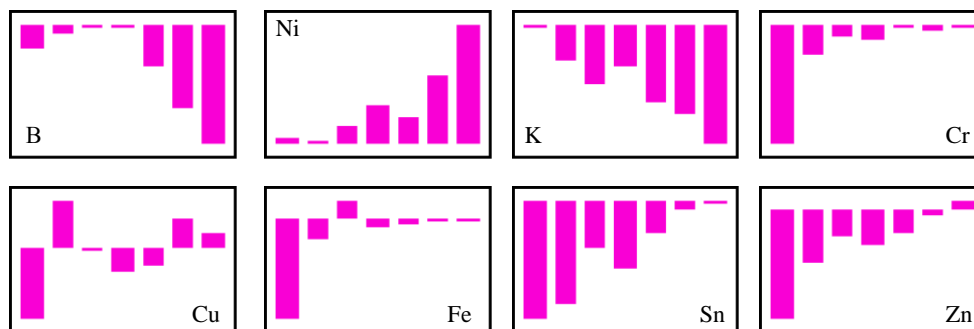


Рис. 3. Мини-диаграммы, на которых показано изменение относительной погрешности  $\Delta$  для значений концентраций элементов при изменении фактора разбавления исходного раствора электролита № 1 – от 4000 до 50 раз (слева направо)

Из представленных на рис. 2 и 3 мини-диаграмм видно, что при исследовании электролита № 1 обнаружено, что для таких элементов, как В, Ni, К, характерно увеличение значений относительного СКО и относительной погрешности  $\Delta$  с уменьшением фактора разбавления, а для элементов Cr, Cu, Fe, Sn, Zn характерно уменьшение значений относительного СКО и относительной погрешности  $\Delta$  с уменьшением фактора разбавления.

*Электролит № 2.* В табл. 7 представлены опорные значения концентраций элементов для каждого анализируемого разбавленного модельного раствора электролита № 2. Далее в табл. 8 приведены результаты определения элементов в исследуемых растворах электролита № 2 методом АЭС ИСП – усредненные значения концентраций элементов и рассчитанный доверительный интервал  $\Delta$  (для  $n = 6$ ,  $P = 0,95$ ).

Таблица 7

**Опорные значения концентраций элементов в анализируемых разбавленных модельных растворах электролита № 2**

Обозначение раствора	Концентрация элементов, мг/л							
	B	Ni	Mg	Na	Co	Mn	Pb	Al
э2-4000	2,19	26,4	0,74	0,89	0,025	0,025	0,025	0,025
э2-2000	4,37	52,7	1,48	1,78	0,050	0,050	0,050	0,050
э2-1000	8,74	105,4	2,96	3,57	0,10	0,10	0,10	0,10
э2-500	17,5	210,9	5,92	7,14	0,20	0,20	0,20	0,20
э2-250	35,0	421,7	11,8	14,3	0,40	0,40	0,40	0,40
э2-100	87,4	1 054,4	29,6	35,7	1,00	1,00	1,00	1,00
э2-50	174,8	2 108,7	59,2	71,4	2,00	2,00	2,00	2,00

**Усредненные результаты определения методом АЭС ИСП концентраций элементов в разбавленных модельных растворах электролита № 2 и доверительный интервал  $\Delta$  (для  $n = 6, P = 0,95$ )**

Обозначение раствора	Концентрация элементов, мг/л							
	B	Ni	Mg	Na	Co	Mn	Pb	Al
э2-4000	2,05±0,01	27,3±0,2	0,72±0,01	0,89±0,01	0,015±0,001	0,027±0,001	0,016±0,006	0,020±0,002
э2-2000	4,14±0,03	55,5±0,4	1,38±0,01	1,93±0,01	0,040±0,001	0,049±0,001	0,060±0,030	0,043±0,003
э2-1000	8,17±0,03	111,2±0,5	2,86±0,01	3,29±0,02	0,094±0,001	0,098±0,001	0,117±0,032	0,087±0,004
э2-500	16,0±0,1	225,6±0,3	4,99±0,01	6,48±0,02	0,186±0,002	0,195±0,001	0,202±0,005	0,172±0,001
э2-250	32,4±0,2	457,7±1,9	10,2±0,1	10,8±0,1	0,381±0,003	0,397±0,001	0,431±0,004	0,377±0,001
э2-100	77,0±0,6	1261,5±21,1	22,6±0,3	23,9±0,9	1,02±0,01	1,01±0,01	0,96±0,01	1,02±0,01
э2-50	151,4±1,4	2489,9±70,6	44,6±1,0	49,7±1,9	2,04±0,01	1,98±0,01	1,92±0,02	2,02±0,01

