

Перспективы совершенствования метода электроэрозионной дезинтеграции тяжелых псевдосплавов (обзор)

С. В. Чушак*, Л. З. Богуславский, А. П. Малюшевская

*Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины,
г. Николаев, 54018, Украина,
e-mail: Chushchak89@gmail.com

Поступила в редакцию 12.08.2022

После доработки 13.01.2023

Принята к публикации 17.01.2023

Рассмотрены современные методы рециклинга скрапа псевдосплавов вольфрама. Обсуждается направление совершенствования метода электроэрозионного диспергирования токопроводящих гранул за счет усиления его электрогидравлическим воздействием для эффективной дезинтеграции псевдосплавов вольфрама на микрокомпоненты.

Ключевые слова: псевдосплавы вольфрама, электроэрозия, электрогидравлический метод, дезинтеграция

УДК 669.018.9:504.064.45:537.528

<https://doi.org/10.52577/eom.2023.59.1.01>

ВВЕДЕНИЕ

Наиболее крупные месторождения вольфрама находятся в Казахстане, Китае, Канаде и США. При этом мировое производство вольфрама составляет 49–50 тыс. тонн в год, в том числе в Китае – 41 тыс. тонн, России – 3,5 тыс.; Казахстане – 0,7 тыс., Австрии – 0,5 тыс. тонн. Потребности экономик в вольфрамовом сырье, прежде всего в порошке для дальнейшего использования в производстве материалов и изделий на его основе, до настоящего времени удовлетворяются в большей части стран мира за счет импорта. Из-за растущих потребностей различных отраслей промышленности, высокой себестоимости и практического отсутствия месторождений, содержащих вольфрам, в большей части стран мира актуальна важная научно-техническая проблема разработки эффективных средств получения вольфрама из альтернативных источников. Вольфрамсодержащее вторичное сырье представлено в основном скрапом – металлическим сырьем, состоящим из отходов производства и лома. Технологии переработки вольфрамсодержащих отходов различаются в зависимости от их вида и физического состояния [1, 2]. В работе [3] утверждается, что переработка твердосплавного скрапа является альтернативой импорту готовых смесей и других полупродуктов производства твердых сплавов для стран, не имеющих первичной сырьевой базы [4]. Но и в странах, имеющих крупнейшие в мире месторождения вольфрамовых и кобальтовых руд, таких как Китай, все больше осознается актуальность

рециклинга скрапа тяжелых и твердых сплавов для экономии природных ресурсов и снижения техногенной нагрузки на окружающую среду [5].

В развитых промышленных странах рынок использования вторичного сырья уже достиг высокого уровня – так, в 2010 г. в США 46% произведенного вольфрама было получено из вольфрам-содержащего скрапа [6]. Экономическая целесообразность переработки вольфрам-содержащего скрапа связана с тем, что в различных его видах содержится от 15 до 99% вольфрама, тогда как вольфрамовые руды обычно имеют в своем составе 1% WO_3 , кроме того, в вольфрамсодержащем скрапе, как правило, находятся и другие ценные компоненты, в частности, не менее ценный кобальт [7]. Важно отметить, что вольфрамовые сплавы – это тяжелые псевдосплавы, получаемые только методами порошковой металлургии, что обусловлено тугоплавкостью самого вольфрама. Псевдосплавы – это композиционные материалы, получаемые в результате объединения в одном материале двух и более металлических компонентов, так отличающихся по физико-химическим свойствам, что получать металлические сплавы на их основе по стандартным металлургическим технологиям невозможно. Получение тяжелых сплавов пропиткой ячеистого вольфрамового каркаса расплавленными металлами основано на затекании в поры жидкой фазы под действием капиллярных сил и образовании сплава без пор. Пористый каркас, в свою очередь, получают прессованием и низкотемпературным спеканием вольфрамового порошка. Полученные сплавы

имеют двухфазную структуру, состоящую из зерен вольфрама округлой формы и связки, являющейся твердым раствором вольфрама в Ni-Cu или Ni-Fe. Рост и образование зерен вольфрама округлой формы связаны с процессами растворения–осаждения через жидкую фазу и коалесценцией частиц вольфрама [8]. Рециклинг такого структурно-сложного материала является нетривиальной научно-технической задачей.

