

## ПОЛУЧЕНИЕ НИКЕЛЬ-КОБАЛЬТОВОГО КОНЦЕНТРАТА ПРИ ПЕРЕРАБОТКЕ РЕНИЙСОДЕРЖАЩЕГО ЖАРОПРОЧНОГО СПЛАВА

© 2016 г. **О.В. Чернышова, Д.К. Канагатов, Д.В. Дробот**

Московский технологический университет

*Статья поступила в редакцию 17.07.15 г., доработана 30.10.15 г., подписана в печать 05.11.15 г.*

Изложены результаты электрохимической переработки жаропрочного сплава марки ЖС32-ВИ, реализованной в гальваностатическом режиме в азотнокислом электролите. Проведены эксперименты по электрохимическому растворению в гальваностатическом режиме этого сплава с использованием раствора азотной кислоты с концентрацией 100 г/л при различных значениях плотности тока. Показано, что происходит количественное разделение составляющих его компонентов: в анодном шламе концентрируются тугоплавкие металлы – ниобий, тантал, молибден и вольфрам, а в электролит переходят частично кобальт и рений и основное количество алюминия, хрома и никеля. Предложена принципиальная технологическая схема переработки сплава ЖС32-ВИ, в которой получение и отделение основной массы никеля и кобальта осуществляются на первой стадии, с формированием металлического Ni–Co-содержащего осадка.

**Ключевые слова:** жаропрочный сплав ЖС32-ВИ, никелевый концентрат, рений, контролируемый анодный потенциал, электрохимическая переработка, электрохимическое выделение.

**Чернышова О.В.** – канд. техн. наук, доцент кафедры «Химия и технология редких и рассеянных элементов, наноразмерных и композиционных материалов» Института тонких химических технологий Московского технологического университета (119571, г. Москва, пр-т Вернадского, 86). E-mail: oxcher@mitht.ru.

**Дробот Д.В.** – докт. хим. наук, проф., заведующий той же кафедрой. E-mail: dvdrobot@mail.ru.

**Канагатов Д.К.** – магистр той же кафедры.

**Для цитирования:** Чернышова О.В., Канагатов Д.К., Дробот Д.В. Получение никель-кобальтового концентрата при переработке ренийсодержащего жаропрочного сплава // Изв. вузов. Цвет. металлургия. 2016. No. 6. С. 42–48. DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2016-6-42-48.

*Chernyshova O.V., Kanagatov D.K., Drobot D.V.*

### **Nickel-cobalt concentrate production under the processing of rhenium-containing high-temperature alloy**

The article describes the results of HAS32-VI superalloy electrochemical processing in nitric acid solutions in galvanostatic mode. Experiments were conducted for electrochemical dissolution of HAS32-VI superalloy in galvanostatic mode using nitric acid with a concentration of 100 g/l at different values of anode current density. It is found that this leads to quantitative separation of superalloy HAS32-VI components. The anode slurry is the concentrate of refractory metals – niobium, tantalum, molybdenum and tungsten. Cobalt, rhenium and the principal amount of aluminum, chromium and nickel partially pass into electrolyte. The flow diagram of HAS32-VI superalloy processing was suggested that provides for generation and separation of the principal nickel and cobalt amount at the first stage with the formation of Ni–Co-containing metal sediment.

**Keywords:** HAS32-VI superalloy, nickel concentrate, rhenium, controlled anode potential, electrochemical processing, electrowinning.

**Chernyshova O.V.** – Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor of Department of chemistry and technology of rare and dispersed elements, and nanoscale composite materials, Moscow Technological University (119571, Russia, Moscow, Vernadskigo prosp., 86). E-mail: oxcher@mitht.ru.

**Drobot D.V.** – Dr. Sci. (Chem.), Prof., Head of the same Department. E-mail: dvdrobot@mail.ru.

**Kanagatov D.K.** – Master's Student of the same Department.

**Citation:** Chernyshova O.V., Kanagatov D.K., Drobot D.V. Poluchenie nikel'-kopal'tovogo kontsentrata pri pererabotke reniisoderzhashchego zharoprochnogo splava. *Izv. vuzov. Tsvet. metallurgiya*. 2016. No. 6. P. 42–48. DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2016-6-42-48.

