

## ОДНОСТАДИЙНОЕ ПОЛУЧЕНИЕ НИКЕЛЕВОГО КОНЦЕНТРАТА ПРИ ПЕРЕРАБОТКЕ РЕНИЙСОДЕРЖАЩЕГО ЖАРОПРОЧНОГО СПЛАВА

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

Московский технологический университет

*Статья поступила в редакцию 24.04.15 г., доработана 18.01.16 г., подписана в печать 29.01.16 г.*

Изложены результаты электрохимической переработки жаропрочного сплава ЖС32-ВИ в азотнокислых растворах. Главная технологическая идея состоит в проведении электрохимического процесса при контролируемом значении анодного потенциала, что обеспечивает преимущественный перевод в раствор никеля, являющегося основой сплава, и получение катодного продукта – металлического никеля чистотой не менее 95 %. Проведены эксперименты по электрохимическому растворению указанного сплава с использованием раствора азотной кислоты с концентрацией 100 г/л при различных значениях анодного потенциала. Определено, что при  $E_a = 1,05$  В катодный продукт содержит, %: Ni – 94,9, Re – 0,2, Co – 4,7, Cr – 0,1. Установлено, что введение хлорид-иона (20 г/л) к азотнокислому электролиту не оказывает существенного влияния на показатели процесса: количество никеля в анодном шламе снижается с 2,4 до 1,6 %, значительного увеличения содержания никеля в катодном продукте не происходит. Исключение составляет значительное возрастание скорости перехода рения в электролит: после 10-часового технологического процесса концентрация рения в азотнокислом электролите составляет 1,26 г/л, в азотнокислом электролите с добавкой хлорид-иона – 8,90 г/л. Показано, что проведение процесса электрохимического растворения Re-содержащих жаропрочных сплавов на основе никеля при контролируемом анодном потенциале  $E_a = 1,05$  В в азотнокислых электролитах обеспечивает получение никелевого концентрата чистотой не менее 95 % в одну стадию и позволяет сконцентрировать рений в анодном шламе.

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

**Чернышова О.В.** – канд. техн. наук, доцент кафедры химии и технологии редких и рассеянных элементов, наноразмерных и композиционных материалов Института тонких химических технологий Московского технологического университета (119571, г. Москва, пр-т Вернадского, 86). Тел./факс: (495) 434-84-44. E-mail: oxcher@mitht.ru.

**Дробот Д.В.** – докт. хим. наук, проф., зав. этой кафедрой. Тел./факс: (495) 434-84-44. E-mail: dvdrobot@mail.ru.

**Для цитирования:** Чернышова О.В., Дробот Д.В. Одностадийное получение никелевого концентрата при переработке ренийсодержащего жаропрочного сплава // Изв. вузов. Цвет. металлургия. 2016. No. 5. С. 17–23.  
DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2016-5-17-23.

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

### Single-stage synthesis of nickel concentrate in processing of rhenium-containing heat-resistant alloy

The paper outlines the results of electrochemical processing of HAS32-VI heat-resistant alloy in nitric acid solutions. The main technological idea is based on running an electrochemical process at a controlled anodic potential value, thus providing for a preferential transition into nickel solution with nickel as basis metal, and synthesis of a cathodic product – metal nickel with purity of at least 95 %. Experiments in electrochemical dissolution of the said alloy were conducted using a nitric acid solution with concentration of 100 g/l at different values of anodic potential. It was determined that at  $E_a = 1,05$  V cathodic product contains, %: Ni – 94,9, Re – 0,2, Co – 4,7, Cr – 0,1. The study determines that introduction of chloride ion (20 g/l) into the nitric acid electrolyte has no significant effect on the process parameters: the amount of nickel in anodic slime is reduced from 2,4 to 1,6 % with no significant increase of nickel content in the cathodic product. An exception is a considerable increase in the transition speed of rhenium into electrolyte: after a 10-hour process, rhenium concentration in a nitric acid electrolyte was 1,26 g/l; in a nitric acid electrolyte with addition of chloride ion – 8,90 g/l. The study demonstrates that the process of electrochemical dissolution of Re-containing heat-resistant nickel-based alloys at a controlled anodic potential  $E_a = 1,05$  V in nitric acid electrolytes provides for a one-stage synthesis of nickel concentrate with a purity of not less than 95 % and allows to concentrate rhenium in anodic slime.

