

УДК 544.653.2

## ПОЛУЧЕНИЕ ПАРАВОЛЬФРАМАТА АММОНИЯ В ПРОЦЕССЕ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ОТХОДОВ СПЛАВОВ ВОЛЬФРАМ-РЕНИЙ В РАСТВОРАХ КАРБОНАТА АММОНИЯ<sup>1</sup>

©2024 г. О.Г. Кузнецова, А.М. Левин, В.Г. Леонтьев, М.А. Севостьянов, А.О. Больших, О.М. Левчук

*ФГБУН Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, Москва  
E-mail: otyakolya@mail.ru*

*Поступила в редакцию 3 июля 2023 г.*

*После доработки 29 сентября 2023 г. принята к публикации 20 октября 2023 г.*

Методом линейной вольтамперметрии в потенциодинамическом режиме исследовано электрохимическое поведение рения, а также сплавов ВР-5 (мас. %: W 95, Re 5) и ВР-20 (мас. %: W 80, Re 20) в растворах карбоната аммония (0,5–1,5 моль/л). Выявлено, что при увеличении содержания рения в сплаве снижается величина максимальной анодной плотности тока, при этом рост концентрации карбоната аммония в электролите приводит к существенной интенсификации процесса окисления сплавов. Определены условия максимальной скорости растворения сплава ВР-5 под действием постоянного электрического тока, обеспечивающие выход сплава по току ~100%. Представлен материальный баланс процесса получения паравольфрамата аммония путем электрохимического растворения отходов сплава ВР-5, последующего упаривания электролита и кристаллизации соответствующей соли.

*Ключевые слова: паравольфрамат аммония; сплав вольфрам-рений; вольфрам; рений; электролиз; анодное растворение; карбонат аммония.*

Необходимый для успешного развития промышленности Российской Федерации рост производства стратегически важных металлов — рения и вольфрама может быть реализован за счет вовлечения в переработку широкого спектра техногенных отходов, а также созданием технологий, обеспечивающих повышение степени извлечения ценных компонентов, упрощение и минимизацию числа производственных операций при максимально бережном природоиспользовании [1–4]. В настоящее время наибольшая степень рециркуляции рения и вольфрама достигается благодаря переработке жаропрочных никелевых, а также твердых и тяжелых вольфрамсодержащих сплавов [5–7]. При этом получение рения из подобного техногенного сырья может быть увеличено более чем на 80% [1], в том числе путем вовлечения в переработку двухкомпонентных ренийсодержащих сплавов. Производство

изделий из сплавов W-Re и Mo-Re составляет ~10% годового мирового потребления рения и сопровождается значительным количеством скрапа [5, 8, 9]. Отметим также, что сплавы W-Re, в которых может содержаться до 26% рения [8], следует рассматривать как весьма богатый источник вторичного рения.

Переработка сплавов W-Re пирометаллургическими методами может быть основана на разной летучести оксидов рения и вольфрама, на сплавлении их со щелочами, обжиге с известью и электролизе расплавленных солей, однако эти методы связаны со сложностью аппаратного оформления, энергоемкостью технологического процесса, а также повышенной экологической опасностью [3, 4, 8, 9]. В то же время наиболее высокая эффективность рециклирования рения достигается при использовании гидрометаллургических методов [8].

Для увеличения степени извлечения ценных компонентов, упрощения процесса переработки и повышения экологической безопасности наиболее перспективным для трудноизмельчаемых отходов сплавов W-Re пред-

<sup>1</sup>Работа выполнена по государственному заданию № 075-00716-23-00.

ставляется электрогидрометаллургический метод, позволяющий осуществлять растворение техногенного сырья широкого спектра крупности (лом, обрезь, проволока, кусковые отходы и др.) без применения агрессивных реагентов [3, 4, 10—12]. При традиционном применении гидроксидов и карбонатов щелочных металлов для электрохимического растворения вольфрама, рения, а также сплавов на их основе обеспечиваются высокие скорости, но только в условиях усложнения процесса переработки электролита, в том числе за счет организации гидрометаллургической конверсии солей вольфрама и рения в аммонийные. Это приводит к многостадийности извлечения данных металлов из раствора в товарный продукт и усложнению получения качественных продуктов [3, 4].