## Введение

Жаропрочные материалы применяются в авиационной, энергомашиностроительной, ракетно-космической и другой технике. Одно из первых

мест в этом сегменте промышленности занимают жаропрочные никелевые сплавы. К настоящему времени в мире накопилось большое количество

изделий из жаропрочных Ni-сплавов, срок службы которых истек. Высокая стоимость компонентов, содержащихся в них (рений, тантал, кобальт и др.), обуславливает необходимость их возврата в сферу промышленного производства. Одним из эффективных и перспективных направлений в технологии переработки металлических отходов редких тугоплавких металлов являются процессы, основанные на электрохимических методах. Они позволяют с высокими технологическими и экономическими показателями осуществлять регенерацию таких отходов [1–17].

Целью настоящей работы являлось выявление закономерностей электрохимической переработки жаропрочного сплава ЖС32-ВИ следующего состава, мас. %:

Re .....	4,0	Ta .....	4,0
Co .....	9,3	Nb .....	1,6
W .....	8,6	Mo .....	1,1
Y .....	0,005	C .....	0,16
La .....	0,005	V .....	0,15
Al .....	6,0	Ce .....	0,025
Cr .....	5,0	Ni .....	60,05

Процесс проводился в гальваностатическом режиме в азотнокислом электролите.

## Методика исследований

Электрохимическое растворение жаропрочного сплава ЖС32-ВИ проводили с помощью электрохимического технологического комплекса ЭХК-1012 (разработки ООО ИП «Тетран», г. Москва), использующего некомпенсационный способ измерения потенциала [18]. Комплекс работает в двух режимах:

- исследовательский — осуществляет сбор информации об объекте изучения, далее в диалоговом режиме с участием оператора выбираются и устанавливаются параметры технологического процесса;
- технологический — выполняется в автоматическом порядке и реализуется в двух вариантах:
  - режим поддержания потенциала — комплекс осуществляет технологический процесс при установленном оператором потенциале (потенциостатический),
  - режим поддержания тока — комплекс поддерживает установленный ток (гальваностатический).

Электрохимическая ячейка представляет собой емкость из фторопласта объемом 300 мл, анод — фрагмент лопасти лопатки из жаропрочного сплава ЖС32-ВИ площадью 10 см<sup>2</sup>, катод — титановая (BT1-0) пластина площадью 12 см<sup>2</sup>.

Убыль массы электрода определялась на аналитических весах AND GR-300 с классом точности измерений ±0,0001 г при температуре 20–25 °С. Элементный анализ проводился с использованием ICP масс-спектрометра ELAN DRC-e («Perkin Elmer», Канада). Размеры частиц полученных катодных осадков определялись путем измерения динамического светорассеяния на анализаторе Delsa™ Nano, PN A54412AA для оценки размера субмикронных частиц и зета-потенциала. Рентгеновские исследования порошков проводились на дифрактометре Shimadzu XDR 6000 (CuK<sub>α</sub>-излучение, непрерывное (1 град/мин) вращение образца с шагом 0,02° и экспозицией 10 с) в интервале углов 2θ = 10°÷90°.

## Результаты и их обсуждение

Существуют два подхода к переработке жаропрочных сплавов: один из них заключается в поэтапном извлечении компонентов сплава в раствор электролита с последующим выделением их из раствора; другой — предполагает совместное извлечение всех ценных компонентов сплава в раствор и их последующее селективное извлечение в виде металлов или соединений.

На основании литературных данных и ранее проведенных исследований выявлена целесообразность применения кислых электролитов на основе H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> и HNO<sub>3</sub> [1, 4, 5, 9, 10, 14]. Нами выбрана азотная кислота с концентрацией 100 г/л, обеспечивающая максимальную скорость растворения сплава с получением катодного никельсодержащего продукта. Меньшая концентрация кислоты ведет к снижению скорости растворения сплава (менее 0,030 г/(ч·см<sup>2</sup>)), а при C<sub>HNO<sub>3</sub></sub> ≥ 250 г/л растет вероятность выделения оксидов азота.