**Keywords:** HAS32-VI heat-resistant alloy, anodic dissolution of alloy, nickel concentrate, rhenium, controlled anodic potential, electrochemical processing, electrowinning.

**Chernyshova O.V.** – Cand. Sci. (Tech.), associate prof., Department of chemistry and technology of rare and dispersed elements, and nanoscale composite materials, Institute of Fine Chemical Technologies, Moscow Technological University (119571, Russia, Moscow, Vernadskogo pr., 86). E-mail: oxcher@mitht.ru.

**Drobot D.V.** – Dr. Sci. (Chem.), prof., head of Department of chemistry and technology of rare and dispersed elements, and nanoscale composite materials, Institute of Fine Chemical Technologies, Moscow Technological University.  
E-mail: dvdrobot@mail.ru.

**Citation:** Chernyshova O.V., Drobot D.V. Odnostadiiное poluchenie nikelvego kontsentrata pri pererabotke reniisoderzhashchego zharoprochnogo splava. *Izv. vuzov. Tsvet. metallurgiya*. 2016. No. 5. P. 17–23.  
DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2016-5-17-23.

## Введение

По оценкам экспертов, в мире ежегодно собирают и перерабатывают 4,4–4,6 млн т никель-содержащих отходов. Извлекаемый из них никель (почти 350 тыс. т, или 25 % полного потребления) применяют, главным образом, для производства нержавеющей стали [1, 2].

В России централизованная переработка отходов жаропрочных никелевых сплавов (ЖНС) пока не налажена и осуществляется на малых предприятиях в опытно-промышленных масштабах [3]. В то же время за рубежом сложилась практика замкнутого цикла использования никелевых суперсплавов. Крупнейшие производители авиадвигателей (такие, как «General Electric», США) налаживают сбор отработанных деталей из ренийсодержащих ЖНС у своих клиентов по всему миру и ведут их переработку на собственных мощностях [4].

Переработка металлосодержащих отходов — многостадийный процесс, сочетающий, в зависимости от вида сырья, применение пирометаллургических (обжиг, спекание, окисление) и гидрометаллургических (выщелачивание, электролиз, жидкостная экстракция, сорбция, осаждение) методов.

Переработке ренийсодержащих отходов жаропрочных сплавов с извлечением ценных компонентов посвящен ряд работ. Электрохимические методы, используемые с целью интенсификации процесса перевода ценных компонентов в раствор с последующим их извлечением известными технологическими приемами, находят широкое применение [5–15].

Целью работы являлось выявление закономерностей при электрохимической переработке жаропрочного сплава ЖС32-ВИ состава, мас. %: 4,0 Re; 9,3 Co; 8,6 W; 0,005 Y; 0,005 La; 6,0 Al; 5,0 Cr; 4,0 Ta; 1,6 Nb; 1,1 Mo; 0,16 C; 0,15 B; 0,025 Ce, 60,05 Ni, проводимой при контролируемом потенциале в азотнокислых растворах.

## Методика исследований

Все измерения потенциалов электрода проводили относительно хлоридсеребряного электрода

сравнения. Убыль массы электрода определяли на аналитических весах ANDGR-300 с классом точности  $\pm 0,0001$  г. Температура составляла 20–25 °С. Элементный анализ выполняли с помощью ICP масс-спектрометра для изотопного и элементного анализа ELAN DRC-e («Perkin Elmer», Канада)

Электрохимическое растворение и снятие поляризационных и деполяризационных кривых проводили с использованием электрохимического технологического комплекса ЭХК-1012 (разработан ООО ИП «Тетран», г. Москва), реализующего некомпенсационный способ измерения потенциала [16]. Применяют два режима работы комплекса:

— исследовательский — осуществляется сбор информации об изучаемом объекте, далее в диалоговом режиме с участием оператора выбираются и устанавливаются параметры технологического процесса, после чего запускается технологический режим;

— технологический — выполняется в автоматическом порядке и имеет два варианта: потенциостатический (поддержание потенциала), когда технологический процесс осуществляется при заданном оператором потенциале, и гальваностатический (поддержание тока), при обеспечении комплектом определенной силы тока.