В случае применения аммиачных растворов для электрохимического растворения металлических вольфрама и рения при упаривании электролита можно получать качественный паравольфрамат (ПВА) или перренат (ПРА) аммония [3, 4, 13], которые являются конечными продуктами большинства технологических схем и основными прекурсорами для получения этих металлов. Важно отметить, что растворы гидроксида аммония характеризуются низкой электропроводностью, что требует введения в состав электролита дополнительных компонентов, например аммонийных солей вольфрама или рения, хлорида аммония и др. [3, 4]. Среди добавок, повышающих электропроводность аммиачного электролита, предпочтительны те, которые имеют минимальную стоимость, а также не вносят дополнительных примесей в конечный продукт. В работе [14] разработана технологическая схема электрохимического способа переработки отходов вольфрама с применением нитрата аммония в качестве добавки к аммиачному электролиту. В данной схеме получают раствор вольфрамата аммония, а далее при упаривании и кристаллизации — ПВА. Однако известно, что разложение нитрата аммония (аммиачная селитра) происходит при температуре ~210 °С, что взрыво- и пожароопасно [15].

В настоящей работе рассматривается возможность применения аммиачно-карбонатных растворов для электрохимической переработки сплавов W-Re, содержащих 5—20 мас. % Re.

Из обзора литературных данных следует, что применение аммиачно-карбонатных растворов в процессе электрохимической переработки отходов сплавов W-Re способствует увеличению экологической безопасности производства, а также может сократить число технологических операций при получении товарных продуктов. Преимущества использования аммиачно-карбонатных растворов при электрохимическом растворении тяжелых и твердых сплавов на основе вольфрама показано в работах [16, 17]. При переработке отходов сплавов W-Re применение указанных электролитов может обеспечить не только высокую скорость перевода вольфрама и рения в раствор, но и безопасное получение аммонийных солей вольфрама путем упаривания электролита.

В настоящей работе исследовалось анодное поведение рения и ренийсодержащих сплавов на основе вольфрама (на примере сплавов типа ВР-5 и ВР-20) в растворах карбоната аммония, а также изучался процесс электрохимической переработки отходов сплавов W-Re с отделением вольфрама от рения в форме ПВА.

**Материалы и методика эксперимента.** Анодное поведение сплавов ВР-5, ВР-20 (мас. %: W 95, Re 5 и W 80, Re 20 соответственно), а также рения чистотой 99,9 мас. % было изучено методом линейной вольтамперметрии в потенциодинамическом режиме с помощью потенциостата IPC-Pro. Сплавы W-Re и рений использовали в качестве рабочего электрода. Измерения выполняли относительно хлорсеребряного электрода сравнения с платиновым противоэлектродом. Скорость изменения потенциала составляла 1 мВ/с. Исследования проводили в растворах карбоната аммония 0,5—1,5 моль/л (далее — М). Температура раствора составляла 20 °С, ее поддерживали с помощью термостата ТW2-02 с точностью 0,1 °С

Исследование скорости растворения отходов сплава ВР-5, его выхода по току и удельного расхода электроэнергии в зависимости от плотности тока проводили в гальваностатическом режиме в растворе карбоната аммония 1,0 М с использованием стеклографитового противоэлектрода. Скорость растворения сплава, а также выход по току определяли по убыли его массы. При этом оценку скорости растворения отходов сплава ВР-5 проводили на основании геометрической пло-

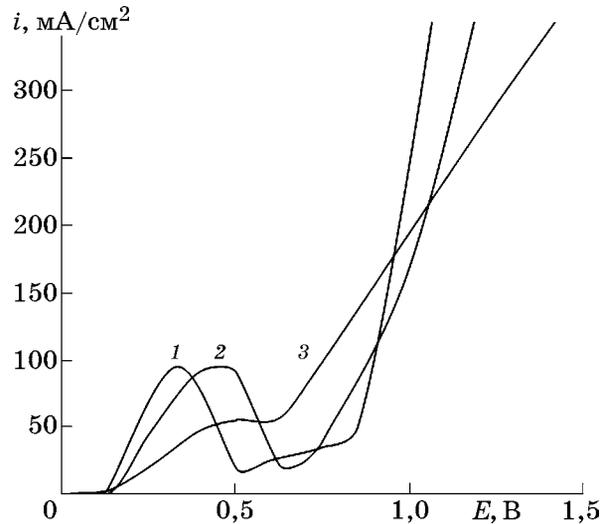
пачди «жгута», изготовленного из проволочных отходов сплава и используемого в качестве анода.

