

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

**Институт металлургии
и материаловедения
им. А.А. Байкова РАН**

80 лет

Москва

ИМЕТ РАН

2018 г.

УДК 669.1; 546.1; 546.3

Институт металлургии материаловедения им. А.А. Байкова РАН – 80 лет.
Сборник научных трудов.
М.: Интерконтакт Наука, 2018, 644 с.

ISBN 978-5-902063-58-2

Сборник подготовлен в связи с 80-летием создания Института Металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук. В статьях содержатся материалы по основным направлениям научной деятельности в области металлургии черных, цветных и редкоземельных металлов, материаловедения металлических, керамических, нанокристаллических, композиционных материалов, развития методов исследования состава, структуры и свойств материалов.

Материалы сборника могут представлять интерес для ученых и сотрудников научно-исследовательских и учебных институтов и университетов, промышленных предприятий, работающих в области металлургии черных, цветных и редких металлов, материаловедения неорганических материалов и методов исследования.

Редакционная коллегия

Академик К.А. Солнцев (ответственный редактор), академик О.А. Банных (зам. Ответственного редактора), академик В.М. Бузник, академик В.М. Иевлев, академик Ю.В. Цветков, чл.-корр. РАН М.И. Алымов, чл.-корр. РАН С.М. Баринов, чл.-корр. РАН Г.С. Бурханов, чл.-корр. РАН Григорович К.В., чл.-корр. РАН А.Г. Колмаков, чл.-корр. РАН В.С. Комлев, д.ф.-м.н. С.В. Симаков, к.т.н. О.Н. Фомина (ответственный секретарь)

ISBN 978-5-902063-58-2

© ИМЕТ РАН, 2018

Усовершенствование технологии переработки отходов сплавов вольфрам-рений с получением рениевой кислоты

А.М. Левин, М.А. Севостьянов, О.Г. Кузнецова, Левчук, О.М. Брюквин В.А., А.О. Больших, О.И. Цыбин, М.А. Больших, В.Г. Леонтьев

ИМЕТ РАН

DOI: 10.30791/978-5-902063-58-2-394-407

Аннотация

Методом линейной вольтамперометрии исследовано анодное поведение сплава W-Re 20 масс % в растворах гидроксида натрия и показана возможность его высокоскоростного электрохимического растворения на постоянном токе. Определены экспериментальные зависимости скорости растворения сплава и выхода по току от анодной плотности тока, в укрупненных испытаниях определен расход электроэнергии на растворение сплава в оптимальных условиях. Из наработанного и очищенного от вольфрама электролита методом электродиализа осуществлено получение рениевой кислоты и определены основные характеристики процесса. Предложена принципиальная технологическая схема извлечения рения из отходов сплава вольфрам-рений в форме рениевой кислоты.

Введение.

Рений и его сплавы с другими металлами находят все более широкое применение в различных областях современной техники. Основная часть этого металла используется при создании специальных сплавов для авиационной и аэрокосмической промышленности и является их незаменимым компонентом, потребность в котором непрерывно возрастает. Из этого вытекает задача повышения объемов производства рения, решаемая как за счет расширения сырьевой базы, так и за счет использования отходов производства и вовлечения в переработку различных видов вторичного ренийсодержащего сырья с использованием эффективных технологических схем извлечения этого ценного металла. Извлечение рения из отходов и вторичного сырья особенно важно для России, на территории которой промышленно освоенных месторождений не имеется [1 - 3].

Разработка новых технологических процессов извлечения рения из техногенного вторичного сырья и промпродуктов его производства весьма актуальна не только для отечественных [4 - 7], но и для зарубежных исследователей [8 - 11]. При этом в качестве источников вторичного рения в технологиях переработки рассматриваются как отходы, возникающие при производстве самого металла, так и его двойные сплавы с никелем, вольфрамом, молибденом, а также и многокомпонентные жаропрочные и жаростойкие ренийсодержащие сплавы на основе никеля, так называемые «суперсплавы».

Одним из распространенных источников вторичного рения являются отходы сплавов вольфрама с рением (ВР), извлечение рения из которых может быть осуществлено различными пиро- и гидрометаллургическими способами [1]. При этом наиболее перспективными представляются электрохимические методы, позволяющие достаточно эффективно и быстро перевести компоненты сплавов ВР в раствор [12, 13] с последующим извлечением из него соединений металлов известными гидрометаллургическими способами. Кроме того, использование электрохимических технологий, а именно электролиза, позволяет также далее извлечь из получаемого ренийсодержащего промпродукта – перрената калия – рений в форме перрената аммония или рениевой кислоты, которая является более перспективным рениевым прекурсором [14, 15]. Поэтому наиболее перспективными среди разнообразия технологий извлечения рения представляются, применительно к вольфрам-рениевым сплавам, именно электрохимические технологии.