## Результаты и их обсуждение

Существуют два подхода к переработке жаропрочных сплавов. Первый заключается в поэтапном извлечении компонентов сплава в раствор электролита с дальнейшим выделением их из раствора. Второй — предполагает совместное извлечение всех ценных компонентов сплава в раствор и их последующее селективное извлечение в виде металлов или соединений.

Из анализа литературных данных и результатов ранее проведенных исследований выявлена целесообразность применения кислых электролитов на основе серной и азотной кислот [5, 8, 9, 12, 13]. Нами выбрана азотная кислота с концентрацией

100 г/л, обеспечивающая максимальную скорость растворения сплава. Меньшая концентрация кислоты ведет к снижению скорости растворения сплава, а большая ( $\geq 250$  г/л) — к повышению вероятности выделения оксидов азота.

Для определения областей протекания возможных электрохимических реакций в азотнокислом электролите ( $C_{\text{HNO}_3} = 100$  г/л) сняты поляризационная и деполяризационная кривые (рис. 1).

Проецирование точек экстремумов деполяризационной кривой (рис. 1) на поляризационную кривую позволяет определить области потенциалов. Таким образом, на поляризационной кривой выделены 4 области:  $E = 0,83 \div 1,36$  В (I);  $1,36 \div 1,75$  В (II);  $1,75 \div 1,85$  В (III);  $> 1,85$  В (IV).

Указать, каким электрохимическим процессам соответствуют выбранные области, проблематично. Выбрав значение потенциала в каждом из выделенных интервалов значений потенциалов, провели технологический процесс в течение 1 ч. По окончании анализировали раствор электролита. На катоде визуально не наблюдали выделения осадка (табл. 1).

В области потенциалов  $0,83 - 1,36$  В происходит преимущественное растворение никеля, переход других компонентов сплава в раствор электролита незначителен. С целью максимального перевода никеля — основы сплава — в раствор электролита проведен процесс растворения сплава ЖС32-ВИ при контролируемом анодном потенциале  $E_a = 1,05$  В. Выбранные параметры обеспечивают преимущественное протекание реакции растворения никеля при максимально возможных скорости и производительности процесса, при этом достигается оптимальное соотношение скоростей растворения никеля, кобальта и рения, что способствует получению катодного осадка, содержащего не менее 95 % Ni. По мере протекания технологического процесса снимали поляриза-

ционные и деполяризационные кривые, проводили анализ электролита. На рис. 2 представлен график зависимости концентрации никеля, ко-

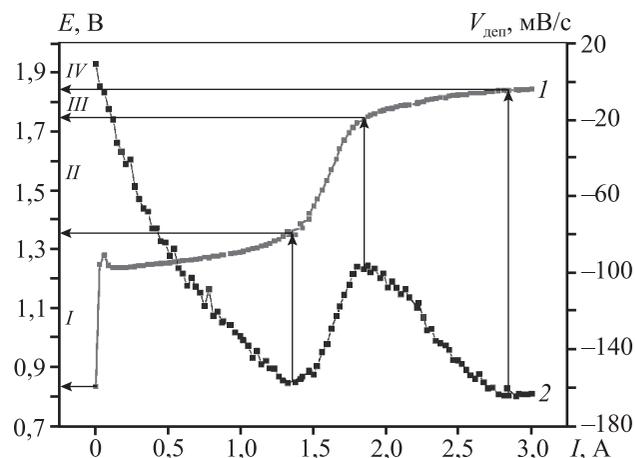


Рис. 1. Поляризационная (1) и деполяризационная (2) кривые

$V_{\text{деп}}$  — скорость деполяризации

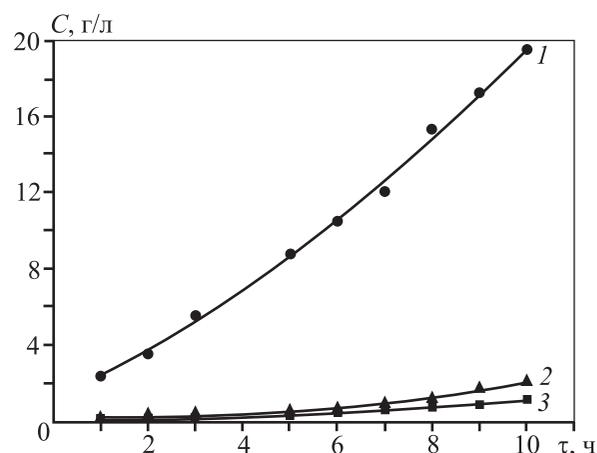


Рис. 2. Изменение концентраций никеля (1), кобальта (2) и рения (3) в зависимости от времени протекания технологического процесса в азотнокислом электролите ( $C_{\text{HNO}_3} = 100$  г/л)