Электрохимическую переработку жаропрочного сплава осуществляли в гальваностатическом режиме, использование которого обусловлено возможностью его реализации на технологическом оборудовании, существующем на большинстве предприятий переработки вторичного и техногенного сырья.

Выбор величин силы тока определялся следующим: при I < 0,5 А процесс протекает с низкой

Таблица 1

**Влияние силы тока на скорость анодного растворения в гальваностатическом режиме**

I, А	i, А/см <sup>2</sup>	Концентрация, г/л					v, г/(ч·см <sup>2</sup> )	BT <sub>Ni</sub> , %
		Ni	Re	Co	Al	Cr		
0,5	0,05	10,90	1,06	0,46	0,08	0,05	0,030	58,5
1,0	0,10	10,43	1,08	0,35	0,10	0,05	0,045	59,1
1,5	0,15	12,10	1,13	0,39	0,18	0,11	0,055	58,9
2,0	0,20	15,65	1,37	0,56	0,21	0,18	0,056	49,9
2,5	0,25	17,03	1,86	0,61	0,29	0,20	0,055	48,9

Примечание. Параметры процесса: электролит азотнокислый, C<sub>HNO<sub>3</sub></sub> = 100 г/л, τ = 2 ч, t = 20±25 °С.

скоростью, что отрицательно сказывается на его производительности в целом, а при I > 2,5 А возрастает доля нежелательных процессов (например, выделение кислорода).

В табл. 1 представлены экспериментальные данные по влиянию величины силы тока на скорость (v) анодного растворения сплава ЖС32-ВИ в азотнокислом электролите при C<sub>HNO<sub>3</sub></sub> = 100 г/л. Для каждого опыта использовали новый анод, представляющий собой фрагмент лопасти лопатки из исследуемого сплава ЖС32-ВИ площадью S = 10 см<sup>2</sup>.

Скорость его растворения рассчитывали по потере массы:

$$v = \frac{m_1 - m_2}{S\tau},$$

где m<sub>1</sub> — исходная масса образца, m<sub>2</sub> — его масса после электрохимического растворения, S — рабочая площадь электрода, τ — время процесса.

В азотнокислом электролите (C<sub>HNO<sub>3</sub></sub> = 100 г/л) с использованием гальваностатического режима суммарно переработано 191,22 г жаропрочного сплава ЖС32-ВИ. В результате получено 125,85 г катодного осадка и 59,37 г анодного шлама, химический состав которых представлен в табл. 2 и 3.

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, а в электролит переходят главным образом основные количества хрома и никеля. При достижении в растворе концентрации никеля около 5—7 г/л начинается его выделение на катоде в виде плотно сцепленного с кобальтом осадка. Суммарное содержание

Таблица 2

**Химический состав анодных шламов, полученных при анодном растворении сплава ЖС32-ВИ в гальваностатическом режиме**

Элемент	Образец 1		Образец 2		Образец 3	
	г	мас. %	г	мас. %	г	мас. %
Al	0,96	7,63	1,97	6,98	0,97	5,23
Cr	0,49	3,88	1,11	3,95	0,35	1,88
Co	0,79	6,23	1,48	5,23	0,78	4,23
Ni	5,19	41,09	7,34	25,98	5,08	27,49
Re	0,36	2,83	0,55	1,93	0,34	1,83
Nb	0,40	3,18	1,58	5,58	1,14	6,18
Mo	0,49	3,89	1,76	6,22	1,45	7,89
Ta	1,44	11,43	4,34	15,35	2,85	15,43
W	2,50	19,84	8,13	28,78	5,51	29,84

Примечание. Образцы 1–3 соответствуют продуктам электрохимического растворения при разных значениях силы тока: I = 0,5 А (обр. 1), 1,5 А (обр. 2) и 2,5 А (обр. 3).

