

КИНЕТИКА СЕРНО-КИСЛОТНОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ НИКЕЛЯ ИЗ ШЛИФОТХОДОВ РЕНИЙСОДЕРЖАЩИХ СУПЕРСПЛАВОВ

© 2021 г. И.Е. Тарганов, И.Д. Трошкина

Российский химико-технологический университет (РХТУ) им. Д.И. Менделеева, г. Москва, Россия

Статья поступила в редакцию 14.05.21 г., доработана 26.06.21 г., подписана в печать 24.06.21 г.

Аннотация: В агитационном режиме изучена кинетика серно-кислотного выщелачивания никеля – основного компонента шлифотходов Re-содержащего жаропрочного суперсплава ЖС-32ВИ, образующихся при механической обработке изделий и содержащих примеси абразивного материала, масел, керамики и другие загрязняющие вещества, с концентрированием тугоплавких металлов в твердом остатке. Содержание никеля составляет 60 %, а кроме него, в шлифотходах присутствуют и другие металлы, такие как рений, хром, кобальт, вольфрам, тантал, молибден, гафний, титан и алюминий. Процесс выщелачивания никеля из отходов раствором серной кислоты осуществляли в термостатированной ячейке при повышенной температуре (55–85 °С), соотношении фаз отходы : 3 М раствор H₂SO₄, равном 1 г : 10 мл, и скорости перемешивания – 200 мин⁻¹. Для изучения кинетики использовали фракцию –0,071 мм с наибольшим выходом (49,2 мас.%) в составе шлифотходов. Получены кинетические кривые выщелачивания никеля из отходов, имеющие выпуклый характер. Установлено, что при изменении температуры от 55 до 85 °С время до прекращения выщелачивания уменьшается с 220 до 140 мин, а извлечение никеля из раствора увеличивается от 45 до 99 %. Данные полученных кинетических кривых линеаризованы по уравнениям «сжимающейся сферы», Гистлинга–Брунштейна и Казеева–Ерофеева (последнее наиболее пригодно для описания). С учетом оценки коэффициентов корреляции анаморфоз установлено, что выщелачивание никеля из шлифотходов лимитирует химическая реакция и процесс протекает в кинетической области реагирования. Кажущаяся энергия активации, рассчитанная с использованием уравнения Аррениуса и констант скоростей, полученных при обработке линеаризованных кинетических кривых по модели «сжимающейся сферы», составила 47,5±0,5 кДж/моль. Такое ее значение подтверждает протекание процесса в кинетической области, интенсифицировать процесс в которой можно повышением температуры его проведения.

Ключевые слова: кинетика, шлифотходы, суперсплавы, никель, рений, выщелачивание, серная кислота, кинетические уравнения, кинетические коэффициенты.

Тарганов И.Е. – аспирант кафедры технологии редких элементов и наноматериалов на их основе, РХТУ им. Д.И. Менделеева (125047, г. Москва, Миусская пл., 9). E-mail: itarganov@muctr.ru.

Трошкина И.Д. – докт. техн. наук, профессор кафедры технологии редких элементов и наноматериалов на их основе, РХТУ им. Д.И. Менделеева. E-mail: tid@muctr.ru, oban1@yandex.ru.

Для цитирования: Тарганов И.Е., Трошкина И.Д. Кинетика серно-кислотного выщелачивания никеля из шлифотходов ренийсодержащих суперсплавов. *Известия вузов. Цветная металлургия*. 2021. Т. 27. No. 4. С. 24–31.
DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2021-4-24-31.

Kinetics of sulfuric acid leaching of nickel from grinding waste of rhenium-containing superalloys

I.E. Targanov, I.D. Troshkina

Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russia

Received 14.05.2021, revised 26.06.2021, accepted for publication 24.06.2021

Abstract: The paper studies the kinetics of sulfuric acid leaching of nickel, the main component of grinding waste of ZhS-32VI rhenium-containing heat-resistant superalloy formed during mechanical processing of products and containing such impurities as abrasive materials, oils, ceramics and other contaminants with refractory metal concentration in a solid residue, in agitation mode. The nickel content is 60 %. In addition to nickel, grinding waste contains other metals such as rhenium, chromium, cobalt, tungsten, tantalum, molybdenum, hafnium, titanium, and aluminum. The process of nickel leaching from waste with a sulfuric acid solution was carried out in a thermostated cell at an elevated temperature (55–85 °С), waste : 3 M H₂SO₄ solution phase ratio of 1 g : 10 ml, and stirring rate of 200 min⁻¹. Kinetics was studied using a fraction of –0.071 mm with the highest yield (49.2 wt.%) in grinding waste. Convex kinetic curves of nickel leaching from waste were obtained. It was found that when the temperature changes from 55 to 85 °С, the time until leaching stops decreases from 220 to 140 min, and nickel recovery from the solution increases from 45 to 99 %. The data of the obtained kinetic curves were linearized according to the «contracting sphere» equation, Gistling–Braunstein and Kazeev–Erofeev equations (the latter is most suitable for description). Taking into account the

assessment of anamorphosis correlation coefficients, it was found that nickel leaching from grinding waste is limited by the chemical reaction, and the process proceeds in the kinetic region of the reaction. The apparent activation energy calculated using the Arrhenius equation and rate constants obtained by processing linearized kinetic curves according to the «contracting sphere» model, was 47.5 ± 0.5 kJ/mol. This value confirms the course of the process in the kinetic region where the process can be intensified by increasing its temperature.