Таблица 1

Содержание металлов в растворе, г/л, после проведения технологических экспериментов в азотнокислом электролите ( $C_{\text{HNO}_3} = 100$  г/л) в потенциостатическом режиме

Область	$E$ , В	Ni	Re	Co	Al	Cr
I	1,25	2,48	0,03	0,21	0,05	0,03
II	1,65	2,54	0,18	0,58	0,15	0,10
III	1,80	2,58	0,20	0,61	0,26	0,28
IV	1,90	2,56	0,22	0,68	0,30	0,25

Таблица 2

**Балансовое распределение, мас.%, в продуктах электролиза компонентов сплава ЖС32-ВИ при его растворении при контролируемом анодном потенциале  $E_a = 1,05$  В в азотнокислом электролите ( $C_{HNO_3} = 100$  г/л)**

Продукты	Ni	Re	Co	W	Mo	Ta	Nb	Cr	Al
Катодный осадок	82,0	0,2	4,1	—	—	—	—	0,1	—
Электролит	12,6	12,2	36,7	—	—	—	—	73,6	97,6
Анодный шлам	2,4	87,5	51,8	96,5	97,2	99,5	99,0	16,8	5,8
Пром. воды	4,2	3,5	5,5	—	—	—	—	13,7	2,4
<b>Итого</b>	<b>101,2</b>	<b>103,4</b>	<b>98,1</b>	<b>96,5</b>	<b>97,2</b>	<b>99,5</b>	<b>99,0</b>	<b>104,2</b>	<b>105,8</b>
Невязка	+1,2	+3,4	-1,9	-3,5	-2,8	-0,5	-1,0	+4,2	+5,8

бальта и рения от времени проведения технологического процесса.

Было переработано 132,0 г жаропрочного сплава ЖС32-ВИ при контролируемом анодном потенциале  $E_a = 1,05$  В. Балансовое распределение компонентов сплава по продуктам переработки представлено в табл. 2

С помощью поляризационной и деполяризационной кривых, снятых по окончании процесса растворения сплава, можно выделить 3 области протекания электрохимических реакций: 0,84—1,50 В; 1,50—1,68 В и 1,68—1,84 В.

При сопоставлении начальных зависимостей (см. рис. 1) с конечными (рис. 3) видно, что происходит изменение границ областей, соответствующих протеканию различных электрохимических реакций, — сглаживание деполяризационной кри-

вой, что свидетельствует о селективном растворении жаропрочного сплава.

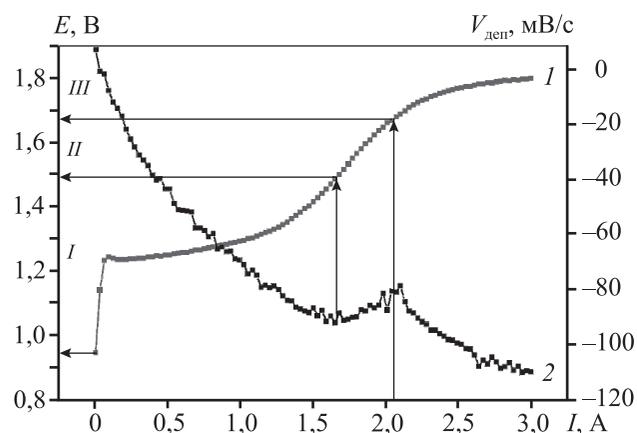
Из приведенных данных следует, что при растворении сплава при контролируемом анодном потенциале  $E_a = 1,05$  В имеет место количественное разделение составляющих его компонентов: в анодном шламе концентрируются тугоплавкие металлы — Nb, Ta, Mo и W, в электролит переходят частично Co и Re, а также и основное количество Al, Cr и Ni. При достижении в растворе концентрации никеля ~5 г/л начинается его выделение на катоде в виде плотно сцепленного осадка. Катодный продукт содержит, мас. %: Ni — 94,9; Re — 0,2; Co — 4,7; Cr — 0,1.