По полученным данным из табл. 8 построены мини-диаграммы, на которых показано:

- изменение относительного СКО концентраций элементов при изменении фактора разбавления исходного раствора электролита № 2 (рис. 4);
- изменение относительной погрешности  $\Delta$  для значений концентраций элементов при изменении фактора разбавления исходного раствора электролита № 2 (рис. 5).

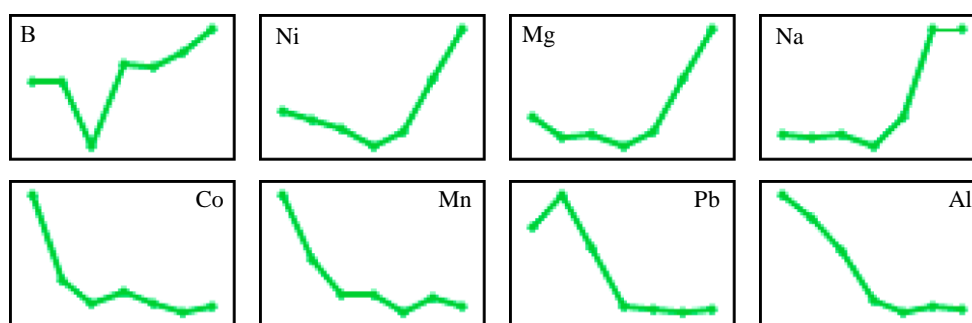


Рис. 4. Мини-диаграммы в виде графиков, на которых показано изменение относительного стандартного квадратического отклонения концентраций элементов при изменении фактора разбавления исходного раствора электролита № 2 – от 4000 до 50 раз (слева направо)

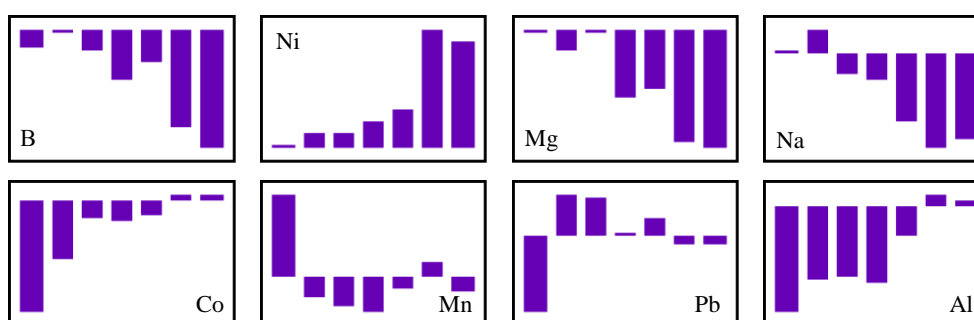


Рис. 5. Мини-диаграммы, на которых показано изменение относительной погрешности  $\Delta$  для значений концентраций элементов при изменении фактора разбавления исходного раствора электролита № 2 – от 4000 до 50 раз (слева направо)

Из представленных на рис. 4 и 5 мини-диаграмм видно, что при исследовании электролита № 2 обнаружено, что для таких элементов, как B, Ni, Mg, Na, характерно увеличение значений относительного СКО и относительной погрешности  $\Delta$  с уменьшением фактора разбавления, а для элементов Co, Mn, Pb, Al характерно уменьшение значений относительного СКО и относительной погрешности  $\Delta$  с уменьшением фактора разбавления.