Согласно [16,17] наиболее распространенные сплавы рения и вольфрама ВР-5 и ВР-20, содержащие 5 и 20 масс % рения соответственно, представляют собой твердый раствор, что при их электрохимическом растворении приводит к переходу в электролит обоих компонентов пропорционально их содержанию в сплаве [18, 19]. Оба компонента сплава анодно растворяются как в аммиачных, так и в щелочных электролитах [20, 21], однако для аммиачных растворов вследствие их низкой электропроводности и незначительной скорости анодного растворения металлов на первоначальном этапе требуется вводить токопроводящие добавки [22, 23]. Предлагается также в этом случае для интенсификации анодного растворения использовать переменный или однополупериодный электрический ток [12, 20]. Вместе с тем, достаточно высокие анодные плотности тока растворения индивидуальных компонентов сплавов ВР в

растворах гидроксида натрия позволяют избежать использования этих дополнительных приемов.

Анодное поведение вольфрама в щелочных электролитах изучено достаточно подробно [18, 19], на поляризационных кривых, полученных методом линейной вольтамперометрии, обнаруживаются участки предельной анодной плотности тока ($i_{\text{пред}}$). Согласно [21], величина $i_{\text{пред}}$ возрастает с повышением концентрации гидроксида натрия и эта зависимость линейна в диапазоне концентраций NaOH 0,25-5,0 М, а сам процесс растворения протекает под диффузионным контролем стадии подвода гидроксид-ионов к поверхности металла.

Анодное поведение рения в растворах гидроксида натрия аналогично таковому для вольфрама: растворение металла протекает с высокими скоростями, на поляризационных кривых наблюдается площадка $i_{\text{пред}}$, величина которого растет с повышением концентрации щелочи [19]. При этом при высоких концентрациях гидроксид-ионов (свыше 5 М) на потенциодинамических поляризационных кривых проявляется максимум, свидетельствующий о появлении пассивной области растворения и указывающий на то, что процесс растворения контролируется не подводом гидроксид-ионов, а замедленностью отвода перренат-ионов от поверхности анода. Следует отметить, что для электролитов на основе KOH наблюдается глубокая пассивация анода за счет образования $KReO_4$.

Ранее, в [24] для извлечения рения из отходов вольфрам-рениевых сплавов типа ВР было предложено полученный после их анодного растворения электролит подвергать очистке от вольфрама путем осаждения вольфрамата кальция, из очищенного электролита осуществлять осаждение перрената калия с последующей его конверсией в рениевую кислоту методом электродиализа. Вместе с тем, выделение рения в виде промпродукта ($KReO_4$) приводит к увеличенным потерям рения, необходимости его доизвлечения из маточных растворов, безвозвратной потере осадителя, повышенному объему солевых стоков и не позволяет отказаться от предварительного удаления вольфрама из электролита. Невысокая растворимость перрената калия приводит к значительному расходу электроэнергии на проведение стадии электродиализа. Кроме того, имеются сложности с утилизацией католита (раствора гидроксида калия), образующегося в процессе электродиализа, так как его нельзя повторно использовать на стадии анодного растворения.

Вышесказанное привело к необходимости усовершенствования технологии извлечения рения в форме рениевой кислоты из сплавов этого металла с вольфрамом с целью сокращения потерь рения на

гидрометаллургических стадиях и снижения расхода электроэнергии при электролизе.

Экспериментальная часть.

Исследование анодного поведения сплава ВР-20 и его компонентов проводили методом линейной вольтамперометрии в потенциодинамическом режиме со скоростью развертки потенциала 1 мВ/с относительно хлорсеребряного электрода сравнения. В качестве электролита использовали раствор NaOH с диапазоном концентраций 25 - 100 г/л, выбранным исходя из технологических соображений. Исследования проводили с помощью электрохимического комплекса IPS-Pro. В качестве анодов использовали компактные вольфрам и рений чистотой 99,9 масс % с фиксированной площадью поверхности. Образцы анода из сплава ВР-20 (20 масс % Re) изготавливали скручиванием отрезков вольфрам-рениевой проволоки, при этом для расчета анодной плотности тока использовали геометрическую площадь поверхности образца.

Анодное растворение сплава ВР-20 проводили в стеклянной водоохлаждаемой ячейке при температуре 25 °С с перемешиванием электролита с помощью магнитной мешалки и использованием нержавеющей стали в качестве кольцевого катода. Силу тока и напряжение измеряли с помощью вольтамперметров В7-58/2. Эффективность процесса электрохимического растворения сплава ВР-20 оценивали по скорости растворения сплава (исходя из убыли массы анода с учетом образующегося шлама и геометрической поверхности электрода), расходу электроэнергии на растворение единицы массы анода и выходу по току, рассчитываемому с учетом атомного содержания компонентов в сплаве.

