

УДК 669.849 : 669.018.44 : 669.24

<https://doi.org/10.17073/0021-3438-2023-5-25-33>

Научная статья

Research article



## Окислительное выщелачивание рения из шлифотходов ренийсодержащих суперсплавов

И.Е. Тарганов, М.А. Солодовников, И.Д. Трошкина

Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева  
125047, Россия, г. Москва, Миусская пл., 9

✉ Ирина Дмитриевна Трошкина (troshkina.i.d@muctr.ru)

**Аннотация:** В агитационном режиме исследована возможность окислительного выщелачивания рения в присутствии соляной кислоты из отходов механической обработки (шлифотходов) изделий из Re-содержащего жаропрочного сплава ЖС-32ВИ на основе никеля. Использовали фракцию шлифотходов –0,071 мм с наибольшим выходом (49,2 мас.%). Процесс извлечения рения осуществляли в двух вариантах: в первом – шлифотходы контактировали с раствором соляной кислоты при температуре ~100 °С, после охлаждения раствора выщелачивания в него добавляли раствор пероксида водорода; во втором – выщелачивание проводили с применением раствора соляной кислоты с порционным добавлением раствора пероксида водорода. Наибольшее значение степени извлечения рения (91,0 %) наблюдалось при выщелачивании в первом варианте, начальная концентрация соляной кислоты составила 8 М, мольное соотношение добавляемых реагентов –  $v(\text{HCl}) : v(\text{H}_2\text{O}_2) = 2,7 : 1,0$ . Была изучена кинетика выщелачивания никеля раствором соляной кислоты (6 М) при температуре 70 °С и соотношении фаз шлифотход : раствор, равном 1 г : 50 мл. Анализ обработки кинетических данных с использованием моделей «сжимающейся сферы», Гинстлинга–Брунштейна и Казеева–Ерофеева позволяет утверждать, что процесс выщелачивания никеля протекает в кинетической области. Исследована кинетика выщелачивания рения из твердого остатка солянокислого выщелачивания никеля из шлифотходов. Применение для обработки данных тех же кинетических моделей позволяет выделить диффузию пероксида водорода в ренийсодержащем твердом остатке как лимитирующую стадию.

**Ключевые слова:** рений, никель, суперсплавы, шлифотходы, выщелачивание, соляная кислота, окислитель, кинетика.

**Для цитирования:** Тарганов И.Е., Солодовников М.А., Трошкина И.Д. Окислительное выщелачивание рения из шлифотходов ренийсодержащих суперсплавов. *Известия вузов. Цветная металлургия*. 2023;29(5):25–33.

<https://doi.org/10.17073/0021-3438-2023-5-25-33>

## Oxidative leaching of rhenium from grinding waste of rhenium-containing superalloys

I.E. Targanov, M.A. Solodovnikov, I.D. Troshkina

Mendeleev University of Chemical Technology of Russia  
9 Miusskaya Sq., Moscow, 125047, Russia

✉ Irina D. Troshkina (troshkina.i.d@muctr.ru)

**Abstract:** The study investigated the feasibility of oxidative leaching rhenium in the presence of hydrochloric acid from machining waste (grinding waste) derived from products made of ZhS-32VI, a nickel-based heat-resistant alloy containing rhenium. This was achieved through agitation leaching process. The grinding waste fraction size of –0.071 mm, which accounted for the highest yield (49.2 wt.%), was utilized in the experiments. The rhenium leaching process was conducted in two variations: in the first option, grinding waste was mixed with a hydrochloric acid solution at ~100 °C, followed by the addition of hydrogen peroxide to the leaching solution after it had cooled; in the second option, leaching was performed using a hydrochloric acid solution with the gradual addition of hydrogen peroxide solution. The highest degree of rhenium leaching (91.0 %) was achieved in the first option. In this case, the initial concentration of hydrochloric acid was 8 M, and the

molar ratio of the added reagents was  $v(\text{HCl}):v(\text{H}_2\text{O}_2) = 2.7 : 1.0$ . The kinetics of nickel leaching using a 6 M hydrochloric acid solution at 70 °C, with a solid-to-liquid phase ratio of 1 g : 50 ml, was also examined. The analysis of the kinetic data, processed using the “contracting sphere,” Ginstling–Brounshtein, and Kazeev–Erofeev models, indicates that the nickel leaching process occurs within the kinetic region. Additionally, the kinetics of rhenium leaching from the solid residue obtained after the hydrochloric acid leaching of nickel from grinding waste was investigated. Employing the same kinetic models to analyze the data, it was determined that the limiting stage of this process involves the diffusion of hydrogen peroxide within the rhenium-containing solid residue.