Научно-производственное сообщество давно рассматривает вольфрамовый скрап как дешевый источник сырья для производства порошковых сплавов. Основным направлением использования вольфрамовых псевдосплавов являются инструментальные стали, учитывая, что сплавы вольфрама с бором и углеродом по твердости очень близки к алмазам – наиболее твердым минералам. Вольфрамовые сплавы, прежде всего тяжелые сплавы групп W-Ni-Fe (ВНЖ) и W-Ni-Cu (ВНМ), в которых содержание вольфрама достигает 90–98%, пригодны для производства деталей, которые можно использовать для работы при повышенных температурах. Сплавы вольфрама с молибденом применяют для производства сопел реактивных самолетов и проволоки. Военная промышленность активно использует тяжелые вольфрамовые сплавы для создания брони танков, гранат, оружия, снарядов – вольфрам стал превосходной заменой свинцу в этой сфере. Очевидно, что ограниченность количества природных месторождений вольфрама, высокая стоимость такого сырья вызывают необходимость повторного использования шлаков тяжелых сплавов, оставшихся после производства, отходов изношенных твердосплавных режущих инструментов, утилизации отходов производства патронов и т.д.

Следствием высокой актуальности вопроса переработки тяжелых сплавов является наличие широкого выбора способов их рециклинга, каждому из которых присущи как преимущества, так и недостатки. Для определения перспектив совершенствования и развития методов переработки необходим анализ современного состояния вопроса, особенно в плоскости электрофизических воздействий на материал.

ТРАДИЦИОННЫЕ МЕТОДЫ ПЕРЕРАБОТКИ ТЯЖЕЛЫХ ПСЕВДОСПЛАВОВ

Происхождение скрапа тяжелых металлов может быть следующим: отходы промышленности, брак, некондиция, лом готовой продукции. В зависимости от физического состояния скрапа, принято подразделять его на две обширные группы: рыхлый скрап (порошок,

стружка, шлифовальный шлам, пылевидные отходы) и плотный скрап (цельные детали и их куски). Очевидно, что способы рециклинга для этих двух групп существенно отличаются. Важным условием эффективной переработки скрапа существующими методами является отдельный сбор, анализ химического состава и радиационной безопасности, очистка от примесей и выбор оптимального в определенных условиях метода утилизации.

В работах [1] и [7] обобщены традиционные методы переработки вольфрамосодержащего скрапа, они подразделяются на четыре группы: металлургия расплавов, гидрометаллургия, полупрямая и прямая переработка.

Использование метода металлургии расплавов позволяет получать вольфрам для производства литого карбида вольфрама, ферровольфрама, плавного вольфрама, суперсплавов, стеллитов и инструментальных сталей. Важно, что вольфрам, восстановленный методом металлургии расплавов, дальнейшему восстановлению из произведенного материала не подлежит. Для тяжелых псевдосплавов (группа вольфрам–кобальт, вольфрам–никель–железо, вольфрам–никель–медь), полученных методами спекания, метод металлургии расплавов считается не эффективным [9].

Активно применяются для рециклинга вольфрама гидрометаллургические методы, основанные на выделении из скрапа вольфрама с помощью водных растворов химреагентов. Паравольфрамат аммония является основным промежуточным продуктом в производстве металлического вольфрама и карбида вольфрама. Одной из типичных технологий гидрометаллургии является щелочное (с NaOH или Na₂CO₃) выщелачивание вольфрамовых концентратов с последующей экстракцией [10] органическим аммонием в кислых средах (pH = 2–3). Свободная щелочь всегда присутствует в растворе выщелачивания, и ее содержание очень велико. Таким образом, для нейтрализации и подкисления выщелачивающего раствора требуется много кислоты, а ценные химические вещества – щелочи (Na₂CO₃ или NaOH) и кислоты (H₂SO₄ или HCl) в рафинате становятся неорганическими солями, вредными для окружающей среды. Кроме того, анионные примеси P, As, Si, Sn не могут быть удалены в этом процессе из-за образования гетерополикислоты, необходимы специальные операции для их удаления путем осаждения в слабощелочной среде, что приводит к одновременной потере вольфрама.