С целью снижения содержания никеля в анодном шламе и увеличения скорости растворения использовали азотнокислый электролит с добавкой хлорид-иона: 20 г/л. Зависимости концентраций Ni, Co и Re от времени проведения технологического процесса в тех же условиях — при контролируемом  $E_a = 1,05$  В — приведены на рис. 4.

Было переработано 106,5 г жаропрочного сплава ЖС32-ВИ при контролируемом анодном потенциале  $E_a = 1,05$  В в азотнокислом электролите с добавкой хлорид-иона, — балансовое распределение компонентов сплава по продуктам переработки представлено в табл. 3.

Проведение процесса при контролируемом анодном потенциале  $E_a = 1,05$  В в азотнокислом электролите с добавкой хлорид-иона позволяет получать в качестве продукта никелевый концентрат чистотой 95,4 %, при этом содержание Re составляет 0,2 %, Co — 4,3 %, Cr — 0,1 %.

Из сопоставления результатов переработки сплава ЖС-32ВИ с использованием различных

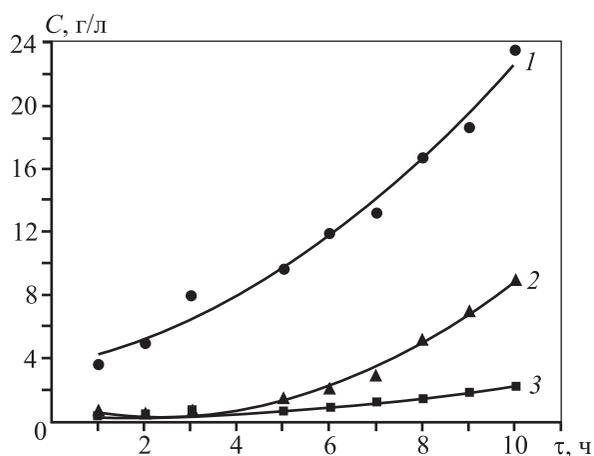


**Рис. 3.** Поляризационная (1) и деполяризационная (2) кривые после завершения процесса в азотнокислом электролите при контролируемом потенциале  $E_a = 1,05$  В

Таблица 3

**Балансовое распределение, мас.%, в продуктах электролиза компонентов сплава ЖС32-ВИ при растворении при контролируемом анодном потенциале  $E_a = 1,05$  В в азотнокислом электролите ( $C_{HNO_3} = 100$  г/л,  $C_{Cl^-} = 20$  г/л)**

Продукты	Ni	Re	Co	W	Mo	Ta	Nb	Cr	Al
Катодный осадок	84,5	0,2	3,8	—	—	—	—	0,1	—
Электролит	10,8	14,7	25,2	—	—	—	—	70,6	75,2
Анодный шлам	1,6	80,8	60,4	97,0	97,2	99,9	99,0	20,1	15,3
Пром. воды	4,0	3,5	6,6	—	—	—	—	13,0	10,4
<b>Итого</b>	<b>100,9</b>	<b>99,2</b>	<b>96,0</b>	<b>97,0</b>	<b>97,2</b>			<b>103,8</b>	<b>100,9</b>
Невязка	+0,9	-0,8	-4,0	-3,0	-2,8	-0,1	-1,0	+3,8	+0,9



**Рис. 4.** Зависимости изменения концентраций никеля (1), рения (2) и кобальта (3) от времени протекания технологического процесса в азотнокислом электролите ( $C_{HNO_3} = 100$  г/л,  $C_{Cl^-} = 20$  г/л)

электролитов установлено, что добавка хлорид-иона в количестве 20 г/л не оказывает существенного влияния на показатели процесса: содержание никеля в анодном шламе снижается с 2,4 до 1,6 %, значительного увеличения содержания никеля в катодном продукте не происходит. Однако при этом значительно возрастает скорость перехода рения в азотнокислый электролит: после 10 ч технологического процесса его концентрация в нем составляет 1,26 г/л, а в случае добавки в него хлорид-иона — 8,90 г/л.