Исследования анодной поляризации вольфрама и рения в растворах гидроксида натрия показали, что процесс растворения металлов начинается и протекает в электроположительной области потенциалов относительно хлорсеребряного электрода сравнения. Поляризационные кривые характеризуются наличием на них площадки предельной анодной плотности тока, при этом величина $i_{\text{пред}}$ возрастает с повышением концентрации гидроксида натрия, что наблюдается при поляризации обоих металлов.

В отличие от индивидуальных своих компонентов, анодное растворение сплава ВР-20 начинается в более электроотрицательной области потенциалов, потенциал начала растворения смещен примерно на 0,5 В в сторону электроотрицательных значений. На поляризационных кривых

сплава после площадки предельной плотности тока выделения газа на электроде в исследованной области потенциалов не наблюдалось.

На рис. 1 приведены для сравнения поляризационные кривые W, Re и сплава ВР-20 в растворе NaOH 100 г/л, из которых видно также, что рений и сплав ВР-20 растворяются с более высокой скоростью, нежели вольфрам. Следует также отметить, что, как и в [21], для вольфрама подтвержден линейный характер зависимости $i_{\text{пред}}$ от концентрации гидроксида натрия в электролите. Однако проведенными исследованиями установлено, что для рения и сплава ВР-20 эти зависимости не являются линейными.

Из полученных данных следует, что анодное растворение сплава ВР-20 в электролите, содержащем гидроксид натрия, протекает с высокой скоростью в широком диапазоне потенциалов, а рекомендуемая концентрация щелочи может составлять порядка 100 г/л. При этом допустимая анодная плотность тока может достигать 10 кА/м^2 , что вполне достаточно для осуществления технологического процесса и не требует применения дополнительных способов его интенсификации.

Исследования по анодному растворению сплава ВР-20 в щелочном электролите проводили с использованием растворов NaOH 50 и 100 г/л при температуре 25°C . В качестве анода использовали спрессованную проволоку сплава ВР-20, катод – нержавеющая сталь, межэлектродное состояние составляло 15-20 мм. Плотность тока изменяли в диапазоне $0,1-1,0 \text{ А/см}^2$.

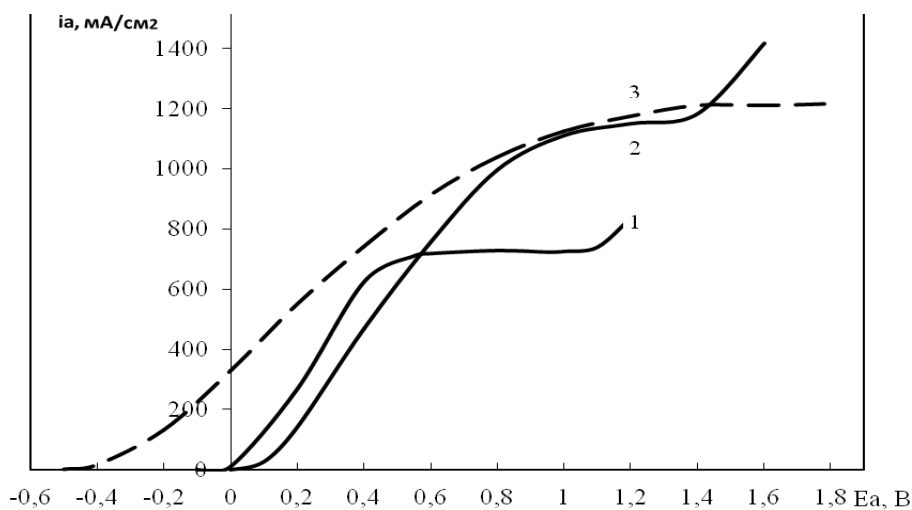


Рис.1. Анодная поляризация вольфрама (1), рения (2) и сплава ВР-20 (3) в растворе NaOH 100 г/л.

На рис. 2 представлены зависимости скорости растворения сплава и расхода электроэнергии на его растворение от анодной плотности тока в растворе гидроксида натрия. Видно, что скорость растворения сплава практически линейно возрастает с увеличением анодной плотности тока как в растворе NaOH 50 г/л, так и в растворе с концентрацией 100 г/л. Из рис. 2 также следует, что расход электроэнергии растет при увеличении плотности тока и, при использовании раствора NaOH 100 г/л, эта зависимость лежит несколько ниже таковой для раствора NaOH 50 г/л, что связано с более высокой электропроводностью электролита. Рассчитанная для всех экспериментов величина выхода по току находилась в диапазоне 98,6-99,8 %, что указывает на практическое отсутствие протекания побочных электродных реакций.

На основании проведенных исследований можно рекомендовать следующие условия проведения процесса анодного растворения сплава ВР-20: температура 25 °С, анодная плотность тока до 1,0 А/см², исходное содержание NaOH в электролите 75±25 г/л.

