

Сравнение химической стойкости титана, тантала и платины в солянокислых окислительных средах в автоклаве

Алексей А. Акименко	¹	aakimenko@krastsvetmet.ru	 0000-0003-3661-949X
Олег В. Белоусов	¹	ov_bel@icct.ru	 0000-0001-7778-5393
Роман В. Борисов	¹	roma_boris@list.ru	 0000-0002-6137-0975

¹ Институт химии и химической технологии – обособленное учреждение ФИЦ КНИЦ СО РАН, Красноярск, Россия

Аннотация. В современной гидрометаллургии процессы автоклавного выщелачивания находят широкое применение, что связано с рядом преимуществ перед процессами, протекающими в открытых системах. В аффинажной отрасли страны внедрение таких технологий затруднительно, и одна из причин – высокие требования к коррозионной устойчивости конструкционных материалов. В настоящей работе исследовано поведение металлических пластин тантала, титана и платины в растворах соляной кислоты с добавками пероксида водорода в автоклавных условиях, в температурном диапазоне 100–200 °С. Показано, что удельная скорость растворения платины в автоклавных условиях на несколько порядков выше скоростей растворения титана и тантала в аналогичных условиях. Так, при температуре 130 °С платиновая пластина полностью растворяется в течение 2 часов, что соответствует удельной скорости растворения $1500 \cdot 10^{-12} \text{ г} \cdot \text{м}^2/\text{сек}$; скорость растворения титана и тантала в тех же условиях составила $40 \cdot 10^{-12}$ и менее $1 \cdot 10^{-12} \text{ г} \cdot \text{м}^2/\text{сек}$, соответственно. Создание окислительных условий способствует пассивации тантала и, в значительной степени, титана. Платина, наоборот, в окислительных условиях интенсивно переходит в раствор. С учетом того, что в большинстве случаев сырье МПГ представляет собой дисперсные порошки с высокой удельной поверхностью, титановое оборудование может быть рекомендовано к их переработке. Установлено, что титан достаточно стабилен в присутствии окислителя в растворах 3М соляной кислоты до температуры 160 °С. Тантал в солянокислых окислительных средах стабилен до температуры 200 °С. Полученные в работе количественные данные могут быть использованы для разработки технологий переработки сырья, содержащего металлы платиновой группы, и создания соответствующего оборудования.

Ключевые слова: автоклав, благородные металлы, титан, тантал, скорость растворения.

Comparison of chemical firmness of the titanium, tantalum and platinum in muriatic oxidizing environments in the autoclave

Alexei A. Akimenko	¹	aakimenko@krastsvetmet.ru	 0000-0003-3661-949X
Oleg V. Belousov	¹	ov_bel@icct.ru	 0000-0001-7778-5393
Roman V. Borisov	¹	roma_boris@list.ru	 0000-0002-6137-0975

¹ Institute of Chemistry and Chemical Technology - a separate institution of the Federal Research Center of the National Research Center SB RAS, Krasnoyarsk, Russia

Abstract. In modern hydrometallurgy, autoclave leaching processes are widely used, which is associated with a number of their advantages over processes occurring in open systems. In the Russian refining industry, the introduction of such technologies is difficult, and one of the reasons is the high requirements for the corrosion resistance of structural materials. In this work, the behavior of metal plates of tantalum, titanium and platinum in solutions of hydrochloric acid with additions of hydrogen peroxide under autoclave conditions was studied in the temperature range of 100–200°C. It has been shown that the specific dissolution rate of platinum under autoclave conditions is several orders of magnitude higher than the dissolution rates of titanium and tantalum under similar conditions. Thus, at a temperature of 130°C, a platinum plate dissolves completely within 2 hours, which corresponds to a specific dissolution rate of $1500 \cdot 10^{-12} \text{ g m}^2/\text{s}$; the dissolution rate of titanium and tantalum under the same conditions was $40 \cdot 10^{-12}$ and less than $1 \cdot 10^{-12} \text{ g m}^2/\text{s}$, respectively. The creation of oxidizing conditions promotes the passivation of tantalum and, to a large extent, titanium. Platinum, on the contrary, under oxidizing conditions intensively goes into solution. Taking into account the fact that in most cases PGM raw materials are dispersed powders with a high specific surface area, titanium equipment can be recommended for their processing. It has been established that titanium is quite stable in the presence of an oxidizing agent in solutions of 3 M hydrochloric acid up to a temperature of 160°C. Tantalum in hydrochloric acid oxidizing environments is stable up to a temperature of 200°C. The quantitative data obtained in the work can be used to develop technologies for processing raw materials containing platinum group metals and to create corresponding equipment.

Keywords: autoclave, precious metals, titanium, tantalum, dissolution rate.