Выявленные факты, объясняются тем, что при разбавлении высококонцентрированных растворов как непосредственно солевой фон, так и влияние легкоионизируемых элементов Mg, K, Na на аналитический сигнал существенно уменьшается, поэтому относительная погрешность  $\Delta$  и СКО имеют тенденцию к уменьшению при совместном определении таких элементов, как В, Ni, Mg, K, Na. В свою очередь в случае определения примесных содержаний Cr, Cu, Fe, Sn, Zn, Co, Mn, Pb, Al относительное СКО и относительная погрешность  $\Delta$  существенно увеличиваются в связи с уменьшением их концентрации при сильном разбавлении исходных растворов. Поэтому в случае необходимости одновременного определения всей группы элементов (В, Ni, Mg, K, Na, В, Cr, Cu, Fe, Sn, Zn, Co, Mn, Pb, Al) можно использовать оптимальное разбавление исходного раствора (табл. 3) для исследуемых составов электролитов № 1 и № 2 – в 250–1000 раз. Если такая необходимость отсутствует, то определение макроэлементов исследуемых электролитов № 1 и № 2 допустимо при разбавлении в 500–4000 раз, а определение микропримесей – при разбавлении в 50–500 раз.

При определении серы и хлора методом МС ИСП использовано разбавление исходных растворов в 250 раз для электролитов № 1 и № 2 (табл. 9). При таком разбавлении обеспечивается снижение влияния солевого фона раствора электролитов, но при этом сохраняется приемлемый уровень аналитического сигнала для серы и хлора.

Таблица 9

**Результаты определения серы и хлора методом МС ИСП из разбавления в 250 раз исходных растворов и рассчитанные концентрации сульфата и хлорида никеля**

Условный номер состава электролита	Концентрация компонентов, мг/л			
	S	Cl	NiSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O	NiCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O
№ 1	36041	–	315342	11170
№ 2	–	42542	210760	284943

В электролите № 1 методом ИСП МС определяли серу и по сере рассчитывали концентрацию сульфата никеля, а по разнице с общим содержанием никеля – концентрацию хлорида никеля.

В электролите № 2 методом ИСП МС определяли хлор и по хлору рассчитывали концентрацию хлорида никеля, а по разнице с общим содержанием никеля – концентрацию сульфата никеля.

При сравнении исходных данных из табл. 2 и полученных в ходе анализа и расчетов данных из табл. 9 видно, что концентрации сульфата и хлорида никеля по результатам анализа серы и хлора методом МС ИСП достаточно хорошо сходятся между собой, при этом результаты, полученные по разнице с общим содержанием никеля, имеют более существенные расхождения, что обусловлено суммированием погрешностей в ходе определения серы и общего содержания никеля или хлора и общего содержания никеля разными методами анализа. Следует отметить, что авторы данной работы не ставили целью подробное исследование определения серы и хлора в электролитах никелирования методом МС ИСП, что требует дополнительных исследований и отдельной публикации. В данной статье авторы показали возможности использования плазменных методов анализа при аналитическом контроле химического состава гальванических электролитов никелирования.

### Заключения

Методами АЭС ИСП и МС ИСП проведен анализ модельных растворов электролитов для гальванического никелирования с концентрациями и компонентами, близкими для наиболее часто используемых в промышленности растворов. Проведено исследование метрологических характеристик при анализе разных разбавлений модельных растворов электролитов никелирования.

Показано, что в случае необходимости одновременного определения всей группы элементов (В, Ni, Mg, K, Na, В, Cr, Cu, Fe, Sn, Zn, Co, Mn, Pb, Al) можно использовать разбавление исходного раствора для исследуемых составов электролитов № 1 и № 2 – в 250–1000 раз. Если такая необходимость отсутствует, то определение макроэлементов исследуемых электролитов № 1 и № 2 допустимо при разбавлении в 500–4000 раз, а определение микропримесей – при разбавлении в 50–500 раз.

Проведено определение серы и хлора в растворах электролитов № 1 и № 2 методом МС ИСП при разбавлении исходного раствора в 250 раз.

Показано, что по сравнению с моноэлементными методами плазменные многоэлементные методы дают преимущество по продолжительности и трудоемкости анализа такого сложного и многокомпонентного объекта, как электролиты.