Keywords: kinetics, grinding waste, superalloys, nickel, rhenium, leaching, sulfuric acid, kinetic equations, kinetic coefficients.

Targanov I.E. – Postgraduate student, Department of technology of rare elements and nanomaterials, Mendeleev University of Chemical Technology of Russia (125047, Russia, Moscow, Miusskaya sq., 9). E-mail: itarganov@muctr.ru.

Troshkina I.D. – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department of technology of rare elements and nanomaterials, Mendeleev University of Chemical Technology of Russia. E-mail: tid@muctr.ru, oban1@yandex.ru.

For citation: Targanov I.E., Troshkina I.D. Kinetics of sulfuric acid leaching of nickel from grinding waste of rhenium-containing superalloys. *Izvestiya Vuzov. Tsvetnaya Metallurgiya (Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy)*. 2021. Vol. 27. No. 4. P. 24–31 (In Russ.). DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2021-4-24-31.

Рений — один из наиболее эффективных легирующих компонентов суперсплавов [1–9], для получения которых используется более 80 % этого металла [9, 10]. Многокомпонентные Re-содержащие сплавы 5-го поколения содержат ряд ценных редких и цветных металлов, таких как никель, хром, кобальт, вольфрам, тантал, молибден, гафний, титан, алюминий и рутений [9–11].

Рений извлекают попутно, в основном из сульфидных молибденовых и медных руд, извлечение его из отходов жаропрочных сплавов, в которых содержание Re достигает 3–6 %, делает их весьма перспективным дополнительным источником этого металла [1–3, 5, 6, 8, 9, 12–16].

Обязательным требованием к технологиям утилизации отходов сплавов является комплексность переработки [1–3, 6, 12, 16]. Отходы суперсплавов на основе никеля — металла, широко применяемого в настоящее время как основы суперсплавов рения, можно рассматривать как дополнительный источник Ni, Re и др. В промышленности никелевые отходы, представляющие опасность для окружающей среды, образуются при первичной переработке (в процессе формования) и изготовлении изделий из нержавеющей стали и специальных сплавов. Их подвергают переработке, как и первичный никель, путем измельчения, плавления, рафинирования и литья [17].

Отходы нержавеющей и высокопрочной сталей и специальных сплавов используются на предприятиях, производящих эти материалы. Основная часть отходов металлического никеля, полученных при плавлении, рафинировании и литье цветных металлов, возвращается на сталеплавильные и литейные заводы. При производстве и переработке нержавеющей и легированных сталей выход никеля в среднем не превышает 60 %,

а для сплавов с высоким его содержанием — всего лишь 20 % [17].

Рециркуляция отходов производства внутри одного и того же завода приводит к минимизации потерь никеля, однако вне предприятия они могут достигать до 30 % и более. Изготовление изделий из жаропрочных сплавов с высоким содержанием Ni технически затруднительно, поэтому отходы этих сплавов утилизируют в тех случаях, когда известен точный состав, что позволяет использовать их непосредственно в качестве сплава. В противном случае отходы подвергают переработке с целью выделения содержащихся в них компонентов в виде, пригодном для повторного использования [17].

Разрабатываемые современные методы выделения рения из отходов предполагают повышение чистоты и увеличение ассортимента его соединений по сравнению с производством из первичного сырья [3, 12, 18] и имеют преимущества с точки зрения энергосбережения и охраны окружающей среды.

Пирометаллургические способы переработки отходов жаропрочных сплавов [3, 4, 6, 12–14, 16, 18] сложны и дороги в обслуживании, имеют ряд недостатков, включая выбросы газов, высокий спрос на энергию, низкую чистоту конечного продукта и значительные потери (до 20 %) легирующих элементов в ходе переплавки [9, 12, 19].

Гидрометаллургические процессы как альтернатива пирометаллургическим считаются более экологичными и менее энергоемкими [20]. Как правило, гидрометаллургические способы выделения рения и других металлов включают щелочное или кислотное выщелачивание, часто в присутствии окислителя [3, 12, 13, 15, 16, 18–23], и/или электрохимическое разложение лома или отходов

[23–27] с последующим разделением элементов путем экстракции, сорбции и осаждения [3, 12, 13]. Один из основных недостатков использования гидromеталлургических методов для извлечения Re и Ni из жаропрочных сплавов — длительное время, необходимое для растворения рения. Это связано с монокристаллической природой суперсплава в сочетании с большими трудностями измельчения крупнокусковых отходов.