Для цитирования

Акименко А.А., Белоусов О.В., Борисов Р.В. Сравнение химической стойкости титана, тантала и платины в солянокислых окислительных средах в автоклаве // Вестник ВГУИТ. 2023. Т. 85. № 4. С. 122–128. doi:10.20914/2310-1202-2023-4-122-128

For citation

Akimenko A.A., Belousov O.V., Borisov R.V. Comparison of chemical firmness of the titanium, tantalum and platinum in muriatic oxidizing environments in the autoclave. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2023. vol. 85. no. 4. pp. 122–128. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2023-4-122-128

This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License

Введение

На сегодняшний день автоклавные процессы получили широкое распространение в различных отраслях горной и металлургической промышленности в России и за рубежом. В частности, оборудование, работающее при избыточном давлении, активно применяется при переработке алюминиевого, цинкового, никелевого сырья, упорных золотосодержащих руд [1–6]. Использование автоклавов обусловлено рядом преимуществ таких технологий перед технологическими решениями, которые опираются на методы ведения процессов в открытых системах. Применительно к методам вскрытия и растворения упорных материалов, автоклавные технологии характеризуются экологической безопасностью, эффективным использованием реагентов, возможностью интенсификации протекающих процессов.

В настоящее время в аффинажной отрасли, как правило, используются многостадийные, длительные по времени и энергозатратные технологии получения металлов платиновой группы. Отдельно следует отметить широкое применение небезопасных реагентов, таких как хлор, азотная кислота, что в свою очередь, предопределяет повышенные требования к промышленной и экологической безопасности. В то же время спрос на металлы платиновой группы возрастает, а ограниченность источников их добычи и высокая стоимость создают благоприятную экономическую основу и стимул к разработке эффективных процессов их переработки. Помимо первичных источников МПГ, постоянно увеличивается доля перерабатываемых вторичных материалов, характеризующихся сложным химическим составом и высокой степенью упорности [7–13].

Несмотря на указанные преимущества, автоклавные технологии слабо внедрены в аффинажную отрасль Российской Федерации. Это связано с необходимостью проведения процессов в растворах минеральных кислот высокой концентрации и в присутствии сильных окислителей, при температурах, превышающих температуру кипения растворителя. В подобных условиях выдвигаются чрезвычайно высокие требования к коррозионной стойкости конструкционных материалов [14, 15]. Поэтому весьма важной при реализации данных процессов является задача подбора химически стойкого материала для изготовления автоклавного оборудования, предназначенного для проведения высокотемпературного кислородного выщелачивания МПГ в солянокислых средах.

Танталовые материалы используются в химической промышленности уже более 60 лет и продолжают оставаться важными конструкционными материалами. Тантал считается наиболее подходящим материалом для химической промышленности благодаря своей превосходной коррозионной устойчивости, которая обусловлена наличием пассивирующей пленки оксида тантала(V) на поверхности [16]. Однако, применение тантала ограничено высокой стоимостью. Титан, на сегодняшний день, является наиболее распространенным конструкционным материалом, в аффинажной отрасли России. Он обладает удовлетворительной стойкостью к коррозии в различных окислительных средах и достаточно устойчив к механическому износу. Однако, в литературных источниках недостаточно полно отражены сведения о коррозионной устойчивости титана и тантала в условиях автоклавного вскрытия в солянокислых растворах, при одновременном присутствии окислителей и пассивирующих добавок при температурах более 100 °C [15].

Цель настоящей работы заключалась в сравнении скоростей растворения конструкционных материалов титана, тантала и платиновой пластины в автоклавах в растворах соляной кислоты в присутствии избыточного давления кислорода при температурах свыше 100 °C.

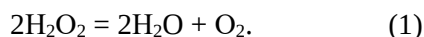
Материалы и методы

В настоящей работе использовали: воду дистиллированную (ГОСТ Р 58144–2018); HCl – «ос. ч. 20–4» (ГОСТ 14261–77); H₂ O₂ (ГОСТ 177–88); пластины платины (ГСО 11082–2018–11085–2018) толщиной 0,1 мм (доля платины не менее 99,9 мас.%), пластины титана марки ВТ1–0 толщиной 1 мм; пластины тантала марки ТВЧ толщиной 0,2 мм.

Электронно-микроскопический анализ проводили на сканирующем электронном микроскопе ТМ4000 (Hitachi, Япония) с системой микроанализа Quantax 70 (Bruker, Германия). Рентгеновские дифрактограммы регистрировали в диапазоне углов 2 θ от 30° до 90° с шагом 0,02° на настольном дифрактометре Proto AXRD (Proto Manufacturing, Канада) с использованием CuK α -излучения с накоплением в точке 2 с.