Электрохимическое растворение отходов сплава ВР-5 под действием постоянного тока осуществляли при плотности тока  $600 \text{ А/см}^2$  в накопительном режиме до начала кристаллизации осадка на дне электролизера. Постоянство объема электролита обеспечивалось введением раствора карбоната аммония концентрацией  $1,0 \text{ М}$ . В процессе растворения отходов наблюдалось образование анодного шлама из опадающих с электродов неокисленных частиц проволоки. При насыщении электролита вольфраматом и перренатом аммония раствор отфильтровывали от шлама, упаривали при  $90 \text{ }^\circ\text{С}$  и охлаждали при комнатной температуре при перемешивании магнитной мешалкой. Процесс сопровождался кристаллизацией солевого осадка. Солевой осадок отфильтровывали, промывали дистиллированной водой и высушивали при  $40\text{--}50 \text{ }^\circ\text{С}$ .

Содержание вольфрама и рения в электролите, маточном растворе кристаллизации солевого осадка и промывных водах определяли методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индукционной плазмой (спектрометр Optima 5300 DV). Содержание металлов в солевом осадке определяли методом рентгенофлуоресцентного анализа с использованием волнодисперсного спектрометра последовательного типа Brukers8 Tiger (серия 2).

Солевой осадок исследовали методом синхронного дифференциально-термического (далее ДТА) и термогравиметрического (далее ТГ) анализов с использованием установки STA 409 PC NETZSCH. Исследование образцов навеской  $150\text{--}250 \text{ мг}$  проводили в алуновом ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) тиглях. Опыты вели в потоке воздуха с расходом  $50 \text{ мл/мин}$ , обеспечивая окислительную атмосферу в печи. Во всех опытах нагрев проводили от комнатной температуры до  $1000 \text{ }^\circ\text{С}$  со скоростью  $10 \text{ }^\circ\text{С/мин}$ .

**Результаты эксперимента и их обсуждение.** На фиг. 1 представлены анодные поляризационные кривые рения в растворах карбоната аммония. Процесс анодного окисления металла начинается при потенциале около  $+0,12 \text{ В}$ . При концентрации карбоната аммония в электролите  $0,5 \text{ М}$  на анодной поляризационной кривой рения (фиг. 1, кри-

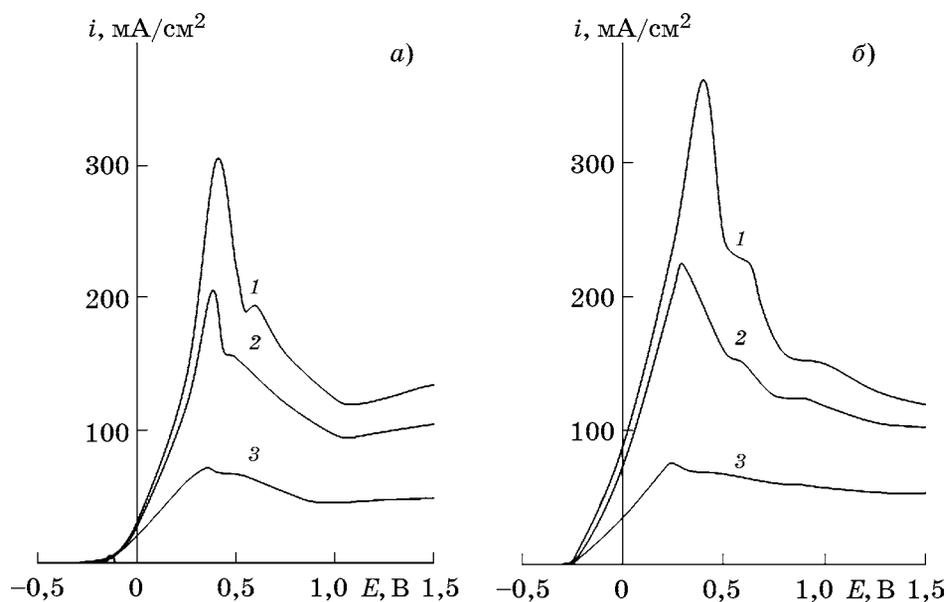


Фиг. 1 Анодные поляризационные кривые рения в растворах карбоната аммония  $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$  концентрацией: 1 —  $1,5 \text{ М}$ ; 2 —  $1,0 \text{ М}$ ; 3 —  $0,5 \text{ М}$

вая 3) наблюдается слабо выраженный максимум анодной плотности тока ( $i_{\text{max}}$ ), равный  $\sim 50 \text{ mA/cm}^2$ , отвечающий значению потенциала электрода  $+0,5 \text{ В}$  и связанный, по-видимому, с окислением рения и его переходом в раствор в виде перренат-иона [4]. После достижения максимальной плотности тока рост потенциала электрода в электроположительную область вызывает незначительное развитие пассивационных процессов. При значениях потенциала более  $+0,6 \text{ В}$  окисление рения и его переход в раствор сопровождаются выделением кислорода.

