

**ПОЛУЧЕНИЕ ДИСПЕРСНЫХ ПОРОШКОВ НИКЕЛЯ  
ПРИ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ПЕРЕРАБОТКЕ РЕНИЙСОДЕРЖАЩЕГО  
ЖАРОПРОЧНОГО СПЛАВА**

**О.В. Чернышова<sup>1,@</sup>, Г.А. Усольцева<sup>2</sup>, Е.Г. Байконуров<sup>2</sup>, Д.В. Дробот<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>МИРЭА – Российский технологический университет (Институт тонких химических технологий имени М.В. Ломоносова), Москва 119571, Россия

<sup>2</sup>Satbayev University, Горно-металлургический институт им. О. Байконурова, Алматы 050013, Казахстан

@Автор для переписки, e-mail: oxcher@mitht.ru

*Статья посвящена обоснованию предлагаемой технологической схемы электрохимической переработки ренийсодержащего жаропрочного сплава ЖС32-ВИ состава (% масс.): Re – 4.0; Co – 9.3; W – 8.6; Y – 0.005; La – 0.005; Al – 6.0; Cr – 5.0; Ta – 4.0; Nb – 1.6; Mo – 1.1; C – 0.16; B – 0.15; Se – 0.025, Ni – 60.0 с получением никельсодержащих катодных осадков. Представлены результаты изучения состава, морфологии поверхности и гранулометрического анализа катодных осадков, полученных при электрохимической переработке отработанного жаропрочного сплава ЖС32-ВИ с использованием кислотных электролитов. Анодное растворение сплава проводили в гальваностатическом режиме. Установлено влияние состава электролита на показатели процесса: выход по току, распределение компонентов сплава между продуктами электролиза, гранулометрический размер частиц катодного продукта электрохимической переработки указанного сплава. Показано, что в зависимости от природы электролита могут быть получены катодные осадки различного химического и фазового состава, различающиеся между собой по крупности и морфологии поверхности. Выявлено, что величина зерен катодных осадков, полученных в кислотных электролитах, практически одинакова: 99% зерен катодных осадков имеет размер в диапазоне 0.04–0.60 мкм. Основное отличие заключается в незначительном увеличении количества мелкой фракции при добавлении в состав электролита сульфосалициловой кислоты. Все полученные катодные осадки имеют дендритную структуру, развитость которой зависит от природы электролита, причем наиболее развитой структурой и наименьшим размером частиц обладают осадки, полученные при использовании азотнокислого электролита.*

**Ключевые слова:** жаропрочный сплав, электрохимическая переработка, анодный шлам, кислотный электролит, сульфосалициловая кислота, никельсодержащий концентрат.

**PRODUCTION OF DISPERSED NICKEL POWDER IN ELECTROCHEMICAL  
PROCESSING OF A RENIUM-CONTAINING HEAT-RESISTANT ALLOY**

**O.V. Chernyshova<sup>1,@</sup>, G.A. Usoltseva<sup>2</sup>, E.G. Baykonurov<sup>2</sup>, D.V. Drobot<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>MIREA – Russian Technological University (M.V. Lomonosov Institute of Fine Chemical Technologies), Moscow 119571, Russia

<sup>2</sup>Satbayev University, O. Baykonurov Institute of Mining and Metallurgy Satbayev University, Almaty 050013, Kazakhstan

@Corresponding author e-mail: oxcher@mitht.ru

*The article is devoted to the substantiation of the proposed technological scheme of electrochemical processing of rhenium-containing heat-resistant alloy ZhS32-VI of composition (mass %): Re – 4.0; Co – 9.3; W – 8.6; Y – 0.005; La – 0.005; Al – 6.0; Cr – 5.0; Ta – 4.0; Nb – 1.6; Mo – 1.1; C – 0.16; B – 0.15; Ce – 0.025, Ni – 60.05 to obtain nickel-containing cathode deposits. The results of studying the composition, surface morphology and granulometric analysis of cathodic precipitates obtained during the electrochemical processing of the spent heat-resistant alloy ZhS32-VI with the use of acid electrolytes are presented. Anodic dissolution of ZhS32-VI was performed in the galvanostatic mode. The effect of the electrolyte composition on the process parameters (current yield, distribution of alloy components between the electrolysis products, particle size distribution of the cathode product), electrochemical processing of this alloy were established. It is shown that depending on the nature of the electrolyte, cathode deposits of different chemical and phase composition can be obtained. They differ in the size and morphology of the surface. It has been established that the value of the cathode precipitate grains obtained in acid electrolytes is almost the same: 99% of the cathode precipitate grains are in the range from 0.04 to 0.60  $\mu\text{m}$ . The main difference is a slight increase in the amount of fine fraction when sulphosalicylic acid is added to the electrolyte. All the cathodic deposits obtained have a dendritic structure, the development of which depends on the nature of the electrolyte, the precipitates obtained with the use of a nitrate electrolyte having the most developed structure and the smallest particle size.*

**Keywords:** *high-temperature alloy, electrochemical processing, anode slurry, acid electrolyte, sulfosalicylic acid, nickel-containing concentrate.*

### Введение

В настоящее время одной из важнейших задач в технологии редких и цветных металлов является рациональное и эффективное использование вторичных ресурсов, которые образуются и накапливаются практически во всех сферах деятельности человека. Основными поставщиками вторичного сырья, содержащего редкие, благородные и цветные металлы, являются ракетно-космическая техника, самолето- и судостроение, химическая промышленность, цветная металлургия, энергетика, приборостроение и электронная промышленность [1]. Как правило, вторичное сырье содержит больший процент ценных компонентов, чем первичное. В связи с этим переработка вторичного сырья с извлечением ценных компонентов является высокорентабельным и перспективным производством. Ввиду перечисленного, возникает две проблемы:

- решение экологических задач, связанных с переработкой и утилизацией металлосодержащих отходов и лома;
- возвращение ценных компонентов в технологическую цепочку и получение новой продукции, содержащей цветные и редкие металлы.

Доля вторичной переработки редких, благородных и цветных металлов в мировом производстве неуклонно растет и с учетом всех вторичных, в том числе цветных металлов, достигает 30–40% от общего объема производства металлургической<sup>1</sup> промышленности развитых стран [1].