**Keywords:** rhenium, nickel, superalloys, grinding waste, leaching, hydrochloric acid, oxidizing agent, kinetics.

**For citation:** Targanov I.E., Solodovnikov M.A., Troshkina I.D. Oxidative leaching of rhenium from grinding waste of rhenium-containing superalloys. *Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy*. 2023;29(5):25–33. <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2023-5-25-33>

## Введение

Ежегодно растущая мировая потребность в материалах высоких технологий, к которым относятся редкие элементы, определяет актуальность переработки вторичного сырья. Одним из таких элементов является рений. Из первичного сырья рений извлекают исключительно попутно [1; 2]. Основными природными источниками рения являются сульфидные молибденовые и медные руды, полиметалльные урановые руды и фумарольные газы вулкана Кудрявый на о. Итуруп [3]. Сроки истощения запасов рения сравнимы с таковыми для других цветных и редких металлов, ресурсы которых будут исчерпаны в ближайшие 100–110 лет [2], что делает актуальным необходимость разработки и усовершенствования технологий рециклинга рения.

Потребность рения в России, по прогнозам [4], составит 20 и 35 т/год к 2032 и 2064 гг. соответственно.

Основное потребление рения (78 %) приходится на изготовление суперсплавов для создания авиационных реактивных двигателей и турбин для выработки электроэнергии, в которых рений — важный легирующий элемент [5; 6]. Суперсплавы на основе никеля обладают высокой стойкостью к окислению и большой механической прочностью. Значительное улучшение механических свойств суперсплавов на основе никеля при высоких температурах достигнуто за счет управления структурой материала путем легирования такими элементами, как рений, рутений и гафний [7; 8]. Именно добавление Re в состав суперсплавов создает эффект твердорастворного упрочнения матрицы и повышения жаропрочности. При этом, однако, стоимость рения, добавляемого, например, в сплав CMSX-4 в количестве 3 мас.%, составляет около 60 % от общей стоимости сплава [9; 10].

В основном используются монокристаллические ренийсодержащие суперсплавы на основе никеля [6; 10–12].

Общее количество отходов ренийсодержащих жаропрочных никелевых сплавов, в основном лопатки газотурбинных двигателей, в РФ оценивалось в 25–35 т/год (2012 г.) [13]. Если принять содержание рения в отходах 3 %, то количество рения в них составляет 0,75–1,0 т/год.

Существующие технологии переработки отходов жаропрочных сплавов на никелевой основе можно разделить на две группы: пирометаллургические и гидрометаллургические [6; 14; 15]. Пирометаллургические технологии используют метод прямой переплавки отходов, а также окислительно-термические методы [16]; гидрометаллургические — электрохимический метод (анодное растворение) [12; 17] и методы, основанные на разложении отходов в растворах кислот. Выбор технологии переработки обусловлен типом сырья (кусковые детали или отходы их механической обработки — шлифотходы), а также наличием специального оборудования (вакуумных печей, электролизеров и т.д.).

Методы, основанные на разложении отходов растворами кислот, могут включать как удаление основы сплава, так и прямое окислительное выщелачивание с переводом рения в раствор. В качестве выщелачивающего агента для извлечения рения в присутствии окислителя могут быть использованы минеральные кислоты и их смеси. Достаточно эффективна азотнокислая переработка многокомпонентных сплавов [14], однако присутствие нитрат-ионов в растворах затрудняет дальнейшее сорбционное извлечение рения. В работе [18] выщелачивание рения проводили «царской водкой». При использовании серной кислоты возможно выщелачивание основы отходов — никеля [19] — с последующим добавлением окислителя для выделения рения или применяют смесь серной кислоты с окислителем (пероксидом водорода) для прямого извлечения рения [14].

Большое содержание в шлифотходах никеля и кобальта — ценных цветных металлов — обуслов-

ливаает выбор солянокислого выщелачивания при их комплексной переработке, поскольку в хлоридных средах возможно осуществить разделение этих близких по химическим свойствам элементов, используя меньшее количество операций для подготовки раствора выщелачивания [20].

Цель настоящей работы — установление закономерностей окислительного выщелачивания рения растворами соляной кислоты из шлифотходов ренийсодержащего суперсплава на основе никеля.

## Методика исследований

Объектом исследования в настоящей работе являлись шлифотходы суперсплава ЖС32-ВИ следующего элементного состава, мас. %: 1,5 Re; 9,0 Co; 8,5 W; 5,9 Al; 4,9 Cr; 4,0 Ta; 1,6 Nb; 1,0 Mo; 0,15 C; 0,02 B; 0,025 Ce, 60,0 Ni. Их фракционный состав представлен в табл. 1.

Была использована фракция шлифотходов ( $-0,071$  мм) с наибольшей массовой долей (49,2 мас. %) (см. табл. 1).

Большая удельная поверхность шлифотходов наименьшего класса крупности, имеющего больший массовый выход, предпочтительна для выбора гидрометаллургического метода переработки, в том числе основанного на разложении отходов растворами соляной кислоты в присутствии окислителя — 30 %-ного раствора  $H_2O_2$ .

Для уменьшения трения, отвода тепла и удаления отходов шлифования, при обработке заготовок применяют различные смазочно-охлаждающие жидкости. Поскольку шлифотходы могут быть загрязнены остатками этих жидкостей, в составе которых возможны гликоль, минеральные масла, смазочные присадки, поверхностно-актив-

ные вещества, а также ингибиторы коррозии, и ветошью [21], то перед проведением экспериментов шлифотходы ренийсодержащих суперсплавов очищали путем промывки горячей водой ( $\sim 90$  °С) с последующей сушкой.