Проведен укрупненный эксперимент по электрохимическому растворению сплава ВР-20 в электролите, содержащем NaOH 100 г/л, при анодной плотности тока 0,8 А/см². Анодом служил спрессованный сплав ВР-20, в качестве катода использовали нержавеющую сталь. Расход электроэнергии на растворение сплава составил 2,7 Вт×час/г при скорости его растворения 0,85 г/см²×час и анодном выходе по току 99,7%. В результате растворения был получен электролит с содержанием 23,2 г/л Re и 93,0 г/л W, который был использован в дальнейших исследованиях.

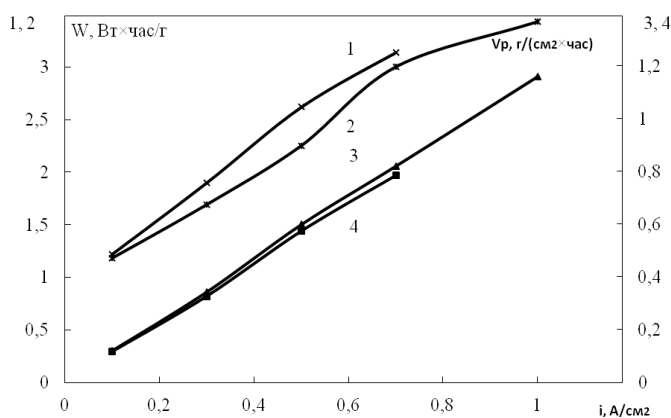


Рис.2. Зависимость расхода электроэнергии (1, 2) на растворение сплава W-Re 20 масс % и скорости его растворения (3, 4) в растворе гидроксида натрия. Концентрация NaOH, г/л: 1, 4 – 50, 2, 3 – 100.

Узким местом электродиализного синтеза рениевой кислоты является высокое напряжение на ванне, приводящее, соответственно, к нагреву растворов в камерах электролизера и повышенному расходу электроэнергии в процессе. Так, согласно [24], общий расход электроэнергии на этой стадии составляет свыше 16 Вт×час на 1 г рениевой кислоты, что является весьма высоким показателем.

Для анализа расхода электроэнергии на проведение процесса электродиализного синтеза рениевой кислоты из перрената калия по методике [25] было проведено измерение падения напряжения на элементах трехкамерного электролизера, описанного в [14, 15]. Было установлено, что наибольший вклад в баланс напряжения на электролизере вносит перепад напряжений в средней камере (64-73 %), что связано с невысокой электропроводностью раствора перрената калия по причине его низкой растворимости в воде – так, например, при температуре 30°C растворимость перрената натрия составляет 59,6 масс %, а перрената калия – 1,52 масс % [1]. В целях снижения напряжения на ванне следует стремиться к уменьшению именно этой величины за счет:

- повышения температуры раствора в средней камере
- поддержания концентрации перрената калия на максимально возможном уровне
- использования принудительного перемешивания раствора в средней камере.

Однако наилучшим способом усовершенствования процесса представляется отказ от промежуточного выделения перрената калия, что позволит снизить потери извлекаемого металла и уменьшить реагентозатратность технологии в целом. В этой связи первоначально с целью дополнительного сокращения количества стадий технологии опробован процесс прямой электродиализной переработки электролита, полученного после анодного растворения сплава. Это позволило бы осуществить извлечение рения в форме рениевой кислоты, минуя стадию осаждения перрената калия. Процесс осуществляли в трехкамерном электролизере по методике [14, 15], исходная концентрация рениевой кислоты в анолите составляла 51,6 г/л, исходный раствор в средней камере содержал 23,2 г/л Re и 93,0 г/л W. Было установлено, однако, что прямая электродиализная переработка электролита в $HReO_4$ не может быть осуществлена в связи с резким и быстрым падением силы тока и возрастанием напряжения на электролизере в течение процесса. Это может быть связано с появлением на поверхности анионообменной мембраны и в ее

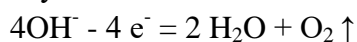
объеме малорастворимой вольфрамовой кислоты, образующейся при переносе вольфрамат-ионов из средней камеры в анодную, содержащую сильноокислый электролит. Последнее может привести к «зарастанию» анионообменной мембраны нетокопроводящей H_2WO_4 .

Замеченный эффект был подтвержден снятием баланса напряжений в электродиализной установке. Было выявлено, что в начале процесса при напряжении 9,35 В и силе тока 750 мА перепад напряжения на анионообменной мембране составил 4,27 В или 45,67 % от общего напряжения на электролизере. По истечении получаса при напряжении 25,50 В и силе тока 250 мА перепад напряжения на анионообменной мембране составил 21,5 В или 84,31 % от общего напряжения на электролизере, что препятствует дальнейшему проведению процесса и может быть объяснено «зарастанием» анионообменной мембраны вольфрамовой кислотой.

