

ХИМИЧЕСКИЕ НАУКИ

Обзорная статья

УДК 669.248.7+669.248.6+661.746.44

EDN: NOXMES

DOI: 10.21285/achb.925



Глюконатные растворы для электрохимического и химического никелирования

Е.Г. Афонин

Калужский научно-исследовательский институт телемеханических устройств,
Калуга, Российская Федерация

Аннотация. Гальванические покрытия никелем широко применяются в промышленности для защитно-декоративной отделки поверхностей металлических и неметаллических материалов, для защиты от коррозии при повышенной температуре в щелочной среде и в растворах органических кислот, в качестве подслоя для получения покрытий другими металлами на сталь, для повышения твердости и износостойкости поверхности, улучшения паяемости. Данные покрытия получают из водных слабокислых, а также из слабощелочных комплексных электролитов. В настоящем обзоре проанализированы литературные данные по комплексообразованию никеля(+2) с D-глюконат-ионом $\text{CH}_2\text{OH}(\text{CHOH})_4\text{COO}^-$, а также рассмотрены составы и некоторые технологические характеристики комплексных D-глюконатных растворов для гальванического и химического никелирования. Например, из электролита с pH 8, содержащего 53 г/дм³ $\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, 44 г/дм³ D- $\text{C}_6\text{H}_{11}\text{O}_7\text{Na}$, 25 г/дм³ H_3BO_3 , 53 г/дм³ $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ и 0,5–3 г/дм³ $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$, при температуре 25 °С, катодной плотности тока 2,5 А/дм² с выходом по току 96,4% получают коррозионностойкое гладкое светлое гальваническое покрытие никелем, хорошо сцепленное с медной основой. Из раствора с pH 9, содержащего 5–30 г/дм³ $\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, 10–60 г/дм³ D- $\text{C}_6\text{H}_{11}\text{O}_7\text{Na}$, 5–40 г/дм³ $\text{NaH}_2\text{PO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$, 3 г/дм³ $\text{HOOCCH}_2\text{CH}_2\text{COOH}$, 0,5 г/дм³ $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{11}\text{OSO}_3\text{Na}$, 0,002 г/дм³ $\text{Pb}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$, при температуре 90 °С со скоростью до 0,75 мкм/мин получают химическое покрытие сплавом Ni-P(3–18 масс.%) на меди. В обзоре также обсуждаются способы приготовления D-глюконатных электролитов никелирования с использованием D-глюконата натрия, D-глюконо-1,5-лактона, D-глюконата никеля. Одним из достоинств D-глюконатных растворов никелирования является то, что D-глюконаты нетоксичны и имеют невысокую стоимость.

Ключевые слова: комплексообразование, глюконатный электролит, гальваническое никелирование, химическое никелирование, химический состав электролита, приготовление электролита

Для цитирования: Афонин Е.Г. Глюконатные растворы для электрохимического и химического никелирования // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2024. Т. 14. N 3. С. 298–304. DOI: 10.21285/achb.925. EDN: NOXMES.

CHEMICAL SCIENCES

Review article

Gluconate solutions for nickel electrodeposition and nickel electroless plating

Evgeniy G. Afonin

Kaluga Research Institute of Telemechanical Devices, Kaluga, Russian Federation

Abstract. Nickel electroplating has found a wide range of industrial applications as a technique for creating protective and decorative coatings of metallic and non-metallic surfaces, protecting materials against corrosion at elevated temperatures in both alkaline environments and organic acid solutions, forming a sublayer for obtaining coatings of other metals on steel, enhancing the hardness and wear resistance of surfaces, as well as for improving solderability. Such coatings can be obtained from weakly acidic aqueous and weakly alkaline complex electrolytes. In this review, we