Навеску шлифотхода контактировали с раствором соляной кислоты при различных соотношениях фаз твердое : жидкое в диапазоне 1 : 50÷100 (г : мл) в агитационном режиме. Скорость перемешивания  $200 \text{ мин}^{-1}$  была выбрана с учетом того, чтобы частицы шлифотходов находились во взвешенном состоянии и интенсивно перемешивались при сохранении обтекания их раствором. В зависимости от эксперимента реакцию массу подогревали и выщелачивали при температуре  $100$  °С в течение 60 мин. После охлаждения реакционной массы в нее порционно добавляли раствор пероксида водорода (*I*). Экспериментальная установка выщелачивания включала колбоподогреватель с установленной в нем трехгорлой колбой с обратным холодильником; перемешивание осуществлялось верхнеприводной мешалкой.

При проведении экспериментов без нагрева и во избежание самопроизвольного разогрева и возможного разложения пероксида водорода процесс проводили в принудительно охлаждаемой проточной водой термостатируемой ячейке с рубашкой. В охлаждаемую реакционную массу окислитель добавляли порционно, через каждый час проведения эксперимента (*II*). Процесс осуществляли при скорости перемешивания  $200 \text{ мин}^{-1}$ . Через определенные промежутки времени проведения эксперимента производили отбор проб раствора и их анализ на содержание рения фотометрическим методом с использованием роданида аммония. Концентрация соляной кислоты (с избытком не менее 30 %) была подобрана с учетом теоретического расчета по уравнениям реакций расходуемой на растворение составляющих сплав металлов кислоты с теми компонентами сплава, которые, по литературным данным, реагируют с ней.

Кинетику выщелачивания никеля из шлифотходов раствором соляной кислоты изучали в агитационном режиме в термостатируемом реакторе в течение 15 ч при температуре  $70$  °С. Навеску шлифотходов контактировали с раствором соляной кислоты (6М) при соотношении твердой и жидкой фаз, равном 1 : 50 (г : мл). Через определенные промежутки времени проводили отбор проб раствора и анализировали на содержание Ni титриметрическим методом с использованием трилона Б.

Таблица 1. Фракционный состав шлифотходов суперсплава ЖС32-ВИ

Table 1. Particle size distribution of grinding waste of ZhS32-VI superalloy

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

Кинетику выщелачивания рения из концентрата, образующегося после удаления никеля из отходов, раствором соляной кислоты и пероксида водорода изучали в агитационном режиме в принудительно охлаждаемой проточной водой термостатируемой ячейке. Навеску рениевого концентрата контактировали с раствором соляной кислоты с начальной концентрацией 2М при соотношении твердой и жидкой фаз, равном 1 : 250 (г : мл). Окислитель добавляли порциями по 1 мл каждые 30 мин. Через определенные промежутки времени проводили отбор проб раствора и анализировали их на содержание Re.

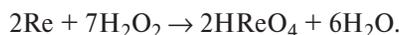
Степень насыщения раствора рением (никелем) —  $\alpha_{(Me)}$  — вычисляли по уравнению

$$\alpha_{(Me)} = C_{(Me)} V_{p-ра} / (\omega_{(Me)} m_{нав}),$$

где  $C_{(Me)}$  — концентрация металла (рения или никеля) в текущий момент времени, г/л;  $V_{p-ра}$  — объем раствора, л;  $\omega_{(Me)}$  — массовая доля металла (рения или никеля) в шлифотходах;  $m_{нав}$  — масса навески, г.

## Результаты и их обсуждение

Металлический рений реагирует с пероксидом водорода с образованием рениевой кислоты по реакции



В предварительных экспериментах было установлено, что без удаления никеля — основы суперсплава — количественно извлечь рений в раствор только раствором пероксида водорода не представляется возможным.

В табл. 2 приведены данные по окислительному выщелачиванию рения из предварительно промытых шлифотходов ренийсодержащего суперсплава в растворах соляной кислоты с

использованием пероксида водорода в качестве окислителя при различных методах и условиях выщелачивания.

Наибольшее значение степени извлечения рения наблюдается при нагреве отходов в растворе кислоты с добавлением окислителя после охлаждения смеси до комнатной температуры. По-видимому, удаление основной массы сплава предварительным нагревом в растворах соляной кислоты до 100 °С в течение 1 ч позволяет облегчить доступ окислителя к рению в сплаве.

Увеличение концентрации раствора соляной кислоты с 6М до 8М при предварительном нагреве и выдержке раствора выщелачивания приводит к росту степени извлечения рения на 7,5 % при последующем добавлении окислителя.

Зависимость степени выщелачивания никеля — основы суперсплава — от времени раствором соляной кислоты (6М) при температуре 70 °С представлена на рис. 1.

Как видно из рис. 1, равновесие наступает через ~600 мин.