Таким образом, присутствие в электролите вольфрамат-ионов не позволяет эффективно проводить прямое электродиализное получение ренийевой кислоты из наработанного электролита. Удаление вольфрама из электролита может быть осуществлено известными способами и, в частности, осаждением искусственного шеелита, что опробовалось ранее в [1, 3, 24].

Из полученного ранее электролита провели осаждение вольфрама в форме CaWO_4 с помощью $\text{Ca}(\text{OH})_2$ («известковое молоко»), степень осаждения вольфрама составила 99,2%. Из полученного вольфрамата кальция известными методами может быть в дальнейшем извлечен вольфрам в виде вольфрамовой кислоты. Полученный раствор содержал рений в концентрации 18,0 г/л, разубоживание произошло за счет использования «известкового молока». Этот раствор может быть направлен на извлечение рения электродиализным методом, минуя стадию осаждения перрената калия.

Вместе с тем, полученный раствор перрената натрия содержит значительное количество гидроксид-ионов, оставшихся в электролите после анодного растворения сплава ВР-20, которые в процессе электродиализа, мигрируя из раствора средней камеры в анолит, способны взаимодействовать с содержащимися там ионами H^+ . При этом будет повышаться расход электроэнергии на процесс электродиализа, а образующаяся вода будет разубоживать раствор ренийевой кислоты. В связи с вышесказанным, полученный после удаления вольфрамат-ионов раствор, содержащий NaReO_4 и NaOH , был направлен на стадию электрохимической нейтрализации, осуществляемой за счет анодной реакции:



Процесс нейтрализации проводили в оргстеклянной электрохимической ячейке с разделением анодного и катодного пространств с помощью катионообменной мембраны. Катод – нержавеющая сталь, анод – платиновая пластина.

В анодную камеру заливали электролит с концентрацией рения 18,0 г/л по металлу, в катодную – раствор NaOH 100 г/л. Нейтрализацию проводили в течение 3-х часов. Зависимость pH электролита от пропущенного количества электричества представлена на рис. 3. В результате проведения процесса нейтрализации удалось снизить pH электролита до значения 6,55. Полученный католит, обогащенный по гидроксиду натрия, может быть направлен в голову процесса на растворение сплава ВР-20.

Полученный таким образом раствор, содержащий перренат натрия с концентрацией рения 18,0 г/л по металлу, подвергли электродиализу по методике [14, 15]. В анодной камере анолитом служил раствор рениевой кислоты с концентрацией HReO_4 54,1 г/л, в средней камере находился раствор перрената натрия, в катодной – раствор NaOH 100 г/л. Объем каждого раствора составлял ~300 мл. В процессе электродиализа контролировали значения силы тока, напряжения и температуры. Электродиализ проводили в течение 1,25 часа. В результате проведения процесса концентрация рениевой кислоты в анолите возросла и в результате достигла 74,24 г/л.

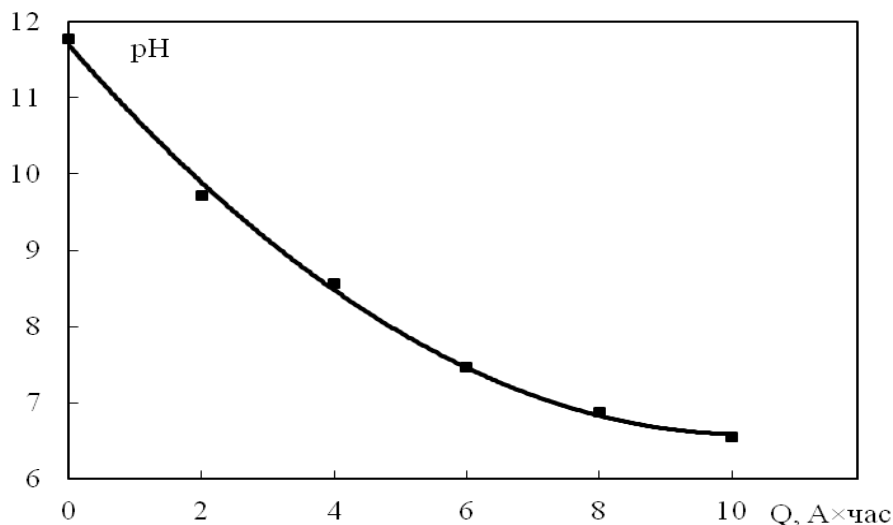


Рис.3. Зависимость pH электролита от количества пропущенного электричества при электрохимической нейтрализации ренийсодержащего электролита.

Таблица 1.