Эксперименты по растворению металлических пластин осуществляли в кварцевых автоклавах объемом от 20 до 30 см³, конструкция которых описана в работах [17–20]. В кварцевый автоклав помещали пластину металла, заливали 10 мл раствора соляной кислоты, вводили 0,5 мл пероксида водорода. Ввиду того, что конструкцией реактора не предусмотрен ввод газообразных веществ, то использовали способ ввода кислорода

в результате выделения газообразного продукта в результате химической реакции:



В растворах соляной кислоты при повышенных температурах, возможно образование хлора:



Кварцевый реактор закрывали фторопластовой крышкой, фиксировали в титановом кожухе. Автоклав нагревали в термостате до заданной температуры при постоянном перемешивании в вертикальной плоскости. В ходе экспериментов наблюдали изменение окраски раствора. По истечении заданного времени автоклав доставали и охлаждали проточной водой. Пластины отделяли от раствора, многократно промывали дистиллированной водой, высушивали и взвешивали. Концентрации металлов в растворах определяли методами атомно-абсорбционной спектроскопии – «AAAnalyst-400» (PerkinElmer, США)

и масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой – ICP-MS 7500a (Agilent, США).

Результаты

1. Химическая стойкость тантала

Устойчивость тантала исследовали при температурах 160 и 200 °С, в растворах соляной кислоты с концентрацией 3 и 6 моль/л в присутствии пероксида водорода и без него (таблица 1). Установлено, что вне зависимости от условий, убыль массы пластины не превышала 0.2%. Анализ растворов показал незначительное наличие тантала в растворах после контакта с 6М HCl, соответствующие доле перевода в раствор на уровне 0.03–0.07 процентов. Таким образом, помимо растворения, фиксируемое изменение массы танталовой пластинки в соляной кислоте может быть связано с её механическим истиранием, происходящим в результате трения пластинки с внутренней поверхностью кварцевого реактора при перемешивании содержимого автоклава.

Таблица 1.

Некоторые количественные данные по растворимости тантала

Table 1.

Some quantitative data on tantalum solubility

Условия Conditions	T, °C	t, ч t, h	Доля перевода в раствор α, % Proportion of transfer to solution	У растворения (г×м ² /сек) U dissolution (g×m ² /sek)
3М HCl, 1 мл H ₂ O ₂	160	6	<0.02	< 1×10 ⁻¹²
3М HCl, 1 мл H ₂ O ₂	200	6	<0.02	< 1×10 ⁻¹²
6М HCl, 1 мл H ₂ O ₂	200	20	0.09	8×10 ⁻¹²
6М HCl, 0 мл H ₂ O ₂	200	20	0.05	5×10 ⁻¹²

Электронно-микроскопические исследования исходной пластины тантала и обработанной в автоклавных условиях (200 °С, 30 часов, 6М HCl, 1 мл H₂ O₂) показали незначительные изменения текстуры (рисунок 1). При этом,

состав пластины, согласно рентгеноспектральному анализу, существенно не изменился. Можно отменить лишь незначительное увеличение доли кислорода, что может свидетельствовать об образовании оксидной пленки.

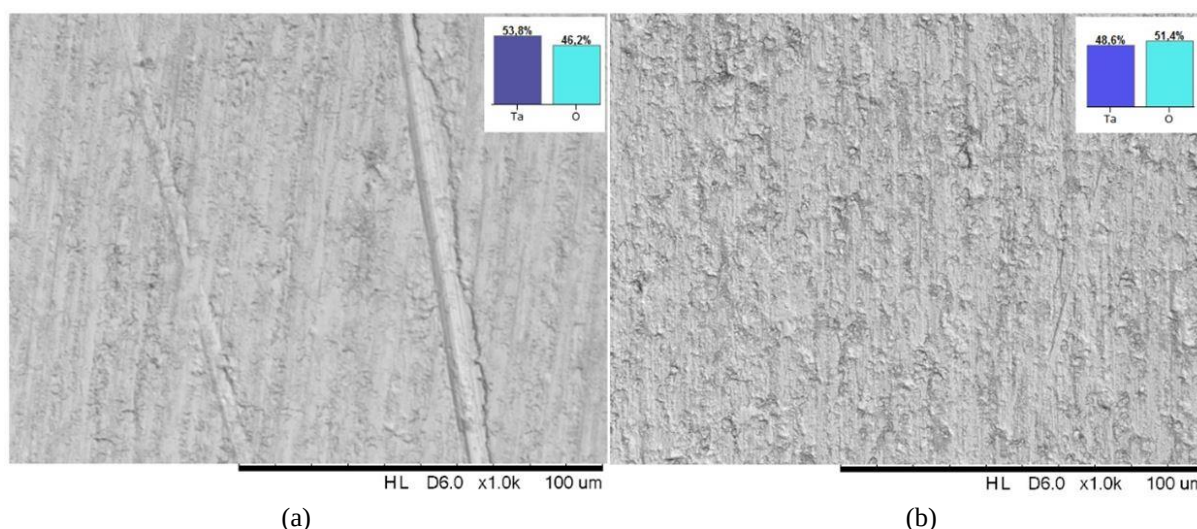


Рисунок 1. СЭМ-изображение пластины Ta: (a) – исходной, (b) – после обработки при 200 °С в растворе 6М HCl, 30 часов