© Афонин Е.Г., 2024

analyze the available literature on complexation of nickel(+2) with D-gluconate ion $\text{CH}_2\text{OH}(\text{CHOH})_4\text{COO}^-$, along with that on compositions and some technological characteristics of complex D-gluconate solutions for nickel electrodeposition and electroless plating. Thus, a corrosion-resistant smooth light-colored nickel coating, tightly adhered to a copper substrate, was obtained from an electrolyte with a pH level of 8, containing 53 g/dm³ of $\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, 44 g/dm³ of $\text{D-C}_6\text{H}_{11}\text{O}_7\text{Na}$, 25 g/dm³ of H_3BO_3 , 53 g/dm³ of $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, and 0.5–3 g/dm³ of $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$, at a temperature of 25 °C, a cathodic current density of 2.5 A/dm² with a current efficiency of 96.4%. An electroless Ni-P(3–18 wt%) alloy coating on copper was obtained from a solution with a pH level of 9, containing 5–30 g/dm³ of $\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, 10–60 g/dm³ of $\text{D-C}_6\text{H}_{11}\text{O}_7\text{Na}$, 5–40 g/dm³ of $\text{NaH}_2\text{PO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$, 3 g/dm³ of $\text{HOOCCH}_2\text{CH}_2\text{COOH}$, 0.5 g/dm³ of $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{11}\text{OSO}_3\text{Na}$, 0.002 g/dm³ of $\text{Pb}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$, at a temperature of 90 °C and a deposition rate of up to 0.75 μm/min. The review also discusses methods for preparing D-gluconate electrolytes for nickel plating using sodium D-gluconate, D-glucono-1,5-lactone, and nickel D-gluconate. One advantage of D-gluconate nickel plating solutions consists in the absence of toxicity and low cost of D-gluconates.

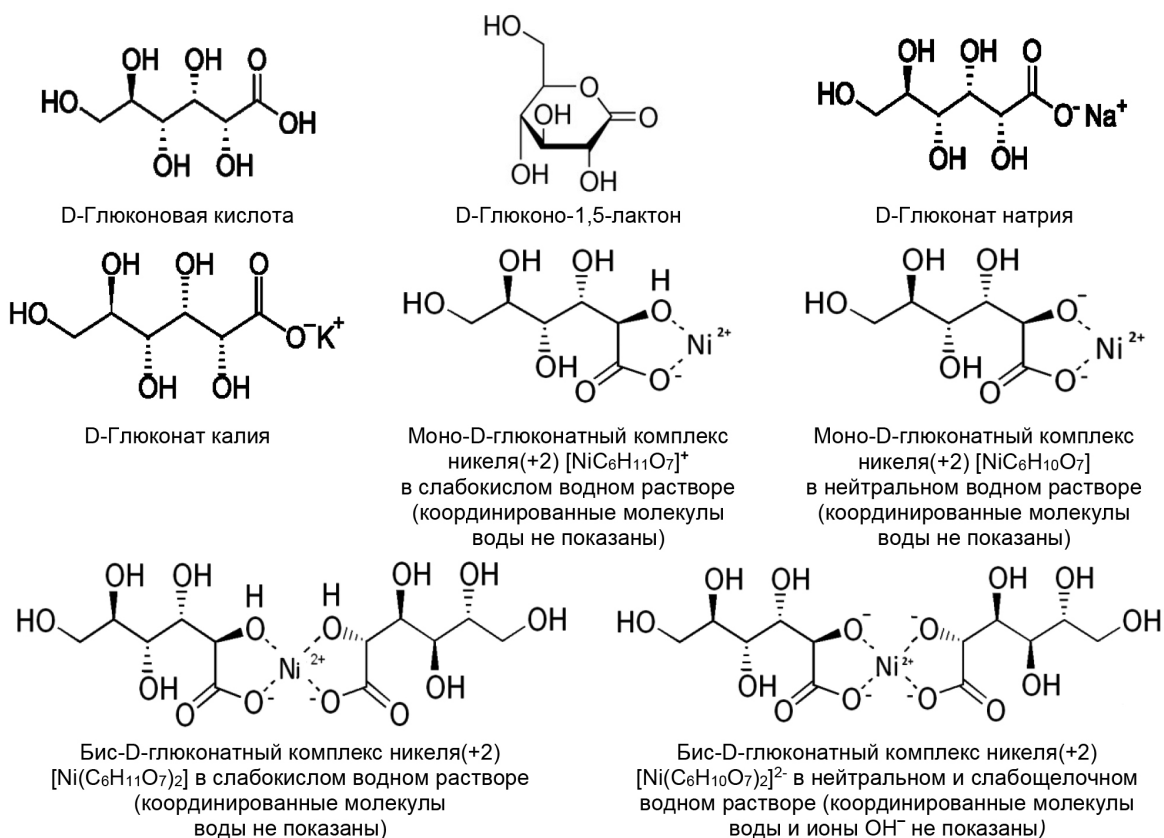
Keywords: complex formation, gluconate electrolyte, nickel electrodeposition, electroless nickel plating, electrolyte composition, electrolyte preparing method

For citation: Afonin E.G. Gluconate solutions for nickel electrodeposition and nickel electroless plating. *Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2024;14(3):298-304. (In Russian). DOI: 10.21285/achb.925. EDN: NOXMES.

