

ХИМИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ НЕОРГАНИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ
CHEMISTRY AND TECHNOLOGY OF INORGANIC MATERIALS

ISSN 2410-6593 (Print), ISSN 2686-7575 (Online)

<https://doi.org/10.32362/2410-6593-2021-16-5-438-447>



УДК 541.1+669.21/.23+669.849

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Применение импульсного тока для растворения жаропрочного сплава ЖС32-ВИ

О.В. Чернышова^{1,@}, Т.Б. Елемесов², Д.В. Дробот¹

¹МИРЭА – Российский технологический университет (Институт тонких химических технологий им. М.В. Ломоносова), Москва, 119571 Россия

²Институт высоких технологий, Алматы, 050012 Республика Казахстан

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

Аннотация

Цели. Выявить закономерности электрохимической переработки жаропрочного сплава ЖС32-ВИ, проводимой в импульсном режиме в сернокислом электролите с концентрацией 100 г/дм³ под действием импульсного тока.

Методы. Снятие поляризационных и деполяризационных кривых с изменением длительности импульса и паузы между ними проводили с помощью электрохимического технологического комплекса ЭХК-1012 (разработан ООО ИП «Тетран»), использующего некомпенсационный способ измерения потенциала. Амплитуда импульсов тока находилась в диапазоне значений от 0 до 3.5 А (при снятии поляризационных и деполяризационных кривых), длительности импульсов изменялись от 200 до 1200 мс, пауза (задержка) между импульсами – от 50 до 500 мс, импульсы реверсивного тока отсутствовали.

Результаты. Определены параметры токовой программы, обеспечивающие максимальные значения скорости растворения сплава и выхода по току. При амплитуде импульса тока 2 А, длительности импульса тока 500 мс и продолжительности паузы между импульсами 250 мс максимальная скорость растворения сплава 0.048 г/ч·см², при этом выход по току для никеля равен 61.6% при площади анода 10 см². Предложена принципиальная технологическая схема переработки жаропрочного сплава ЖС32-ВИ, включающая анодное растворение сплава в импульсном режиме.

Выводы. Электрохимическое растворение сплава ЖС32-ВИ под действием импульсного тока способствует оптимальному соотношению скоростей растворения составляющих сплава, что обеспечивает получение катодного осадка с суммарным содержанием никеля и кобальта 97.5%.

Ключевые слова: импульсный ток, серная кислота, сплав ЖС32-ВИ, поляризационная и деполяризационная кривые, амплитуда импульса тока, длительность импульса тока, пауза между импульсами тока

Для цитирования: Чернышова О.В., Елемесов Т.Б., Дробот Д.В. Применение импульсного тока для растворения жаропрочного сплава ЖС32-ВИ. *Тонкие химические технологии*. 2021;16(5):438–447. <https://doi.org/10.32362/2410-6593-2021-16-5-438-447>

RESEARCH ARTICLE

Application of pulse current for dissolution of heat-resistant GS32-VI alloy

Oxana V. Chernyshova^{1,@}, Turar B. Yelemessov², Dmitry V. Drobot¹

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

²Institute of High Technologies, Almaty, 050012 Republic of Kazakhstan

Correspondence author, e-mail: oxcher@mitht.ru

Abstract

Objectives. To identify the regularities of electrochemical processing of the heat-resistant GS32-VI alloy in a sulfuric acid electrolyte with a concentration of 100 g/dm³ under the action of a pulsed current in a pulsed mode.

Methods. Using the electrochemical technological complex EHK-1012 (developed by IP Tetran) and a non-compensatory method of measuring potential, polarization and depolarization curves with a change in pulse duration and a pause between them were recorded. The current pulses had an amplitude ranging from 0 to 3.5 A (when recording the polarization and depolarization curves), pulse durations ranging from 200 to 1200 ms, and a pause (delay) between pulses ranging from 50 to 500 ms. There were no reverse current pulses.

Results. The parameters of the current program that provide the maximum values of the alloy dissolution rate and current output were determined: with a current pulse amplitude of 2 A, a current pulse duration of 500 ms, and a pause duration between pulses of 250 ms, the maximum dissolution rate of the alloy is 0.048 g/h·cm², while the current output for nickel is 61.6% with an anode area of 10 cm². The basic technological scheme for processing the heat-resistant GS32-VI alloy, which includes anodic alloy dissolution in a pulsed mode, is proposed.

Conclusions. Electrochemical dissolution of GS32-VI alloy under pulsed current action results in an optimal dissolution rate ratio of the alloy components, ensuring the production of a cathode precipitate with a total nickel and cobalt content of 97.5%.

Keywords: pulse current, sulfuric acid, GS32-VI alloy, polarization and depolarization curves, amplitude of pulse current, duration of pulse current, pause between pulse current

For citation: Chernyshova O.V., Yelemessov T.B., Drobot D.V. Application of pulse current for dissolution of heat-resistant GS32-VI alloy. *Tonk. Khim. Tekhnol. = Fine Chem. Technol.* 2021;16(5):438–447 (Russ., Eng.). <https://doi.org/10.32362/2410-6593-2021-16-5-438-447>

ВВЕДЕНИЕ

Высокая стоимость компонентов никелевых жаропрочных сплавов (рений, тантал, кобальт и др.), выработавших срок службы, 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, позволяющие с высокими технологическими и экономическими показателями осуществлять регенерацию таких отходов [1–15]. В литературе описаны различные подходы решения обсуждаемой проблемы. Так, известны способы переработки, основанные на вскрытии перерабатываемого сырья растворами кислот. Как правило, наиболее распространено использование серной, соляной и азотной кислот с последующим электрохимическим выделением целевых продуктов при фиксированной плотности тока [1–5]. Другой подход, заключающийся в анодном растворении перерабатываемого металлосодержащего сырья и последующем выделении товарных продуктов из раствора электролита, описан в [6–17].