Figure 1. SEM image of plates Ta: (a) – initial, (b) – after treatment at 200 °C in 6M HCl solution, 30 hours

2. Химическая стойкость титана

Титан в растворах соляной кислоты титан обладает ограниченной стойкостью, хотя он более стоек по сравнению с нержавеющей стали. С увеличением концентрации соляной кислоты скорость растворения титановой пластинки в соляной кислоте резко возрастает. Поэтому без избыточного давления кислорода эксперименты с титаном не проводили. При концентрации соляной кислоты до 3М и температуре до 160 °С при избыточном давлении кислорода в автоклаве титановая пластина

достаточно устойчива – растворимость составила менее 0.1% за 6 часов. При концентрации соляной кислоты 6М в присутствие окислителя в системе даже при температуре 120 °С визуально наблюдается изменение поверхности пластины. Увеличение температуры до 160 °С приводит к существенному разрушению пластинки с образованием белого осадка, не растворимого в соляной кислоте. Рентгенофазовым анализом (рисунок 2) установлено, что данный осадок представляет собой смесь оксида титана с оксихлоридами титана.

Таблица 2.

Некоторые количественные данные по растворимости титана

Table 2.

Some quantitative data on titanium ration

Условия Conditions	T, °C	t, ч t, h	Доля перевода в раствор α, % Proportion of transfer to solution	U растворения (г×м ² /сек) U dissolution (g×m ² /s)
1М HCl, 1 мл H ₂ O ₂	120	6	<0.01	-
1М HCl, 1 мл H ₂ O ₂	160	6	0.018	5×10 ⁻¹²
1М HCl, 1 мл H ₂ O ₂	200	6	0.043	11×10 ⁻¹²
2М HCl, 1 мл H ₂ O ₂	120	6	0.009	3×10 ⁻¹²
2М HCl, 1 мл H ₂ O ₂	160	6	0.051	14×10 ⁻¹²
2М HCl, 1 мл H ₂ O ₂	200	6	0.078	21×10 ⁻¹²
3М HCl, 1 мл H ₂ O ₂	120	6	0.035	9×10 ⁻¹²
3М HCl, 1 мл H ₂ O ₂	160	6	0.084	23×10 ⁻¹²
3М HCl, 1 мл H ₂ O ₂	200	6	0.145	39×10 ⁻¹²
6М HCl, 1 мл H ₂ O ₂	110	4	0.102	40×10 ⁻¹²
6М HCl, 1 мл H ₂ O ₂	120	4	0.281	105×10 ⁻¹²
6М HCl, 1 мл H ₂ O ₂	160	0.5	> 1% *	-

*Пластина покрыта белым осадком

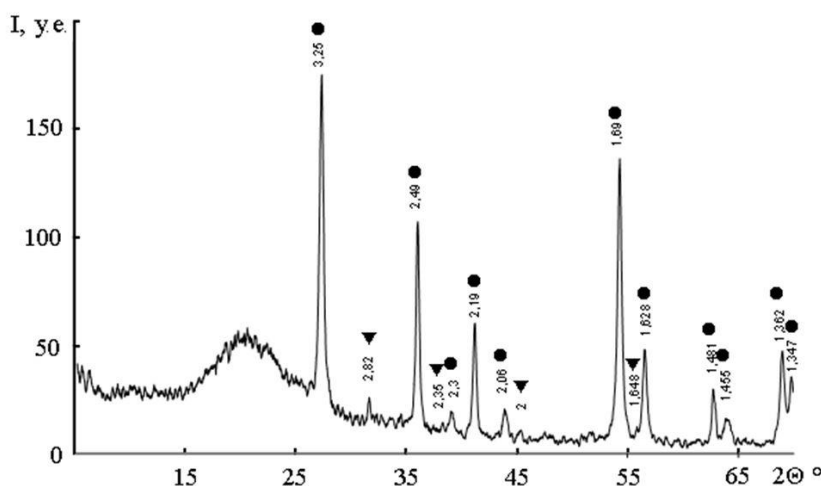


Рисунок 2. Фрагмент дифрактограммы нерастворимого осадка, образующегося в результате контакта Ti пластинки с 6М HCl при 120 °С: ● – рутил (TiO₂, d = 3,25; 2,49; 1,69 Å, JCPDS, 21–1276); ▼ – гидрат хлорида титана (TiCl₃·2H₂O, d = 2,82; 2,35; 2,00 Å, JCPDS, 17–343)

Figure 2. Fragment of diffractogram of insoluble precipitate resulting from contact of Ti plate with HCl 6M at 120 °C: ● – rutile (TiO₂, d = 3,25; 2,49; 1,69 Å, JCPDS, 21–1276); ▼ – titanium chloride hydrate (TiCl₃·2H₂O, d = 2,82; 2,35; 2,00 Å, JCPDS, 17–343)

Электронно-микроскопические исследования исходной пластины титана и обработанной в автоклавных условиях (120 °С, 4 часа, 6М HCl + 1 мл H₂O₂) показали существенное изменение поверхностной морфологии (рисунок 3).