Данные по кинетике выщелачивания ограничены. Авторами [9] изучена кинетика выщелачивания рения и других металлов — компонентов мелкоизмельченной фракции жаропрочного сплава CMSX-4 — царской водкой (100 %). Показано, что в течение 480 мин процесс выщелачивания лимитирует стадия химической реакции, а после этого времени (до 3000 мин) — диффузия через слой продукта.

К одному из видов отходов относятся образующиеся при полировании изделий из жаропрочных сплавов порошкообразные отходы, содержащие остатки абразивного материала, масел и другие загрязняющие компоненты. В отличие от переработки других видов отходов, требующих предварительной затратной подготовки — измельчения, для шлифотходов пригодны гидromеталлургические методы.

Авторами [21, 29] предложены два варианта кислотного вскрытия шлифотходов:

— перевод основы сплава в раствор с концентрированием рения в остатке с последующей его переработкой путем высокотемпературной окислительной отгонки гептаоксида рения;

— окислительное растворение с переводом в раствор как основы сплава, так и рения с селективным извлечением последнего жидкостной экстракцией вторичным октиловым спиртом.

При растворении основы сплава ЖС-32 использованы растворы соляной и серной кислот (2–5 моль/дм³). Процесс осуществляли при соотношении твердой и жидкой фаз 1:15, температуре 80 °С и времени 3–6 ч. Данные по кинетике растворения основы отходов сплава авторы не приводят.

Предварительное извлечение никеля из шлифотходов, а затем рения и других металлов из образующегося кека может существенно снизить общие расходы на извлечение и разделение металлов.

Таким образом, цель настоящей работы — изучение кинетики серно-кислотного выщелачивания никеля из шлифотходов Re-содержащего суперсплава ЖС-32ВИ.

Методика экспериментов

Объектом исследования являлись шлифотходы суперсплава ЖС32-ВИ следующего состава, мас. %:

Re	4,6	Nb.....	1,6
Co	9,0	Mo	1,0
W.....	8,5	C	0,15
Al.....	5,9	B	0,02
Cr.....	4,9	Ce	0,025
Ta.....	4,0	Ni.....	60,0

Их гранулометрический состав представлен в табл. 1.

В работе использовали фракцию шлифотходов с классом крупности –0,071 мм, имеющую наибольший выход (49,2 мас. %). Содержание никеля в этой фракции составляло 60 %, рения — 4,6 %.

Хотя электрохимический метод — один из наиболее эффективных способов переработки отходов жаропрочных Re-содержащих суперсплавов, для порошкообразных шлифотходов целесообразно использовать реагентное растворение, так как размер их фракций может оказать положительное влияние на кинетику перехода в раствор основы шлифотходов суперсплава ЖС32-ВИ — никеля.

Кинетику взаимодействия шлифотходов с раствором серной кислоты изучали в агитационном режиме в термостатируемом реакторе в течение выбранного времени при температурах 55, 65, 75 и 85 °С. Навеску шлифотходов контактировали с раствором кислоты при соотношении твердой и жидкой фаз Т : Ж = 1 : 10 (г : мл). Скорость пе-

Таблица 1. Гранулометрический состав шлифотходов суперсплава ЖС32-ВИ

Table 1. Grain size distribution ZhS-32VI superalloy grinding waste

Класс крупности, мм	Выход, мас. %
+2	3,1
–2+1,2	0,7
–1,2+1	2,0
–1+0,5	1,1
–0,5+0,1	24,7
–0,1+0,071	19,2
–0,071	49,2

ремешивания (200 мин^{-1}) выбрана с учетом того, чтобы частицы шлифотходов находились во взвешенном состоянии и интенсивно перемешивались при сохранении обтекания их раствором. Через определенные промежутки времени проводили отбор проб раствора и анализировали их на содержание Ni титриметрическим методом с использованием трилона Б [30]. Концентрация 3М раствора H_2SO_4 выбрана с учетом теоретического расчета расходуемой на растворение составляющих сплав металлов кислоты по уравнениям реакций с теми компонентами сплава, которые, по литературным данным, реагируют с ней с коэффициентом избытка 1,33.

Извлечение никеля в раствор вычисляли по уравнению

$$\alpha = \frac{C_{\text{Ni}} V_{\text{р-р}}}{\omega_{\text{Ni}} M_{\text{H}}} \cdot 100 \%,$$

где C_{Ni} — концентрация никеля в текущий момент времени, г/л; $V_{\text{р-р}}$ — объем раствора, л; ω_{Ni} — массовая доля никеля в шлифотходах, M_{H} — масса навески, г.