Одним из эффективных и перспективных направлений в технологии переработки металлических

отходов редких тугоплавких металлов являются процессы, основанные на электрохимических методах, позволяющие с высокими технологическими и экономическими показателями осуществлять регенерацию таких отходов [2–15]. Это обусловлено их полифункциональностью, малым расходом химических реагентов, возможностью гибкого управления.

В статье представлены результаты электрохимической переработки жаропрочного сплава ЖС32-ВИ состава (% масс.): Re – 4.0; Co – 9.3; W – 8.6; Y – 0.005; La – 0.005; Al – 6.0; Cr – 5.0; Ta – 4.0; Nb – 1.6; Mo – 1.1; C – 0.16; B – 0.15; Ce – 0.025, Ni – 60.0, проводимой в гальваностатическом режиме в кислых электролитах.

### Экспериментальная часть

Электрохимическое растворение проводили с использованием электрохимического технологического комплекса ЭХК-1012 (разработан ООО ИП «Тетран»), в котором реализуется некомпенсационный способ измерения потенциала [16]. Электрохимическая ячейка представляла собой емкость из фторопласта объемом 300 мл, анод – фрагмент лопасти лопатки из жаропрочного сплава ЖС32-ВИ, площадью  $S = 10 \text{ см}^2$ , катод – титановая (ВТ1-0) пластина, площадью  $S = 12 \text{ см}^2$ .

Убыль массы электрода определяли на аналитических весах ANDGR-300 с классом точности  $\pm 0.0001 \text{ г}$ . Температура процесса 20–25 °С. Элементный анализ проводили с использованием ИСР-масс-спектрометра для изотопного и элементного анализа ELAN DRC-e (Perkin Elmer, Канада). Определение размеров частиц методом измерения динамического светорассеяния выполняли на анализаторе размера субмикронных частиц

<sup>1</sup>Производство редких, цветных и платиновых металлов относится к металлургической отрасли промышленности.

и дзета-потенциала Delsa™ Nano, PN A54412AA. Рентгеновские исследования порошков осуществляли на дифрактометре Shimadzu XDR 6000 (излучение  $\text{CuK}_\alpha$ , вращение образца, непрерывный (1 град./мин), пошаговый (шаг  $0.02^\circ$ , экспозиция 10 с) режимы в интервале углов  $2\Theta$   $10^\circ$ – $90^\circ$ . Исследование морфологии и структуры получаемых катодных осадков проводили с использованием растрового сканирующего электронного микроскопа JEOL JSM 6390 LA.

### Результаты и их обсуждение

Целесообразность применения электролитов на основе серной и азотной кислот для переработки отходов исследуемого сплава была определена нами

на основании анализа литературных и собственных, ранее полученных экспериментальных данных [1, 2, 4–15]. Предлагалось [14–17] модернизировать стадию электрохимического растворения в кислом электролите существующей технологической схемы переработки жаропрочного сплава ЖС32-ВИ [13] с получением катодного осадка – металлического никель-кобальтового концентрата (рис. 1). Как видно из схемы, конечными продуктами электрохимической технологии переработки отработанных жаропрочных никельсодержащих сплавов являются концентраты цветных и редких металлов (анодный шлам), селективные и коллективные никельсодержащие металлические порошки (катодный продукт) и перренат аммония.

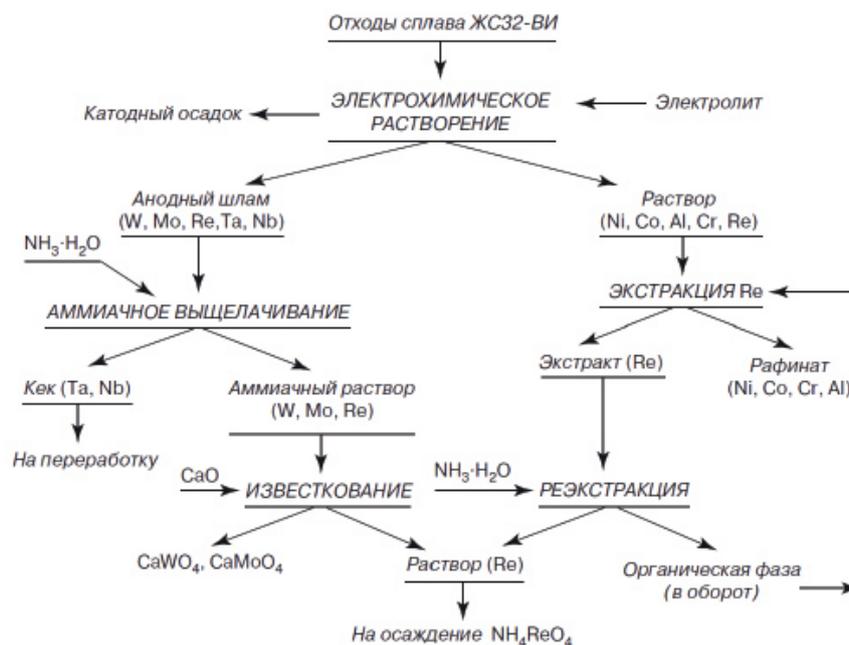


Рис. 1. Принципиальная технологическая схема переработки отходов жаропрочного сплава ЖС32-ВИ.

При использовании полученных катодных порошков металлов как сырья для создания композитов важную роль играет их гранулометрический состав. Известен ряд публикаций, посвященных изучению влияния органических веществ на процесс электролитического осаждения металлов из водных растворов электролитов [18–25]: фталевой кислоты, полиэтиленimina, ароматических соединений, поверхностно-активных веществ органического происхождения, например, яблочной, сульфосалициловой или сульфаминовой кислот. При введении в электролит органических добавок, способствующих возникновению на катоде новых центров кристаллизации металла, выделяемого путем электролиза, происходит измельчение частиц порошка, возрастает его дендритность. Добавки, замедляющие разряд ионов металла, способствуют получению более крупных и менее дендритных частиц порошка.