Анодный шлам, представляющий собой концентрат редких тугоплавких металлов, может быть переработан известными способами, например аммиачным выщелачиванием с последующим выделением редких металлов [17]. Использование электролита с концентрацией азотной кислоты

100 г/л позволяет получить анодный шлам состава, мас. %: 13,4 Re; 18,4 Co; 32,7 W; 1,2 Al; 3,0 Cr; 16,0 Ta; 6,0 Nb; 4,0 Mo; 5,3 Ni. В этом случае в анодном шламе остается 87,5 % рения от его исходного количества. Состав анодного шлама, полученного при потенциостатическом режиме в азотнокислом электролите с добавкой хлорид-иона, близок, мас. %: 12,0 Re; 21,1 Co; 31,0 W; 3,4 Al; 3,1 Cr; 15,4 Ta; 5,9 Nb; 4,4 Mo; 3,7 Ni, при этом содержание рения составляет 80,8 % от исходного. С точки зрения дальнейшей переработки анодного шлама, содержащего ценные компоненты (самый дорогостоящий среди них рений), целесообразно так организовать проведение процесса электрохимической переработки жаропрочного сплава, чтобы получить анодный шлам с максимальным количеством рения.

Таким образом, проведение процесса электрохимического растворения ренийсодержащих жаропрочных сплавов на основе никеля при контролируемом анодном потенциале  $E_a = 1,05$  В в азотнокислых электролитах позволяет получить никелевый концентрат чистотой не менее 95 % в одну стадию и сконцентрировать рений в анодном шламе.

## Выводы

**1.** На основе анализа поляризационных и депольризационных кривых определены границы областей, соответствующих электрохимическим процессам, проходящим при растворении жаропрочного сплава ЖС32-ВИ в азотнокислых растворах.

**2.** Установлено влияние добавки хлорид-иона в количестве 20 г/л на поведение компонентов жа-

ропрочного сплава ЖС32-ВИ при электрохимическом растворении.

3. Показано, что процесс электрохимического растворения жаропрочного сплава ЖС32-ВИ при контролируемом анодном потенциале 1,05 В обеспечивает получение никелевого концентрата чистотой не менее 95 % в одну стадию и позволяет сконцентрировать рений в анодном шламе.

## Литература

1. Мировой рынок никеля. URL: <http://www.cmmarket.ru/markets/niworld.htm> (дата обращения: 18.03.2015).
2. Российский рынок руд и концентратов цветных металлов и продукции 2014. URL: [http://www.aurubisrus.ru/rus\\_non\\_ferrous\\_ores\\_market.html](http://www.aurubisrus.ru/rus_non_ferrous_ores_market.html) (дата обращения 18.03.2015).
3. Касиков А.Г., Петрова А.М. Рециклинг рения из отходов жаропрочных и специальных сплавов // Технол. металлов. 2010. No. 2. С. 2—12.
4. Без рения ракеты не летают. URL: <http://rareearth.ru/ru/pub/20131111/00015.html> (дата обращения: 18.03.2015).
5. Lutz L.J., Parker S.A., Stephenson J.B. Recycling of contaminated superalloy scrap via electrochemical processing // TMS Annual Meeting. 1993. P. 1211—1220.
6. Ramachandra Rao S.R. Resource recovery and recycling from metallurgical wastes. Vol. 7. Elsevier Science, 2006.
7. 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.
8. 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.
9. Stoller Viktor, Olbrich Armin, Meese-Marktscheffel Juliane, Mathy Wolfgang, Erb Michael, Nietfeld Georg, Gille Gerhard. Process for electrochemical decomposition of superalloys: Pat. 10155791 (DE). 2003.
10. Krynitz Ulrich, Olbrich Armin, Kummer Wolfgang, Schloh Martin. Method for the decomposition and recovery of metallic constituents from superalloys: Pat. 5776329 (USA). 1998.
11. Stoller Viktor, Olbrich Armin, Meese-Marktscheffel Juliane, Mathy Wolfgang, Erb Michael, Nietfeld Georg, Gille Gerhard. Electrochemical dissolution process for disintegrating superalloy scraps: Pat. 1312686 (EP). 2008.
12. Srivastava R.R., Kim M., Lee J., Jha M.K., Kim B.S. Re-

source recycling of superalloys and hydrometallurgical challenges // J. Mater. Sci. 2014. Vol. 49. Iss. 14. P. 4671.