Результаты и их обсуждение

По методике, описанной выше, получены кинетические кривые выщелачивания никеля при разных температурах в координатах α — τ (рис. 1). Из представленных данных следует, что температура оказывает сильное влияние на процесс выщелачивания: при ее изменении от 55 до 85 °С время до прекращения выщелачивания уменьшается с

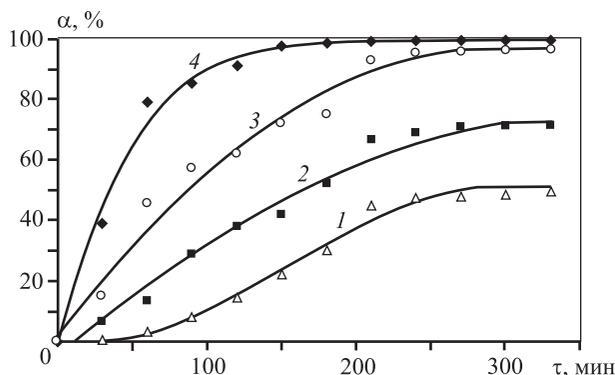


Рис. 1. Зависимость извлечения Ni в раствор от времени

t , °С: 55 (1), 65 (2), 75 (3), 85 (4)

Fig. 1. Dependence of Ni recovery into the solution on time

t , °С: 55 (1), 65 (2), 75 (3), 85 (4)

220 до 140 мин, а извлечение никеля в раствор увеличивается с 45 до 99 %.

Скорость выщелачивания, как и любого гетерогенного процесса, определяется скоростью диффузионного массопереноса и скоростью химической реакции. Процесс включает следующие основные стадии:

1) диффузионный перенос реагента из объема раствора к поверхности твердой фазы через слой жидкости, непосредственно прилегающий к твердой частице, — внешний диффузионный слой;

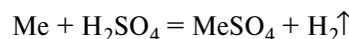
2) диффузионный перенос реагента через слой твердого продукта реакции или внутри пор твердой фазы — внутренний диффузионный слой;

3) химическая реакция на поверхности выщелачиваемого вещества;

4) диффузионный перенос растворенного вещества от поверхности реакции к контурной поверхности частицы через слой твердого продукта реакции или внутри пор;

5) диффузионный перенос растворенного вещества через слой жидкости, прилегающий к твердой частице, в объем раствора.

При взаимодействии никеля с раствором серной кислоты по реакции



происходит выделение водорода. Образующиеся пузырьки могут, с одной стороны, блокировать часть поверхности частиц, а с другой, вследствие их роста, отрыва и всплытия, способствовать перемешиванию раствора серной кислоты вблизи поверхности и интенсифицировать процесс внешнего массообмена. Стадии 1 и 5 при выбранной скорости перемешивания с учетом газовыделения могут быть исключены из рассмотрения.

Для оценки определяющей скорость стадии выщелачивания никеля из шлифотходов обработке кинетических данных проводили с использованием уравнений, описывающих процессы, протекающие в кинетической и диффузионной областях реагирования.

Модель «сжимающейся сферы» описывает процесс выщелачивания, когда реакция протекает на поверхности сферического твердого тела, которое теряет массу и уменьшается в размере в ходе реакции, с образованием нерастворенного пористого слоя продукта. Уравнение «сжимающейся сферы» — так называемое уравнение Грея—Веддингтона [31], хорошо описывающее процессы, проте-

кающие в кинетической области реагирования, имеет следующий вид:

$$1 - (1 - \alpha)^{1/3} = k\tau,$$

где α — извлечение, доли ед.; k — константа скорости реакции, мин^{-1} ; τ — время, мин.

Это уравнение позволяет с хорошим приближением обрабатывать кинетические данные, когда толщина образовавшегося твердого продукта растет в течение времени реакции, но не оказывает влияния на ее диффузионную составляющую [10].

Линеаризацию кинетических кривых выщелачивания никеля из шлифотходов, полученных при разных температурах (рис. 1), по уравнению «сжимающейся сферы» отражает рис. 2.

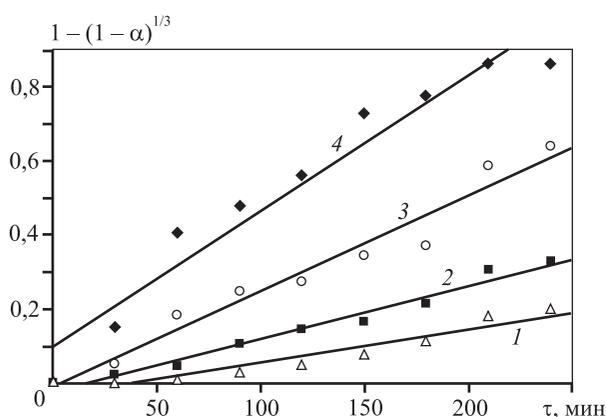


Рис. 2. Линеаризация кинетических данных выщелачивания никеля из шлифотходов по уравнению «сжимающейся сферы»
 $t, ^\circ\text{C}$: 55 (1), 65 (2), 75 (3), 85 (4)

Fig. 2. Kinetic data linearization for nickel leaching from grinding waste according to the «contracting sphere» equation
 $t, ^\circ\text{C}$: 55 (1), 65 (2), 75 (3), 85 (4)

Константы скорости выщелачивания, полученные при обработке экспериментальных кинетических данных (табл. 2), использовали для расчета кажущейся энергии активации (E_a) по уравнению Аррениуса. В интервале температур 328–358 К она составила $47,5 \pm 0,5$ кДж/моль.