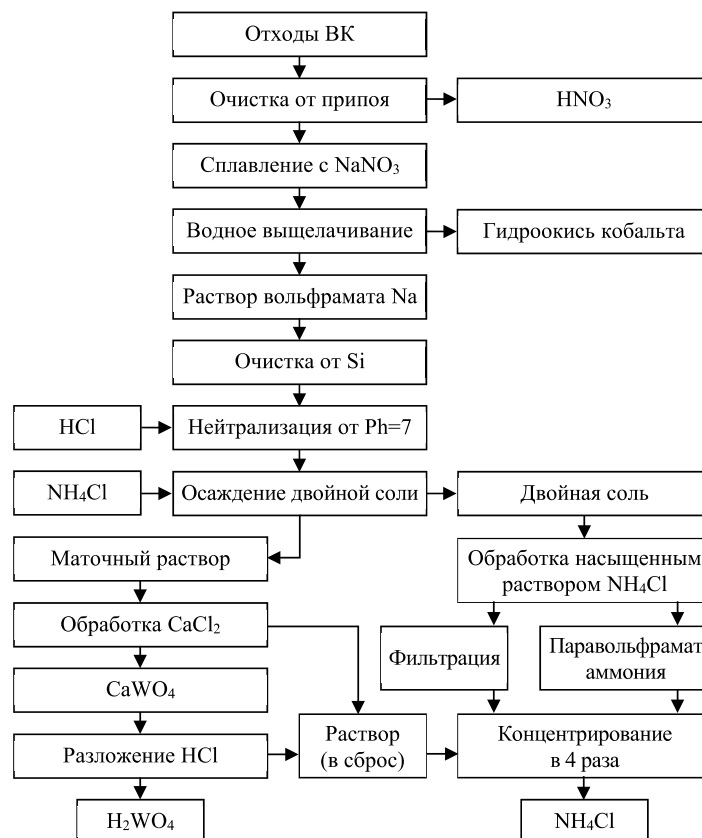


Рис. 1. Схема переработки отходов сплава вольфрам–кобальт сплавлением с селитрой [11].

Тем не менее гидрометаллургическая переработка скрапа имеет высокую конкурентоспособность. По данным Международной ассоциации вольфрамовой промышленности (International Tungsten Industry Association – ITIA) в США, Японии и Европе в 2001 г. этим методом было получено 70% паравольфрамата аммония из вольфрамсодержащего скрапа и только 30% – из рудных концентратов. Особенностью восстановления вольфрама методами гидрометаллургии является то, что, применяя их и к скрапу и к рудному концентрату, получают вольфрам и его соединения одинакового качества. Побочные продукты гидрометаллургических методов переработки тяжелых и твердых сплавов (оксиды кобальта, никеля, тантала, хрома) представляют собой ценное сырье для извлечения металлов из них. Для восстановления сплавов методами гидрометаллургии нет ограничений по способу их изготовления, регенерации поддаются как литые, так и порошковые материалы. Высокая эффективность, одновременно с высокой сложностью метода и его экологической опасностью, обуславливает целесообразность его использования для многокомпонентных сплавов или даже для материала, не рассортированного по маркам [2].

Применяют также несколько иную [11] схему регенерации твердых сплавов, используя для выделения из раствора соединений вольфрама осаждение так называемой двойной соли (рис. 1).

Под прямой переработкой понимают превращение скрапа тяжелых и твердых сплавов в порошок, идентичный по составу, химическими или физическими методами, а также их комбинациями [9]. Предварительными условиями для успешной прямой переработки являются следующие требования:

- состав лома должен быть таким же, как требуемый порошковый продукт;
- скрап должен быть высокой чистоты не только в отношении примесей, но также правильно рассортирован по составу и размеру;
- отсутствие загрязнения посторонними материалами в процессе обработки.

Полупрямая переработка подразумевает химическую переработку лома также в паравольфрамат аммония, основной высокочистый промежуточный материал для большей части изделий из вольфрама. Полупрямой процесс рециклинга проводится аналогично тому, который используется для переработки вольфрамовых концентратов. Однако и вольфрам, и карбид вольфрама необходимо сначала окислить воздухом или химикатами, чтобы перевести в шестивалентное состояние, что позволяет затем провести процесс выщелачивания. В настоящее время большая часть рыхлых вольфрамсодержащих отходов и большая часть несортированного плотного скрапа перерабатывается способом полупрямого рециклинга [9].