ВВЕДЕНИЕ

Гальванические покрытия никелем получают из водных слабокислых электролитов (хлоридных, фторидных, сульфатных, сульфатно-хлоридных, тетрафтороборатных, гексафторосиликатных, сульфаматных, перхлоратных, метансульфонатных, бензолсульфонатных, нафталинсульфонатных, сульфосалицилатных, формиатных, ацетатных и других), а также из слабощелочных комплексных электролитов (аммиачных, этилендиаминовых, триэтаноламиновых, дифосфатных, фосфонатных, оксалатных, дикарбоксилатных, лактатных, тартратных, цитратных, этилендиаминтетраацетатных и других).

Анион D-глюконовой кислоты $\text{CH}_2\text{OH}(\text{CHOH})_4\text{COO}^-$ (глюконат-ион) (рисунок) образует в слабокислой, нейтральной и щелочной средах комплексы с катионами многих металлов, что используется при разработке водных комплексных электролитов, применяемых для получения покрытий металлами, в том числе и никелем. В настоящей работе рассмотрены составы D-глюконатных электролитов гальванического никелирования, созданных для промышленности, и некоторые технологические свойства электролитов и никелевых покрытий. В статье также дан обзор D-глюконатных растворов химического никелирования.

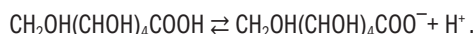


Структурные формулы D-глюконовой кислоты и D-глюконатных комплексов никеля(+2) в водном растворе

Structural formulas of D-gluconic acid and of nickel(+2) D-gluconate complexes in aqueous solution

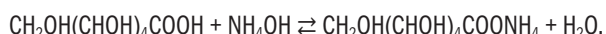
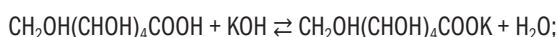
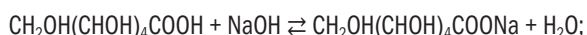
ДИССОЦИАЦИЯ D-ГЛЮКОНОВОЙ КИСЛОТЫ И КОМПЛЕКСООБРАЗОВАНИЕ КАТИОНА НИКЕЛЯ(+2) С D-ГЛЮКОНАТ-ИОНОМ В ВОДНОМ РАСТВОРЕ

D-Глюконовая кислота ($C_6H_{12}O_7$) ведет себя в водном растворе как слабая одноосновная карбоновая кислота с показателем константы диссоциации $pK_{\text{дисс.}} = 3,48 \pm 0,06$ ($t = 25^\circ\text{C}$, $I = 1,0$ – $NaClO_4$) [1], $pK_{\text{дисс.}} = 3,30 \pm 0,02$ (t комнатная, $I = 0,1$ – $NaClO_4$) [2], $pK_{\text{дисс.}} = 3,372 \pm 0,003$ ($t = 25^\circ\text{C}$, $I = 1,0$ – $NaNO_3$) [3], $pK_{\text{дисс.}} = 3,709 \pm 0,004$ ($t = 25^\circ\text{C}$, бесконечное разбавление) [3]:



В водном растворе D-глюконовая кислота (см. рисунок) находится в равновесии с D-глюконо-1,5-лактоном (см. рисунок) и D-глюконо-1,4-лактоном. При pH выше 2,5 в растворе из двух изомеров содержится только D-глюконо-1,5-лактон, при pH ниже 2,0 растет доля D-глюконо-1,4-лактона, хотя D-глюконо-1,5-лактон и преобладает [2].

D-Глюконовая кислота реагирует с основаниями, образуя соли – глюконаты (см. рисунок):



В сильнощелочной среде (pH выше 12) с увеличением pH растет доля аниона $C_6H_{10}O_7^{2-}$, в котором дополнительно депротонирован гидроксил одной из спиртовых групп [2].