Увеличение концентрации карбоната аммония от  $0,5 \text{ М}$  до  $1,5 \text{ М}$  приводит к росту величины  $i_{\text{max}}$  до  $\sim 100 \text{ mA/cm}^2$  (фиг. 1, кривая 1) и сдвигу отвечающего ей потенциала электрода в более электроотрицательную область. При этом наблюдается более глубокая пассивация рения с расширением пассивной области до интервала от  $+0,5$  до  $+0,7 \text{ В}$ , а также сдвиг потенциала начала процесса выделения кислорода в более электроположительную область.

На фиг. 2, а представлены анодные поляризационные кривые сплава ВР-20 в растворах карбоната аммония ( $0,5\text{--}1,5 \text{ М}$ ). Видно, что процесс анодного окисления сплава ВР-20 начинается при потенциале около  $-0,25 \text{ В}$  и ускоряется с увеличением концентрации карбоната аммония до величины плотности тока  $i_{\text{max}} \approx 300 \text{ mA/cm}^2$  при анодном потенциале  $\sim +0,4 \text{ В}$  (фиг. 2, а, кривая 1). Близкие закономерности наблюдались



Фиг. 2 Анодные поляризационные кривые сплавов ВР-20 (а) и ВР-5 (б) в растворах карбоната аммония  $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$  концентрацией: 1 — 1,5 М; 2 — 1,0 М; 3 — 0,5 М

и для индивидуального вольфрама [16], однако в отличие от последнего присутствие рения в сплаве вызывает протекание пассивационных процессов при дальнейшем сдвиге потенциала электрода в электроположительную область, а также появление второго максимума в интервале потенциалов от +0,5 до +0,6 В.

На фиг. 2, б представлены анодные поляризационные кривые сплава ВР-5 в растворах карбоната аммония (0,5—1,5 М). Видно сходство кривых с таковыми для сплава ВР-20 (см. фиг. 2, а). При этом увеличение содержания вольфрама с 80 мас.% в сплаве ВР-20 до 95 мас.% в сплаве ВР-5 и соответственно снижение содержания рения с 20 до 5 мас.% приводят к росту максимальной анодной плотности тока первого пика (при потенциале  $\sim +0,4$  В) и сглаживанию второго пика (при потенциале  $\sim +0,6$  В), который принимает вид «плато» или «плеча». Полученные результаты в сопоставлении с данными [16] позволяют предположить, что начальный участок анодных кривых сплавов W-Re до первого максимума (в интервале потенциалов от  $-0,25$  до  $+0,4$  В) определяется преимущественным окислением вольфрама, при этом второй пик может быть связан с преимущественным окислением рения.

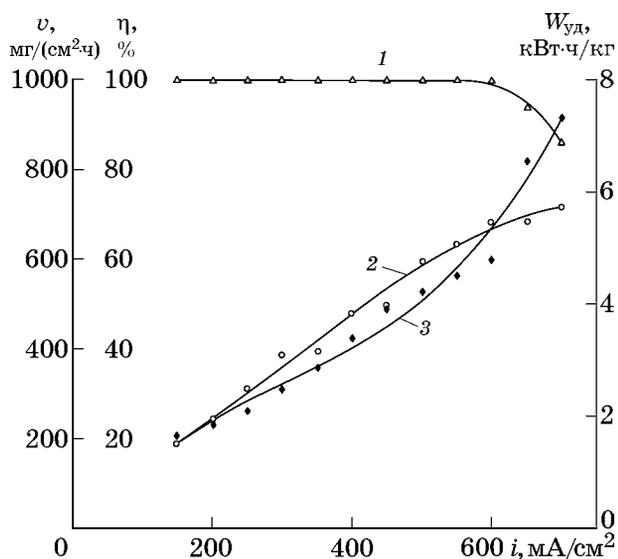
Таким образом, по результатам проведенных исследований процесса анодной поляризации сплавов W-Re с содержанием рения от 5 до 20 мас.% в растворах карбоната ам-

мония выявлено, что при увеличении концентрации последнего с 0,5 до 1,5 М пятикратно интенсифицируется растворение сплавов. При этом увеличение содержания рения в сплаве W-Re приводит к снижению максимальной анодной плотности тока сплава не более чем на 15%.

Полученные данные показывают перспективу электрохимической переработки отходов сплавов W-Re в растворах карбоната аммония со стабильными скоростными показателями, которые несущественно зависят от содержания рения.