#### Список источников

1. Хмелева К.М., Козлов И.А., Никитин Я.Ю., Никифоров А.А. Современные тенденции защитных гальванических покрытий, работающих при повышенных температурах (обзор) // Труды ВИАМ. 2020. № 12 (94). Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 04.07.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-12-75-86.
2. Виноградов С.С., Никифоров А.А., Демин С.А., Чесноков Д.В. Защита от коррозии углеродистых сталей // Авиационные материалы и технологии. 2017. № 5. С. 242–263. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-242-263.
3. Скрябин В.А., Фомичев В.О. Особенности нанесения никелевых покрытий на детали из сталей и алюминиевых сплавов // Научные вести. 2020. № 1 (18). С. 116–119.
4. Виноградов С.С., Никифоров А.А., Балахонов С.В., Лещев К.А. Исследование структуры и свойств химического покрытия Ni–В // Труды ВИАМ. 2014. № 12. Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 16.07.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-12-7-7.
5. Борисенко А.Б., Храмцов В.В., Немтинов В.А., Крылов А.В., Матрохин М.А. Разработка конструкции установки химического никелирования, функционирующей в составе гальванической линии // Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2021. Т. 27. № 2. С. 275–284.
6. Виноградов С.С., Никифоров А.А., Закирова Л.И. Замена кадмия. Этап 2 – заключительный. Гальванотермическое покрытие системы «цинк–олово» – реальная альтернатива кадмиевому покрытию // Авиационные материалы и технологии. 2019. № 3 (56). С. 59–66. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-3-59-66.
7. Абрамова М.Г. К вопросу о подтверждении идентичности механизма коррозионного разрушения алюминиевых сплавов (обзор). Часть 1. Атмосферная коррозия // Авиационные материалы и технологии. 2020. № 4 (61). С. 86–94. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-4-86-94.
8. Абрамова М.Г. К вопросу о подтверждении идентичности механизма коррозионного разрушения алюминиевых сплавов (обзор). Часть 2. Коррозия в морской воде // Авиационные материалы и технологии. 2021. № 1 (62). Ст. 09. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 20.08.2022). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-95-103.
9. Чурилов Д.Г., Стекольников Ю.А., Арапов И.С. Восстановление деталей с применением комбинированных композиционных покрытий с дальнейшим упрочнением // Современные материалы, техника и технологии. 2021. № 1 (34). С. 52–58.
10. Ночовная Н.А., Базылева О.А., Каблов Д.Е., Панин П.В. Интерметаллидные сплавы на основе титана и никеля / под общ. ред. Е.Н. Каблова. М.: ВИАМ, 2018. 308 с.
11. Каблов Е.Н., Сидоров В.В., Мин П.Г., Вадеев В.Е., Крамер В.В. Исследование и разработка технологических параметров плавки в вакууме коррозионностойких жаропрочных никелевых сплавов // Металлург. 2021. № 2. С. 62–67.
12. Никифоров А.А., Демин С.А., Хмелева К.М. Электрохимическая обработка деталей, полученных методом селективного лазерного сплавления // Труды ВИАМ. 2021. № 7 (101). Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 25.07.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-7-3-12.
13. Гончаров Б.Э., Сипатов А.М., Черкашнев Н.Н., Плескань А.Ю., Самохвалов Н.Ю., Ваганова М.Л., Сорокин О.Ю., Солнцев Ст.С., Евдокимов С.А. Исследование высокотемпературной термостойкости антиокислительного покрытия для керамического композиционного материала с многослойной структурой // Авиационные материалы и технологии. 2021. № 4 (65). Ст. 06. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 12.08.2022). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-4-51-58.