Таблица 3

**Химический состав катодных осадков, полученных при анодном растворении сплава ЖС32-ВИ в гальваностатическом режиме**

Элемент	Образец 1		Образец 2		Образец 3	
	г	мас. %	г	мас. %	г	мас. %
Ni	31,01	84,12	46,55	82,61	25,24	77,40
Co	5,35	14,50	8,95	15,89	6,29	19,27
Cr	0,41	1,10	0,61	1,08	0,69	2,11
Re	0,09	0,25	0,19	0,35	0,30	0,93
Al	0,01	0,03	0,03	0,05	0,09	0,26

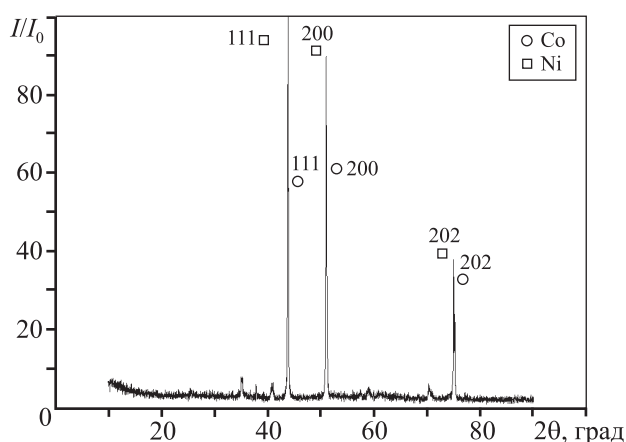
никеля и кобальта в катодных осадках превышает 96 %.

Данные рентгенофазового анализа катодного

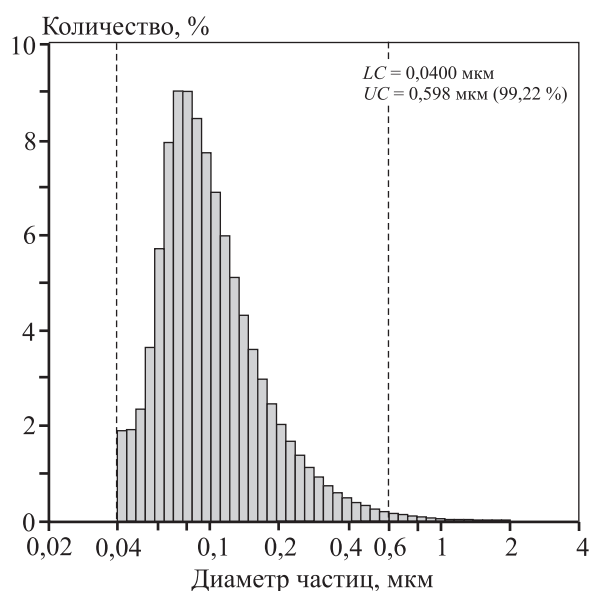
Таблица 4

**Идентификация рентгенограмм катодного осадка (обр. 2) при анодном растворении сплава ЖС32-ВИ в гальваностатическом режиме при  $I = 1,5$  А**

Фаза	Катодный осадок 2		Карточка (PDF-2) № 96-901-3032	
	$2\theta$ , град	$I$ , %	$2\theta$ , град	$I$ , %
Ni	43,78	100	43,71	1000,0
	50,98	89,8	50,92	449,5
	74,94	37,9	74,88	219,3
Фаза	Катодный осадок 2		Карточка (PDF-2) № 96-901-2933	
	$d$ , Å	$I$ , %	$d$ , Å	$I$ , %
Co	43,82	71,1	43,76	1000,0
	51,02	65,2	50,97	447,4
	75,01	26,5	74,96	216,3



**Рис. 1.** Рентгенограмма катодного осадка 2, полученного при анодном растворении сплава ЖС32-ВИ в гальваностатическом режиме при  $I = 1,5$  А



**Рис. 2.** Гранулометрический состав катодного осадка 2

осадка, полученного при переработке жаропрочного сплава ЖС32-ВИ в гальваностатическом режиме при силе тока 1,5 А (рис. 1), свидетельствуют о том, что он представляет собой механическую смесь индивидуальных порошков никеля и кобальта. Аналогичные результаты получены и для обр. 1 ( $I = 0,5$  А). При повышении силы тока происходит увеличение содержания рения и алюминия в катодном осадке, что подтверждается данными РФА — появляются фазы  $Al_{14}Co_3Ni_3$  (карточка PDFWINPDF-2 № 46-1062) и  $AlRe$  (карточка PDFWINPDF-2 № 29-0078), а фазы, содержащей хром, не обнаружено.