Исследование процесса электрохимического растворения отходов сплава ВР-5 проводили при концентрации карбоната аммония 1,0 М, которая наряду с обеспечением достаточной электропроводности электролита позволяет достигать высоких концентраций вольфрама и рения в растворе [16].

На фиг. 3 представлено влияние плотности постоянного тока на выход по току сплава ВР-5 (кривая 1), скорость его растворения (кривая 2) и удельный расход электроэнергии (кривая 3) в 1,0 М растворе карбоната аммония. Видно, что с увеличением плотности тока от 150 до 700  $\text{mA}/\text{cm}^2$  скорость растворения отходов сплава ВР-5 значительно возрастает и достигает 715  $\text{mg}/(\text{cm}^2 \cdot \text{ч})$ . При этом наблюдается существенное увеличение расхода электроэнергии. Выход сплава по току составляет около 100% в интервале плотностей тока от 150 до 600  $\text{mA}/\text{cm}^2$ ; при дальнейшем повышении плотности тока до



Фиг. 3 Влияние плотности постоянного тока на выход по току  $\eta$  сплава ВР-5 (1), скорость  $v$  его растворения (2) и удельный расход электроэнергии  $W_{уд}$  (3) в 1,0 М растворе карбоната аммония

700 мА/см<sup>2</sup> наблюдается снижение выхода по току до величины ~85%. Таким образом, максимальной скоростью процесса электрохимического растворения сплава ВР-5, обеспечивающей его выход ~100%, является величина 600 мА/см<sup>2</sup> при удельном расходе электроэнергии ~5 кВт·ч/кг.

Полученные данные были использованы для исследования процесса электрохимического растворения отходов сплава ВР-5 в накопительном режиме с дальнейшей переработкой электролита. Процесс проводили до насыщения электролита в гальваностатическом режиме при плотности тока 600 мА/см<sup>2</sup> и концентрации карбоната аммония 1,0 М. Объем электролита составлял 200 мл.

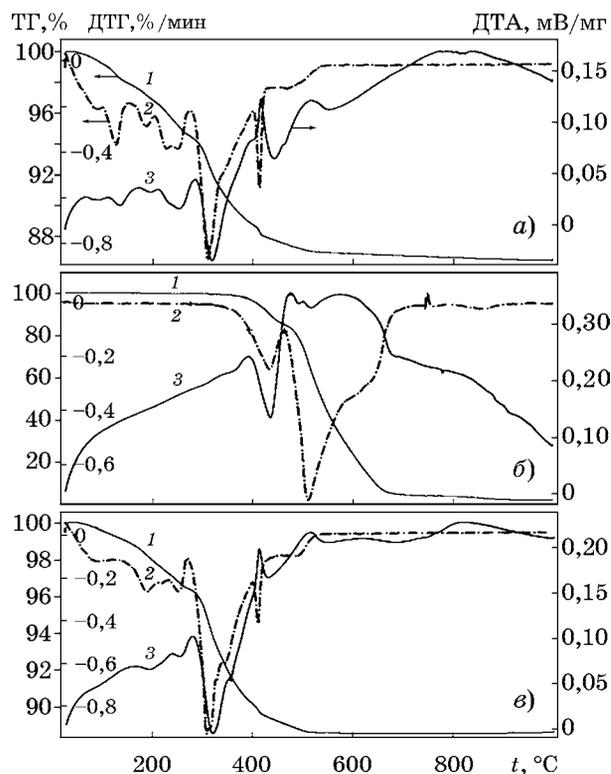
Была достигнута концентрация вольфрама и рения в электролите 83,0 и 4,35 г/л соответственно. В процессе электролиза наблюдалось осыпание мелких частиц проволоки, которые были отделены от электролита фильтрацией. После упаривания до 50 мл и полного отсутствия запаха аммиака (рН 7—7,2) электролит охлаждали с применением магнитной мешалки для предотвращения прилипания кристаллов солевого осадка ко дну стакана. Солевой осадок промывали декантацией, отфильтровывали на бумажном фильтре и высушивали.

Маточный раствор, образованный при кристаллизации солевого осадка, а также промывные воды солевого осадка исследовали на содержание вольфрама и рения. Было

установлено концентрирование рения в маточном растворе (7,2 г/л) при остаточной концентрации вольфрама 9,5 г/л. Степень извлечения вольфрама из сплава в маточный раствор составила 5,2%.