В качестве электролитов выбраны растворы: азотная кислота  $\text{HNO}_3$  ( $C = 100$  г/дм<sup>3</sup>) (I); азотная кислота  $\text{HNO}_3$  ( $C = 100$  г/дм<sup>3</sup>) + сульфосалициловая кислота ( $C = 10$  г/дм<sup>3</sup>) (II); серная кислота ( $C = 100$  г/дм<sup>3</sup>) (III); серная кислота ( $C = 100$  г/дм<sup>3</sup>) + сульфосалициловая кислота ( $C = 10$  г/дм<sup>3</sup>) (IV). Критерием эффективности являлся максимальный переход никеля и кобальта в электролит в процессе электрохимического растворения ЖС32-ВИ с последующим получением катодного металлического осадка, обеспечивающий упрощение его дальнейшей переработки.

Выбор величин силы тока определялся следующими условиями: при силе тока, меньшей 0.5 А, процесс протекает с низкой скоростью, что отрицательно сказывается на производительности процесса в целом, при значениях силы тока выше 2.5 А – возрастает доля нежелательных процессов (например, выделение кислорода).

В табл. 1 представлены экспериментальные данные по влиянию величины силы тока на скорость анодного растворения сплава ЖС32-ВИ в кислых электролитах, которую рассчитывали по формуле:

$$v = (m_1 - m_2)/(S \cdot t),$$

где  $m_1$  – исходная масса растворяемого образца, г;  
 $S$  – рабочая площадь электрода, см<sup>2</sup>;

$t$  – время процесса, ч;  
 $m_2$  – масса образца после электрохимического растворения с учетом образовавшегося анодного шлама, г:

$$m_2 = V \cdot (C_{Ni} + C_{Re} + C_{Co} + C_{Al} + C_{Cr}),$$

где  $V$  – объем электролита, мл;  
 $C$  – концентрация металла в электролите, г/дм<sup>3</sup>.

**Таблица 1.** Влияние силы тока на скорость анодного растворения в гальваностатическом режиме при  $I = 0.5\text{--}2.5$  А

Параметры процесса $I, A / i, A/cm^2$	Концентрация, г/дм <sup>3</sup>					Скорость растворения, г/ч·см <sup>2</sup>	Выход по току для никеля, %
	Ni	Re	Co	Al	Cr		
Электролит азотнокислый HNO <sub>3</sub> ( $C = 100$ г/дм <sup>3</sup> ) (I)							
0.5/0.05	10.9	1.06	0.46	0.08	0.05	0.030	58.5
1.0/0.10	10.4	1.08	0.35	0.10	0.05	0.045	59.1
1.5/0.15	12.1	1.13	0.39	0.18	0.11	0.055	58.9
2.0/0.20	15.6	1.37	0.56	0.21	0.18	0.056	49.9
2.5/0.25	17.0	1.86	0.61	0.29	0.20	0.056	48.9
Электролит азотнокислый HNO <sub>3</sub> ( $C = 100$ г/дм <sup>3</sup> ) с добавкой сульфосалициловой кислоты ( $C_{сск} = 10$ г/дм <sup>3</sup> ) (II)							
0.5/0.05	8.54	0.75	0.30	0.05	0.03	0.025	52.5
1.0/0.10	8.95	0.81	0.28	0.05	0.03	0.033	54.0
1.5/0.15	9.56	0.85	0.30	0.05	0.07	0.048	54.5
2.0/0.20	10.0	0.85	0.32	0.07	0.08	0.050	45.3
2.5/0.25	11.2	0.87	0.36	0.07	0.08	0.050	42.5
Электролит сернокислый H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ( $C = 100$ г/дм <sup>3</sup> ) (III)							
0.5/0.05	7.45	0.58	0.32	0.07	0.03	0.024	48.5
1.0/0.10	8.12	0.64	0.38	0.07	0.03	0.030	51.0
1.5/0.15	8.56	0.66	0.40	0.10	0.05	0.030	50.5
2.0/0.20	9.23	0.65	0.44	0.15	0.05	0.035	43.8
2.5/0.25	10.02	0.72	0.46	0.17	0.05	0.035	41.3
Электролит сернокислый H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ( $C = 100$ г/дм <sup>3</sup> ) с добавкой сульфосалициловой кислоты ( $C_{сск} = 10$ г/дм <sup>3</sup> ) (IV)							
0.5/0.05	7.56	0.55	0.41	0.05	0.03	0.024	49.1
1.0/0.10	7.99	0.58	0.45	0.05	0.03	0.031	49.3
1.5/0.15	8.35	0.62	0.42	0.04	0.05	0.030	49.8
2.0/0.20	8.30	0.62	0.44	0.05	0.05	0.031	49.4
2.5/0.25	8.20	0.66	0.44	0.05	0.05	0.032	49.2

Сравнивая представленные в табл. 1 данные, можно говорить о более высокой скорости растворения сплава ЖС32-ВИ в азотнокислом электролите по сравнению с сернокислым: 0.056 и 0.035 г/ч·см<sup>2</sup> при плотности тока 0.25 А/см<sup>2</sup>, соответственно. Добавка сульфосалициловой кислоты практически не влияет на скорость растворения сплава.

Величина зерен катодных осадков, полученных в электролитах (I)–(IV), практически одинакова: размер 99% зерен катодных осадков находится в диапазоне от 0.04 до 0.60 мкм. Основное отличие заключается в незначительном увеличении количества мелкой фракции при добавлении сульфосалицило-

вой кислоты, причем это характерно и для азотнокислого, и для сернокислого электролитов. Результаты гранулометрического анализа катодного осадка, полученного в электролите (I), приведены на рис. 2.