По результатам гранулометрического анализа катодных осадков, полученных при различной силе тока, установлено, что 99 % зерен имеют размер в диапазоне от 0,040 до 0,598 мкм (рис. 2). Отличие заключается в незначительном увеличении мелкой фракции с ростом силы тока.

Таким образом, основные закономерности электрохимической переработки жаропрочного сплава ЖС32-ВИ могут быть сформулированы следующим образом:

— с ростом плотности тока наблюдается существенное различие в поведении металлов V–VI и VII групп Периодической системы, входящих в состав сплава ЖС32-ВИ при его электрохимическом растворении: так, например, содержание ниобия в анодном шламе возрастает с 3,18 до 6,18 мас.%, тогда как концентрация рения уменьшается с 2,83 до 1,83 мас.% при плотности тока 0,05 и 0,25 А/см<sup>2</sup> соответственно;

— при плотности тока 0,05–0,15 А/см<sup>2</sup> достигается оптимальное соотношение скоростей растворения никеля, кобальта и рения, что обеспечивает

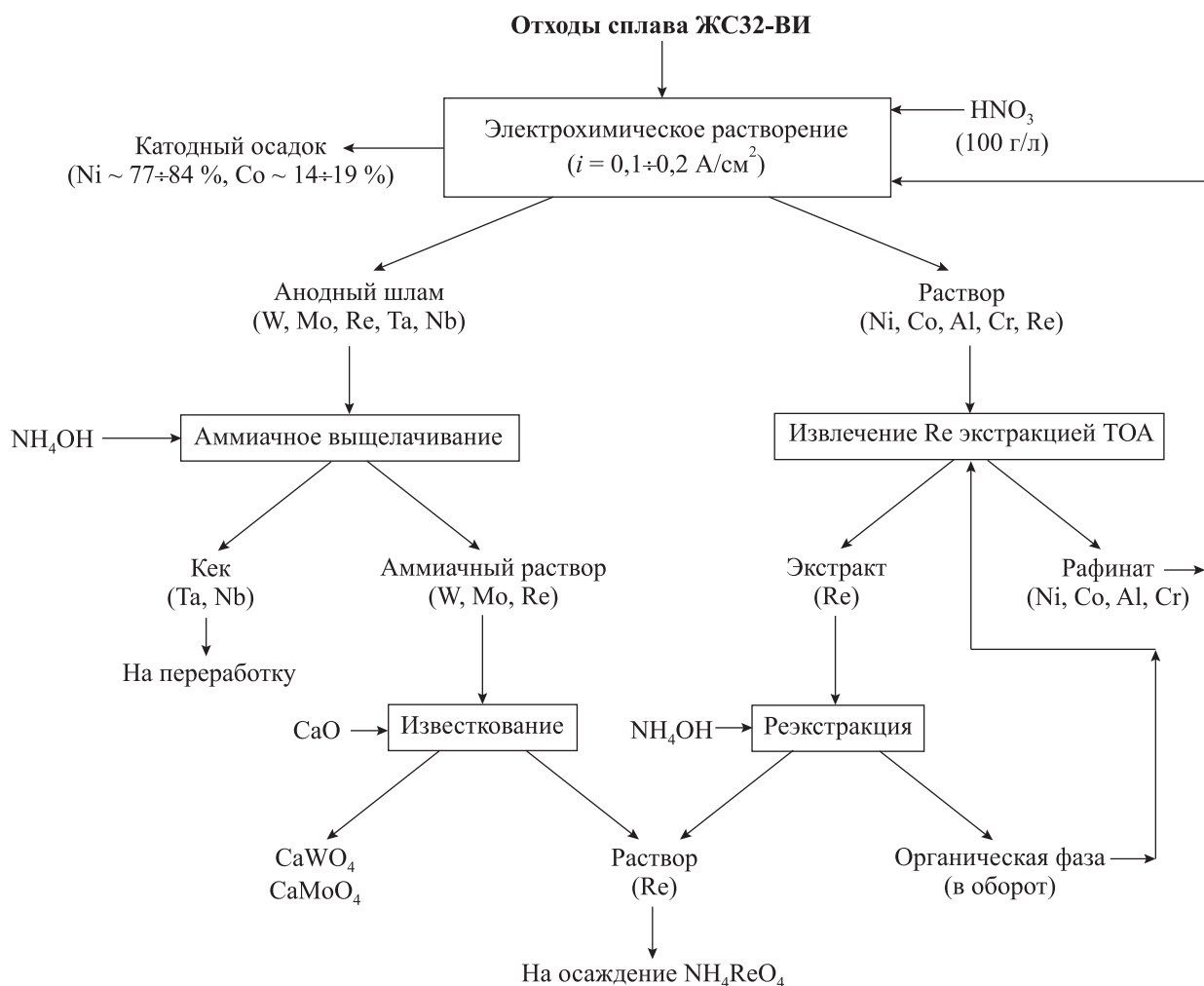


Рис. 3. Принципиальная технологическая схема переработки жаропрочного сплава ЖС32-ВИ

получение катодного осадка с содержанием суммы никеля и кобальта не менее 96 %;

— с ростом плотности тока от 0,05 до 0,25 А/см<sup>2</sup> наблюдается незначительное увеличение мелкой фракции в катодном осадке: размер от 0,040 до 0,598 мкм имеют 99,17 и 99,32 % зерен соответственно.

На основе проведенных исследований предложена принципиальная технологическая схема переработки жаропрочного сплава ЖС32-ВИ (рис. 3), включающая основные стадии:

— электрохимическое растворение в азотно-кислом электролите с получением основной массы никеля и кобальта в виде металлического никель-кобальтового концентрата и анодного шлама;

— выщелачивание анодного шлама раствором аммиака с переводом в раствор вольфрама, молибдена и рения и получением кека — концентрата ниобия и тантала;

— осаждение CaWO<sub>4</sub> и CaMoO<sub>4</sub> из аммиачного раствора с получением товарного продукта — искусственного шеелита;

— экстракционное извлечение рения (например, ТОА) из азотнокислого электролита;

— реэкстракция рения раствором аммиака;

— осаждение перрената аммония.

## Выводы

1. Показано влияние силы тока/плотности тока на скорость электрохимического растворения сплава ЖС32-ВИ. Установлено, что при  $I = 1,5 \text{ A}$  ( $i = 0,15 \text{ A/cm}^2$ ) достигается максимальная скорость растворения сплава 0,055 г/(ч·см<sup>2</sup>). Выход по току для никеля составляет 58,9 %.

2. При проведении электрохимического растворения сплава ЖС32-ВИ в гальваностатическом режиме при  $I = 1,5 \text{ A}$  получен катодный осадок с

содержанием 83 % никеля, 16 % кобальта. При этом 99 % зерен катодных осадков находится в диапазоне размеров от 0,040 до 0,598 мкм.

3. Предложена принципиальная технологическая схема переработки сплава ЖС32-ВИ. Отделение основной массы никеля и кобальта осуществляется на первой стадии с получением металлического Ni—Co-содержащего осадка.