Уравнением «сжимающейся сферы» можно удовлетворительно описывать экспериментально полученные кинетические данные при условии отсутствия существенного влияния образующегося слоя твердого продукта реакции на диффузионную составляющую процесса. В случае образования плотного непористого слоя продукта используют уравнение Гистлинга—Броунштейна [31, 32]:

$$1 - \frac{2}{3}\alpha - (1 - \alpha)^{2/3} = k\tau.$$

Линеаризованные кинетические данные по выщелачиванию никеля из шлифотходов в координатах $1 - \frac{2}{3}\alpha - (1 - \alpha)^{2/3} - \tau$ представлены на рис. 3.

Константы скоростей реакций (k), рассчитанные по уравнению Гистлинга—Броунштейна, также приведены в табл. 2. Исходя из значений коэффициентов корреляции (R^2) можно констатировать, что уравнение «сжимающейся сферы» более адекватно описывает процесс выщелачивания никеля, входящего в состав суперсплава. Следовательно, образование твердого слоя продукта не приводит к существенному диффузионному торможению.

Применение обобщенного кинетического уравнения Казеева—Ерофеева позволяет выявить лимитирующую стадию процесса, оценивая значения показателя n в уравнении

$$\alpha = 1 - \exp(-k\tau^n),$$

где k и n — кинетические параметры. В физическом смысле это уравнение представляет собой

Таблица 2. Кинетические характеристики выщелачивания никеля из шлифотходов, полученные при использовании различных моделей

Table 2. Kinetic properties of nickel leaching from grinding waste obtained using different models

$t, ^\circ\text{C}$	Уравнение «сжимающейся сферы» $1 - (1 - \alpha)^{1/3} = k\tau$		Уравнение Гистлинга—Броунштейна $1 - \frac{2}{3}\alpha - (1 - \alpha)^{2/3} = k\tau$		Уравнение Казеева—Ерофеева $\ln[-\ln(1 - \alpha)] = n\ln\tau + \ln(k\tau)$	
	$k \cdot 10^3, \text{мин}^{-1}$	R^2	$k \cdot 10^4, \text{мин}^{-1}$	R^2	n	R^2
55	0,9	0,9274	2	0,8143	1,24	0,9753
65	1,4	0,9760	4	0,9029	1,28	0,9779
75	2,6	0,9591	11	0,9018	2,00	0,9635
85	3,7	0,9428	2	0,8054	1,05	0,9574

функцию вероятности степени превращения как в топахимических реакциях, так и в реакциях иной природы. В дважды логарифмированном виде оно линеаризуется следующим образом:

$$\ln[-\ln(1 - \alpha)] = n \ln t + \ln(k_r).$$

Кинетические данные выщелачивания никеля из шлифотходов в координатах $\ln[-\ln(1 - \alpha)] - \ln t$ представлены на рис. 4.

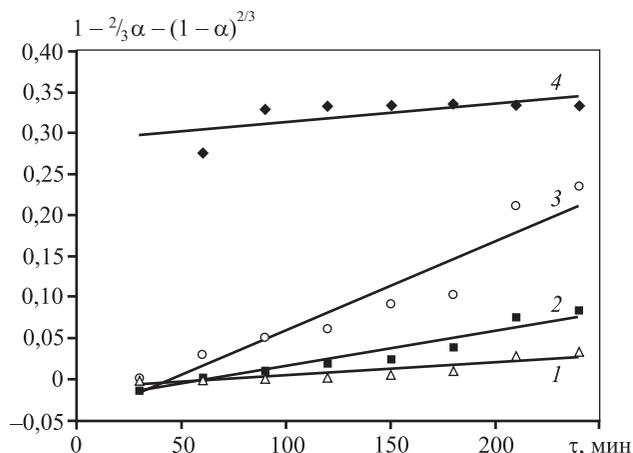


Рис. 3. Линеаризация кинетических данных выщелачивания никеля из шлифотходов по уравнению Гистлинга—Броунштейна $t, ^\circ\text{C}$: 55 (1), 65 (2), 75 (3), 85 (4)

Fig. 3. Kinetic data linearization for nickel leaching from grinding waste according to the Gistling–Braunstein equation $t, ^\circ\text{C}$: 55 (1), 65 (2), 75 (3), 85 (4)