14. Закирова Л.И., Лаптев А.Б. Свойства защитных гальванических покрытий для замены кадмия на стальных крепежных деталях (обзор). Часть 1. Морфология и коррозионная стойкость // *Авиационные материалы и технологии*. 2020. № 3 (60). С. 37–46. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-3-37-46.
15. Лаптев А.Б., Закирова Л.И., Деговец М.Л. Свойства защитных гальванических покрытий для замены кадмия на стальных крепежных деталях (обзор). Часть 2. Водородное охрупчивание и фрикционные характеристики // *Авиационные материалы и технологии*. 2020. № 4 (61). С. 35–40. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-4-35-40.
16. Тихонов Р.Д. Электрохимическое осаждение сплава NiFe из концентрированного хлоридного электролита // *Нано- и микросистемная техника*. 2020. Т. 22. № 8. С. 422–433.
17. Севостьянов Н.В. Автоматизация выбора гальванического покрытия медь-никель и технологических параметров осаждения // *Коррозия: материалы, защита*. 2015. № 4. С. 9–16.
18. Скопинцев В.Д., Винокуров Е.Г. Энергоэффективность процесса химического никелирования поверхностей // *Химическая технология*. 2020. Т. 21. № 10. С. 434–440.
19. Салахова Р.К., Тихообразов А.Б., Фарафонов Д.П., Смирнова Т.Б. Особенности электролитического осаждения абразивно-износостойких покрытий на основе никеля // *Труды ВИАМ*. 2022. № 2 (108). Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 26.07.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-2-99-110.
20. Смирнов Г.А. Контроль слоя никеля на металлизированной керамике // *Стекло и керамика*. 2021. № 5. С. 9–13.
21. Балюева Ю.А., Сосновская Н.Г., Розенцвейг И.Б. Блескообразующее действие трихлорэтиламидов с тиоамидными функциями в технологии электрохимического никелирования // *Современные технологии и научно-технический прогресс*. 2022. № 9. С. 11–12.
22. Бутрик Р.В., Грабельных В.А., Сосновская Н.Г., Корчевин Н.А. Изотиуриониевые производные пиридина как блескообразующие добавки в процессе электрохимического никелирования // *Современные технологии и научно-технический прогресс*. 2021. № 8. С. 19–20.
23. Сосновская Н.Г., Истомина Н.В., Корчевин Н.А., Розенцвейг И.Б. Влияние строения органических добавок на формирование блестящих покрытий при электрохимическом никелировании // *Успехи в химии и химической технологии*. 2021. Т. 35. № 5 (240). С. 54–56.
24. Соловьева И.А., Соловьев Д.С., Литовка Ю.В. Поиск силы тока и степени загрузки барабана для снижения неравномерности гальванического покрытия мелких деталей // *Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии*. 2022. № 2 (58). С. 119–126.
25. Гамбург Ю.Д. Гальванические покрытия. Справочник по применению. М.: Техносфера, 2006. 216 с.
26. Вячеславов П.М., Шмелева Н.М. Контроль электролитов и покрытий. Л.: Машиностроение, 1985. 96 с.
27. Карпов Ю.А. Аналитический контроль металлургического производства. М.: Металлургия, 1995. С. 97–107.
28. Надеждина М.Е. Прогрессивные технологические процессы организации производства предприятий химической промышленности // *Ползуновский альманах*. 2020. № 1. С. 55–58.
29. Надеждина М.Е., Шинкевич А.И., Шинкевич М.В. Система мониторинга цифрового производства предприятия нефтехимической промышленности // *Компетентность*. 2021. № 7. С. 36–39.
30. Якимович П.В., Алексеев А.В. Анализ сточных вод методом ИСП-МС // *Металлург*. 2018. № 1. С. 13–18.
31. Гармаш А.В., Сорокина Н.М. Метрологические основы аналитической химии. М.: МГУ им. М.В. Ломоносова, 2012. 47 с.
32. Надеждина М.Е., Бобков В.И. Реализация принципов системного анализа химической технологии при переходе к индустрии 4.0 // *Дни студенческой науки: сб. науч. тр. III Междунар. студ. конф. Казань, 2020*. С. 366–369.
33. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. № 1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.

34. Карачевцев Ф.Н., Алексеев А.В., Летов А.Ф., Дворецков Р.М. Плазменные методы анализа элементного химического состава никелевых сплавов // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. № 5. С. 483–497. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-483-497.