Согласно рентгеноспектральному анализу, доля кислорода на пластине уменьшается, что может указывать на отсутствие оксидной пленки и обнажение поверхности титана.

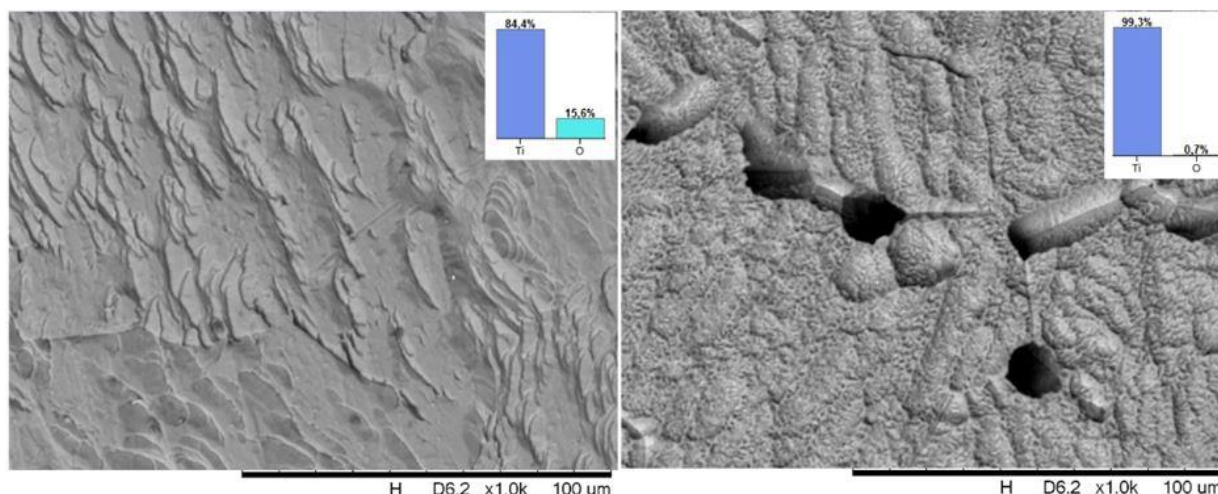


Рисунок 3. СЭМ-изображение пластинки Ti: а – исходной, б – после обработки при 120 °С в растворе 6М HCl + 1мл H₂ O₂, 4 часа

Figure 3. SEM image of Ti plate: a – initial, b – after treatment at 120° C in a solution of 6M HCl + 1 ml of H₂O₂, 4 hours

3. Параметры растворения платины

Процессы окисления металлической платины в растворах соляной кислоты в присутствии окислителя термодинамически разрешены (таблица 3). В случае использования пероксида водорода уравнение процесса может быть записано следующим образом:

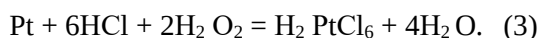


Таблица 3.

Термодинамические характеристики реакции (3)

Table 3.

Thermodynamic reaction characteristics (3)

Температура, К Temperature, K	ΔH^0 , кДж ΔH^0 , kJ	ΔS^0 , Дж/(моль·К) ΔS^0 , J/(mol K)	ΔG^0 , кДж ΔG^0 , kJ
300	-374,5	86,4	-400,4

Платина и палладий является наименее инертными по сравнению с редкими платиновыми металлами. Однако для достижения количественного растворения платиновой пластинки в открытой системе в смеси соляной и азотной кислот необходимы продолжительное время и нагрев. В автоклаве платиновая пластинка быстро растворяется даже при $t = 100$ °С (рисунок 4). Так в растворе 6М соляной кислоты с добавкой пероксида водорода за 4 часа в раствор переходит около 86% платины. При увеличении температуры до 130 °С для количественного растворения достаточно около 120 мин.

На основании полученных данных была рассчитана скорость растворения платины на единицу площади: 700×10^{-12} и 1500×10^{-12} г×м²/сек для температур 100 и 130 °С соответственно.