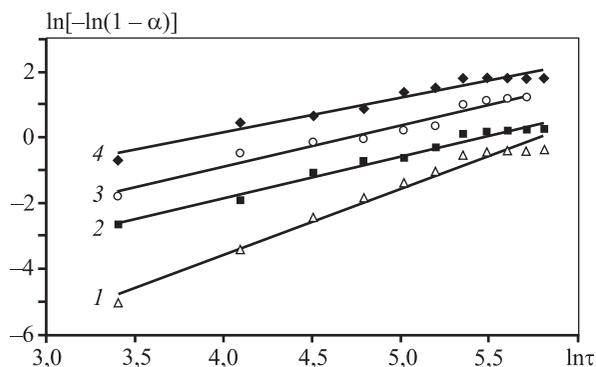


Рис. 4. Линеаризация кинетических данных выщелачивания никеля из шлифотходов по уравнению Казеева—Ерофеева $t, ^\circ\text{C}$: 55 (1), 65 (2), 75 (3), 85 (4)

Fig. 4. Kinetic data linearization for nickel leaching from grinding waste according to the Kazeev–Erofeev equation $t, ^\circ\text{C}$: 55 (1), 65 (2), 75 (3), 85 (4)

Значения коэффициента n при температурах 55, 65, 75 и 85 $^\circ\text{C}$, составили 1,25, 1,28, 2,00 и 1,05 соответственно. Поскольку во всех случаях они превышают 1, процесс выщелачивания контролируется химической реакцией. Этот факт наряду с величиной кажущейся энергии активации, рассчитанной по температурным коэффициентам констант скоростей при линеаризации кинетических данных по уравнению «сжимающейся сферы», свидетельствует о значительной роли кинетической области реагирования.

Для оценки поведения рения при переработке шлифотходов методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой определяли его содержание в кеке, полученном после серно-кислотного выщелачивания при $t = 85 ^\circ\text{C}$, которое составило 4,6 %, что позволяет утверждать об отсутствии перехода рения в раствор и возможности разделения Re и Ni на этой стадии. При этом содержание никеля в кеке составило 0,0605 %, что соответствует его извлечению по твердой фазе 90 %.

Заключение

В результате экспериментального исследования кинетики процесса выщелачивания никеля из шлифотходов Re-содержащих суперсплавов (фракция $-0,071 \text{ мм}$) получены кинетические данные, свидетельствующие о том, что в выбранных условиях проведения процесса при изменении температуры от 55 до 85 $^\circ\text{C}$ время до его прекращения уменьшается с 220 до 140 мин, а извлечение никеля в раствор увеличивается от 45 до 99 %.

Обработка этих данных с использованием уравнений «сжимающейся сферы», Гистлинга—Броунштейна и Казеева—Ерофеева с оценкой коэффициентов корреляции показала, что процесс протекает в кинетической области, контролируется химической реакцией и практически не тормозится диффузией через твердый слой продукта реакции. Уравнение Казеева—Ерофеева лучше других описывает полученные данные. Кажущаяся энергия активации, рассчитанная с помощью линеаризации кинетических кривых по модели «сжимающейся сферы» с использованием уравнения Аррениуса, составила $47,5 \pm 0,5 \text{ кДж/моль}$, что подтверждает протекание процесса в кинетической области, и интенсифицировать его можно повышением температуры.

При извлечении никеля сернокислыми раство-

рами из шлифотходов рений остается в кеке. Селективное отделение никеля (в количестве 60 % от общей массы шлифотходов) может существенно снизить суммарные расходы на извлечение и разделение этих металлов.