В водном растворе, содержащем катионы никеля(+2) и D-глюконат-ионы, в слабокислой среде (pH 4,5–7,0) образуются комплексы $[NiC_6H_{11}O_7]^+$ с $IgK_{\text{уст.}} = 1,8$ (где $K_{\text{уст.}}$ – константа устойчивости) [4–6], а также $[NiC_6H_{10}O_7]$ [5] и $[Ni(C_6H_{11}O_7)_2]$ (см. рисунок). При pH 7–9 образуются плохо растворимые в воде гидроксо-D-глюконатные соединения никеля(+2) $Ni_2(OH)_3(C_6H_{11}O_7)$ [4], а при избытке лиганда в растворе преобладает комплекс $[Ni(C_6H_{10}O_7)_2]^{2-}$ (см. рисунок) [7].

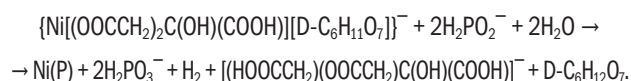
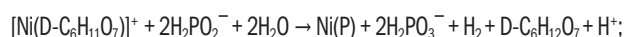
ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ И СВОЙСТВА ГЛЮКОНАТНЫХ ЭЛЕКТРОЛИТОВ ГАЛЬВАНИЧЕСКОГО НИКЕЛИРОВАНИЯ

Для практического применения разработаны электролиты, состав и технологические характеристики которых представлены в табл. 1. Слабокислые электролиты никелирования (1–5)¹ содержат комплекс $[Ni(C_6H_{11}O_7)]^+$, а также борную кислоту и соли аммония для поддержания постоянного значения pH. Нейтральный электролит (7) является билигандным глюконатно-цитратным; введение в него первичных блескообразователей по 0,5–2 г/дм³ 2-бутин-1,4-диола или 2-бутен-1,4-диола дает возможность получать никелевые покрытия с высокой отражательной способностью, а дополнение электролита блескообразователями 0,5–3 г/дм³ кумарина или 1,0–4,0 г/дм³ аллилсульфоната натрия – полублестящие покрытия никелем [8]. Электролиты (1) и (6) обеспечивают катодный выход никеля по току ~95% при высоком качестве покрытия [9, 10].

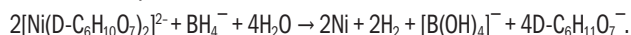
СОСТАВ И СВОЙСТВА ГЛЮКОНАТНЫХ РАСТВОРОВ ХИМИЧЕСКОГО НИКЕЛИРОВАНИЯ

Абнер Бреннер и Грейс Ридделл [14] в 1947 г. сообщили, что в присутствии глюконовой кислоты химическое осаждение никелевого покрытия под действием гипохлорита натрия протекает с незначительной скоростью. Тем не менее позднее было создано несколько D-глюконатных растворов для получения покрытий никелем и его сплавами с фосфором или бором безэлектролизным (химическим) методом [15–19] (табл. 2).

Из слабокислых (2–4) или слабощелочных (1, 4) D-глюконатных и слабокислого D-глюконатно-цитратного (5) растворов химического никелирования, в которых восстановителем является гипохлорит натрия NaH_2PO_2 , получают покрытия сплавом Ni-P:

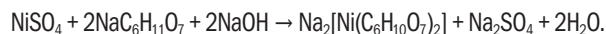
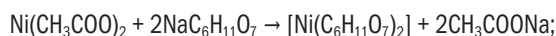
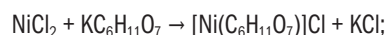


В щелочном D-глюконатном растворе (6) с тетрагидридоборатом натрия $NaBH_4$ и гидразином N_2H_4 в качестве восстановителей получают блестящее химическое покрытие никелем:

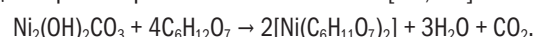


ПРИГОТОВЛЕНИЕ ГЛЮКОНАТНЫХ ЭЛЕКТРОЛИТОВ НИКЕЛИРОВАНИЯ

Глюконатные электролиты никелирования обычно готовят используя растворимые в воде соли никеля ($NiSO_4 \cdot 6H_2O$ CAS 10101-97-0, ГОСТ 4465-74, M (для $7H_2O$) = 280,87 г/моль; $NiCl_2 \cdot 6H_2O$ CAS 7791-20-0, ГОСТ 4038-79, M = 237,70 г/моль; $Ni(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ CAS 13478-00-7, ГОСТ 4055-70, M = 290,80 г/моль; $Ni(HCOO)_2 \cdot 2H_2O$ CAS 15994-70-9, ТУ 6-09-743-77, M = 184,77 г/моль; $Ni(CH_3COO)_2 \cdot 4H_2O$ CAS 6018-89-9, ТУ 6-09-3848-75, M = 248,85 г/моль) и D-глюконаты щелочных металлов ($NaC_6H_{11}O_7$ CAS 527-07-1, M = 218,14 г/моль; $KC_6H_{11}O_7$ CAS 299-27-4, M = 234,25 г/моль):



Можно взять также D-глюконовую кислоту ($C_6H_{12}O_7 \cdot H_2O$ CAS 526-95-4, M (б.в.) = 196,16 г/моль), но значительно чаще применяют ее 45–50%-й водный раствор, а также D-глюконат аммония ($C_6H_{11}O_7NH_4$ CAS 19222-41-4, M = 213,19 г/моль), D-глюконо-1,5-лактон ($C_6H_{10}O_6$ CAS 90-80-2, M = 178,14 г/моль). Растворением $3Ni(OH)_2 \cdot 2NiCO_3 \cdot 4H_2O$ (CAS 12244-51-8, ГОСТ 4466-78) в водном растворе D-глюконовой кислоты или D-глюконо-1,5-лактона получают водный раствор D-глюконата никеля [20, 21]:



Известен хорошо растворимый в воде кристаллогидрат D-глюконата никеля $Ni(C_6H_{11}O_7)_2 \cdot nH_2O$, $n = 3$ или 2 (CAS 71957-07-8) [21–23], который можно использовать для приготовления D-глюконатных электролитов

¹Здесь и далее в круглых скобках указаны номера электролитов/растворов из табл. 1, 2.

Таблица 1. Химический состав и некоторые технологические характеристики D-глюконатных электролитов гальванического никелирования

Table 1. Chemical compositions and some technological characteristics of D-gluconate electrolytes for nickel electrodeposition

№	Компоненты электролита	Концентрации компонентов, моль/дм ³	pH	t, °C	i_k , А/дм ²	η_k , %	Свойства никелевого покрытия и электролита	Источник
1	NiSO ₄ NaC ₆ H ₁₁ O ₇	0,144 0,23	4,3	40	1	~92	Блестящее покрытие никелем, отлично сцепленное с медной основой. Рассеивающая способность электролита – 7,0%	[9]
2	NiSO ₄ NiCl ₂ NaC ₆ H ₁₁ O ₇ H ₃ BO ₃	0,125 0,125 0,25 0,25	6,0	21–23	–	50–75	Покрывание никелем с гладкой или с подобной «цветной капусте» поверхностью	[11]
3	NiSO ₄ NaC ₆ H ₁₁ O ₇ H ₃ BO ₃ (NH ₄) ₂ SO ₄	0,1 0,2 0,5 0,5	3,5	Комнатная	–	34–47	Плотное беспористое покрытие никелем с сетью микротрещин	[12]
4	NiCl ₂ NaC ₆ H ₁₁ O ₇ H ₃ BO ₃ NH ₄ Cl	0,1 0,2 0,5 0,5	3,5	Комнатная	–	36–55	Плотное беспористое покрытие никелем с сетью микротрещин	[12]
5	NiSO ₄ NaC ₆ H ₁₁ O ₇ H ₃ BO ₃ NH ₄ Cl	0,1 0,2 0,5 0,5	3,5	20–22	4,0	35,0	Плотное беспористое покрытие никелем с сетью микротрещин	[13]
6	NiSO ₄ NaC ₆ H ₁₁ O ₇ H ₃ BO ₃ (NH ₄) ₂ SO ₄ (C ₆ H ₅ NH ₃) ₂ SO ₄ или CO(NH ₂) ₂ или C ₆ H ₅ SO ₂ NCINa·3H ₂ O	0,2 0,2 0,4 0,4 0,002–0,0097 0,0083–0,033 0,002–0,0093	8	25	2,5	96,4	Гладкое светлое покрытие никелем, хорошо сцепленное с основой	[10]
7	NiSO ₄ NiCl ₂ NaC ₆ H ₁₁ O ₇ Na ₃ C ₆ H ₅ O ₇ (NH ₄) ₂ SO ₄ 2-Бутин-1,4-диол	0,54 0,125 0,137 0,476 0,257 0,0058–0,023	6,8–7,2	60	4,3	–	Зеркально-блестящее покрытие никелем без трещин, хорошо сцепленное с основой из алюминия, цинка, железа, меди и их сплавов. Рассеивающая способность электролита отличная	[8]