Материальный баланс по рению в процессе электродиализной конверсии раствора перрената натрия в рениевую кислоту

Продукт	Введено Re		Получено Re	
	г	%	г	%
Р-р средней камеры	5,39	30,9	0,67	3,8
Анолит	12,03	69,1	16,51	94,8
Всего	17,42	100,0	17,18	98,6
Невязка *			-0,24	-1,4

(*) В невязку включены потери рения с промывными водами и количественным химическим анализом.

В табл. 1 приведен материальный баланс по рению.

Установлено, что в процессе электродиализа перепад напряжений в средней камере составляет 35-45 %, что существенно меньше, чем при электродиализе раствора перрената калия. Следует, однако, отметить возрастание этой величины с течением времени процесса, что связано с уменьшением содержания перрената натрия в растворе. Рекомендуемые условия проведения процесса: плотность тока на мембранах ≤ 5 А/дм², температура в анодной камере $< 30^{\circ}\text{C}$, в средней и катодной камерах – до 50°C .

Было установлено, что значение расхода электроэнергии по сравнению с электродиализом раствора перрената калия значительно снижается и составляет 2,79 Вт×час/г против ~ 16 Вт×час/г [24]. Это связано с увеличением электропроводности раствора средней камеры и снижением общего напряжения на электролизере. Удельный расход электричества составил 0,27 А×час/г.

Таким образом, показано, что из очищенного от вольфрама электролита возможно прямое (минуя стадию осаждения перрената калия) получение рениевой кислоты электродиализным методом, и предложенная ранее в [24] схема получения рениевой кислоты из сплава ВР-20 упрощается. Это позволит снизить потери рения с маточными растворами и промывными водами. Усовершенствованная схема переработки сплавов вольфрам-рений на примере сплава ВР-20 с получением в качестве продукта рениевой кислоты представлена на рис. 4.

Для наиболее полной очистки раствора перрената натрия от избыточных катионов кальция (после осаждения вольфрамата кальция) представляется целесообразным, как показано на рис. 4, удаление ионов кальция из раствора путем осаждения CaCO_3 с помощью незначительного количества Na_2CO_3 . Это позволит на стадии электродиализного получения

рениевой кислоты использовать в качестве католита раствор гидроксида натрия, который затем может быть направлен в голову технологической схемы, а именно на стадию электрохимического растворения сплавов вольфрам-рений.

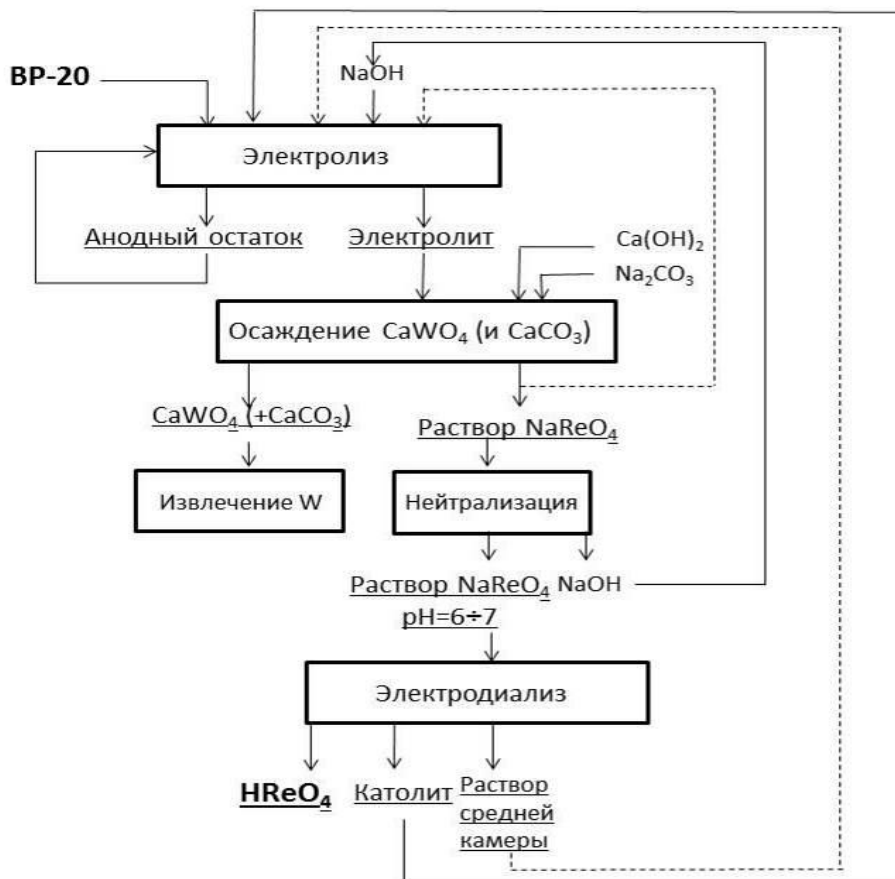


Рис.4. Усовершенствованная принципиальная технологическая схема переработки сплавов вольфрам-рений на примере сплава ВР-20.