На скорость растворения и перевод продуктов в раствор при анодном растворении металлов или сплавов существенное влияние оказывает токовая программа. Заметим, что процессы анодного растворения, в которых величина используемого тока и его направление являются переменными величинами, получили распространение при переработке различных видов вторичного сырья. Подобные режимы в отличие от электрохимических процессов с постоянной величиной тока называют нестационарными режимами электролиза или нестационарным электролизом. В работах [6–11, 13] процесс растворения ведут с использованием переменного тока различных форм. Реализация процесса анодного растворения в таких условиях позволяет избежать пассивационных явлений и ведет к увеличению скорости анодного растворения.

Нестационарный электролиз, реализуемый в импульсном режиме, успешно применяют при получении покрытий, электрохимической обработке материалов [17–27]. В то же время при переработке вторичного сырья его использование ограничено, несмотря на более высокие характеристики электрохимических процессов.

Целью работы явилось выявление закономерностей электрохимической переработки жаропрочного сплава ЖС32-ВИ, проводимой в импульсном режиме в серноокислом электролите.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Электрохимическое растворение сплава состава (мас. %) 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 и снятие поляризационных и деполяризационных кривых проводили с помощью электрохимического технологического комплекса ЭХК-1012 (разработан ООО ИП «Тетран»), использующего некомпенсационный способ измерения потенциала [28]. Электрод сравнения – хлоридсеребряный.

Токовая диаграмма при снятии поляризационных и деполяризационных кривых: амплитуда импульсов тока – 0–3.5 А, длительности импульсов изменялись от 200 до 1200 мс, пауза (задержка) между импульсами – от 50 до 500 мс, импульсы реверсивного тока отсутствуют (рис. 1).

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 $S = 9.5 \text{ см}^2$.

Убыль массы электрода определяли на аналитических весах ANDGR-300 с классом точности $\pm 0.0001 \text{ г}$. Процесс вели при температуре 20–25 °С. Элементный анализ проводили с использованием ИСР масс-спектрометра для изотопного и элементного анализа ELAN DRC-e (PerkinElmer, Канада).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На основании литературных данных и ранее проведенных исследований выявлена целесообразность применения кислых электролитов на основе серной и азотной кислот для переработки жаропрочных сплавов на никелевой основе [1, 4, 5, 9, 10, 13, 14]. Нами выбрана серная кислота с концентрацией 100 г/дм^3 , что обеспечивает высокую скорость растворения сплава с получением катодного никельсодержащего продукта. Меньшая концентрация кислоты ведет к снижению скорости растворения сплава (менее $0.030 \text{ г/ч}\cdot\text{см}^2$), при концентрациях серной кислоты 250 г/дм^3 и выше растет вероятность увеличения количества анодного шлама.

Основным преимуществом импульсного электролиза является возможность резкого изменения потенциала электрода, который существенно влияет на стадию переноса заряда, адсорбцию и кристаллизацию, кинетику процесса в целом и определяет протекание той или иной электрохимической реакции.

При использовании импульсного тока значимыми параметрами являются: длительность и амплитуда импульса, пауза между импульсами, наличие реверсивного импульса. Для оценки влияния этих параметров на процесс электрохимического растворения жаропрочного сплава ЖС32-ВИ были сняты анодные поляризационные кривые с изменением длительности импульса и паузы между ними. Кривые деполяризации снимаются после импульса тока

и показывают динамику изменения величины потенциала электрода.

Импульсный ток в отличие от постоянного позволяет эффективно воздействовать на электродные процессы. Крутой передний фронт импульсов обеспечивает более быстрое возрастание электродного потенциала от минимального значения до максимального (рис. 1). В результате этого обеднение электролита вблизи электрода происходит быстрее, линии тока перераспределяются, что ведет к осаждению более плотных мелкокристаллических осадков на катоде и получению более мелких частиц анодного шлама в случае использования растворимых анодов гетерофазного состава. Можно предполагать, что это характерно и для сплава ЖС-32 ВИ при анодном растворении, поскольку этот сплав – многокомпонентный, гетерофазный. Главными элементами его фазового состава являются дисперсные (<0.5 мкм) частицы γ^1 -фазы на основе упорядоченного интерметаллического соединения Ni_3Al (сверхструктура L12) и сложнлегированный никелевый γ -твердый раствор, а также карбидные и боридные фазы различного типа [29]. В то же время крутой спад прямых импульсов вызывает увеличение размаха колебаний потенциала, что влияет и на структуру осадков, и на отдельные показатели процесса электролиза.

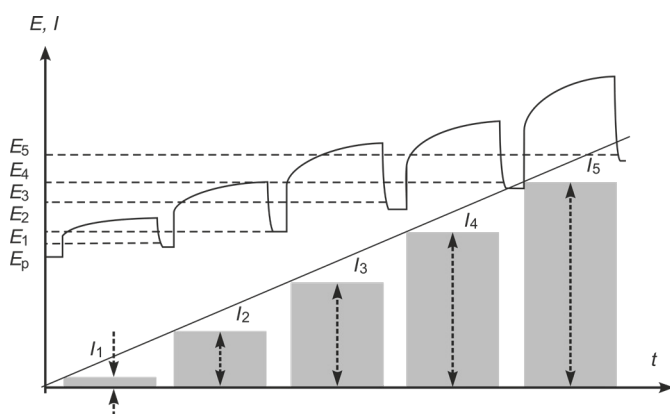


Рис. 1. Токовая диаграмма для снятия поляризационных и деполяризационных кривых.

Fig. 1. Current diagram for polarization and depolarization curves.

На рис. 2 и 3 приведены поляризационные и деполяризационные кривые, соответственно, которые снимали в импульсном гальванодинамическом режиме.