Согласно данным [4, 18] растворимость ПРА в воде при 30 °С значительно превышает таковую для ПВА. Таким образом, можно предположить, что солевой осадок представляет собой ПВА с минимальной примесью рения в виде ПРА. Для проверки этого проведены исследования термического разложения методом ДТА и ТГ солевого осадка, а также для сравнения ПВА квалификации х.ч. и ПРА марки АР-0 (фиг. 4). Следует отметить, что применяемый метод позволяет определить присутствие рения в металлических сплавах на основе вольфрама [8].

На фиг. 4, а представлены результаты ТГ анализа ПВА в токе воздуха. Представленные зависимости показывают, что процесс разложения ПВА протекает в несколько стадий и сопровождается как эндотермическими, так и экзотермическими эффектами, что согласуется с результатами работы [19]. Пер-



Фиг. 4. Синхронные графики зависимости изменения массы образца (1), скорости изменения массы образца (2) и сигнала ДТА (3) от температуры в токе воздуха. Данные для образцов: а — ПВА; б — ПРА; в — солевой осадок. Нагрев до 1000 °С со скоростью 10 °С/мин

вой стадией можно считать процесс испарения воды с максимумом скорости убыли массы и эндотермическим эффектом в районе 100 °С, а также выделение в газовую фазу кристаллизационной воды с эндотермическими тепловыми эффектами. Вторая стадия разложения начинается при температурах выше 290 °С и сопровождается большим эндотермическим эффектом с убылью массы на 5,74%, а также пиком скорости убыли массы при 311 °С (см. фиг. 4, а, кривая 2), пиком поглощения теплоты при 313 °С (кривая 3) и заканчивается при температуре 400 °С. На этой стадии происходит разложение образца с выделением внутримолекулярной воды и частичным выделением аммиака. При дальнейшем нагревании наблюдались третья и четвертая стадии процесса декомпозиции ПВА, сопровождающиеся двумя экзотермическими пиками при температурах 417 и 515 °С при уменьшении массы образца соответственно на 1,06 и 0,85%. На этих стадиях происходит выделение аммиака и его окисление кислородом воздуха или оксидом вольфрама (горение или автогенный процесс). Согласно данным [19] наличие четвертой стадии связано с образованием гексагональных кристаллов  $h\text{-WO}_3$ , удерживающих в своей решетке одну молекулу аммиака до температур 480—600 °С. Остаточная масса образца составила 86,4%, что отвечает содержанию оксида вольфрама.

На фиг. 4, б представлены результаты исследования процесса термического разложения ПРА в токе воздуха. Основная потеря массы порошка ПРА протекает в интервале температур 320—675 °С, потеря массы составляет 100% (см. фиг. 4, б, кривая 1). Полученные зависимости показывают, что процесс термического разложения ПРА проходит в две стадии. Пик первой стадии при температуре 437 °С сопровождается эндотермическим эффектом и потеря массы при окончании первой стадии составляет примерно 13%. Последнее может соответствовать потере молекулы аммиака и атома кислорода. При этом происходит частичная возгонка летучих оксидов рения [8]. Вторая стадия разложения начинается вслед за первой и сопровождается экзотермическим эффектом с пиком при температуре 477 °С. При указанных температурах происходит преимущественное образование летучих оксидов рения и их возгонка. Взаимодействие летучих ок-

сидов рения и аммиака приводит к экзотермическому эффекту. Дальнейшее повышение температуры до 700 °С вызывает разложение всего образца ПРА за счет полной возгонки  $\text{Re}_2\text{O}_7$  (см. фиг. 4, б, кривая 1).

Образцы солевого осадка, полученного в результате упаривания электролита, исследовались аналогично образцам ПВА. На фиг. 4, в представлены результаты синхронного ДТА и ТГ анализов солевого осадка в токе воздуха. Температуры пиков, температурные интервалы отдельных стадий, тепловые эффекты на этих стадиях, а также остаточные массы имеют лишь незначительные отклонения от данных для ПВА квалификации х.ч. (фиг. 4, а), что, по-видимому, обусловлено особенностями процесса кристаллизации солевого осадка и различием в количестве кристаллизационной воды в образцах (остаточная масса образца солевого осадка составила 88,6%).

Сравнение температурных зависимостей ТГ-ДТА образцов солевого осадка (фиг. 4, в) и ПРА (фиг. 4, б) показало отсутствие характерных пиков разложения ПРА на графиках для солевого осадка. На этом основании можно полагать, что в последнем присутствует лишь следовое содержание ПРА. Полученные результаты были подтверждены методом рентгенофлуоресцентного анализа. Установлено, что содержание рения в солевом остатке составило 0,043 мас. %.