Примечание. t – рабочая температура электролита; i_k – катодная плотность тока; η_k – катодный выход по току.

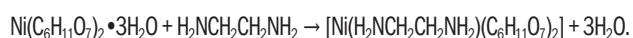
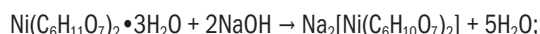
Таблица 2. Состав и некоторые технологические характеристики D-глюконатных растворов химического никелирования

Table 2. Chemical compositions and some technological characteristics of D-gluconate solutions for nickel electroless plating

№	Компоненты раствора	Концентрации компонентов, г/дм ³	pH	t, °C	d.r., мкм/мин	Химический состав покрытия	Источник
1	NiSO ₄ ·7H ₂ O	35,9	9	79–81	0,22	Сплав Ni-P	[16]
	NaC ₆ H ₁₁ O ₇	110					
	NaH ₂ PO ₂ ·H ₂ O	25					
	H ₃ BO ₃	30					
	Pb ²⁺	0,010					
2	NiSO ₄ ·7H ₂ O	35,9	5,0	79–81	–	94,5 масс.% Ni, 4,5 масс.% P, 2 масс.% Sb	[16]
	NaC ₆ H ₁₁ O ₇	60					
	NaH ₂ PO ₂ ·H ₂ O	20					
	H ₃ BO ₃	15					
	Глюконат сурьмы(+3) (в пересчете на Sb)	0,100					
3	NiSO ₄ ·7H ₂ O	35,9	5,0	79–81	–	93 масс.% Ni, 4 масс.% P, 3,3 масс.% Sb	[16]
	NaC ₆ H ₁₁ O ₇	120					
	NaH ₂ PO ₂ ·H ₂ O	20					
	H ₃ BO ₃	30					
	Глюконат сурьмы(+3) (в пересчете на Sb)	0,200					
4	NiSO ₄ ·6H ₂ O	5–30	5–10	50–100	0,11–0,75	Аморфные сплавы Ni-P с содержанием фосфора 3–8,5 или 3–18 масс.%	[17]
	NaC ₆ H ₁₁ O ₇	10–60					
	NaH ₂ PO ₂ ·H ₂ O	5–40					
	HOOCCH ₂ CH ₂ COOH	3					
	CH ₃ (CH ₂) ₁₁ OSO ₃ Na	0,5					
	Pb(CH ₃ COO) ₂ ·3H ₂ O	0,002					
5	NiSO ₄ ·6H ₂ O	28	5,5	85–89	0,20	Гомогенное покрытие сплавом Ni-P(13 масс.%) без трещин с хорошей адгезией к основе	[18]
	NaC ₆ H ₁₁ O ₇	20					
	NaH ₂ PO ₂ ·H ₂ O	35					
	CH ₃ COOH	1,4					
	Na ₃ C ₆ H ₅ O ₇ ·2H ₂ O	44					
	Pb ²⁺	Следы					
6	Ацетат никеля	2,5	10–12,5	–	–	Однородное покрытие никелем с металлическим блеском	[19]
	NaC ₆ H ₁₁ O ₇	4,5					
	NaBH ₄	0,25					
	H ₃ BO ₃	1,25					
	N ₂ H ₄ ·H ₂ SO ₄	0,25					
	NH ₃ и NaOH	До достижения pH					

Примечание. t – рабочая температура электролита; d.r. – скорость осаждения покрытия.