Из полученных зависимостей формы поляризационных кривых от длительности импульса видно (рис. 2), что при времени поляризации 200–300 мс форма поляризационной кривой имеет сглаженный вид. При увеличении длительности импульса тока до 500 мс на поляризационной кривой появляется горизонтальная площадка, соответствующая максимальной

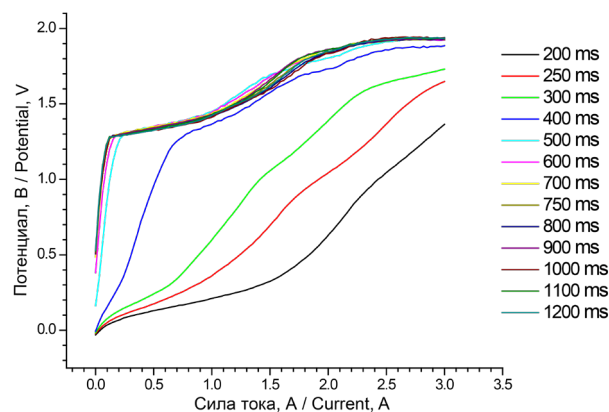


Рис. 2. Поляризационные кривые растворения сплава ЖС32-ВИ в сернокислом электролите с концентрацией 100 г/дм³ при различной длительности импульса и паузой 250 мс.

Fig. 2. Polarization curves of GS32-VI alloy dissolution in a sulfuric acid electrolyte with a concentration of 100 g/dm³ at different pulse durations and a pause of 250 ms.

скорости растворения сплава. Дальнейшее увеличение длительности импульса (до 1200 мс) не приводит к заметным изменениям формы поляризационных кривых.

Описанные зависимости влияния длительности импульса тока на форму поляризационных кривых подтверждаются полученными зависимостями для деполяризационных кривых. При длительностях импульса тока 400–500 мс на деполяризационных кривых отчетливо видны участки, отвечающие различным электрохимическим процессам (рис. 3).

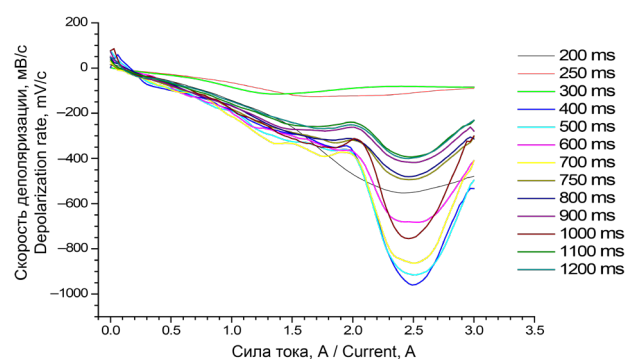


Рис. 3. Деполяризационные кривые растворения сплава ЖС32-ВИ в сернокислом электролите с концентрацией 100 г/дм³ при различной длительности импульса и паузой 250 мс.

Fig. 3. Depolarization curves of GS32-VI alloy dissolution in a sulfuric acid electrolyte with a concentration of 100 g/dm³ at different pulse durations and a pause of 250 ms.

Чтобы сделать более наглядными участки, соответствующие протеканию различных электрохимических процессов, на рис. 4 приведены поляризационная и деполяризационные кривые растворения сплава ЖС-32ВИ в сернокислом электролите с концентрацией 100 г/дм³, длительностью импульса 500 мс и задержкой 250 мс.

I область: $E = 0.18-1.78$ В – происходит растворение фазы сложного легированного никелевого γ -твердого раствора;

II область: $E = 1.78-1.91$ В – растворение γ^1 -фазы на основе упорядоченного интерметаллического соединения Ni₃Al;

III область: $E \geq 1.91$ В – выделение кислорода через образование промежуточных неустойчивых оксидов.

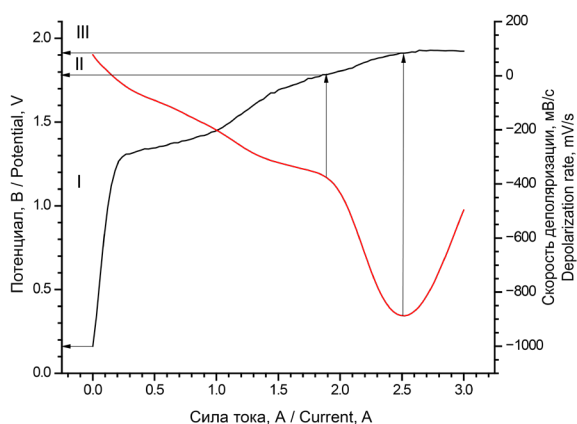


Рис. 4. Поляризационная и деполяризационная кривые растворения сплава ЖС32-ВИ в сернокислом электролите с концентрацией 100 г/дм³, длительностью импульса 500 мс и задержкой 250 мс.

Fig. 4. Polarization and depolarization curves of GS32-VI alloy dissolution in the sulfuric acid electrolyte at a concentration of 100 g/dm³, 500 ms pulse duration, and a delay of 250 ms.

Аналогичные зависимости получены и для установления влияния длительности паузы между импульсами на форму поляризационных и деполяризационных кривых (рис. 5, 6). Пауза в импульсном электролизе оказывает существенное влияние на процесс осаждения металла и качество получаемых катодных осадков. В зависимости от длительности паузы происходит полное или частичное выравнивание концентрации ионов в приэлектродном пространстве за счет миграции. Возможна также и пассивация поверхности электрода, заключающаяся в окислении поверхности или адсорбции на активных участках поверхности электродов примесей, содержащихся в растворе электролита.