Литература/References

1. Каблов Е.Н., Бондаренко Ю.А., Колодяжный М.Ю., Сурова В.А., Нарский А.Р. Перспективы создания высокотемпературных жаропрочных сплавов на основе тугоплавких матриц и естественных композитов. *Вопросы материаловедения*. 2020. No. 4(104). С. 64–78. DOI: 10.22349/1994-6716-2020-104-4-64-78.
Kablov E.N., Bondarenko Yu.A., Kolodyazhny M.Yu., Surova V.A., NarSKIY A.R. Prospects for the creation of high-temperature heat-resistant alloys based on refractory matrices and natural composites. *Voprosy materialovedeniya*. 2020. No. 4 (104). P. 64–78 (In Russ.).
2. Петрушин Н.В., Оспенникова О.Г., Елютин Е.С. Рений в монокристаллических жаропрочных никелевых сплавах для лопаток газотурбинных двигателей. *Авиационные материалы и технологии*. 2014. No. S5. С. 5–16.
Petrushin N.V., Ospennikova O.G., Elyutin E.S. Rhenium in monocrystalline heat-resistant nickel alloys for gas turbine engine blades. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii*. 2014. No. S5. P. 5–16 (In Russ.).
3. Палант А.А., Трошкина И.Д., Чекмарев А.М., Костылев А.И. Технология рения. М.: ООО «Галлея-Принт», 2015.
Palant A.A., Troshkina I.D., Chekmarev A.M., Kostylev A.I. Rhenium technology. Moscow: LLC «Galleya-Print», 2015 (In Russ.).
4. Ryohei Yagi, Toru H. Okabe. Current status and smelting technologies of rhenium. *J. Jap. Inst. Met. Mater.* 2016. Vol. 80 (6). P. 341–349. DOI: 10.2320/jinstmet.J2016022.
5. Cheng Tingyu, Xiong Ning, Peng Kaiyuan, Yang Haibing, Yin Jingchuan. Technology of production and application of rhenium and its alloys. *Xiyu jinshu Cailiao Yu Gongcheng/Rare Metal Materials and Engineering*. 2009. Vol. 38. No. 2. P. 373–376.
6. Bryskin B.D. (Ed.). Proceedings of the International symposium on rhenium and rhenium alloys: TMS Annual Meeting, USA, Orlando (Florida), 1997.
7. Anderson C.D., Taylor P.R., Anderson C.G. Extractive metallurgy of rhenium: A review. *Miner. Metal. Process.* 2013. Vol. 30. No. 1. P. 59–73.
8. Pollock T.M., Tin S. Nickel-based superalloys for advanced turbine engine: chemistry, microstructure and properties. *J. Propuls. Power*. 2006. Vol. 22. No. 2. P. 361–374.
9. Mamo S.K., Elie M., Baron M.G., Simons A.M., Gonzalez-Rodriguez J. Leaching kinetics, separation, and recovery of rhenium and component metals from CMSX-4 superalloys using hydrometallurgical processes. *Separat. Purif. Technol.* 2019. Vol. 212. P. 150–160. DOI: 10.1016/j.seppur.2018.11.023.
10. USGS Mineral Commodity Yearbook 2021. DOI: 10.3133/mcs2021.
11. Каблов Е.Н., Карпов Ю.А., Титов В.И., Карфидова Е.Н., Кудрявцева Г.С., Гундобин Н.В. Определение рения и рутения в наноструктурированных жаропрочных никелевых сплавах для авиационно-космической техники. *Завод. лаб. Диагностика материалов*. 2014. Т. 80. No. 1. С. 6–12.
Kablov E.N., Karpov Yu.A., Titov V.I., Karfidova E.N., Kudryavtseva G.S., Gundobin N.V. Determination of rhenium and ruthenium in nanostructured heat-resistant nickel alloys for aerospace engineering. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov*. 2014. Vol. 80. No. 1. P. 6–12 (In Russ.).
12. Касиков А.Г., Петрова А.М. Рециклинг рения. М.: РИОР: ИНФРА-М, 2014.
Kasikov A.G., Petrova A.M. Rhenium recycling. Moscow: RIOR: INFRA-M, 2014 (In Russ.).
13. Яковлев М.А. Обзор способов переработки отходов ренийсодержащих сплавов. В сб.: *Тр. молодых ученых*. Владикавказ: Владикавказский науч. центр РАН, 2004. No. 1. С. 23–29.
Yakovlev M.A. Review of methods for processing waste of rhenium-containing alloys. In: *Trudy molodykh uchenykh*. Vladikavkaz: Vladikavkazskiy nauch. tsentr RAN, 2004. No. 1. P. 23–29 (In Russ.).
14. Singh Gaur R.P., Wolfe T.A., Braymiller S.A. Recycling of rhenium-containing wire scrap. *Int. J. Refract. Metal. Hard Mater.* 2015. Vol. 50. P. 79–85.
15. Srivastava R.R., Kim M.S., Lee J.C. Novel aqueous processing of the reverted turbine-blade alloy for rhenium recovery. *Ind. Eng. Chem. Res.* 2016. Vol. 55. No. 29. P. 8191–8199.
16. Mishra B., Anderson C.D., Taylor P.R., Anderson C.G., Apelian D., Blanpain B. CR3 Update: Recycling of strategic metal. *JOM*. 2012. Vol. 64. No. 4. P. 441–443.
17. Cummug M. Извлечение металлов и неорганических соединений из отходов. М.: Металлургия, 1985.
Sitting M. Metal and inorganic waste reclaiming. New Jersey: Noyes Data Corp., 1980.
18. Крейн О.Е. Отходы рассеянных редких металлов. М.: Металлургия, 1985.
Crane O.E. Waste of scattered rare metals. Moscow: Metallurgiya, 1985 (In Russ.).