Поскольку азотнокислый электролит ( $C_{HNO_3} = 100$  г/дм<sup>3</sup>) в сравнении с сернокислым электролитом обеспечивает для никеля максимальную скорость растворения сплава и высокие показатели выхода по току, с ним и проводили дальнейшие исследования по электрохимической переработке жаропрочного сплава. Суммарно в азотнокислом электролите ( $C_{HNO_3} = 100$  г/дм<sup>3</sup>) в гальваностатическом режиме переработано 90.34 г жаропрочного сплава ЖС32-ВИ и по-

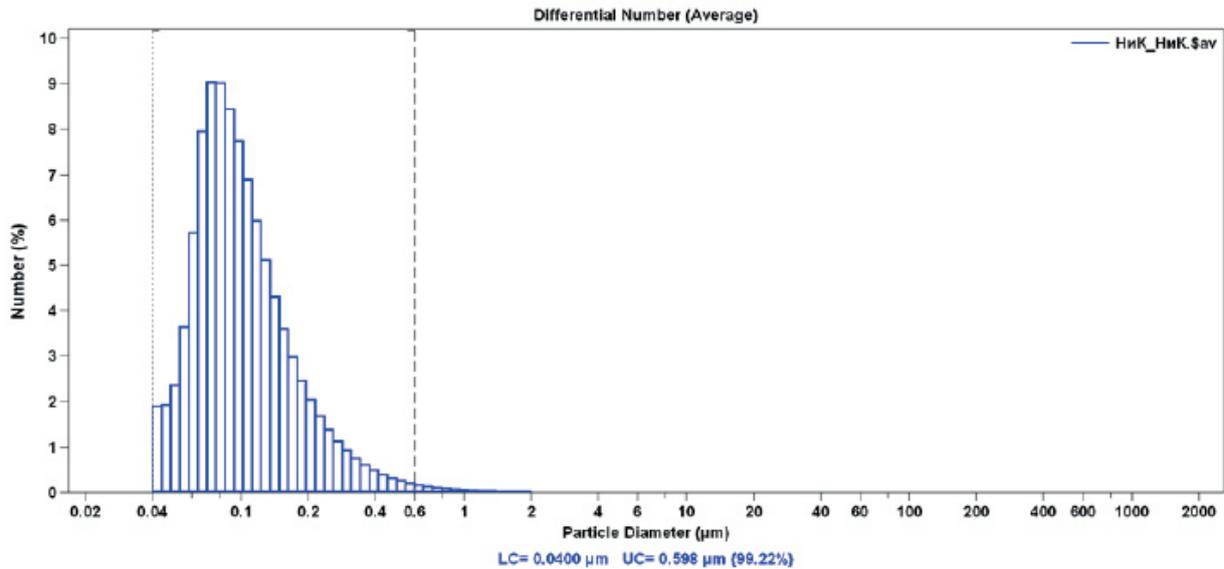


Рис. 2. Гранулометрический состав катодного осадка, полученного в электролите (I) в гальваностатическом режиме при  $i = 0.15 \text{ A/cm}^2$ .

лучено 59.62 г катодного осадка и 28.12 г анодного шлама. Химический состав анодного шлама, полученного при анодном растворении в азотнокислом электролите сплава ЖС32-ВИ в гальваностатическом режиме при  $I = 1.5 \text{ A}$ , % масс.: Al – 6.98; Cr – 3.95; Co – 5.23; Ni – 26.0; Re – 1.93; Nb – 5.58; Mo – 6.22; Ta – 15.4; W – 28.8.

Из приведенных данных следует, что при растворении сплава ЖС32-ВИ в гальваностатическом режиме при силе тока в диапазоне значений 0.5–2.5 А происходит количественное разделение составляющих его компонентов: в анодном шламе концентрируются тугоплавкие металлы – ниобий, тантал, молибден и вольфрам, в электролит переходят частично кобальт

и рений и основное количество алюминия, хрома и никеля. При достижении в растворе концентрации никеля около  $5\text{--}7 \text{ г/дм}^3$  начинается его выделение на катоде в виде плотно сцепленного осадка совместно с кобальтом.

Химический состав катодного осадка, полученного при анодном растворении сплава ЖС32-ВИ в азотнокислом электролите в гальваностатическом режиме при силе тока  $I = 1.5 \text{ A}$ , % масс.: Ni – 82.6; Co – 15.9; Cr – 0.35; Re – 1.08; Al – 0.05. Данные рентгенофазового анализа, приведенные на табл. 2 и на рис. 3, свидетельствуют о том, что катодный осадок представляет механическую смесь индивидуальных порошков никеля и кобальта.

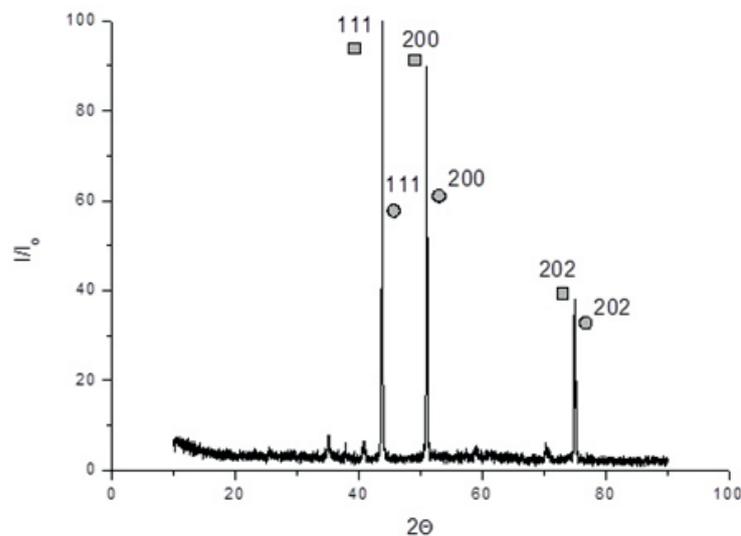


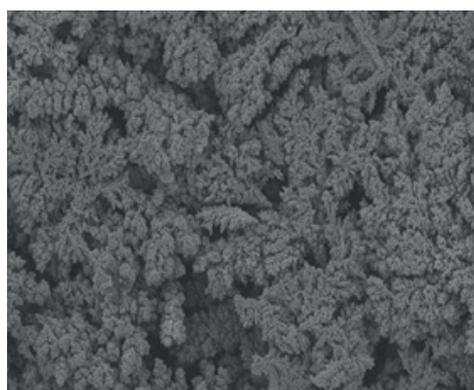
Рис. 3. Рентгенограмма катодного осадка, полученного при анодном растворении сплава ЖС32-ВИ в гальваностатическом режиме при  $I = 1.5 \text{ A}$ : ○ – Co, □ – Ni.