При растворении сплава ЖС-32ВИ в сернокислом электролите с концентрацией 100 г/дм³ с использованием импульсного тока установлено, что при

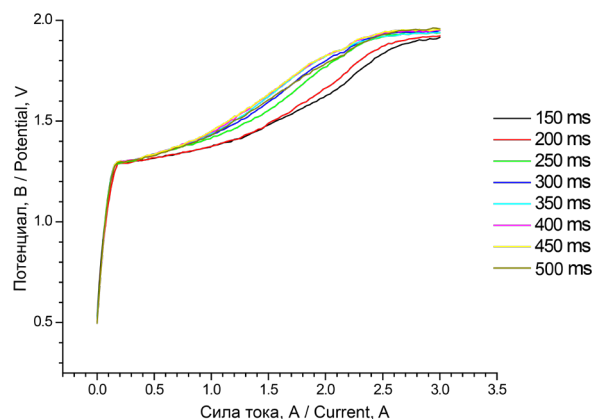


Рис. 5. Поляризационные кривые растворения сплава ЖС32-ВИ в сернокислом электролите с концентрацией 100 г/дм³, длительностью импульса 500 мс и различным временем паузы.

Fig. 5. Polarization curves of GS32-VI alloy dissolution in a sulfuric acid electrolyte with a concentration of 100 g/dm³, a pulse duration of 500 ms, and different pause times.

длительности импульса 500–700 мс и паузе между импульсами 250 мс достигается высокая скорость растворения сплава. Соотношение скоростей растворения никеля, кобальта и рения обеспечивает получение катодного осадка с содержанием суммы никеля и кобальта не менее 90%.

Верхний предел амплитуды импульса тока при анодном растворении сплава ограничен величиной 2.5 А (при площади анода $S = 10$ см²): превышение этой величины ведет к протеканию нежелательного

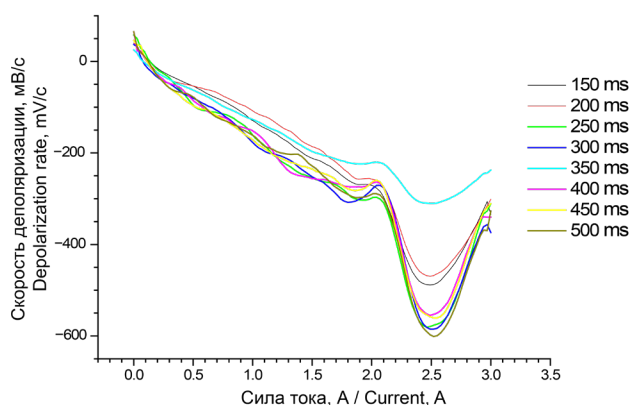


Рис. 6. Деполяризационные кривые растворения сплава ЖС32-ВИ в сернокислом электролите с концентрацией 100 г/дм³, длительностью импульса 500 мс и различным временем паузы.

Fig. 6. Depolarization curves of GS32-VI alloy dissolution in a sulfuric acid electrolyte with a concentration of 100 g/dm³, a pulse duration of 500 ms, and different pause times.

процесса – выделению кислорода, что снижает выход по току. Оптимальная величина амплитуды импульса тока определяется исходя из максимальной скорости растворения сплава в сочетании с высоким выходом по току никеля, являющегося основой сплава ЖС32-ВИ.

В табл. 1 представлены экспериментальные данные по влиянию амплитуды импульса тока на скорость анодного растворения сплава ЖС32-ВИ в сернокислом электролите с концентрацией 100 г/дм³. Для каждого эксперимента использовали новый анод, представляющий собой фрагмент лопасти лопатки из жаропрочного сплав ЖС32-ВИ площадью $S = 10 \text{ см}^2$.

Скорость растворения сплава v рассчитывали по потере массы растворяемого сплава согласно формуле:

$$v = (m_1 - m_2) / S \cdot t^{-1},$$

где m_1 – исходная масса растворяемого образца, m_2 – масса образца после электрохимического растворения, S – рабочая площадь электрода, t – время процесса.

Основываясь на полученных данных, выбраны следующие параметры проведения технологического процесса переработки сплава ЖС32-ВИ электрохимическим способом: амплитуда импульса тока – 2 А (при площади анода $S = 10 \text{ см}^2$), длительность импульса тока – 500 мс, пауза между импульсами – 250 мс.

Суммарно переработано в сернокислом электролите с концентрацией 100 г/дм³ в импульсном гальваностатическом режиме 97.56 г жаропрочного сплава ЖС32-ВИ, по окончании получено 55.08 г катодного осадка и 27.32 г анодного шлама, химический состав которых суммирован в табл. 2.

Таким образом, в анодном шламе концентрируются тугоплавкие металлы – ниобий, тантал, молибден и вольфрам, в электролит переходит частично

Таблица 1. Влияние параметров токовой программы на скорость анодного растворения сплава ЖС32-ВИ
Table 1. Influence of current program parameters on the anodic dissolution rate of GS32-VI alloy

Параметр Parameter	Значение Value	Концентрация никеля, $C(\text{Ni})$, г/дм ³ Nickel concentration, $C(\text{Ni})$, g/dm ³	Скорость растворения сплава, г/ч·см ² Dissolution rate of the alloy, g/h·cm ²	Выход по току никеля, $\eta(\text{Ni})$, % Current yield of nickel, $\eta(\text{Ni})$, %
Длительность импульса тока – 500 мс, длительность паузы между импульсами – 250 мс Current pulse duration—500 ms, pause time between pulses—250 ms				
Амплитуда импульса тока, А Amplitude of current pulse, А	0.5	9.75	0.027	60.5
	1.0	9.33	0.038	60.1
	1.5	10.20	0.042	62.5
	2.0	14.05	0.048	61.8
	2.5	15.12	0.054	57.2
Амплитуда импульса тока – 2.0 А, длительность паузы между импульсами – 250 мс Amplitude of current pulse—2.0 A, pause time between pulses—250 ms				
Длительность импульса тока, мс Current pulse duration, ms	200	9.90	0.020	61.,8
	500	10.44	0.038	63.8
	700	11.03	0.038	59.4
	900	12.34	0.044	53.2
	1200	14.75	0.048	49.9
Амплитуда импульса тока – 2.0 А, длительность импульса тока – 500 мс Current pulse amplitude—2.0 A, current pulse duration—500 ms				
Длительность паузы между импульсами, мс Pause time between pulses, ms	150	9.75	0.028	59.5
	250	9.33	0.036	61,1
	350	10.20	0.026	60.5
	450	14.05	0.020	56.8
	500	15.12	0.015	52.2