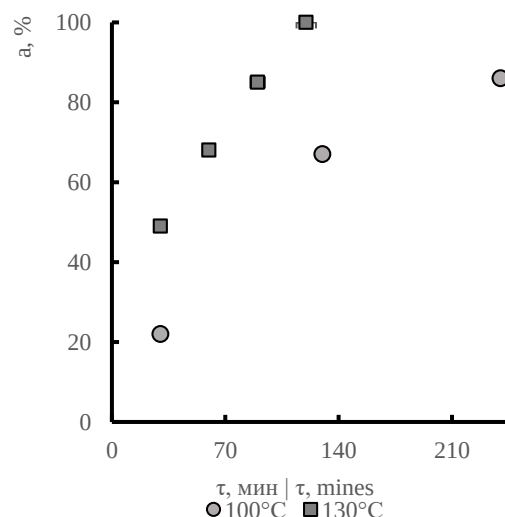


Рисунок 4. Зависимость степени растворения платиновой пластинки в среде 6М HCl + H₂O₂ от времени

Figure 4. Dissolution ratio of platinum plate in 6M HCl + H₂O₂ medium versus time

Заключение

В данной работе были определены количественные параметры химической стойкости металлических пластин тантала, титана и платины. Показано, что удельная скорость растворения платины в автоклавных условиях на несколько порядков выше скоростей растворения титана и тантала в аналогичных условиях. Учитывая то, что в большинстве случаев, сырье МПГ представляет собой дисперсные порошки с высокой удельной поверхностью, то титановое оборудование может рекомендовано к их переработке.

Установлено, что титан достаточно стабилен в присутствии окислителя в растворах 3М соляной кислоты до температуры 160 °С. Тантал в солянокислых окислительных средах стабилен до температуры 200 °С.

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания Института химии и химической технологии СО РАН (проект FWES-2021-0014) с использованием оборудования Красноярского регионального центра коллективного пользования ФИЦ КНЦ СО РАН

Литература

- 1 Roux J.O., du Toit M., Shklaz D. Novel redesign of a pressure leach autoclave by a South African platinum producer // Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy. 2009. V. 109. №. 11. P. 677–683.
- 2 Gok O., Anderson C.G., Cicekli G., Cocen E.L. Leaching kinetics of copper from chalcopirite concentrate in nitrous-sulfuric acid // Physicochemical Problems of Mineral Processing. 2014. V. 50. №. 1. P. 399–413.
- 3 Zinoviev V.A., Kalashnikova M.I., Lisakov Yu.N., Pelikh Yu.M. Testing of new corrosion-resistant materials and alloys for autoclave processes // Tsvetnye Metally. 2015. №. 7. P. 68–73. doi: 10.17580/tsm.2015.07.12
- 4 Mpinga C.N., Eksteen J.J., Aldrich C., Dyer L. Direct leach approaches to Platinum Group Metal (PGM) ores and concentrates: A review. Minerals Engineering. 2015. V. 78. P. 93–113.
- 5 Adams M.D. Summary of gold plants and processes // Gold Ore Processing. Elsevier, 2016. P. 961–984.
- 6 Bobozoda S., Boboev I.R., Strizhko L.S. Gold and copper recovery from flotation concentrates of Tarror deposit by autoclave leaching. Journal of Mining Science. 2017. V. 53. №. 2. P. 352–357.
- 7 Saguru C., Ndlovu S., Moropeng D. A review of recent studies into hydrometallurgical methods for recovering PGMs from used catalytic converters // Hydrometallurgy. 2018. №. 182. P. 44–56.
- 8 Islam A., Ahmed T., Awual M.R., Rahman A. et al. Advances in sustainable approaches to recover metals from e-waste-A review // J. Clean. Product. 2020. V. 244. P. 118815. doi: 10.1016/j.jclepro.2019.118815
- 9 Salman K., Yen-Peng T. Recycling pathways for platinum group metals from spent automotive catalyst: A review on conventional approaches and bio-processes // Resources, Conserv., Recycl. 2021. V. 170. P. 105558. doi: 10.1016/j.resconrec.2021.105558
- 10 Padamata S.K., Yasinskiy A.S., Polyakov P.V., Pavlov E.A. et al. Recovery of noble metals from spent catalysts: A review // Metall. Mater. Trans. B. 2020. V. 51. №. 5. P. 2413–2435. doi: 10.1007/s11663-020-01913-w
- 11 Oraby E.A., Li H., Eksteen J.J. An alkaline glycine-based leach process of base and precious metals from powdered waste printed circuit boards // Waste Biomass Valoriz. 2020. V. 11. №. 8. P. 3897–3909. doi: 10.1007/s12649-019-00780-0
- 12 Batnasan A., Haga K., Shibayama A. Recovery of precious and base metals from waste printed circuit boards using a sequential leaching procedure // JOM. 2018. V. 70. №. 2. P. 124–128. doi: 10.1007/s11837-017-2694-y
- 13 Ding Y., Zhang S., Liu B., Zheng H. et al. Recovery of precious metals from electronic waste and spent catalysts: A review // Resources, Conserv., Recycl. 2019. V. 141. P. 284–298. doi: 10.1016/j.resconrec.2018.10.041
- 14 Карпов А.Г., Шубенкина Н.Н., Шнайдер А. Проблемы эксплуатации автоклавов и выбор конструкционных материалов для изготовления оборудования автоклавных производств // Экспозиция Нефть Газ. 2012. №. 2 (20). С. 5–7.
- 15 Акименко А.А., Белоусов О.В., Борисов Р.В., Грабчак. Э.Ф. Исследование химической устойчивости титана в модельных солянокислых растворах аффинажного производства // Цветные металлы. № 9. 2021. С. 46–52.
- 16 Bishop C.R. Corrosion tests at elevated temperatures and pressures // Corrosion. 1963. V. 19. №. 9. P. 308–314.
- 17 Белоусов О.В., Белоусова Н.В., Рюмин А.И., Борисов Р.В. Переработка платино-палладиевого концентрата в гидротермальных условиях // Журнал прикладной химии. 2015. № 6. С. 1078–1081.
- 18 Belousova N.V., Belousov O.V., Borisov R.V. Dissolution of metallic iridium powders in hydrochloric acid oxidizing media // Tsvetnye Metally. 2022. № 8:40–45. doi: 10.17580/tsm.2022.08.05
- 19 Belousova N.V., Belousov O.V., Borisov R.V., Grizan N.V. Specific Features of Dissolution of Metallic Rhodium in Acid Oxidative Media under Hydrothermal Conditions // Russian Journal of Applied Chemistry. 2019. V. 92. №. 8. P.1102–1106. doi: 10.1134/S107042721908007X
- 20 Belousova N.V., Belousov O.V., Borisov R.V., Akimenko A.A. Autoclave dissolution of platinum metals in hydrochloric acid oxidizing media // Russian journal of non-ferrous metals. 2021. № 5. P. 50–57