Таблица 2. Идентификация рентгенограммы катодного осадка, полученного при анодном растворении сплава ЖС32-ВИ в гальваностатическом режиме при  $I = 1.5 \text{ А}$

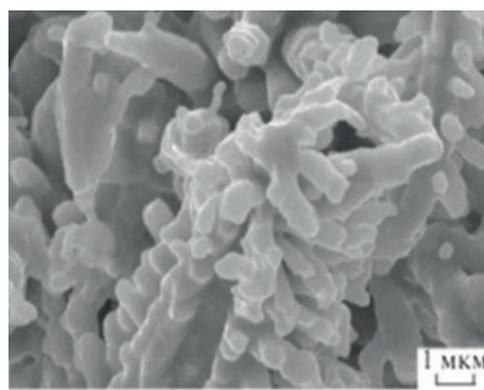
Фаза	Катодный осадок		Карточка (PDF-2) № 96-901-3032	
	$2\Theta$	$I, \%$	$2\Theta$	$I, \%$
Ni	43.78	100	43.71	100.0
	50.98	89.8	50.92	44.9
		37.9	74.88	21.9
Фаза	Катодный осадок		Карточка (PDF-2) № 96-901-2933	
	$d, \text{ \AA}$	$I, \%$	$d, \text{ \AA}$	$I, \%$
Ni	43.82	71.1	43.76	100.0
	51.02	65.2	50.97	44.7
		26.5	74.96	21.6

Следует отметить, что в отсутствие органических добавок образуется плотный катодный никельсодержащий осадок. Одновременно наблюдается интенсивное выделение водорода на начальной стадии, которое прекращается с развитием поверхности электрода за счет осаждения металлов. Микрофотографии катодного осадка, полученного при электрохимической перера-

ботке жаропрочного сплава в азотнокислом электролите с концентрацией  $100 \text{ г/дм}^3$ , приведены на рис. 4. Полученный катодный осадок характеризуется ярко выраженной дендритной структурой, дендриты сильно разветвлены, срастание частиц происходит по направлениям сингонии образующихся кристаллов и дендритных «веточек».



×500



×1000

Рис. 4. Микрофотографии катодного осадка, полученного при электрохимической переработке жаропрочного сплава ЖС32-ВИ в азотнокислом электролите.

Добавление сульфосалициловой кислоты в целом сопровождается малым количеством выделяемого водорода; порошок становится мелкозернистым, однородным. Полученные данные хорошо согласуются с имеющимися литературными [18–21]. Образование мелкодисперсных, однородных электролитических никель-кобальтсодержащих порошков в присутствии сульфосалициловой кислоты  $\text{C}_6\text{H}_3(\text{OH})(\text{COOH})(\text{SO}_3\text{H})\cdot 2\text{H}_2\text{O}$  (рис. 5а) обусловлено, скорее всего, наличием в молекуле органического соединения карбоксильной и сульфогрупп, находящихся в *орто*-положении, которые координируются к поверхностным атомам металла. Бензольное кольцо органической молекулы ориентируется к граням кристаллов плоско-параллельно, экранируя поверхность осаждаемого металла от катионов металла, диффундирующих из объема электролита к

катоде. Это способствует уменьшению средних размеров кристаллов и, соответственно, повышению мелкозернистой фракции в осадке, образованию сферических и полусферических форм выделяемого металла и их упорядоченному расположению.

Полученные в ходе исследований данные по изучению влияния поляризующих агентов – сульфосалициловой и сульфаминовой кислот показали, что их присутствие не отражается на составе катодного осадка, но оказывает влияние на гранулометрический состав образующегося порошка: наибольшее влияние оказывает введение сульфосалициловой кислоты, благодаря чему доля мелкой фракции (менее  $0.1 \text{ мкм}$ ) увеличивалась до 99.5–99.7% (на рис. 6 гранулометрический состав приведен для осадка, полученного из азотнокислого электролита).

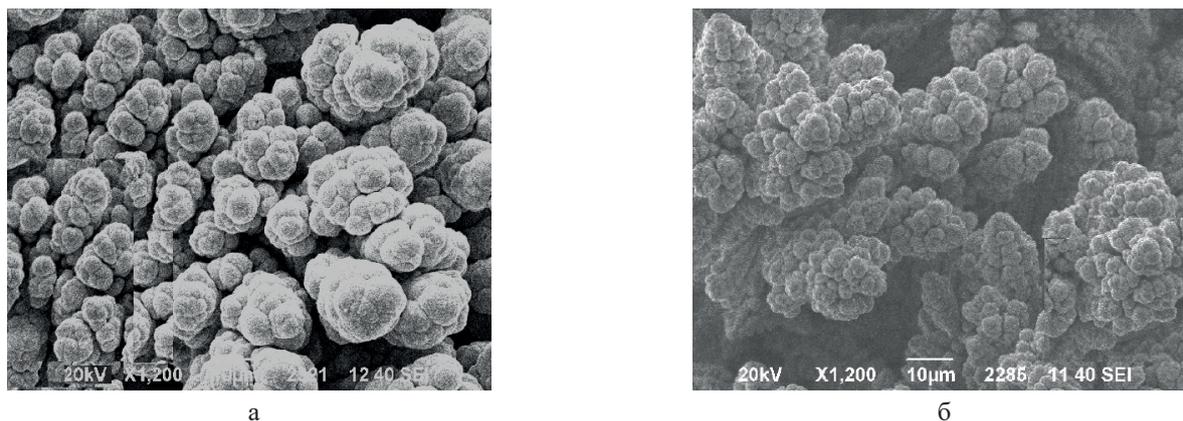


Рис. 5. Микрофотографии катодного осадка, выделенного при электрохимической переработке жаропрочного никелевого сплава ЖС32-ВИ в присутствии сульфосалициловой (а) и сульфаминовой (б) кислот.