Выводы.

1. Методом линейной вольтамперометрии в потенциодинамическом режиме исследовано анодное поведение вольфрама, рения и сплава ВР-20 в растворах гидроксида натрия с концентрацией 25 – 100 г/л. Выявлено, что для всех исследуемых образцов характерно наличие на поляризационных кривых области предельной анодной плотности тока, величина которой возрастает с повышением концентрации NaOH в электролите. При этом для рения и сплава ВР-20 зависимость величины предельной плотности тока от концентрации щелочи не является линейной, как в случае вольфрама.

Показано, что процесс анодного растворения сплава ВР-20 протекает в более электроотрицательной области потенциалов, чем растворение его индивидуальных компонентов.

2. Исследован процесс анодного растворения сплава ВР-20 в электролите с содержанием NaOH 50 и 100 г/л в диапазоне анодной плотности тока 0,1 – 1,0 А/см². Определены зависимости скорости растворения сплава ВР-20, его выхода по току и расхода электроэнергии на растворение от плотности тока. Выявлено увеличение расхода электроэнергии на растворение сплава с ростом плотности тока и показано, что скорость растворения сплава линейно возрастает с его увеличением для обоих электролитов. При этом, величина выхода по току составляет 98,3-99,8%, что указывает на отсутствие побочных анодных реакций во всем исследованном диапазоне плотностей тока.

3. Разработана методика измерения падения напряжения на элементах трехкамерного электролизера синтеза ренийевой кислоты методом электродиализа и на ее основе рассчитан баланс напряжений на ванне. Показано, что основной перепад напряжений в случае синтеза ренийевой кислоты из перрената калия приходится на среднюю камеру электролизера. С использованием этой методики также установлено, что прямая электродиализная переработка вольфрам-ренийсодержащего электролита приводит к резкому возрастанию перепада напряжения на анионообменной мембране. Это связано с ее зарастанием малорастворимой вольфрамовой кислотой, что препятствует эффективному проведению синтеза ренийевой кислоты.

4. Показано, что предварительная очистка вольфрам-ренийсодержащего электролита от вольфрама путем его осаждения в форме искусственного шеелита позволяет напрямую извлекать рений из очищенного раствора методом электродиализа в форме ренийевой кислоты. При этом достигается ~5-кратное сокращение расхода электроэнергии на электродиализ.

5. На основании проведенных исследований разработана и предложена усовершенствованная технологическая схема переработки отходов сплавов вольфрам-рений с извлечением рения в форме ренийевой кислоты высокой концентрации. Основные стадии предлагаемого процесса опробованы в укрупненном лабораторном масштабе.

Работа выполнялась по государственному заданию № 007-00129-18-

Литература

1. Палант А.А. Технология рения. / Палант А.А., Трошкина И.Д., Чекмарев А.М., Костылев А.И. // М.: ООО «Галлея-принт». 2015.- 329 с., ил.
2. Быховский Л.З. Стратегическое минеральное сырье: пути решения проблемы дефицита. / Быховский Л.З., Тигунов Л.П. // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление, 2015, № 5, с. 43-49.
3. Агапова Л.Я. Комплексная переработка техногенных вольфрам-рений-содержащих отходов. / Агапова Л.Я., Абишева З.С., Килибаева С.К. и др. // В сб. тр. конф. «Прогрессивные методы обогащения и комплексной переработки природного и техногенного минерального сырья». - Алматы, 16-19 сентября 2014 г. с. 361-363.
4. Т.Б. Елемесов. Электрохимическое растворение никель-ренийсодержащих сплавов. / Т.Б. Елемесов, О.В. Чернышова, Д.Т. Шакирова и др. // Тонкие химические технологии, 2015, т. X, № 2, стр. 53-60.
5. Палант А.А. Электрохимическая переработка металлических отходов цветных и редких металлов. / А.А. Палант, В.А. Брюквин, А.М. Левин и др. // Институт металлургии и материаловедения им. А.А.Байкова РАН — 75 лет. Сб. научных трудов под ред. академика К.А. Солнцева. - М.: Интерконтакт Наука, 2013. - с 176-182.
6. Гуро В.П. Переочистка перрената аммония и извлечение рения из отходов ренийсодержащих сплавов. / Гуро В.П., Белов А.А. // В сб. тр. конф. «Ресурсовоспроизводящие, малоотходные и природоохранные технологии освоения недр». - Москва - Усть-Каменогорск, 17-21 сентября 2012 г. с. 165-166.
7. Петрушин Н.В. Рений в монокристаллических жаропрочных никелевых сплавах для лопаток газотурбинных двигателей. / Петрушин Н.В., Оспенникова О.Г., Елютин Е.С. // Авиационные материалы и технологии, 2014, № S5, с. 5-16.
8. Cheng Tingyu. Technology of production and application of rhenium and its alloys. Xiyou jinshu cailiao yu gongcheng / Cheng Tingyu, Xiong Ning, Peng Kaiyuan et al.. // Rare Metal Mater. And Eng. - 2009. V. 38, №2, pp.373-376.
9. Raj P. Singh Gaur. Recycling of rhenium-containing wire scrap ? / Raj P. Singh Gaur, Thomas A. Wolfe, Scott A. Braymiller. // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. – V. 50, May 2015, Pp. 79–85.
10. Ernst Fleischmanna. Quantitative experimental determination of the solid solution hardening potential of rhenium, tungsten and molybdenum in single-crystal nickel-based superalloys. / Ernst Fleischmanna, Michael K. Millerb, Ernst Affeldtc et al. // Acta Materialia, V. 87, 1 April 2015, Pp. 350–356.
11. Joseph D. Lessard . Recovery of rhenium from molybdenum and copper concentrates during the Looping Sulfide Oxidation process. / Joseph D. Lessard, Daniel G. Gribbin, Leonid N. Shekhter. // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. – V. 44, May 2014, Pp. 1–6.
12. Левчук О. М. Электрохимическая переработка отходов редких тугоплавких металлов под действием переменного тока / О.М. Левчук, А.А. Палант, В.А., Брюквин и др. // Цветные металлы. - 2011.- №5.- С. 29-35.
13. Айтекеева С.Н. Электрохимическая переработка рений-вольфрамсодержащих отходов и получение вольфрам-рениевых покрытий / С.Н. Айтекеева // Комплексное