## References

1. Khmeleva K.M., Kozlov I.A., Nikitin Ya.Yu., Nikiforov A.A. Modern trends of protective galvanic coatings working at high temperatures (review). *Trudy VIAM*, 2020, no. 12 (94), paper no. 07. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: July 04, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-12-75-86.
2. Vinogradov S.S., Nikiforov A.A., Demin S.A., Chesnokov D.V. Protection against corrosion of carbon steel. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2017, no. 5, pp. 242–263. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-242-263.
3. Skryabin V.A., Fomichev V.O. Peculiarities of applying nickel coatings to parts made of steels and aluminum alloys. *Nauchnye vesti*, 2020, no. 1 (18), pp. 116–119.
4. Vinogradov S.S., Nikiforov A.A., Balahonov S.V., Leshhev K.A. Ni–B chemical coating’s structure and properties investigation. *Trudy VIAM*, 2014, no. 12, paper no. 07. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: July 16, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-12-7-7.
5. Borisenko A.B., Khramtsov V.V., Nemtinov V.A., Krylov A.V., Matrokhin M.A. Development of the design of a chemical nickel plating plant operating as part of a galvanic line. *Vestnik Tambovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2021, vol. 27, no. 2, pp. 275–284.
6. Vinogradov S.S., Nikiforov A.A., Zakirova L.I. Cadmium replacement. Stage 2 – final. Galvanic thermal coating of zinc–tin system – real alternative to cadmium plating. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2019, no. 3 (56), pp. 59–66. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-3-59-66.
7. Abramova M.G. Revisiting the confirmation of the identity of the corrosion destruction mechanism of aluminum alloys (review). Part 1. Atmospheric corrosion. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 4 (61), pp. 86–94. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-4-86-94.
8. Abramova M.G. Revisiting the confirmation of the identity of the corrosion destruction mechanism of aluminum alloys (review). Part 2. Corrosion in sea water. *Aviation materials and technology*, 2021, no. 1 (62), paper no. 09. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: August 20, 2022). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-95-103.
9. Churilov D.G., Stekolnikov Yu.A., Arapov I.S. Restoration of parts using combined composite coatings with further hardening. *Sovremennye materialy, tekhnika i tehnologii*, 2021, no. 1 (34), pp. 52–58.
10. Nochovnaya N.A., Bazyleva O.A., Kablov D.E., Panin P.V. *Intermetallic alloys based on titanium and nickel*. Ed. E.N. Kablov. Moscow: VIAM, 2018, 308 p.
11. Kablov E.N., Sidorov V.V., Min P.G., Vadeev V.E., Kramer V.V. Research and development of technological parameters of vacuum melting of corrosion-resistant heat-resistant nickel alloys. *Metallurg*, 2021, no. 2, pp. 62–67.
12. Nikiforov A.A., Demin S.A., Khmeleva K.M. Electrochemical treatment of parts obtained by selective laser fusion. *Trudy VIAM*, 2021, no. 7 (101), paper no. 01. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: July 25, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-7-3-12.
13. Goncharov B.E., Sipatov A.M., Cherkashneva N.N., Pleskan A.Yu., Samokhvalov N.Yu., Vaganova M.L., Sorokin O.Yu., Solntsev St.S., Evdokimov S.A. Studies of thermal shock resistance of an anti-oxidation coating for a multi-layered ceramic composite. *Aviation materials and technologies*, 2021, no. 4 (65), paper no. 06. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: August 12, 2022). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-51-58.
14. Zakirova L.I., Laptev A.B. Properties of protective electroplating coatings for replacement of cadmium on steel fixing parts (review). Part 1. Morphology and corrosion resistance. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 3 (60), pp. 37–46. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-3-37-46.
15. Laptev A.B., Zakirova L.I., Degovets M.L. Properties of protective galvanic coatings for replacement of cadmium on steel fixing parts (review). Part 2. Hydrogen embrittlement and frictional characteristics. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 4 (61), pp. 35–40. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-4-35-40.
16. Tikhonov R.D. Electrochemical deposition of NIFE alloy from concentrated chloride electrolyte. *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2020, vol. 22, no. 8, pp. 422–433.
17. Sevostyanov N.V. Automation of the selection of copper-nickel plating and technological parameters of deposition. *Korroziya: materialy, zashchita*, 2015, no. 4, pp. 9–16.