Таблица 2. Химический состав катодного осадка и анодного шлама, полученных при анодном растворении сплава ЖС32-ВИ
 Table 2. Chemical composition of cathode deposit and anode sludge obtained during the anodic dissolution of GS32-VI alloy

Элементы Elements	Катодный осадок Cathode deposit		Анодный шлам Anode sludge	
	г	%	г	%
Ni	46.58	84.57	6.96	25.49
Co	7.20	13.07	0.54	1.98
Cr	1.03	1.87	1.43	5.23
Re	0.22	0.39	3.01	11.02
Al	0.05	0.10	0.49	1.79
Nb	–	–	1.59	5.82
Mo	–	–	1.05	3.84
Ta	–	–	3.88	14,20
W	–	–	8.37	30.63

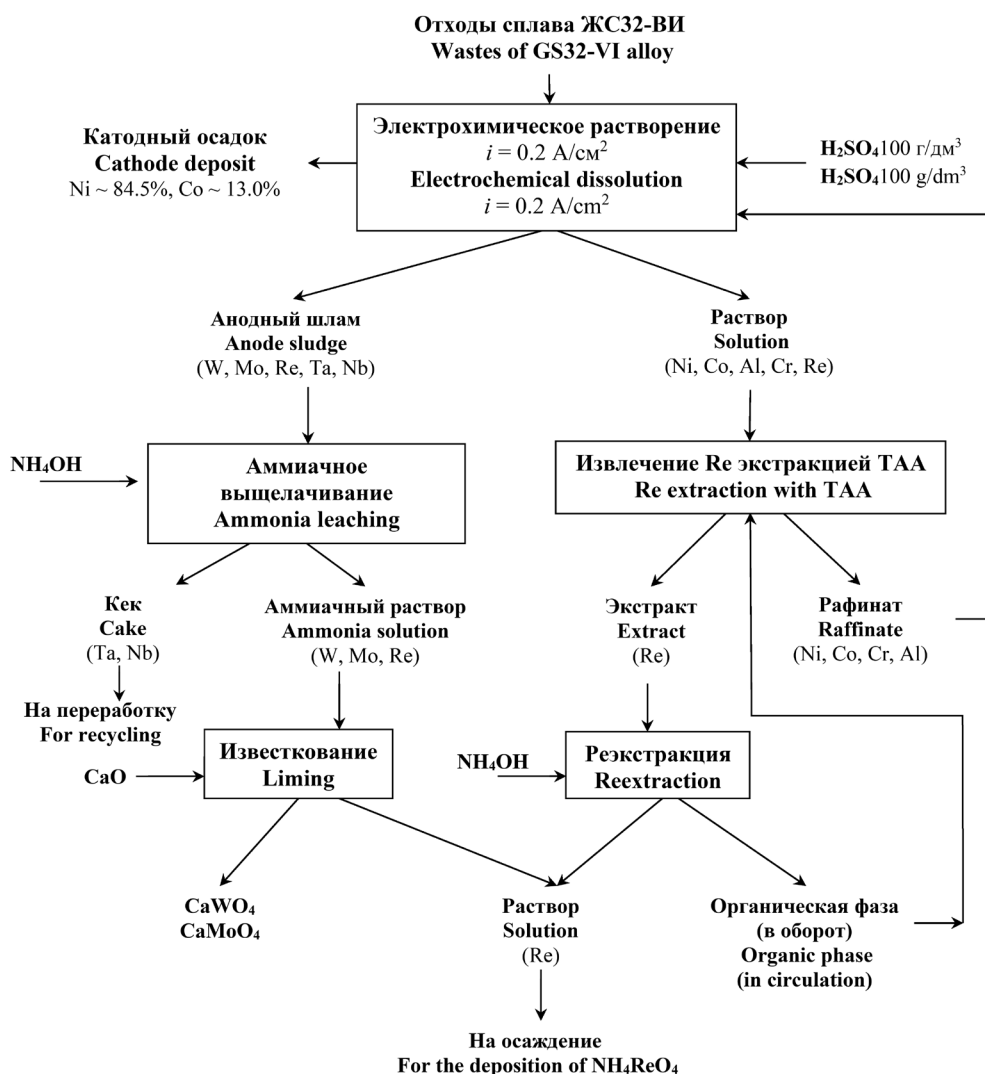


Рис. 7. Принципиальная технологическая схема переработки жаропрочного сплава ЖС32-ВИ.
 Fig. 7. The basic technological processing scheme for the heat-resistant GS32-VI alloy.

кобальт и рений и основное количество алюминия, хрома и никеля. Следует отметить, что использование электрохимической переработки при импульсном токе позволяет сконцентрировать рений в анодном шламе – его содержание составляет 77% от исходного количества, поступившего на переработку. Анодный шлак легко отделяется фильтрованием от раствора электролита (в отличие от анодного шлама, полученного на прямом токе в гальваностатическом режиме при прочих равных условиях): 90% частичек анодного шлама имеют размер от 146 до 510 мкм. Полученный анодный шлак может быть переработан известными методами [30], например, аммиачным выщелачиванием с переводом рения, вольфрама и молибдена в раствор с последующим осаждением искусственного шеелита и образованием ренийсодержащего раствора, из которого получают другой товарный продукт – перренат аммония (или калия).

Суммарное содержание никеля и кобальта в катодном осадке составляет 97.5%.

На основании исследований предложена принципиальная технологическая схема комплексной переработки жаропрочного сплава ЖС32-ВИ (рис. 7).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Показано влияние параметров импульсного тока (амплитуда, длительность импульса, пауза

между импульсами) на скорость электрохимического растворения сплава ЖС32-ВИ.