## Литература

1. Lutz L.J., Parker S.A., Stephenson J.B. Recycling of contaminated superalloy scrap via electrochemical processing. TMS Annual Meeting, 1993. P. 1211—1220.
2. Satya Prasad V., Sambasiva Rao A., Prakash U., Ramakrishna Rao V., Krishna Rao P., Krishna M. Gupta. Recycling of superalloy scrap through electro slag remelting // *ISIJ Int.* 1996. Vol. 36(12). P.1459—1464. DOI: 10.2355/isijinternational.36.1459.
3. Ramachandra Rao S.R. Resource recovery and recycling from metallurgical wastes. Elsevier Sci., 2006.
4. Sibley S.F. Flow studies for recycling metal commodities in the United States. Virginia. Reston: US Geological Survey, 2004.
5. Worrell E., Reuter M.A. Handbook of recycling: State-of-the-art for practitioners. Analysts and scientists. Elsevier, 2014.
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. No. 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). 2010.
8. Stolle V., Olbrich A., Meese-Marktscheffel Ju., Mathy W., Erb M., Nietfeld G., Gille G. Process for electrochemical decomposition of superalloys: Pat. 10155791 (DE). 2003.
9. Krynitz U., Olbrich A., Kumm W., Schloh M. Method for the decomposition and recovery of metallic constituents from superalloys: Pat. 5776329 (USA). 1998.
10. Stoller V., Olbrich A., Meese-Marktscheffel Ju., Mathy W., Erb M., Nietfeld G., Gille G. Electrochemical dissolution process for disintegrating superalloy scraps: Pat. 1312686 (EP). 2008.
11. Srivastava R.R., Kim M., Lee J., Jha M.K., Kim B.S. Resource recycling of superalloys and hydrometallurgical challenges // *J. Mater. Sci.* 2014. Vol. 49. Iss. 14. P. 4671—4686.

12. Шупачев В.А. Некоторые технологические приемы выделения и очистки рения из жаропрочных сплавов // *Химия в интересах устойчивого развития.* 2012. No. 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 // *Электрометаллургия.* 2010. No. 7. С. 29—33.
14. Петрова А.М., Касиков А.Г., Громов П.Б. Извлечение рения из отходов сложнотермически обработанных жаропрочных сплавов на основе никеля // *Цвет. металлы.* 2011. No. 11. С. 39—43.
15. Чернышова О.В., Дробот Д.В., Чернышов В.И., Махонько М.В. Способ извлечения никеля при электрохимической переработке жаропрочных никелевых сплавов: Пат. 2542182 (РФ). 2013.
16. Redden L.D., Greaves J.N. The technical and economic aspects of producing high-purity cobalt and nickel from superalloy scrap utilizing a double-membrane electrolytic cell // *Hydrometallurgy.* 1992. Vol. 29. Iss. 1-3. P. 547—565.
17. Malliten I., Kustuch Ju., Scholz V., Müller H. Refining and recycling of the nickel based heat-resistant alloy used in aviation // *Proc. 3-rd Int. Conf. on Life cycle management (LCM-2007).* Zurich, 2007.
18. Гайдаренко О.В., Чернышов В.И., Чернышов Ю.И. Способ измерения потенциала рабочего электрода электрохимической ячейки под током: Пат. 2106620 (РФ). 1998.

## References

1. Lutz L.J., Parker S.A., Stephenson J.B. Recycling of contaminated superalloy scrap via electrochemical processing. TMS Annual Meeting, 1993. P. 1211—1220.
2. Satya Prasad V., Sambasiva Rao A., Prakash U., Ramakrishna Rao V., Krishna Rao P., Krishna M. Gupta. Recycling of superalloy scrap through electro slag remelting. *ISIJ Int.* 1996. Vol. 36(12). P. 1459—1464. DOI: 10.2355/isijinternational.36.1459.
3. Ramachandra Rao S.R. Resource recovery and recycling from metallurgical wastes. Elsevier Sci., 2006.
4. Sibley S.F. Flow studies for recycling metal commodities in the United States. Virginia. Reston: US Geological Survey, 2004.
5. Worrell E., Reuter M.A. Handbook of recycling: State-of-the-art for practitioners. Analysts and scientists. Elsevier, 2014.
6. Palant A.A., Bryukvin V.A., Levin A.M., Levchuk O.M. Kompleksnaya elektrokhimicheskaya tekhnologiya pererabot-