- использование минерального сырья/ Институт металлургии и обогащения МОН РК.- 2000.- №5-6 (212-213).- С. 27-30.
14. Палант А.А. Получение концентрированных растворов ренийевой кислоты электродиализом / А.А. Палант, А.М. Левин, В. А. Брюквин и др. // Цветные металлы.- 2010.- №11.- С. 62-64.
 15. Палант А.А. Совмещенный процесс получения концентрированных растворов ренийевой кислоты / А.А. Палант, В.А. Брюквин, А.М. Левин и др. // Электрометаллургия. - 2011.- №7.- С. 23-25.
 16. Савицкий Е.М. Современное состояние проблемы рения и новые направления разработки сплавов / Е.М. Савицкий, М.А. Тылкина // Исследование и применение сплавов рения: сб. статей./ Академия наук СССР, Институт металлургии им. А.А. Байкова.- Москва, 1975.- 203 с.
 17. Диаграммы состояния двойных металлических систем: Справочник: В 3 т.: Т. 3. Кн. 2. / Под общ. ред. Н.П. Лякишева. – М.: Машиностроение, 2000. – 448 с., ил.
 18. Васько, А.Т. Электрохимия тугоплавких металлов / А.Т. Васько, С.К. Ковач.- Киев: Техника, 1983.- 160 с.
 19. Атанасянц, А.Г. Анодное поведение металлов: Учеб. пособие для вузов / А.Г. Атанасянц. – М.: Металлургия, 1987.- 151 с.
 20. Палант А.А. Электрохимическая переработка металлических отходов рения в аммиачных электролитах при наложении симметричного переменного тока / А.А. Палант, О.М. Грачева, В.А. Брюквин // Электрометаллургия.- 2007.- №3.- С. 24-27.
 21. Белов, С.Ф. Анодное растворение вольфрама в гидроксиде натрия в присутствии ионов NH_4^+ , SO_4^{2-} , CO_3^{2-} . / Белов С.Ф., Игумнов М.С. , Левин А. М. // Изв. Вузов. Цветная металлургия. – 1991, № 1.– с. 124–127.
 22. Палант А.А. Физико-химические и технологические основы электрохимической переработки отходов металлического вольфрама / А.А. Палант, В.А. Павловский // Технология металлов.- 2003.- № 11.- С. 3-7.
 23. Левин А.М. Электропроводность аммиачных растворов, содержащих рений (VII) / А.М. Левин, О.М. Левчук // Металлы.- 2014.- №5.- С.32-35.
 24. Левин А.М. Электрохимическое извлечение рения из сплавов W-Re в форме ренийевой кислоты. 1. Обоснование технологии. / Левин А.М., Левчук О.М. //Металлы. – 2017. - № 1. - с. 55-62.
 25. Левин А.М. Определение перепада напряжения на ванне электродиализного синтеза ренийевой кислоты. / Левин А.М., Кузнецова О.Г., Севостьянов М.А. // Сб. статей межд. научно-практ. конф. «Воздействие НТР на характер связи науки с производством» (15 апреля 2018 г., г. Новосибирск) - Уфа: АЭТЕРНА, 2018. - с. ____. В печати.