18. Skopintsev V.D., Vinokurov E.G. Energy efficiency of the process of chemical nickel plating of surfaces. *Khimicheskaya tekhnologiya*, 2020, vol. 21, no. 10, pp. 434–440.
19. Salakhova R.K., Tikhoobrazov A.B., Farafonov D.P., Smirnova T.B. Features of electrolytic deposition of abrasive-wear-resistant nickel-based coatings. *Trudy VIAM*, 2022, no. 2 (108), paper no. 08. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: July 26, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-2-99-110.
20. Smirnov G.A. Nickel layer control on metallized ceramics. *Steklo i keramika*, 2021, no. 5, pp. 9–13.
21. Balyueva Yu.A., Sosnovskaya N.G., Rozentsveig I.B. Shine-forming action of trichloroethylamides with thioamide functions in the technology of electrochemical nickel plating. *Sovremennye tekhnologii i nauchno-tekhnicheskii progress*, 2022, no. 9, pp. 11–12.
22. Butrik R.V., Grabelnykh V.A., Sosnovskaya N.G., Korchevin N.A. Isothiuronium derivatives of pyridine as brightening additives in electrochemical nickel plating. *Sovremennye tekhnologii i nauchno-tekhnicheskii progress*, 2021, no. 8, pp. 19–20.
23. Sosnovskaya N.G., Istomina N.V., Korchevin N.A., Rozentsveig I.B. Influence of the structure of organic additives on the formation of shiny coatings during electrochemical nickel plating. *Uspekhi v khimii i khimicheskoy tekhnologii*, 2021, vol. 35, no. 5 (240), pp. 54–56.
24. Soloveva I.A., Solovev D.S., Litovka Yu.V. Search for the current strength and degree of loading of the drum to reduce the unevenness of the galvanic coating of small parts. *Prikladnyy zhurnal: upravleniye i vysokie tekhnologii*, 2022, no. 2 (58), pp. 119–126.
25. Hamburg Yu.D. *Galvanic coatings. Application guide*. Moscow: Technosfera, 2006, 216 p.
26. Vyacheslavov P.M., Shmeleva N.M. *Control of electrolytes and coatings*. Leningrad: Mashinostroenie, 1985. 96 p.
27. Karpov Yu.A. *Analytical control of metallurgical production*. Moscow: Metallurgiya, 1995, pp. 97–107.
28. Nadezhkina M.E. Progressive technological processes of organization of production of enterprises of the chemical industry. *Polzunovskiy almanakh*, 2020, no. 1, pp. 55–58.
29. Nadezhkina M.E., Shinkevich A.I., Shinkevich M.V. Monitoring system for digital production of an enterprise of the petrochemical industry. *Competence*, 2021, no. 7, pp. 36–39.
30. Yakimovich P.V., Alekseev A.V. Wastewater analysis by ICP-MS. *Metallurg*, 2018, no. 1, pp. 13–18.
31. Garmash A.V., Sorokina N.M. *Metrological bases of analytical chemistry*. Moscow: Lomonosov Moscow State University, 2012, 47 p.
32. Nadezhkina M.E., Bobkov V.I. Implementation of the principles of system analysis of chemical technology in the transition to industry 4.0. *Days of Student Science: collection of sci. Works of III Intern. stud. conf. Kazan*, 2020, pp. 366–369.
33. Kablov E.N. Innovative developments of FSUE «VIAM» SSC of RF on realization of «Strategic directions of the development of materials and technologies of their processing for the period until 2030». *Aviacionnye materialy i tekhnologii*, 2015, no. 1 (34), pp. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
34. Karachevtsev F.N., Alekseev A.V., Letov A.F., Dvoretsov R.M. Plasma methods of nickel alloys elemental chemical composition analysis. *Aviacionnye materialy i tekhnologii*, 2017, no. S, pp. 483–497. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-483-497.

**Информация об авторах**

**Дворецков Роман Михайлович**, начальник сектора, к.х.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Карачевцев Федор Николаевич**, начальник лаборатории, к.х.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Демин Семен Анатольевич**, ведущий инженер, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Information about the authors**

**Roman M. Dvoretsov**, Head of Sector, Candidate of Sciences (Chem.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Fedor N. Karachevtsev**, Head of Laboratory, Candidate of Sciences (Chem.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Simeon A. Demin**, Leading Engineer, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

Статья поступила в редакцию 18.07.2022; получена после доработки 17.11.2022; одобрена и принята к публикации после рецензирования 25.11.2022.  
The article was submitted 18.07.2022; received in revised form 17.11.2022; approved and accepted for publication after reviewing 25.11.2022.