13. Шупачев В.А. Некоторые технологические приемы выделения и очистки рения из жаропрочных сплавов // Химия в интересах устойчивого развития. 2012. No. 20. С. 365—368.
14. 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.
15. Петрова А.М., Касиков А.Г., Громов П.Б. Извлечение рения из отходов сложнолегированных жаропрочных сплавов на основе никеля // Цвет. металлы. 2011. No. 11. С. 39—43.
16. Гайдаренко О.В., Чернышов В.И., Чернышов Ю.И. Способ измерения потенциала рабочего электрода электрохимической ячейки под током: Пат. 2106620 (РФ). 1998.
17. Палант А.А., Трошкина И.Д., Чекмарев А.М. Металлургия рения. М.: Наука, 2007.

## References

1. Mirovoi rynek nikelya [The world market for nickel]. URL: <http://www.cmmarket.ru/markets/niworld.htm> (accessed: 18.03.2015).
2. Rossiiskii rynek rud i kontsentrato v tsvetnykh metallov i produktii 2014 [The Russian market ores and concentrates of nonferrous metals and products in 2014]. URL: [http://www.aurubisrus.ru/rus\\_non\\_ferrous\\_ores\\_market.html](http://www.aurubisrus.ru/rus_non_ferrous_ores_market.html) (accessed: 18.03.2015).
3. Kasikov A.G., Petrova A.M. Retsikling reniya iz otkhodov zharoprochnykh i spetsial'nykh splavov [Recycling of rhenium from waste heat-resistant and special alloys]. *Tekhnologiya metallov*. 2010. No. 2. P. 2—12.
4. Bez reniya rakety ne letayut [Without rhenium rocket not fly]. URL: <http://rareearth.ru/ru/pub/20131111/00015.html> (accessed: 18.03.2015).
5. Lutz L.J., Parker S.A., Stephenson J.B. Recycling of contaminated superalloy scrap via electrochemical processing. *TMS Annual Meeting*. 1993. P. 1211—1220.
6. Ramachandra Rao S.R. Resource recovery and recycling from metallurgical wastes. Vol. 7. Elsevier Science, 2006.
7. Palant A.A., Bryukvin V.A., Levin A.M., Levchuk O.M. Kompleksnaya elektrokhimicheskaya tekhnologiya pererabotki otkhodov zharoprochnykh nikelovykh splavov, soderzhashchikh renii, vol'fram, tantal, niobii i drugie tsennyye 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.
8. Palant A.A., Bryukvin V.A., Levchuk O.M., Palant A.V., Levin A.M. Sposob elektrokhimicheskoi pererabotki metallicheskih otkhodov zharoprochnykh nikelovykh splavov, sodержashchikh renii [A method of electrochemical processing of metal waste heat-resistant nickel alloys containing rhenium]: Pat. 2401312 (RF). 2010.
  9. Stoller Viktor, Olbrich Armin, Meese-Marktscheffel Juliane, Mathy Wolfgang, Erb Michael, Nietfeld Georg, Gille Gerhard. Process for electrochemical decomposition of superalloys: Pat. 10155791 (DE). 2003.
  10. Krynitz Ulrich, Olbrich Armin, Kummer Wolfgang, Schloh Martin. Method for the decomposition and recovery of metallic constituents from superalloys: Pat. 5776329 (USA). 1998.
  11. Stoller Viktor, Olbrich Armin, Meese-Marktscheffel Juliane, Mathy Wolfgang, Erb Michael, Nietfeld Georg, Gille Gerhard. Electrochemical dissolution process for disintegrating superalloy scraps: Pat. 1312686 (EP). 2008.
  12. 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.
  13. 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.
  14. Palant A.A., Bryukvin V.A., Levchuk O.M. Kompleksnaya elektrokhimicheskaya pererabotka metallicheskih otkhodov reniisoderzhashchego 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.
  15. 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]. *Tsvetnye metally*. 2011. No. 11. P. 39—43.
  16. Gaidarenko O.V., Chernyshov V.I., Chernyshov Yu.I. Sposob izmereniya potentsiala rabochego 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.
  17. Palant A.A., Troshkina I.D., Chekmarev A.M. Metallurgiya reniya [Metallurgy of rhenium]. Moscow: Nauka, 2007.