References

- 1 Roux J.O., du Toit M., Shklaz D. Novel redesign of a pressure leach autoclave by a South African platinum producer. Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy. 2009. vol. 109. no. 11. pp. 677–683.
- 2 Gok O., Anderson C.G., Cicekli G., Cocen E.L. Leaching kinetics of copper from chalcopirite concentrate in nitrous-sulfuric acid. Physicochemical Problems of Mineral Processing. 2014. vol. 50. no. 1. pp. 399–413.
- 3 Zinoviev V.A., Kalashnikova M.I., Lisakov Yu.N., Pelikh Yu.M. Testing of new corrosion-resistant materials and alloys for autoclave processes. Tsvetnye Metally. 2015. no. 7. pp. 68–73. doi: 10.17580/tsm.2015.07.12
- 4 Mpinga C.N., Eksteen J.J., Aldrich C., Dyer L. Direct leach approaches to Platinum Group Metal (PGM) ores and concentrates: A review. Minerals Engineering. 2015. vol. 78. pp. 93–113.
- 5 Adams M.D. Summary of gold plants and processes. Gold Ore Processing. Elsevier, 2016. pp. 961–984.
- 6 Bobozoda S., Boboev I.R., Strizhko L.S. Gold and copper recovery from flotation concentrates of Tarror deposit by autoclave leaching. Journal of Mining Science. 2017. vol. 53. no. 2. pp. 352–357.
- 7 Saguru C., Ndlovu S., Moropeng D. A review of recent studies into hydrometallurgical methods for recovering PGMs from used catalytic converters. Hydrometallurgy. 2018. no. 182. pp. 44–56.
- 8 Islam A., Ahmed T., Awual M.R., Rahman A. et al. Advances in sustainable approaches to recover metals from e-waste-A review. J. Clean. Product. 2020. vol. 244. pp. 118815. doi: 10.1016/j.jclepro.2019.118815