В таблице представлен материальный баланс процесса электрохимической переработки отходов сплава ВР-5 в растворе карбоната аммония. Видно, что в результате электрохимического растворения сплава и последующей переработки электролита степень извлечения вольфрама в ПВА составила ~85%. При этом рений был сконцентрирован в маточном растворе с близкой величиной степени извлечения. Показатели процесса могут быть повышены при возвращении анодной осыпи в процесс растворения, а также при приготовлении электролита на основе промывных вод.

В процессе электрохимического растворения отходов сплава ВР-5 его компоненты переходят в раствор в соотношении, равном их исходному содержанию. Упаривание электролита сопровождается отделением основного количества вольфрама от рения путем кристаллизации ПВА, при этом рений концентрируется в маточном растворе, в кото-

**Материальный баланс процесса переработки отходов  
сплава ВР-5 в растворе карбоната аммония**

Статья баланса	W		Re	
	т, г	мас. %	т, г	мас. %
<i>Задано</i>				
Сплав ВР-5 (отходы, проволока)	17,41	100,0	0,92	100,0
<i>Получено</i>				
Солевой осадок (ПВА)	14,73	84,6	<0,01	<0,01
Маточный раствор	0,9	5,2	0,77	83,9
Промывные воды	0,47	2,7	0,04	4,3
Осыпь	0,85	4,9	0,05	5,4
Невязка	-0,46	-2,6	-0,06	-6,4

ром остается около 5% W от исходного. Осаждение вольфрама в виде ПВА (основной прекурсор в технологии этого металла) облегчает последующую очистку конечного ренийсодержащего раствора известными гидрометаллургическими методами (экстракция, ионный обмен и др.), что позволит получать качественные соли рения.

**Выводы.** 1. Исследовано электрохимическое поведение рения и сплавов W-Re (ВР-20 и ВР-5) в растворах карбоната аммония (концентрация 0,5—1,5 М). Выявлено, что увеличение концентрации карбоната аммония приводит к двукратному росту максимальной анодной плотности тока для рения (до 100 мА/см<sup>2</sup>) и пятикратному увеличению таковой для сплавов ВР-20 и ВР-5 (соответственно до 300 и 350 мА/см<sup>2</sup>).

2. Исследовано влияние плотности постоянного тока (150—700 мА/см<sup>2</sup>) на скорость растворения отходов сплава ВР-5, его выход по току и удельный расход электроэнергии в 1,0 М растворе карбоната аммония. Установлено, что увеличение плотности тока в указанном диапазоне приводит к росту скорости растворения сплава с 190 до 715 мг/(см<sup>2</sup>·ч), удельного расхода электроэнергии с 1,6 до 7,3 кВт·ч/кг. При этом интервал плотностей тока от 150 до 600 мА/см<sup>2</sup> обеспечивает электрохимическое растворение сплава ВР-5 с выходом по току ~100%, а дальнейшее увеличение плотности тока приводит к падению выхода по току до ~85%.

3. Определены оптимальные условия проведения процесса электрохимического растворения сплава ВР-5 в аммиачно-кар-

бонатном электролите: плотность тока 600 мА/см<sup>2</sup> и концентрация карбоната аммония 1,0 М. Процесс протекает с выходом по току ~100% при скорости растворения сплава ~600 мг/(см<sup>2</sup>·ч) и удельном расходе электроэнергии ~5 кВт·ч/кг

4. Исследован процесс извлечения вольфрама из электролита на основе карбоната аммония, содержащего вольфрамат- и перренат-ионы, путем отделения вольфрама в виде паравольфрамата аммония упариванием и кристаллизацией с концентрированием рения в маточном растворе. Показано, что содержание рения в порошке паравольфрамата аммония составляет менее 0,05 мас. %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Werner, T.T. Rhenium mineral resources: A global assessment. / T.T. Werner, G.M. Mudd, S.M. Jowitt, D. Huston // Resources Policy. 2023. V.82. Art. 103441.
2. Петухов, О.Ф. Рений / О.Ф. Петухов, К. Санакулов, М.А. Курбанов, У.З. Шарафутдинов. — Н. : Типография НГМК, 2020. 388 с.
3. Касиков, А.Г. Рециклинг рения : монография / А.Г. Касиков, А.М. Петрова. — М. : РИОР, ИНФРА-М, 2017. 95 с.
4. Палант, А.А. Технология рения / А.А. Палант, И.Д. Трошкина, А.М. Чекмарев, А.И. Костылев. — М. : ООО «Галлея-Принт», 2015. 329 с.
5. Shen, L. Review of rhenium extraction and recycling technologies from primary and secondary resources / L. Shen, F. Tesfaye, X. Li, D. Lindberg, P. Taskinen // Minerals Eng. 2021. V.161. Art.106719.
6. Hool, A. How companies improve critical raw material circularity: 5 use cases Findings from the International Round Table on Materials Criticality / A. Hool, S. van Nielen, D. Schrijvers, S. Ganzeboom // Minerals Economics. 2022. V.21. April.
7. Zeiler, B. Recycling of tungsten: Current share, economic limitations, technologies and future potential