Для определения лимитирующей стадии процесса выщелачивания никеля раствором со-

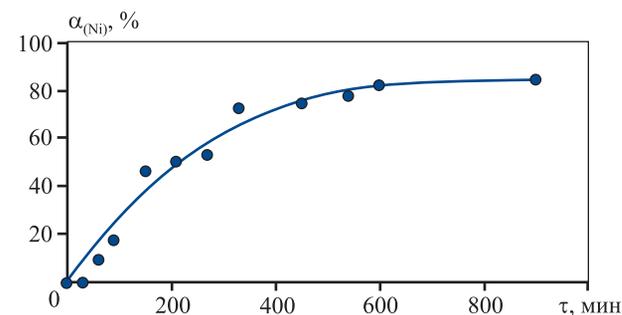


Рис. 1. Зависимость степени выщелачивания никеля солянокислым раствором (6М) при температуре 70 °С от времени

Fig. 1. Temporal variation in nickel leaching using a 6M hydrochloric acid solution at 70 °С

Таблица 2. Солянокислое окислительное выщелачивание рения

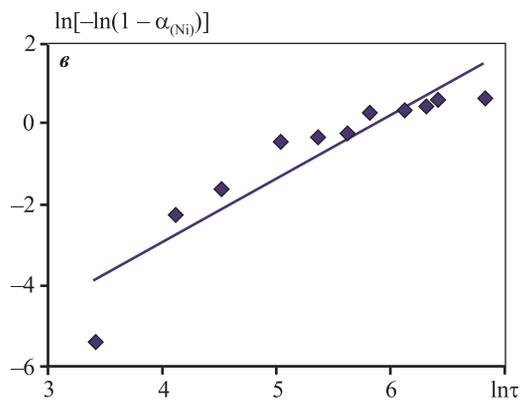
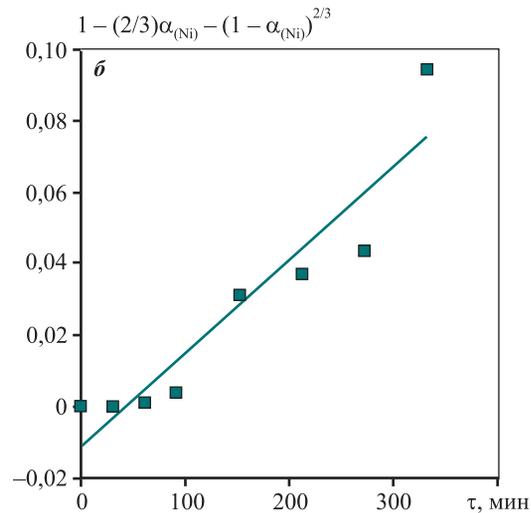
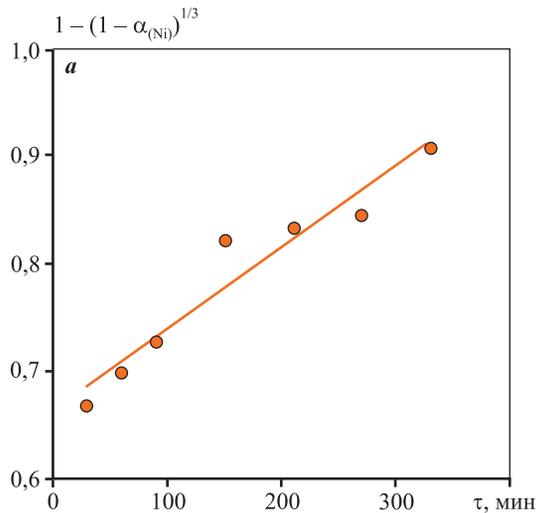
Table 2. Hydrochloric acid oxidative leaching of rhenium

Начальная концентрация HCl	Условие проведения	Мольное соотношение $v(HCl) : v(H_2O_2)$	Соотношение фаз, г : мл	$\alpha_{(Re)}$ , %
8М	I	2,7 : 1,0	1 : 130	91,0
6М	I	2,0 : 1,0	1 : 130	83,5
6М	I	1,4 : 1,0	1 : 50	71,4
6М	II	2,4 : 1,0	1 : 100	68,5
8М	II	6,6 : 1,0	1 : 50	47,0

Таблица 3. Кинетические характеристики солянокислого выщелачивания никеля из шлифотходов, полученные при использовании различных моделей

Table 3. Kinetic characteristics of hydrochloric acid leaching of nickel from grinding waste obtained using various models

Уравнение «сжимающейся сферы»		Уравнение Гинстлинга–Броунштейна		Уравнение Казеева–Ерофеева	
$1 - (1 - \alpha)^{1/3} = k\tau$		$1 - (2/3)\alpha - (1 - \alpha)^{2/3} = k\tau$		$\ln[-\ln(1 - \alpha)] = n\ln\tau + \ln k_\tau$	
$k \cdot 10^4, \text{ мин}^{-1}$	$R^2$	$k \cdot 10^4, \text{ мин}^{-1}$	$R^2$	$n$	$R^2$
8	0,933	3	0,883	1,56	0,849



**Рис. 2.** Линеаризация кинетических данных выщелачивания никеля солянокислым раствором (6М) при температуре 70 °С из шлифотходов с использованием математических моделей «сжимающейся сферы» (а), Гинстлинга–Броунштейна (б) и Казеева–Ерофеева (в)

**Fig. 2.** Linearization of the kinetic data of nickel leaching with hydrochloric acid solution (6M) at 70 °C from grinding waste using mathematical models of “contracting sphere” (a), Ginstling–Bronshtein (b) and Kazeev–Erofeev (c)

ляной кислоты кинетические данные были обработаны с привлечением кинетических и диффузионных математических моделей (рис. 2, табл. 3).