никелирования, не содержащих иных анионов кроме D-глюконата:



D-Глюконовая кислота имеет очень высокую растворимость в воде (~600 г/дм³ при 25 °C), D-глюконаты щелочных металлов и аммония легко растворимы в воде, например, растворимость D-глюконата натрия (г/100 г воды) составляет 50,0 (9,3 °C), 59,9 (24,6 °C), 71,0 (38,0 °C), 80,0 (47,2 °C) [24, 25], растворимость D-глюконата аммония – 31,6 г/100 г воды при 25 °C [25].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

D-Глюконат-ион является лигандом, связывающим катионы никеля(+2) в термодинамически умеренно устойчивые комплексы в слабокислой, нейтральной и слабощелочной средах. Это дало возможность создать на их основе значительное число электролитов для гальва-

нического никелирования и растворов для химического никелирования.

Разработанные глюконатные электролиты позволяют получать качественные покрытия никелем на стали, меди, алюминии и некоторых других металлах с высоким выходом по току. Одним из достоинств таких электролитов является низкая токсичность и невысокая стоимость глюконатов.

Целесообразно продолжить работу по созданию новых водных электролитов для гальванического никелирования, содержащих D-глюконатные комплексы никеля(+2) в сочетании с веществами, влияющими на качество покрытия никелем, процесс растворения анода, например полилигандных электролитов никель(+2) – D-глюконат – триэтанолламин, никель(+2) – D-глюконат – аминокислота, никель(+2) – D-глюконат – диэтилентриамин, а также новых D-глюконатных растворов для химического никелирования (и покрытия сплавами никель – бор) с гидразином, гидразиндибораном, диметиламинобораном, пиридинбораном и другими подходящими восстановителями.

REFERENCES

1. Coccioli F., Vicedomini M. On the protonation of gluconate ions and the complex formation with lead(II) in acid solutions. *Journal of Inorganic and Nuclear Chemistry*. 1978;40(12):2103-2105. DOI: 10.1016/0022-1902(78)80215-2.
2. Zhang Z., Gibson P., Clark P., Tian G., Zanonato P.L., Rao L. Lactonization and protonation of gluconic acid: a thermodynamic and kinetic study by potentiometry, NMR and ESI-MS. *Journal of Solution Chemistry*. 2007;36:1187-1200. DOI: 10.1007/s10953-007-9182-x.
3. Bretti C., Cigala R.M., De Stefano C., Lando G., Sammartano S. Acid-base and thermodynamic properties of D-gluconic acid and its interaction with Sn²⁺ and Zn²⁺. *Journal of Chemical & Engineering Data*. 2016;61(6):2040-2051. DOI: 10.1021/acs.jced.5b00993.
4. Joyce L.G., Pickering W.F. An investigation of the nickel gluconate system. *Australian Journal of Chemistry*. 1965;18(6):783-794. DOI: 10.1071/CH9650783.
5. Panda C., Patnaik R.K. Gluconate complexes of cobalt(II) and nickel(II). *Journal of the Indian Chemical Society*. 1976;53:718-719. DOI: 10.5281/zenodo.6393036.
6. Warwick P., Evans N.D.M., Hall T., Vines S. Complexation of Ni(II) by α-isosaccharinic acid and gluconic acid from pH 7 to pH 13. *Radiochimica Acta*. 2003;91(4):233-240. DOI: 10.1524/ract.91.4.233.19971.
7. Escandar E.M., Sala L.F., Sierra M.G. Complexes of cobalt(II) and nickel(II) with D-alldonic and D-allduronic acids in aqueous solution. *Polyhedron*. 1994;13(1):143-150. DOI: 10.1016/S0277-5387(00)86650-4.
8. Baig M.L. Neutral nickel-plating process and bath therefor. US Patent, no. 3417005; 1968.
9. Abd El Meguid E.A., Abd El Rehim S.S., Moustafa E.M. The electroplating of nickel from aqueous gluconate baths. *Transactions of the IMF*. 1999;77(5):188-191. DOI: 10.1080/00202967.1999.11871280.
10. Eltoum A.M.S., Baraka A.M., Elfatih H.A. Electrodeposition and characterization of nickel from gluconate baths in presence of some additives. *Journal of American Science*. 2011;7(5):368-377.
11. Chat-Wilk K., Rudnik E., Włoch G., Osuch P. Importance of anions in electrodeposition of nickel from gluconate solutions. *Ionics*. 2021;27:4393-4408. DOI: 10.1007/s11581-021-04166-y.
12. Rudnik E., Wojnicki M., Włoch G. Effect of gluconate addition on the electrodeposition of nickel from acidic baths. *Surface & Coatings Technology*. 2012;207:375-388. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2012.07.027.
13. Rudnik E., Włoch G. The influence of sodium gluconate on nickel and manganese codeposition from acidic chloride-sulfate baths. *Ionics*. 2014;20:1747-1755. DOI: 10.1007/s11581-014-1137-9.
14. Brenner A., Riddell G. Deposition of nickel and cobalt by chemical reduction. *Journal of Research of the National Bureau of Standards*. 1947;39:385-395. DOI: 10.6028/jres.039.024.
15. Gutzeit G., Talmey P., Lee W.G. Chemical nickel plating processes and bath therefor. US Patent, no. 2935425; 1960.
16. Boose C.A. Recent developments in electroless plating. *Transactions of the IMF*. 1975;53(1):49-54. DOI: 10.1080/00202967.1975.11870338.
17. Eltoum M.S.A., Elhaj A.H. Development of electroless deposition of nickel from alkaline hypophosphite baths using gluconate as complexing agent. *International Journal of Multidisciplinary Sciences and Engineering*. 2014;5(1):34-43.
18. Tangi A., Elhark M., Bachir A.B., Shrir A., Cherkaoui M., Ebntouhami M., et al. Self-catalytic bath and method for the deposition of a nickel-phosphorus alloy on a substrate. US Patent, no. 6143059; 2000.
19. Franz H., Lecoco D.E. Method for stabilizing a chemical filming composition. US Patent, no. 3893865; 1975.
20. Chester A.E., Reisinger F.F. Cadmium plating. US Patent, no. 2485565; 1949.
21. Melson G.A., Pickering W.F. A study of solid nickel gluconates. *Australian Journal of Chemistry*. 1968;21(5):1205-1212. DOI: 10.1071/CH9681205.
22. May O.E., Weisberg S.M., Herrick H.T. Some physical constants of d-gluconic acid and several of its salts. *Journal of the Washington Academy of Sciences*. 1929;19(20):443-447.