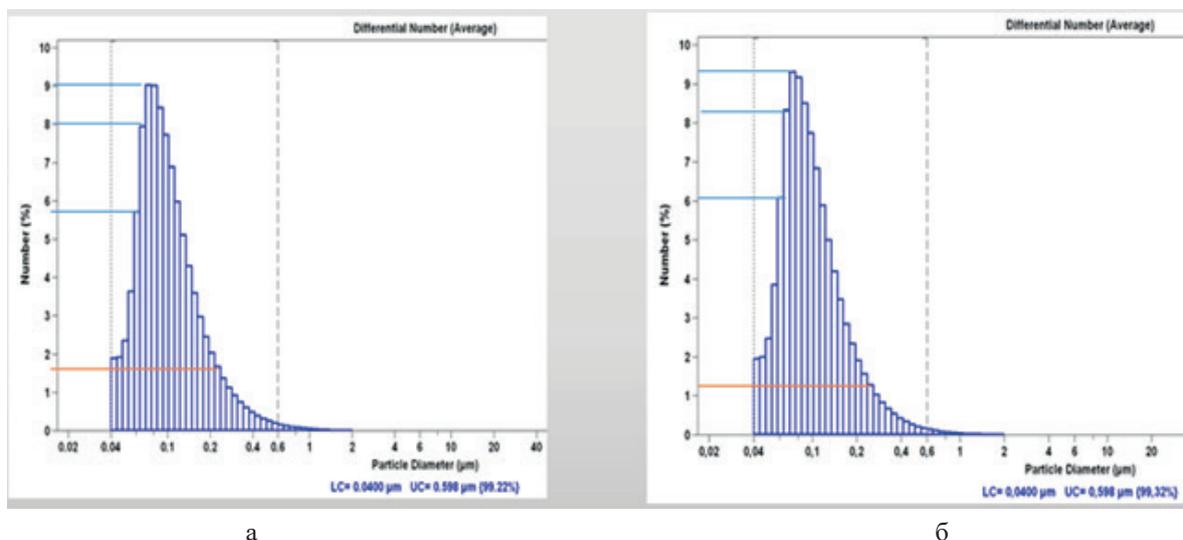


Рис. 6. Гранулометрический состав катодного осадка, полученного при анодном растворении жаропрочного никелевого сплава ЖС32-ВИ из азотнокислого электролита (а) и азотнокислого электролита с добавкой 10 г/дм<sup>3</sup> сульфосалициловой кислоты (б).

Таким образом, в ходе исследований по влиянию органических добавок на процесс электрохимической переработки жаропрочного сплава ЖС32-ВИ и дисперсность получаемого катодного продукта:

- изучено влияние состава электролита на показатели процесса электролиза и установлено, что добавка сульфосалициловой кислоты практически не оказывает влияния на протекание процесса и величину скорости растворения сплава;

- показано влияние силы тока/плотности тока на скорость электрохимического растворения сплава ЖС32-ВИ: при силе тока 1.5 А достигается максимальная скорость растворения сплава – 0.055 г/ч·см<sup>2</sup>,

причем выход по току для никеля достигает 58.9%;

- выявлено, что для азотнокислого электролита характерна более высокая скорость растворения сплава ЖС32-ВИ по сравнению с сернокислым: 0.056 и 0.035 г/ч·см<sup>2</sup> при плотности тока 0.25 А/см<sup>2</sup>, соответственно;

- установлено, что величина зерен катодных осадков, полученных в указанных электролитах, практически одинакова: 99% зерен катодных осадков имеет размер в диапазоне от 0.04 до 0.60 мкм; основное отличие заключается в незначительном увеличении количества мелкой фракции при добавлении в состав электролита сульфосалициловой кислоты.

#### Список литературы:

1. Rao S.R. Resource recovery and recycling from metallurgical wastes. V. 7. Elsevier Science, 2006. 580 p.
2. Lutz L.J., Parker S.A., Stephenson J.B. Recycling of contaminated superalloy scrap via electrochemical processes // TMS Annual Meeting. 1993. P. 1211–1220.

#### References:

1. Rao S.R. Resource recovery and recycling from metallurgical wastes. V. 7. Elsevier Science, 2006. 580 p.
2. Lutz L.J., Parker S.A., Stephenson J.B. Recycling of contaminated superalloy scrap via electrochemical processes. *TMS Annual Meeting*. 1993: 1211-1220.