Модель «сжимающейся сферы», так называемое уравнение Грея–Веддингтона [22], описывает процессы, когда реакция протекает на поверхности сферического твердого тела, которое теряет массу и уменьшается в размере в ходе реакции, с образованием нерастворенного пористого слоя продукта. Это уравнение хорошо применимо для

процессов, протекающих в кинетической области реагирования, и имеет вид

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

где  $\alpha$  — степень извлечения, доля;  $k$  — константа скорости реакции,  $\text{мин}^{-1}$ ;  $\tau$  — время, мин.

В случае образования плотного непористого слоя продукта используют уравнение Гинстлинга–Броунштейна [20, 22]:

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

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

$$\alpha = 1 - \exp(-K\tau^n), \quad (3)$$

где  $K$  и  $n$  — кинетические параметры. Это уравнение представляет собой функцию вероятности степени превращения, как в топахимических реакциях, так и в реакциях иной природы.

В дважды логарифмированном виде уравнение (3) линеаризуется:

$$\ln[-\ln(1 - \alpha)] = n \ln \tau + \ln k_{\tau}. \quad (4)$$

Исходя из результатов математической обработки кинетических данных выщелачивания никеля из шлифотходов ренийсодержащих суперсплавов можно сделать вывод о том, что более адекватно данные линеаризуются по уравнению «сжимающейся сферы». Анализ математической обработки кинетических данных по уравнению Казеева—Ерофеева позволил определить значение показателя  $n = 1,56$ , что указывает на протекание

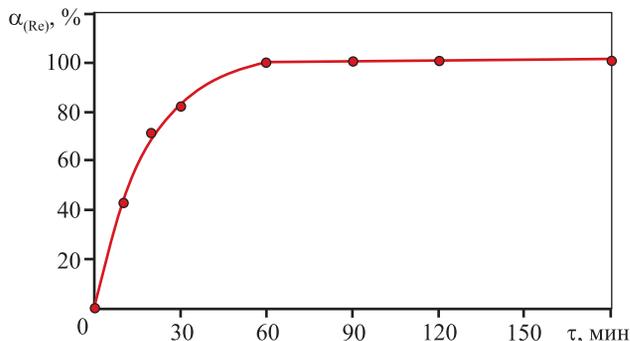


Рис. 3. Зависимость степени выщелачивания рения пероксидом водорода (30 %) в присутствии соляной кислоты (2М) от времени

Fig. 3. Temporal variation of rhenium leaching using hydrogen peroxide (30 %) in the presence of hydrochloric acid (2M)

процесса выщелачивания никеля в кинетической области реагирования.

Выщелачивание рения из концентрата, образующегося после удаления никеля — основы суперсплава, проводили с использованием раствора пе-

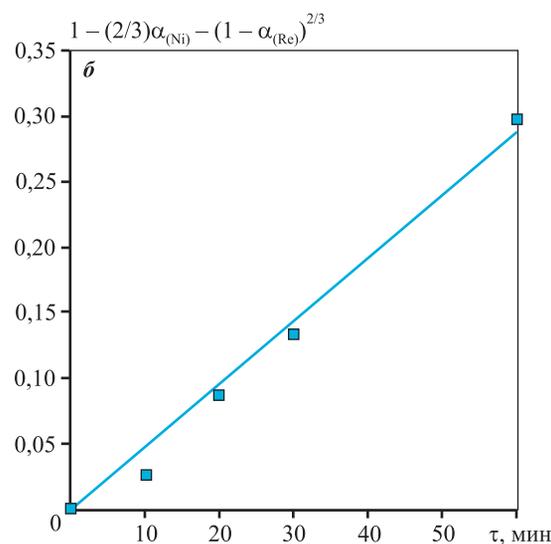
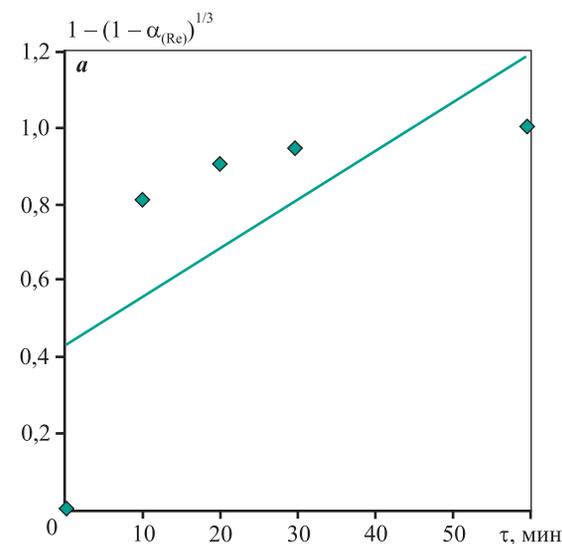