2. Установлено, что при токовой программе: амплитуда импульса тока – 2 А (при площади анода $S = 10 \text{ см}^2$), длительность импульса тока – 500 мс, пауза между импульсами – 250 мс, достигается максимальная скорость растворения сплава $0.048 \text{ г/ч}\cdot\text{см}^2$; выход по току для никеля составляет 61.6%.

3. При проведении электрохимического растворения сплава ЖС32-ВИ импульсным током достигается оптимальное соотношение скоростей растворения составляющих сплава, что обеспечивает получение катодного осадка с суммарным содержанием никеля и кобальта 97.5%.

Предложена принципиальная технологическая схема переработки сплава ЖС32-ВИ.

Вклад авторов

Все авторы в равной степени внесли свой вклад в исследовательскую работу.

Authors' contribution

All authors equally contributed to the research work.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interest.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Lutz L.J., Parker S.A., Stephenson J.B. Recycling of Contaminated Superalloy Scrap via Electrochemical Processing. *TMS Annual Meeting*. 1993:1211–1220.
- Prasad V.S., Rao S.A., Prakash U., et al. Recycling of Superalloy Scrap through Electro Slag Remelting. *ISIJ International*. 1996;36(12):1459–1464. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.36.1459>
- Rao S.R. (Ed.). *Resource Recovery and Recycling from Metallurgical Wastes*. V. 7. Elsevier Science; 2006. 580 p. [https://doi.org/10.1016/s0713-2743\(06\)x8083-2](https://doi.org/10.1016/s0713-2743(06)x8083-2)
- Sibley S.F. (Ed.). *Flow studies for recycling metal commodities in the United States*. Reston, Virginia: US Geological Survey; 2004. V. 1196. <https://doi.org/10.3133/cir1196>
- Worrell E., Reuter M.A. *Handbook of Recycling: State of the art for Practitioners, Analysts, and Scientists*. Elsevier; 2014. 600 p.
- 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):25–27.
- Палант А.А., Брюквин В.А., Левчук О.М., Палант А.В., Левин А.М. *Способ электрохимической переработки металлургических отходов жаропрочных никелевых сплавов, содержащих рений*: Пат. 2401312 РФ. Заявка № 2009113255/02; заявл. 09.04.2009; опубл. 10.10.2010. Бюл. 28.

REFERENCES

- Lutz L.J., Parker S.A., Stephenson J.B. Recycling of Contaminated Superalloy Scrap via Electrochemical Processing. *TMS Annual Meeting*. 1993: 1211–1220.
 - Prasad V.S., Rao S.A., Prakash U., et al. Recycling of Superalloy Scrap through Electro Slag Remelting. *ISIJ International*. 1996;36(12):1459–1464. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.36.1459>
 - Rao S.R. (Ed.). *Resource Recovery and Recycling from Metallurgical Wastes*. V. 7. Elsevier Science; 2006. 580 p. [https://doi.org/10.1016/s0713-2743\(06\)x8083-2](https://doi.org/10.1016/s0713-2743(06)x8083-2)
 - Sibley S.F. (Ed.). *Flow studies for recycling metal commodities in the United States*. Reston, Virginia: US Geological Survey; 2004. V. 1196. <https://doi.org/10.3133/cir1196>
 - Worrell E., Reuter M.A. *Handbook of Recycling: State of the art for Practitioners, Analysts, and Scientists*. Elsevier; 2014. 600 p.
 - Palant A.A., Bryukvin V.A., Levin A.M., Levchuk O.M. Combined electrochemical processing of the wastes of nickel superalloys containing rhenium, tungsten, tantalum, niobium and other precious metals. *Russ. Metall.* 2014;2014(1):20–22. <https://doi.org/10.1134/S0036029514010108>
- [Original Russian Text: Palant A.A., Bryukvin V.A., Levin A.M., Levchuk O.M. Combined electrochemical processing of the wastes of nickel superalloys containing rhenium, tungsten, tantalum, niobium and other precious metals. *Metally*. 2014;(1):25–27 (in Russ.).]