- 9 Salman K., Yen-Peng T. Recycling pathways for platinum group metals from spent automotive catalyst: A review on conventional approaches and bio-processes. *Resources, Conserv., Recycl.* 2021. vol. 170. pp. 105558. doi: 10.1016/j.resconrec.2021.105588
- 10 Padamata S.K., Yasinskiy A.S., Polyakov P.V., Pavlov E.A. et al. Recovery of noble metals from spent catalysts: A review. *Metall. Mater. Trans. B.* 2020. vol. 51. no. 5. pp. 2413–2435. doi: 10.1007/s11663-020-01913-w
- 11 Oraby E.A., Li H., Eksteen J.J. An alkaline glycine-based leach process of base and precious metals from powdered waste printed circuit boards. *Waste Biomass Valoriz.* 2020. vol. 11. no. 8. pp. 3897–3909. doi: 10.1007/s12649-019-00780-0
- 12 Batnasan A., Haga K., Shibayama A. Recovery of precious and base metals from waste printed circuit boards using a sequential leaching procedure. *JOM.* 2018. vol. 70. no. 2. pp. 124–128. doi: 10.1007/s11837-017-2694-y
- 13 Ding Y., Zhang S., Liu B., Zheng H. et al. Recovery of precious metals from electronic waste and spent catalysts: A review. *Resources, Conserv., Recycl.* 2019. vol. 141. pp. 284–298. doi: 10.1016/j.resconrec.2018.10.041
- 14 Karpov A.G., Shubenkina N.N., Schneider A. Problems of autoclave operation and selection of structural materials for production of autoclave production equipment. *Exposition Oil Gas.* 2012. no. 2 (20). pp. 5–7. (in Russian).
- 15 Akimenko A.A., Belousov O.V., Borisov R.V., Grabchak E.F. Study of chemical stability of titanium in model hydrochloric acid solutions of refining production. *Non-ferrous metals.* 2021. no. 9. pp. 46–52. (in Russian).
- 16 Bishop C.R. Corrosion tests at elevated temperatures and pressures. *Corrosion.* 1963. vol. 19. no. 9. pp. 308–314.
- 17 Belousov O.V., Belousova N.V., Ryumin A.I., Borisov R.V. Processing of platinum-palladium concentrate under hydrothermal conditions. *Journal of Applied Chemistry.* 2015. no. 6. pp. 1078–108. (in Russian).
- 18 Belousova N.V., Belousov O.V., Borisov R.V. Dissolution of metallic iridium powders in hydrochloric acid oxidizing media. *Tsvetnye Metally.* 2022. no. 8:40–45. doi: 10.17580/tsm.2022.08.05
- 19 Belousova N.V., Belousov O.V., Borisov R.V., Grizan N.V. Specific Features of Dissolution of Metallic Rhodium in Acid Oxidative Media under Hydrothermal Conditions. *Russian Journal of Applied Chemistry.* 2019. vol. 92. no. 8. pp. 1102–1106. doi: 10.1134/S107042721908007X
- 20 Belousova N.V., Belousov O.V., Borisov R.V., Akimenko A.A. Autoclave dissolution of platinum metals in hydrochloric acid oxidizing media. *Russian journal of non-ferrous metals.* 2021. no. 5. pp. 50–57.

Сведения об авторах

Алексей А. Акименко аспирант, лаборатория гидрометаллургических процессов, Институт химии и химической технологии – обособленное учреждение ФИЦ КНЦ СО РАН, Академгородок, 50/24, Красноярск, 660036, Россия, aakimenko@krastsvetmet.ru

 <https://orcid.org/0000-0003-3661-949X>

Олег В. Белоусов д.х.н., профессор, лаборатория гидрометаллургических процессов, Институт химии и химической технологии – обособленное учреждение ФИЦ КНЦ СО РАН, Академгородок, 50/24, Красноярск, 660036, Россия, ov_bel@icct.ru

 <https://orcid.org/0000-0001-7778-5393>

Роман В. Борисов к.х.н., научный сотрудник, лаборатория гидрометаллургических процессов, Институт химии и химической технологии – обособленное учреждение ФИЦ КНЦ СО РАН, Академгородок, 50/24, Красноярск, 660036, Россия, roma_boris@list.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-6137-0975>

Вклад авторов

Все авторы в равной степени принимали участие в написании рукописи и несут ответственность за плагиат

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about authors

Alexei A. Akimenko graduate student, laboratory of hydrometallurgical processes, Institute of Chemistry and Chemical Technology of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Akademgorodok, 50/24, Krasnoyarsk, 660036, Russia, aakimenko@krastsvetmet.ru

 <https://orcid.org/0000-0003-3661-949X>

Oleg V. Belousov Dr. Sci. (Chem.), professor, laboratory of hydrometallurgical processes, Institute of Chemistry and Chemical Technology of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Akademgorodok, 50/24, Krasnoyarsk, 660036, Russia, ov_bel@icct.ru

 <https://orcid.org/0000-0001-7778-5393>

Roman V. Borisov Cand. Sci. (Chem.), researcher, laboratory of hydrometallurgical processes, Institute of Chemistry and Chemical Technology of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Akademgorodok, 50/24, Krasnoyarsk, 660036, Russia, roma_boris@list.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-6137-0975>

Contribution

All authors are equally involved in the writing of the manuscript and are responsible for plagiarism

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила 13/10/2023	После редакции 31/10/2023	Принята в печать 20/11/2023
Received 13/10/2023	Accepted in revised 31/10/2023	Accepted 20/11/2023