Рис. 4. Линеаризация кинетических данных выщелачивания рения из концентрата с использованием математических моделей «сжимающейся сферы» (а), Гинстлинга—Броунштейна (б) и Казеева—Ерофеева (в)

Fig. 4. Linearization of kinetic data of rhenium leaching from concentrate using “contracting sphere” (a), Ginstling-Brounshtein (b) and Kazeev—Erofeev (c) mathematical models

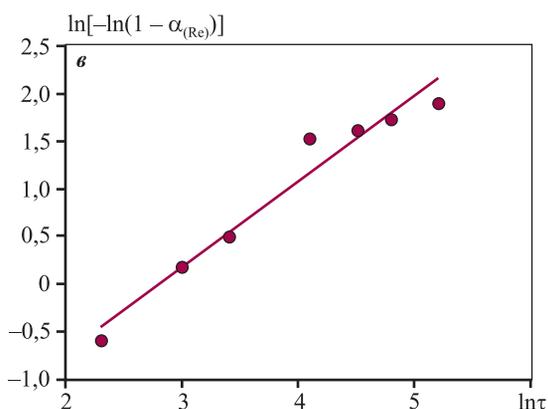


Таблица 4. Кинетические характеристики выщелачивания рения из концентрата, полученные при использовании различных моделей

Table 4. Kinetic characteristics of rhenium leaching from concentrates obtained using different models

Уравнение «сжимающейся сферы»		Уравнение Гинстлинга–Броунштейна		Уравнение Казеева–Ерофеева	
$1 - (1 - \alpha)^{1/3} = k\tau$		$1 - (2/3)\alpha - (1 - \alpha)^{2/3} = k\tau$		$\ln[-\ln(1 - \alpha)] = n\ln\tau + \ln k_\tau$	
$k \cdot 10^2, \text{ мин}^{-1}$	$R^2$	$k \cdot 10^3, \text{ мин}^{-1}$	$R^2$	$n$	$R^2$
1,2	0,488	4,7	0,986	0,9	0,958

роксида водорода в присутствии соляной кислоты. Зависимость от времени степени выщелачивания рения из концентрата при добавлении раствора соляной кислоты с концентрацией 2М и периодическом введении пероксида водорода (рис. 3) имеет характерную выпуклую форму и выходит на плато за время, равное ~1 ч.

Степень извлечения рения в раствор при этом составила  $\geq 99\%$ .

Для выявления скоростylimитирующей стадии кинетические данные были обработаны с привлечением кинетических и диффузионных математических моделей, описанных выше (рис. 4, табл. 4).

Кинетические данные по выщелачиванию рения из концентрата, образующегося после выделения никеля, с большим коэффициентом детерминации линеаризуются при использовании уравнения Гинстлинга–Броунштейна, которое описывает процессы в диффузионной области реагирования. Показатель  $n$ , значение которого получено при обработке кинетических данных по уравнению Казеева–Ерофеева, составил менее 1, что подтверждает результаты обработки по уравнению Гинстлинга–Броунштейна о лимитировании процесса диффузией.

## Заключение

В результате экспериментального исследования окислительного солянокислого выщелачивания рения из шлифотходов суперсплава (фракция –0,071 мм) установлено, что наибольшее значение степени извлечения рения ( $\alpha = 91,0\%$ ) наблюдается при проведении процесса с предварительным перемешиванием шлифотходов в 8М растворе HCl в течение 1 ч при температуре ~100 °С, последующим охлаждением реакционной смеси и порционным добавлением пероксида водорода. Показано, что повышение концентрации соляной кислоты с 6М до 8М при

проведении процесса в выбранных условиях позволяет увеличить степень извлечения рения на 7,5 %.

Обработка кинетических данных выщелачивания никеля — основы суперсплава — из шлифотходов раствором соляной кислоты (6М) при температуре 70 °С с применением математических уравнений «сжимающейся сферы», Гинстлинга–Броунштейна и Казеева–Ерофеева позволяет утверждать, что процесс протекает в кинетической области реагирования.

Анализ математической обработки кинетических данных выщелачивания рения раствором пероксида водорода в соляной кислоте (2М) из концентрата, являющегося твердым остатком солянокислого выщелачивания никеля из шлифотходов, по диффузионным и кинетическим моделям показал, что скорость выщелачивания лимитирует диффузия пероксида водорода в твердом концентрате.

Дальнейшая переработка растворов выщелачивания методом экстракции позволяет выделить перренат аммония. Порошок металлического рения, получаемый из него путем водородного восстановления, может быть использован при изготовлении сплавов.