8. Stoller V., Olbrich A., Meese-Marktscheffel J., et al. *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 superalloys*: Pat. 5776329 USA. Publ. 07.07.1998.
10. Stoller V., Olbrich A., Meese-Marktscheffel J., et al. *Electrochemical dissolution process for disintegrating superalloy scraps*: Pat. 1312686 EP. Publ. 16.01.2008.
11. Srivastava R., Kim M., Lee J., et al. Resource recycling of superalloys and hydrometallurgical challenges. *J. Mate. Sci.* 2014;49(14):4671–4686. <https://doi.org/10.1007/s10853-014-8219-y>
12. Шипачев В.А. Некоторые технологические приемы выделения и очистки рения из жаропрочных сплавов. *Химия в интересах устойчивого развития*. 2012;20(3):365–368.
13. Палант А.А., Брюквин В.А., Левчук О.М. и др. Комплексная электрохимическая переработка металлических отходов ренийсодержащего жаропрочного никелевого сплава в сернокислых электролитах. *Электromеталлургия*. 2010;(7):29–33.
14. Петрова А.М., Касиков А.Г., Громов П.Б., Калинин В.Т. Извлечение рения из отходов сложноголегированных жаропрочных сплавов на основе никеля. *Цветные металлы*. 2011;(11):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. Заявка № 201345573/02; заявл. 11.10.2013; опубл. 20.02.2015. Бюл. № 5.
16. Агапова Л.Я., Абишева З.С., Килибаева С.К., Яхияева Ж.Е. Электрохимическая переработка техногенных отходов ренийсодержащих жаропрочных никелевых сплавов в сернокислых растворах. *Цветные металлы*. 2017;(10):69–74. <https://doi.org/10.17580/tsm.2017.10.08>
17. Agapova L.Y., Kilibayeva S.K., Abisheva Z.S., Sharipova A.S. Complex electrochemical processing of technogenic wastes of rhenium-containing heat-resistant nickel alloys. *Non-ferrous metals*. 2020;(1):24–30. <https://doi.org/10.17580/nfm.2020.01.04>
18. Фролова И.И., Соловьева Н.Д., Рыбалкина И.П., Попова Н.Е. Использование нестационарных режимов при электроосаждении никелевых покрытий. *Перспективные материалы*. 2015;(7):58–63.
19. Выпирайло С.Ю., Киреева С.Н., Киреев С.Ю. Электрохимическое осаждение покрытий оловом с использованием импульсного электролиза. *Вестник Пензенского государственного университета*. 2015;3(11):128–132.
20. Михедова Е.В., Черник А.А., Жарский И.М., Яскельчик В.В. Электрохимическое осаждение желтой латуни в условиях импульсного электролиза. *Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия химических наук*. 2014;(3):48–52.
21. Spanou S., Pavlatou E.A. Pulse electrodeposition of Ni/nano-TiO₂ composites: effect of pulse frequency on deposits properties. *J. Appl. Electrochem.* 2010;40(7):1325–1336. <https://doi.org/10.1007/s10800-010-0080-3>
22. Seza A., Jafarian H.R., Hasheminiasari M., Aliofkhaezai M. Effect of duty cycle on corrosion resistance and mechanical properties of tertiary Al₂O₃/Y₂O₃/Graphene pulsed electrodeposited Ni-based nano-composite. *Procedia Mater. Sci.* 2015;11:576–582. <https://doi.org/10.1016/j.mspro.2015.11.077>
23. Atourki L., Bouabid K., Ihalane E., L. Alahyane L., et al. Pulse electrodeposition of ZnO for thin absorber solar cells. *Energy Procedia*. 2014;50:376–382. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.06.045>
7. Palant AA, Bryukvin VA, Levchuk OM, Palant AV, Levin AM. *Method of electrochemical treatment of heatproof nickel alloy metal wastes that contain rhenium*: Pat. 2401312 RF. Publ. 10.10.2010.
8. Stoller V., Olbrich A., Meese-Marktscheffel J., et al. *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 superalloys*: Pat. 5776329 USA. Publ. 07.07.1998.
10. Stoller V., Olbrich A., Meese-Marktscheffel J., et al. *Electrochemical dissolution process for disintegrating superalloy scraps*: Pat. 1312686 EP. Publ. 16.01.2008.
11. Srivastava R., Kim M., Lee J., et al. Resource recycling of superalloys and hydrometallurgical challenges. *J. Mate. Sci.* 2014;49(14):4671–4686. <https://doi.org/10.1007/s10853-014-8219-y>
12. Shipachev V.A. Some Processing Techniques for Rhenium Isolation and Purification from Refractory Alloys. *Khimiya v interesakh ustoichivogo razvitiya = Chemistry for Sustainable Development*. 2012;20(3):323–326.
13. Palant A.A., Bryukvin V.A., Levchuk O.M., et al. Complex electrochemical processing of metallic rhenium-containing wastes of heat-temperature nickel alloy in sulphate electrolytes. *Electrometallurgiya = Electrometallurgy*. 2010;(7):29–33 (in Russ.).
14. Petrova A.M., Kasikov A.G., Gromov P.B., Kalinnikov V.T. Rhenium recovery from nickel-based complex heat-resistant alloys. *Tsvetnye metally = Non-Ferrous Metals*. 2011;(11):39–43 (in Russ.).
15. Chernyshova O.V., Drobot D.V., Chernyshov V.I., Makhon'ko M.V. *Method of nickel recovery at electrochemical processing of heat-resistant nickel alloys*: Pat. 2542182 RF. Publ. 20.02.2015 (in Russ.).
16. Agapova L. Ya., Abisheva Z. S., Kilibaeva S. K., Yakhiyaeva Zh. E. Electrochemical processing of technogenic wastes of rhenium-containing heat-resistant nickel alloys in sulfuric acid solutions. *Tsvetnye Metally*. 2017;(10):69–74 (in Russ.). <https://doi.org/10.17580/tsm.2017.10.08>
17. Agapova L.Y., Kilibayeva S.K., Abisheva Z.S., Sharipova A.S. Complex electrochemical processing of technogenic wastes of rhenium-containing heat-resistant nickel alloys. *Non-ferrous metals*. 2020;(1):24–30. <https://doi.org/10.17580/nfm.2020.01.04>
18. Frolova I.I., Solov'eva N.D., Rybalkina I.P., Popova N.E. Use of non-stationary modes in electrodeposition of nickel coatings. *Perspektivnyye materialy*. 2015;(7):58–63 (in Russ.).
18. Vypirailo S.Yu., Kireeva S.N., Kireev S.Yu. Electrochemical deposition of tin coatings using pulsed electrolysis. *Vestnik Penz. Gos. Un-ta = Vestnik of Penza State University*. 2015;3(11):128–132 (in Russ.).
20. Mikhedova E.V., Chernik A.A., Zharskii I.M., Yaskel'chik V.V. Electrochemical deposition of yellow brass under pulse electrolysis conditions. *Proceeding of the National Academy of Sciences of Belarus. Chemical Series*. 2014;(3):48–52 (in Russ.).
21. Spanou S., Pavlatou E.A. Pulse electrodeposition of Ni/nano-TiO₂ composites: effect of pulse frequency on deposits properties. *J. Appl. Electrochem.* 2010;40(7):1325–1336. <https://doi.org/10.1007/s10800-010-0080-3>
22. Seza A., Jafarian H.R., Hasheminiasari M., Aliofkhaezai M. Effect of duty cycle on corrosion resistance and mechanical properties of tertiary Al₂O₃/Y₂O₃/Graphene pulsed electrodeposited Ni-based nano-composite. *Procedia Mater. Sci.* 2015;11:576–582. <https://doi.org/10.1016/j.mspro.2015.11.077>