19. DeBarbadillo J.J. Nickel-based superalloys: physical metallurgy of recycling. *Metall. Trans A. Phys. Metall. Mater. Sci.* 1983. Vol. 14A. No. 3. P. 329—341.
20. Srivastava R.R., Kim M.S., Lee J.C., Iha M.K., Kim B.S. Resource recycling of superalloys and hydrometallurgical challenges. *J. Mater. Sci.* 2014. Vol. 49. No. 14. P. 4671—4686.
21. Петрова А.М., Касиков А.Г. Извлечение рения из отходов обработки и эксплуатации жаропрочных никелевых сплавов. *Авиационные материалы и технологии.* 2012. No. 3 (24). С. 9—13.
Petrova A.M., Kasikov A.G. Rhenium extraction out of wastes after the treatment and service of Ni-base superalloys. *Aviatsionnyye materialy i tekhnologii.* 2012. No. 3 (24). P. 9—13 (In Russ.).
22. Guro V.P. Ammonium perrhenate purification and rhenium recovery from heat-resistant rhenium nickel superalloys. In: *Proc. of 21-st Inter. Conf. on Metallurgy and Materials — Metal 2012 (Czech Republic, Brno, 23—25 May 2012)*. URL: www.metal2014.com/files/proceedings/02/reports/479.pdf.
23. Ляпин С.Б., Штырлов П.Ю., Хайтмитов А.А., Гуро В.П., Атакузиев А.А. Получение аммония рениевокислого из отходов сплава Fe—Ni—Re. *Горный вестник Узбекистана.* 2005. No. 2 (21). С. 105—106.
Lyapin S.B., Shtyrlov P.Yu., Khaytmitov A.A., Guro V.P., Atakuziev A.A. Production of ammonium rhenium acid from Fe—Ni—Re alloy wastes. *Gornyy vestnik Uzbekistana.* 2005. No. 2 (21). P. 105—106 (In Russ.).
24. Krynitz U., Olbrich A., Kummer W., Schloh M. Method for the decomposition and recovery of metallic constituents from superalloys: Pat. 5776329 (USA). 1998.
25. Палант А.А., Левчук О.М., Брюквин В.А., Левин А.М., Парецкий В.М. Комплексная электрохимическая переработка металлических отходов ренийсодержащего жаропрочного никелевого сплава в сернокислых электролитах. *Электрометаллургия.* 2010. No. 7. С. 29—33.
Palant A.A., Levchuk O.M., Bryukvin V.A., Levin A.M., Paretskii V.M. Complex electrochemical processing of the metallic wastes from a rhenium-containing nickel superalloy in sulfuric acid electrolytes. *Russ. Metall.* 2011. Vol. 589. P. 589—593. DOI: 10.1134/S0036029511060176.
26. Левчук О.М., Левин А.М., Брюквин В.А., Трошкина И.Д. Электрохимическая переработка отходов сплава W—Re в щелочных электролитах под действием переменного тока. *Цветные металлы.* 2016. No. 6 (882). С. 80—84. DOI: 10.17580/tsm.2016.06.11.
Levchuk O.M., Levin A.M., Bryukvin V.A., Troshkina I.D. Electrochemical processing of W—Re alloy wastes in alkaline electrolytes under the action of alternating current. *Tsvetnye Metally.* 2016. No. 6 (882). P. 80—84 (In Russ.).
27. Чернышева О.В., Дробот Д.В. Варианты электрохимической переработки ренийсодержащего жаропрочного сплава. *Хим. технология.* 2017. Т. 18. No. 1. С. 36—42.
Chernyshova O.V., Drobot D.V. Alternatives of electrochemical processing of rhenium-containing heat-resistant alloy. *Khimicheskaya tekhnologiya.* 2017. No. 1. P. 36—42 (In Russ.).
28. 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. No. 10. С. 69—74. DOI: 10.17580/tsm.2017.10.08.
Agarova L.Ya., Abisheva Z.S., Kilibaeva S.K., Yakhiyeva Zh.E. Electrochemical processing of technogenic waste of rhenium-containing heat-resistant nickel alloys in sulfuric acid solutions. *Tsvetnye Metally.* 2017. No. 10. P. 69—74 (In Russ.).
29. Касиков А.Г., Петрова А.М., Багрова Е.Г. Извлечение рения из шлифотходов жаропрочных сплавов с применением жидкостной экстракции. *Цвет. металлургия.* 2009. No. 1. С. 15—20.
Kasikov A.G., Petrova A.M., Bagrova E.G. Extraction of rhenium from grinding waste of heat-resistant alloys using liquid extraction. *Tsvetnaya metallurgiya.* 2009. No. 1. P. 15—20 (In Russ.).
30. Дятлова Н.М., Темкина В.Я., Колпакова И.Д. Комплексоны. М.: Химия, 1970.
Dyatlova N.M., Temkina V.Ya., Kolpakova I.D. Complexons. Moscow: Khimiya, 1970 (In Russ.).
31. Free M.L. *Hydrometallurgy: Fundamentals and Applications.* NJ, USA: John Wiley & Sons, 2013. Vol. 1. P. 86—122.
32. Гинстлинг А.М., Броунштейн Б.И. О кинетике диффузии реакций в сферических частицах. *Журн. прикл. химии.* 1950. No. 23. С. 1249—1259.
Ginstling A.M., Brounshtein B.I. Concerning the diffusion kinetics of reactions in spherical particles. *Zhurnal prikladnoy khimii.* 1950. No. 23. P. 1249—1259 (In Russ.).