## Список литературы/References

1. Каблов Е.Н., Бондаренко Ю.А., Колодяжный М.Ю., Сулова В.А., Нарский А.Р. Перспективы создания высокотемпературных жаропрочных сплавов на основе тугоплавких матриц и естественных композитов. *Вопросы материаловедения*. 2020;4(104):64–78. <https://doi.org/10.22349/1994-6716-2020-104-4-64-78>
- Kablov E.N., Bondarenko Yu.A., Kolodyazhnyi M.Yu., Surova V.A., Narskii A.R. Prospects for the creation of high-temperature heat-resistant alloys based on refractory matrices and natural composites. *Voprosy materialovedeniya*. 2020;4 (104):64–78. (In Russ.). <https://doi.org/10.22349/1994-6716-2020-104-4-64-78>

2. Палант А.А., Трошкина И.Д., Чекмарев А.М., Костылев А.И. Технология рения. М.: ООО «Галлея-Принт», 2015. 329 с.
3. Знаменский В.С., Коржинский М.А., Штейнберг Г.С., Ткаченко С.И., Якушев А.И., Лапутина И.П., Брызгалов И.А., Самотоин Н.Д., Магазина Л.О., Кузьмина О.В., Органова Н.И., Рассулов В.А., Чаплыгин И.В. Рений,  $\text{ReS}_2$  — природный дисульфид рения из fumarol вулкана Кудрявый (о. Итуруп, Курильские острова). *Записки Российского минералогического общества*. 2005;134(5):32–39. Znamenskii V.S., Korzhinskii M.A., Shteinberg G.S., Tkachenko S.I., Yakushev A.I., Laputina I.P., Bryzgalov I.A., Samotoin N.D., Magazina L.O., Kuz'mina O.V., Organova N.I., Rassulov V.A., Chaplygin I.V. Rheniite,  $\text{ReS}_2$ , the natural rhenium disulfide from fumaroles of Kudryavy volcano (Iturup isl., Kurily islands). *Zapiski Rossiyskogo Mineralogicheskogo Obshchestva*. 2005;134(5):32–39. (In Russ.).
4. Левченко Е.Н., Ключарев Д.С. Нетрадиционные источники критических редких металлов. *Труды науч.-практ. конференции «Минерально-сырьевая база металлов высоких технологий. Освоение, воспроизводство, использование»* (Москва, 3–4 дек. 2019 г.). М.: ФГБУ «ВИМС», 2020. С. 116–127.
5. Nowotnik A. Nickel-based superalloys (Reference module in materials science and materials engineering). 2016. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.02574-1>
6. Yagi R., Okabe T. Current status of recycling of rhenium and process technologies. *Journal of MMIJ*. 2016;132: 114–122. <https://doi.org/10.2473/journalofmmij.132.114>
7. Polyak D.E. USGS metal prices in the United States through 2010: Rhenium. U.S. Geological Survey, Washington DC, 2013. P. 152–154.
8. Koizumi Y., Jianxin Z., Kobayashi T., Yokokawa T., Harada H., Aoki Y., Arai M. Development of next generation Ni-base single crystal superalloys containing ruthenium. *Journal of the Japan Institute of Metals and Materials*. 2003;67(9): 468–471. <https://doi.org/10.2320/jinstmet1952.67.9>
9. Srivastava R.R., Kim M.S., Lee J.C., Jha M.K., Kim B.S. Resource recycling of superalloys and hydrometallurgical challenges. *Journal of Materials Science*. 2014;49: 4671–4686. <http://doi.org/10.1007/s10853-014-8219-y>
10. Wang X.G., Liu J.L., Jin T., Sun X.F. The effects of ruthenium additions on tensile deformation mechanisms of single crystal superalloys at different temperatures. *Materials and Design*. 2014;63:286–293. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.06.009>
11. Latief F.H., Kakehi K. Effects of Re content and crystallographic orientation on creep behavior of aluminized Ni-base single crystal superalloys. *Materials and Design*. 2013;49:485–492. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.01.022>
12. Байконуров Е.Г., Усольцева Г.А., Чернышова О.В., Дробот Д.В. Влияние технологических параметров на процесс электрохимической переработки ренийсодержащего жаропрочного сплава. *Цветные металлы*. 2017;10:56–60. <https://doi.org/10.17580/tsm.2017.08.08> Baikonurov E.G., Usol'tseva G.A., Chernyshova O.V., Drobot D.V. The effect of technological parameters on electrochemical processing of rhenium-containing heat-resistant alloy. *Non-ferrous metals*. 2017;10:56–60. (In Russ.). <https://doi.org/10.17580/tsm.2017.08.08>
13. Петрова А.М., Касиков А.Г. Извлечение рения из отходов обработки и эксплуатации жаропрочных никелевых суперсплавов. *Авиационные материалы и технологии*. 2012;3:9–13. Petrova A.M., Kasikov A.G. Extraction of rhenium from waste processing and operation of heat-resistant nickel superalloys. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii*. 2012;3:9–13. (In Russ.).
14. Касиков А.Г., Петрова А.М. Рециклинг рения. М.: РИОР: ИНФРА-М, 2014. 163 с.
15. Singh Gaur R.P., Wolfe T.A., Braymiller S.A. Recycling of rhenium-containing wire scrap. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. 2015; 50:79–85. <http://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2014.11.003>
16. Anderson C.D., Taylor P.R., Anderson C.G. Extractive metallurgy of rhenium: A review. *Minerals and Metallurgical Processing*. 2013;30(1):59–73. <http://doi.org/10.1007/BF03402342>
17. Agapova L.Ya., Kilibayeva S.K., Zagorodnyaya A.N. Electrochemical processing of metal wastes of rhenium-containing heat-resistant nickel alloys. *Solid State Phenomena*. 2021;316:631–636. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.316.631>
18. Mamo S., Elie M., Baron M., Simons A., Gonzalez-Rodriguez J. Leaching kinetics, separation, and recovery of rhenium and component metals from CMSX-4 superalloys using hydrometallurgical processes. *Separation and Purification Technology*. 2019;212:150–160. <https://doi.org/10.1016/J.SEPUR.2018.11.023>
19. Тарганов И.Е., Трошкина И.Д. Кинетика серно-кислотного выщелачивания никеля из шлифотходов ренийсодержащих суперсплавов. *Известия вузов. Цветная металлургия*. 2021;27(4):24–31. <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2021-4-24-31> Targanov I.E., Troshkina I.D. Kinetics of sulfuric acid leaching of nickel from grinding waste of rhenium-