24. Xu Z., Jia L., Zhu D., Qu N., *et al.* Electrochemical machining of burn-resistant Ti₄O alloy. *Chinese Journal of Aeronautics (CJA)*. 2015;28(4):1263–1272. <https://doi.org/10.1016/j.cja.2015.05.007>

25. Vazquez-Arenas J., Treeratanaphitak T., Pritzker M. Formation of Co–Ni alloy coatings under direct current, pulse current and pulse-reverse plating conditions. *ELECTROCHIM. ACTA*. 2012;62:63–72. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2011.11.085>

26. Xia F., Xu H., Liu C., Wang J., *et al.* Microstructures of Ni–AlN composite coatings prepared by pulse electrodeposition technology. *Appl. Surf. Sci.* 2013;271:7–11. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2012.12.064>

27. Chen Y.I., Chen P., Lin H., Li X. Effect of Selected Process Parameters on Efficiency Enhancement of Electrochemical Etching and Polishing of Tungsten under Forced Convection. *Int. J. Electrochem. Sci.* 2020;15(11):10955–10970. <http://doi.org/10.20964/2020.11.72>

28. Гайдаренко О.В., Чернышов В.И., Чернышов Ю.И. Способ измерения потенциала рабочего электрода электрохимической ячейки под током: Пат. № 2106620 РФ. Заявка № 9610873225Ж заявл. 26.04.1996; опубл. 10.03.1998. 1998.

29. Каблов Е.Н. Физико-химические и технологические особенности создания жаропрочных сплавов, содержащих рений. *Вестник Московского университета. Серия 2. Химия*. 2005;46(3):155–167.

30. Палант А.А., Трошкина И.Д., Чекмарев А.М. *Металлургия рения*. М.: Наука; 2007. 298 с. ISBN 5-02-034116-9

23. Atourki L., Bouabid K., Ihalane E., L. Alahyane L., *et al.* Pulse electrodeposition of ZnO for thin absorber solar cells. *Energy Procedia*. 2014;50:376–382. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.06.045>

24. Xu Z., Jia L., Zhu D., Qu N., *et al.* Electrochemical machining of burn-resistant Ti₄O alloy. *Chinese Journal of Aeronautics (CJA)*. 2015;28(4):1263–1272. <https://doi.org/10.1016/j.cja.2015.05.007>

25. Vazquez-Arenas J., Treeratanaphitak T., Pritzker M. Formation of Co–Ni alloy coatings under direct current, pulse current and pulse-reverse plating conditions. *ELECTROCHIM. ACTA*. 2012;62:63–72. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2011.11.085>

26. Xia F., Xu H., Liu C., Wang J., *et al.* Microstructures of Ni–AlN composite coatings prepared by pulse electrodeposition technology. *Appl. Surf. Sci.* 2013;271:7–11. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2012.12.064>

27. Chen Y.I., Chen P., Lin H., Li X. Effect of Selected Process Parameters on Efficiency Enhancement of Electrochemical Etching and Polishing of Tungsten under Forced Convection. *Int. J. Electrochem. Sci.* 2020;15(11):10955–10970. <http://doi.org/10.20964/2020.11.72>

28. Gaidarenko O.V., Chernyshov V.I., Chernyshov Yu.I. *Method for measuring potential of live main electrode of electrochemical*: Pat. 2106620 RF. Publ. 10.03.1998 (in Russ.).

29. Kablov E.N. Physicochemical and technological features of production of high-temperature rhenium containing alloys. *Moscow University Bulletin*. 2005;60(3):16–28.

30. Palant A.A., Troshkina I.D., Chekmarev A.M. *Metallurgiya reniya (Metallurgy of rhenium)*. Moscow: Nauka; 2007. 298 p. (in Russ.). ISBN 5-02-034116-9

Об авторе:

Чернышова Оксана Витальевна, к.т.н., доцент, доцент кафедры химии и технологии редких элементов 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. Scopus Author ID 8961258100, <https://orcid.org/0000-0003-0543-7474>

Елемесов Турар Берикович, младший научный сотрудник лаборатории нового оборудования и материалов Института высоких технологий (050012, Республика Казахстан, г. Алматы, ул. Богенбай батыра, д. 168). E-mail: baseke@mail.ru

Дробот Дмитрий Васильевич, д.х.н., профессор, профессор кафедры химии и технологии редких элементов 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. Scopus Author ID 35580931100, Researcher ID AAR-3711-2019, <https://orcid.org/0000-0003-1702-9435>

About the author:

Oxana V. Chernyshova, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, K.A. Bolshakov Department of Chemistry and Technology of Rare Elements, M.V. Lomonosov Institute of Fine Chemical Technologies, MIREA – Russian Technological University (86, Vernadskogo pr., Moscow, 119571, Russia). E-mail: oxcher@mitht.ru. Scopus Author ID 8961258100, <https://orcid.org/0000-0003-0543-7474>

Turarb. Yelemessov, Junior Researcher, Laboratory of New Equipment and Materials. Institute of High Technologies (168, Bogenbai Batyr st., Almaty, 050012, Republic of Kazakhstan). E-mail: baseke@mail.ru

Dmitry V. Drobot, Dr. Sci. (Chem.), Professor, K.A. Bolshakov Department of Chemistry and Technology of Rare Elements, M.V. Lomonosov Institute of Fine Chemical Technologies, MIREA – Russian Technological University (86, Vernadskogo pr., Moscow, 119571, Russia). E-mail: dvdrobot@mail.ru. Scopus Author ID 35580931100, Researcher ID AAR-3711-2019, <https://orcid.org/0000-0003-1702-9435>

Поступила: 20.09.2021; получена после доработки: 01.10.2021; принята к опубликованию: 18.10.2021.
The article was submitted: September 20, 2021; approved after reviewing: October 01, 2021; accepted for publication: October 18, 2021.