- ki otkhodov zharoprochnykh nikelovykh splavov, sodershashchikh renii, vol'fram, tantal, niobii i drugie tsennye metally [Integrated electrochemical technology waste heat-resistant nickel alloys containing rhenium, tungsten, tantalum, niobium and other precious metals]. *Metally*. 2014. No. 1. P. 25–27.
7. Palant A.A., Bryukvin V.A., Levchuk O.M., Palant A.V., Levin A.M. Sposob elektrokhimicheskoi pererabotki metallicheskih otkhodov zharoprochnykh nikelovykh splavov, sodershashchikh renii [A method of electrochemical processing of metal waste heat-resistant nickel alloys containing rhenium]: Pat. 2401312 (RF). 2010.
  8. Stolle V., Olbrich A., Meese-Marktscheffel Ju., Mathy W., Erb M., Nietfeld G., Gille G. Process for electrochemical decomposition of superalloys: Pat. 10155791 (DE). 2003.
  9. Krynitz U., Olbrich A., Kumme W., Schloh M. Method for the decomposition and recovery of metallic constituents from superalloys: Pat. 5776329 (USA). 1998.
  10. Stoller V., Olbrich A., Meese-Marktscheffel Ju., Mathy W., Erb M., Nietfeld G., Gille G. Electrochemical dissolution process for disintegrating superalloy scraps: Pat. 1312686 (EP). 2008.
  11. Srivastava R.R., Kim M., Lee J., Jha M.K., Kim B.S. Resource recycling of superalloys and hydrometallurgical challenges. *J. Mater. Sci.* 2014. Vol. 49. Iss. 14. P. 4671–4686.
  12. Shipachev V.A. Nekotorye tekhnologicheskie priemy vydeleniya i ochistki reniya iz zharoprochnykh splavov [Some technological methods for isolation and purification of rhenium from superalloys]. *Khimiya v interesakh ustoychivogo razvitiya*. 2012. No. 20. P. 365–368.
  13. Palant A.A., Bryukvin V.A., Levchuk O.M. Kompleksnaya elektrokhimicheskaya pererabotka metallicheskih otkhodov renii sodershashchego zharoprochnogo nikelovogo splava v sernokislykh elektrolitakh [Integrated electrochemical processing of metal waste rhenium-containing heat-resistant nickel alloy in sulfuric acid electrolytes]. *Elektrometallurgiya*. 2010. No. 7. P. 29–33.
  14. Petrova A.M., Kasikov A.G., Gromov P.B. Izvlechenie reniya iz otkhodov slozhnolegirovannykh zharoprochnykh splavov na osnove nikelya [Extraction of rhenium from waste complexly superalloys based on nickel]. *Tsvet. metally*. 2011. No. 11. P. 39–43.
  15. Chernyshova O.V., Drobot D.V., Chernyshov V.I., Makhon'ko M.V. Sposob izvlecheniya nikelya pri elektrokhimicheskoi pererabotke zharoprochnykh nikelovykh splavov [The method of extraction of nickel in electrochemical processing of heat-resistant nickel alloys]: Pat. 2542182 (RF). 2013.
  16. Redden L.D., Greaves J.N. The technical and economic aspects of producing high-purity cobalt and nickel from superalloy scrap utilizing a double-membrane electrolytic cell. *Hydrometallurgy*. 1992. Vol. 29. Iss. 1-3. P. 547–565.
  17. Malliten I., Kustuch Iu., Scholz V., Müller H. Refining and recycling of the nickel based heat-resistant alloy used in aviation. In: *Proc. 3-rd Int. Conf. on Life cycle management (LCM-2007)*. Zurich, 2007.
  18. Gaidarenko O.V., Chernyshov V.I., Chernyshov Yu.I. Sposob izmereniya potentsiala rabocheho elektroda elektrokhimicheskoi yacheiki pod tokom [Method of measuring the potential of the working electrode of an electrochemical cell under a current]: Pat. 2106620 (RF). 1998.