3. Prasad V.V.S., Rao A.S., Prakash U., Rao V.R., Rao P.K., Gupt M.K. Recycling of super alloy scrap through electro slag remelting // *ISIJ Int.* 1996. V. 36. № 12. P. 1459–1464. DOI: 10.2355/isijinternational.36.1459
4. Flow studies for recycling metal commodities in the United States / Ed. S.F. Sibley. Reston, Virginia: US Geological Survey, 2004. 182 p.
5. Worrell E., Reuter M.A. Handbook of Recycling: State-of-the-art for Practitioners, Analysts, and Scientists. Amsterdam: Elsevier, 2014. 600 p.
6. Палант А.А., Брюквин В.А., Левин А.М., Левчук О.М. Комплексная электрохимическая технология переработки отходов жаропрочных никелевых сплавов, содержащих рений, вольфрам, тантал, ниобий и другие ценные металлы // *Металлы*. 2014. № 1. С. 25–27.
7. Палант А.А., Брюквин В.А., Левчук О.М., Палант А.В., Левин А.М. Способ электрохимической переработки металлических отходов жаропрочных никелевых сплавов, содержащих рений: Пат. 2401312 РФ. № 2009113255/02; заявл. 09.04.2009; опубл. 10.10.2010. Бюл. № 28.
8. Stoller V., Olbrich A., Meese-Marktscheffel J., Mathy W., Erb M., Nietfeld G., Gille G. Process for electrochemical decomposition of superalloys: Pat. 10155791 DE. Publ. 17.07.2003.
9. Krynitz U., Olbrich A., Kummer W., Schloh M. Method for the decomposition and recovery of metallic constituents from super alloys: Pat. 5776329 USA. Publ. 07.07.1998.
10. Stoller V., Olbrich A., Meese-Marktscheffel J., Mathy W., Erb M., Nietfeld G., Gille G. Electrochemical dissolution process for disintegrating super alloy scraps: Pat. 1312686EP. Publ. 21.05.2003.
11. Srivastava R., Kim M., Lee J., Jha M.-K., Kim B.-S. Resource recycling of superalloys and hydrometallurgical challenges // *J. Mater. Sci.* 2014. V. 49. Iss. 14. P. 4671–4686.
12. Шипачев В.А. Некоторые технологические приемы выделения и очистки рения из жаропрочных сплавов // *Химия в интересах устойчивого развития*. 2012. № 20. С. 365–368.
13. Палант А.А., Брюквин В.А., Левчук О.М. Комплексная электрохимическая переработка металлических отходов ренийсодержащего жаропрочного никелевого сплава в сернокислых электролитах // *Электromеталлургия*. 2010. № 7. С. 29–33.
14. Chernyshova O.V., Drobot D.V. Variants of electrochemical processing of rhenium-containing high-temperature alloy // *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 2018. V. 52. № 4. P. 711–716.
15. Чернышова О.В., Чернышов В.И., Дробот Д.В., Махонько М.В. Способ извлечения никеля при электрохимической переработке жаропрочных никеле-
3. Prasad V.V.S., Rao A.S., Prakash U., Rao V.R., Rao P.K., Gupt M.K. Recycling of super alloy scrap through electro slag remelting. *ISIJ Int.* 1996; 36(12): 1459-1464. DOI: 10.2355/isijinternational.36.1459
4. Flow studies for recycling metal commodities in the United States. Ed. S.F. Sibley. Reston, Virginia: US Geological Survey, 2004. 182 p.
5. Worrell E., Reuter M.A. Handbook of Recycling: State-of-the-art for Practitioners, Analysts, and Scientists. Amsterdam: Elsevier, 2014. 600 p.
6. Palant A.A., Bryukvin V.A., Levin A.M., Levchuk O.M. Combined electrochemical processing of the wastes of nickel super alloys containing rhenium, tungsten, tantalum, niobium and other precious metals. *Metally (Metals)*. 2014; 1: 25-27. (in Russ.)
7. Palant A.A., Bryukvin V.A., Levchuk O.M., Palant A.V., Levin A.M. Method of electrochemical processing of metal waste of heat-resistant nickel alloys containing rhenium: pat. 2401312 RF. No. 2009113255/02; filled 04/09/2009; publ. 10/10/2010. (in Russ.)
8. Stoller V., Olbrich A., Meese-Marktscheffel J., Mathy W., Erb M., Nietfeld G., Gille G. Process for electrochemical decomposition of superalloys: Pat. 10155791 DE. Publ. 07/17/2003.
9. Krynitz U., Olbrich A., Kummer W., Schloh M. Method for the decomposition and recovery of metallic constituents from super alloys: Pat. 5776329 USA. Publ. 07/07/1998.
10. Stoller V., Olbrich A., Meese-Marktscheffel J., Mathy W., Erb M., Nietfeld G., Gille G. Electrochemical dissolution process for disintegrating super alloy scraps: Pat. 1312686 EP. Publ. 05/21/2003.
11. Srivastava R., Kim M., Lee J., Jha M.-K., Kim B.-S. Resource recycling of superalloys and hydrometallurgical challenges. *J. Mater. Sci.* 2014; 49(14): 4671-4686.
12. Shipachev V.A. Some technological measures to extract and purify rhenium from heat-resistant materials. *Khimiya v interesakh ustojchivogo razvitiya (Chemistry for Sustainable Development)*. 2012; 20: 365-368. (in Russ.)
13. Palant A.A., Bryukvin V.A., Levchuk O.M. Complex electrochemical processing of metallic rhenium-containing wastes of high-temperature nickel alloy in sulphate electrolytes. *Elektrometallurgiya (Electrometallurgy)*. 2010; 7: 29-33. (in Russ.)
14. Chernyshova O.V., Drobot D.V. Variants of electrochemical processing of rhenium-containing high-temperature alloy. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*. 2018; 52(4): 711-716.
15. Chernyshova O.V., Chernyshov V.I., Drobot D.V., Makhon'ko M.V. Method of extraction of nickel during electrochemical processing of heat-resistant nickel alloys: pat. 2542182 RF. No. 2013145573/02; filled 10/11/2013; publ. 05/20/2015. (in Russ.)

левых сплавов: Пат. 2542182 РФ. № 2013145573/02; заявл. 11.10.2013; опубл. 20.05.2015. Бюл. № 5.

16. Гайдаренко О.В., Чернышов В.И., Чернышов Ю.И. Способ измерения потенциала рабочего электрода электрохимической ячейки под током: Пат. № 2106620 РФ. № 96108732/25; заявл. 26.04.1996; опубл. 10.03.1998. Бюл. № 3.

17. Чернышова О.В., Канагатов Д.Г., Дробот Д.В. Получение никель-кобальтового концентрата при переработке ренийсодержащего жаропрочного сплава // Изв. ВУЗов. Цветная металлургия. 2016. № 6. С. 40–48.

18. Кобжанов А.С., Курбатов А.П., Романов Г.А. Влияние состава электролита и температуры на электроосаждение порошков меди // Промышленность Казахстана. 2005. Т. 3. № 30. С. 80–81.

19. Исаев А.В., Седаков А.Ю. Исследование механизма катодного восстановления никеля в сульфатном электролите // Новые промышленные технологии. 2009. № 5. С. 12–15.

20. Ваграмян А.Т., Жамаргорцянц М.А. Электроосаждение металлов и ингибирующая адсорбция. М.: Наука, 1969. 199 с.

21. Виноградов С.Н., Севастьянов Н.В. Сульфосалицилатный электролит для осаждения сплава медь-никель: Пат. 2365683 РФ. № 2008138832/02; заявл. 30.09.2008; опубл. 27.08.2009. Бюл. № 24.

22. Байконурова А.О., Усольцева Г.А., Акпанбаев Р.С., Абушахман О.Ш. Влияние добавок органических веществ на качество электролитического медного порошка // Изв. научно-техн. общества «КАХАК». 2011. № 1(31). С. 35–39.

23. Скибина Л.М., Дороган И.В., Бумбер А.А., Бурдина Е.И. Влияние комплексообразования ионов кадмия с *N*-метилпирролидоном на кинетику их электровосстановления в сульфатном электролите // Электрохимия. 2013. Т. 49. № 2. С. 138–145.

24. Sharifirad M., Omrani A., Rostami A. Electrodeposition and characterization of polypyrrole films on copper // J. Electroanal. Chem. 2010. V. 645. P. 149–158.

25. Седойкин А.А., Цупак Т.Е. Роль миграционного массопереноса при электроосаждении никеля из сульфатно-хлоридных и хлоридных растворов, содержащих янтарную кислоту // Электрохимия. 2008. Т. 44. № 3. С. 343–350.