- containing superalloys. *Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy*. 2021;27(4):24–31. (In Russ.).  
<https://doi.org/10.17073/0021-3438-2021-4-24-31>
20. Zante G., Boltoeva M., Masmoudi A., Barillon R., Trébouet D. Selective separation of cobalt and nickel using a stable supported ionic liquid membrane. *Separation and Purification Technology*. 2020;252:117477.  
<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.117477>.  
 hal-03419681
21. Free M.L. *Hydrometallurgy: Fundamentals and applications*. New Jersey, USA: John Wiley & Sons. 2013, 444 p.
22. Гинстлинг А.М., Броунштейн Б.И. О кинетике диффузии реакций в сферических частицах. *Журнал прикладной химии*. 1950;23:1249–1259.  
 Ginstling A.M., Brounshtein B.I. Concerning the diffusion kinetics of reactions in spherical particles. *Zhurnal prikladnoi khimii*. 1950;23:1249–1259. (In Russ.).

## Информация об авторах

**Игорь Евгеньевич Тарганов** – аспирант кафедры технологии редких элементов и наноматериалов (ТРЭН) Российского химико-технологического университета (РХТУ) им. Д.И. Менделеева.  
<https://orcid.org/0000-0001-8354-0018>  
 E-mail: [targanov.igor@yandex.ru](mailto:targanov.igor@yandex.ru)

**Максим Александрович Солодовников** – студент кафедры ТРЭН РХТУ им. Д.И. Менделеева.  
<https://orcid.org/0009-0009-3497-160X>  
 E-mail: [solodovnikovmaksim1@gmail.ru](mailto:solodovnikovmaksim1@gmail.ru)

**Ирина Дмитриевна Трошкина** – д.т.н., профессор кафедры ТРЭН РХТУ им. Д.И. Менделеева.  
<https://orcid.org/0000-0002-5523-0247>  
 E-mail: [troshkina.i.d@muctr.ru](mailto:troshkina.i.d@muctr.ru)

## Information about the authors

**Igor E. Targanov** – Postgraduate Student of the Department of Technology of Rare Elements and Nanomaterials (TREN), Mendeleev University of Chemical Technology of Russia (MUCTR).  
<https://orcid.org/0000-0001-8354-0018>  
 E-mail: [targanov.igor@yandex.ru](mailto:targanov.igor@yandex.ru)

**Maksim A. Solodovnikov** – Student of the Department of TREN, MUCTR.  
<https://orcid.org/0009-0009-3497-160X>  
 E-mail: [solodovnikovmaksim1@gmail.ru](mailto:solodovnikovmaksim1@gmail.ru)

**Irina D. Troshkina** – Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department of TREN, MUCTR.  
<https://orcid.org/0000-0002-5523-0247>  
 E-mail: [troshkina.i.d@muctr.ru](mailto:troshkina.i.d@muctr.ru)

## Вклад авторов

**И.Е. Тарганов** – проведение экспериментов, участие в обсуждении результатов, написание статьи.

**М.А. Солодовников** – проведение анализов проб методами фотометрии и титриметрии, участие в обсуждении результатов.

**И.Д. Трошкина** – определение цели работы, участие в обсуждении результатов, редакция статьи.

## Contribution of the authors

**I.E. Targanov** – conducted experiments, contributed to the discussion of the results, authored the manuscript.

**M.A. Solodovnikov** – analyzed samples through photometric and titrimetric methods, contributed to the discussion of the results.

**I.D. Troshkina** – formulated the research objectives, contributed to the discussion of the results, revised the manuscript.

*Статья поступила в редакцию 27.04.2023, доработана 30.07.2023, подписана в печать 02.08.2023*

*The article was submitted 27.04.2023, revised 30.07.2023, accepted for publication 02.08.2023*