23. Escandar G.M., Peregrin J.M.C., Sierra M.G., Martino D., Santoro M., Frutos A.A., et al. Interaction of divalent metal ions with d-gluconic acid in the solid phase and aqueous solution. *Polyhedron*. 1996;15(13):2251-2261. DOI: 10.1016/0277-5387(95)00478-5.

24. Pedrosa A., Serrano M.L. Solubilities of sodium gluconate in water and in aqueous solutions of ethanol

and methanol. *Journal of Chemical & Engineering Data*. 2000;45(3):461-463. DOI: 10.1021/je990305x.

25. Prescott F.J., Shaw J.K., Billello J.P., Cragwall G.O. Gluconic acid and its derivatives. *Industrial & Engineering Chemistry*. 1953;45(2):338-342. DOI: 10.1021/ie50518a030.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Афонин Евгений Геннадиевич,
к.х.н., старший научный сотрудник,
Калужский научно-исследовательский
институт телемеханических устройств,
248000, г. Калуга, ул. Карла Маркса, 4,
Российская Федерация,
afonineg.chem@gmail.com
<https://orcid.org/0009-0005-5457-8646>

Вклад автора

Автор выполнил анализ литературы,
на основании полученных результатов
провел обобщение, подготовил рукопись
к печати.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта
интересов.

Автор прочел и одобрил окончательный
вариант рукописи.

Информация о статье

Поступила в редакцию 14.09.2023.
Одобрена после рецензирования 05.05.2024.
Принята к публикации 30.08.2024.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Evgeniy G. Afonin,
Cand. Sci. (Chemistry), Senior Researcher,
Kaluga Research Institute
of Telemechanical Devices,
4, Karl Marx St., Kaluga, 248000,
Russian Federation,
afonineg.chem@gmail.com
<https://orcid.org/0009-0005-5457-8646>

Contribution of the author

The author performed the review, made
a generalization on the basis of the results
obtained and prepared the copyright
for publication.

Conflict interests

Author declares no conflict of interests regarding
the publication of this article.

The final manuscript has been read and approved
by the author.

Information about the article

The article was submitted 14.09.2023.
Approved after reviewing 05.05.2024.
Accepted for publication 30.08.2024.