16. Gajdarenko O.V., Chernyshov V.I., Chernyshov Yu.I. Method for measuring the potential of a working electrode of an electrochemical cell under a current: Pat. 2106620 RF. No. 96108732/25; filled 04/26/1996; publ. 03/10/1998. (in Russ.)

17. Chernyshova O.V., Kanagatov D.G., Drobot D.V. Nickel-cobalt concentrate production under the processing of rhenium-containing high-temperature alloy. *Izvestiya VUZov. Tsvetnaya metallurgiya* (Nonferrous Metallurgy). 2016; 6: 40-48. (in Russ.)

18. Kobzhanov A.S., Kurbatov A.P., Romanov G.A. Influence of electrolyte composition and temperature on the electrodeposition of copper powders. *Promyshlennost' Kazakhstana* (Industry of Kazakhstan). 2005; 30(3): 80-81. (in Russ.)

19. Isaev A.V., Sedakov A.Yu. Investigation of the mechanism of cathodic nickel reduction in sulfamate electrolyte. *Novye promyshlennye tekhnologii* (New Industrial Technologies). 2009; 5: 12-15. (in Russ.)

20. Vagramyan A.T., Zhamargortsyants M.A. Electrodeposition of metals and inhibiting adsorption. Moscow: Nauka Publ., 1969. 199 p.(in Russ.)

21. Vinogradov S.N., Sevast'yanov N.V. Sulfosalicylate electrolyte for deposition of copper-nickel alloy: pat. 2365683 RF. No. 2008138832/02; filled 09/30/2008; publ. 08/27/2009. (in Russ.)

22. Baykonurova O.A., Usoltseva G.A., Akpanbaev R.S., Abushakhman O.Sh. The effect of organic additives on the quality of electrolytic copper powder. *Izvestiya nauchno-tekhnicheskogo obshchestva "KAHAK"* (Proceedings of the scientific-technical society "QAGHAQ"). 2011; 1 (31): 35-39. (in Russ.)

23. Skibina L.M., Dorogan I.V., Bumber A.A., Burdina E.I. Effect of complexation of cadmium ions with *N*-methylpyrrolidone on kinetics of their electroreduction in sulfate electrolyte. *Ehlektrhimiya* (Electrochemistry). 2013; 49(2): 138-145. (in Russ.)

24. Sharifirad M., Omrani A., Rostami A. Electrodeposition and characterization of polypyrrole films on copper. *J. Electroanal. Chem.* 2010; 645: 149-158.

25. Sedoikin A.A., Tsupak T.E. The role of migration mass transfer in the electrodeposition of nickel from sulfate-chloride and chloride solutions containing succinic acid. *Russian Journal of Electrochemistry.* 2008; 44(3): 319-326.

#### Об авторах:

**Чернышова Оксана Витальевна**, кандидат технических наук, доцент кафедры химии и технологии редких и рассеянных элементов, наноразмерных и композиционных материалов им. К.А. Большакова Института тонких химических технологий им. М.В. Ломоносова ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119571, Россия, Москва, пр-т Вернадского, 86). E-mail: oxcher@mitht.ru

**Усольцева Галина Александровна**, кандидат технических наук, ассистент профессора кафедры «Металлургические процессы, теплотехника и технология специальных материалов» Горно-металлургического института им. О. Байконурова, Satbayev University (050013, Казахстан, г. Алматы, ул. Сатпаева, 22). E-mail: nota-vesna@yandex.ru

**Байконуров Ерден Галымович**, Ph.D., докторант кафедры «Металлургические процессы, теплотехника и технология специальных материалов» Горно-металлургического института им. О. Байконурова, Satbayev University (050013, Казахстан, г. Алматы, ул. Сатпаева, 22). E-mail: erden\_baikonurov@mail.ru

**Дробот Дмитрий Васильевич**, доктор химических наук, профессор кафедры химии и технологии редких и рассеянных элементов, наноразмерных и композиционных материалов им. К.А. Большакова Института тонких химических технологий им. М.В. Ломоносова ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119571, Россия, Москва, пр-т Вернадского, 86). E-mail: dvdrobot@mail.ru

**About the authors:**

**Oksana V. Chernyshova**, Ph.D. (Engineering), Associate Professor, K.A. Bolshakov Chair of Chemistry and Technology of Rare and Scattered Elements, Nanoscale and Composite Materials, M.V. Lomonosov Institute of Fine Chemical Technologies, MIREA – Russian Technological University (86, Vernadskogo Pr., Moscow 119571, Russia). E-mail: oxcher@mitht.ru.

**Galina A. Usoltseva**, Ph.D. (Engineering), Chair of Metallurgical Processes, Thermotechnics and Technology of Special Materials, O. Baykonurov Institute of Mining and Metallurgy, Satbayev University, (22 Satbaev st., Almaty 050013, Kazakhstan). E-mail: nota-vesna@yandex.ru

**Erden G. Baykonurov**, Postgraduate Student, Chair of Metallurgical Processes, Thermotechnics and Technology of Special Materials, O. Baykonurov Institute of Mining and Metallurgy, Satbayev University, (22 Satbaev st., Almaty 050013, Kazakhstan). E-mail: erden\_baikonurov@mail.ru

**Dmitry V. Drobot**, D.Sc. (Chem.), Professor, K.A. Bolshakov Chair of Chemistry and Technology of Rare and Scattered Elements, Nanoscale and Composite Materials, M.V. Lomonosov Institute of Fine Chemical Technologies, MIREA – Russian Technological University (86, Vernadskogo Pr., Moscow 119571, Russia). E-mail: dvdrobot@mail.ru

**Для цитирования:** Чернышова О.В., Усольцева Г.А., Байконуров Е.Г., Дробот Д.В. Получение дисперсных порошков никеля при электрохимической переработке ренийсодержащего жаропрочного сплава // Тонкие химические технологии / Fine Chemical Technologies. 2018. Т. 13. № 6. С. 69–78. DOI: 10.32362/2410-6593-2018-13-6-69-78

**For citation:** Chernyshova O.V., Usoltseva G.A., Baykonurov E.G., Drobot D.V. Production of dispersed nickel powder in electrochemical processing of a rhenium-containing heat-resistant alloy. *Tonkie khimicheskie tekhnologii / Fine Chemical Technologies*. 2018; 13(6): 69-78. DOI: 10.32362/2410-6593-2018-13-6-69-78