- / B. Zeiler, A. Bartl, W. Schubert // Int. J. Refract. Metals and Hard Mater. 2021. V.98. Art.105546.
8. *Xu, D.* Recycling of rhenium from W-Re-alloyed scraps by a pyrometallurgical method / D. Xu, S. Zheng, P. Chen, B. Wei, J. Zhang, J. Cheng // J. Sustainable Metallurgy. 2022. V.8. P.148—155.
  9. *Singh Gaur, R.P.* Recycling of rhenium-containing wire scrap / R.P. Singh Gaur, T.A. Wolfe, S.A. Braymiller // Int. J. Refract. Met. Hard Mater. 2015. V.50. P.79—85.
  10. *Рузиев, У.Н.* Технология электрохимической переработки отходов сплавов вольфрам—рений и молибден—рений / У.Н. Рузиев, С.Н. Расулова, В.П. Гуро, Х.Т. Шарипов, М.А. Ибрагимова, Х.Ф. Адинаев // Universum : химия и биология : электрон. научн. журн. 2022. V.10. P.100.
  11. *Кузнецова, О.Г.* Усовершенствованная технология электродиализного синтеза ренийевой кислоты из электролитов процесса переработки отходов сплавов вольфрам—рений / О.Г. Кузнецова, А.М. Левин, М.А. Севостьянов, О.И. Цыбин, А.О. Больших, М.А. Больших // Металлы. 2020. №1. С. 84—90. — (O.G. Kuznetsova, A.M. Levin, M.A. Sevost'yanov, O.I. Tsybin, A.O. Bol'shikh, M.A. Bol'shikh, «Improved electrodialysis synthesis of perrhenic acid from the electrolytes of processing the wastes of tungsten—rhenium alloys». Russian Metallurgy (Metally). 2020. №1. P.71—76.)
  12. *Левчук, О.М.* Электрохимическая переработка отходов сплава W-Re в щелочных электролитах под действием переменного тока / О.М. Левчук, А.М. Левин, В.А. Брюквин, И.Д. Трошкина // Цв. металлы. 2016. №6. С.80—83.
  13. *Кузнецова, О.Г.* Получение паравольфрамата аммония в процессе электрохимической переработки отходов W и сплавов W-Re / О.Г. Кузнецова, А.М. Левин // Матер. XIV Междунар. науч.-техн. конф. «Современные методы в теоретической и экспериментальной электрохимии» (3—7 июля 2023 г.). — Иваново : Ин-т химии растворов им. Г.А. Крестова РАН. 2023. С.106.
  14. *Рузиев, У.Н.* Анодная переработка металлических отходов вольфрама в аммиачном электролите с добавкой нитрата аммония / У.Н. Рузиев, С.Н. Расулова, В.П. Гуро, Х.Т. Шарипов, М.А. Ибрагимова, У.Р. Эрназаров // Universum: химия и биология : электрон. научн. журн. 2022. V.7. P.97.
  15. Вредные вещества в промышленности : справочник для химиков, инженеров и врачей : в 3 т. / изд. 7-е пер. и доп. — Л. : Химия. 1977. Т.III. 608 с.
  16. *Кузнецова, О.Г.* Электрохимическая переработка отходов тяжелых вольфрамовых сплавов в растворах карбоната аммония / О.Г. Кузнецова, А.М. Левин, С.В. Коношкин, О.И. Цыбин, А.О. Больших // Металлы. 2023. №1. С. 9—15.
  17. Patent US 5021133. Electrolitic method for producing ammonium paratungstate from cemented tungsten carbide / C.D. Vanderpool, T.K. Kim. 1991.
  18. Химия и технология редких и рассеянных элементов. / под ред. К.А. Большакова. — М. : Высшая школа, 1976. Ч.3. 319 с.
  19. *Колмакова, Л.П.* Изучение механизма и кинетики получения синего оксида вольфрама прокаливанием паравольфрамата аммония / Л.П. Колмакова, О.Н. Ковтун, Н.Н. Довженко // J. Siberian Federal University. Eng. Technol. 2010 V.3. P. 293—304.