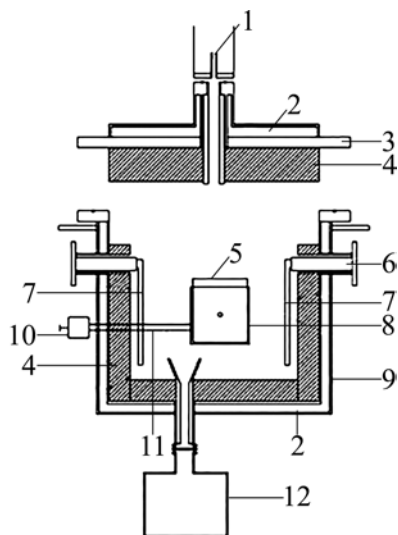


Рис. 2. Электрическая печь для переработки твердых сплавов [14]: 1 – газоотводный патрубок; 2 – охладитель; 3 – крышка камеры; 4 – теплоизоляция; 5 – крышка тигля; 6 – электропитание; 7 – нагреватель; 8 – тигель; 9 – камера; 10 – вращательный механизм; 11 – штанга; 12 – приемник.

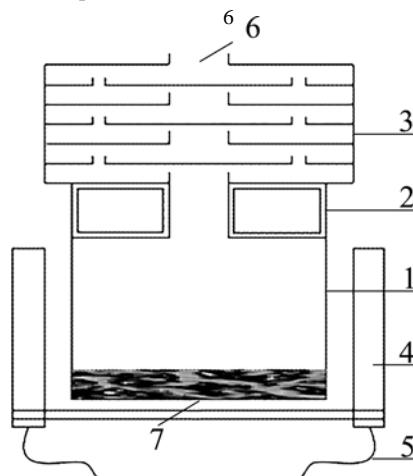


Рис. 3. Вакуумная термическая электропечь [15]: 1 – графитовый тигель; 2 – переходная секция; 3 – кристаллизатор кобальта; 4 – нагреватель; 5 – электропитание; 6 – выход; 7 – отходы.

Одним из наиболее распространенных способов переработки отходов твердых сплавов является цинковый метод, относящийся к прямым, связанный с экстракцией в цинковый расплав кобальта с последующим выпариванием цинка [12, 13]. Он основан на утилизации твердого сплава при расплавлении цинком. Утилизацию производят в вакуумной печи, при этом цинк и комковатые отходы твердого сплава помещают в вакуумную печь в графитовые поддоны, а затем цинк расплавляют. В вакууме происходит диффузия адгезионной связки кобальта или никеля в цинке. Далее цинк отгоняют и происходит конденсация его в приемнике-конденсаторе с получением в графитовом поддоне спеченной массы, состоящей из карбидов вольфрама, титана, тантала и кобальта, а в воде охлаждающего конденсатора появляется слой конденсированного цинка. Далее производят охлаждение поддона и установки, осуществляют выгрузку из нее охлаждающего конденсатора с цинком, после измельчают

содержимое поддона в шаровых мельницах с получением порошковой смеси, пригодной для производства твердого сплава. Цинк подлежит повторному использованию. Недостатками этого способа является низкая производительность и необходимость тщательной предварительной сортировки перерабатываемого сырья.

Авторами [13] рассмотрена работа Института керамической техники и технологии в Корее (KICE), в котором разработали способ переработки вольфрамовых сплавов, также используя цинкование. В основе метода лежит взаимодействие жидкого цинка с кобальтовой связкой в электрической печи (рис. 2).

Промывая при температуре 40 °С поверхности сплавов растворителями, такими, как этанол, метанол или ацетон, отходы сплавов очищают от примесей. После этого отходы твердых сплавов с цинком (в соотношении 1 к 6) помещают в герметичный тигель, установленный в камеру печи с созданной защитной газовой атмосферой посредством подачи аргона или азота от 0,1 до

20 л/мин. Содержимое в тигле нагревают выше температуры плавления, но ниже температуры кипения цинка, до 420–800 °С. Сам процесс деструкции занимает приблизительно 12 часов [14].

Авторами [13, 15] описан вакуумно-термический метод извлечения карбида вольфрама и кобальта из отходов сплавов. Отходы очищают промывкой органическими растворителями при температуре 50–70 °С, с постоянным перемешиванием и одновременным воздействием ультразвука. Сначала откачивают воздух до давления менее 10 Па, затем печь нагревают со скоростью 10–20 °С/мин до 1800 °С с попеременным снижением и повышением давления (рис. 3).

Высокие температуры нагрева приводят к увеличению затрат на электроэнергию и увеличивает длительность процесса переработки отходов в вакуумной термоэлектрической печи до 5–8 часов, что снижает производительность и увеличивает стоимость конечной продукции. Разработаны способ и реактор (рис. 4) для переработки кусковых твердых сплавов [16, 17], включающий загрузку отходов в реактор, нагрев для взаимодействия с парами цинка, отгонку цинка, вакуумирование и разрушение твердого сплава, охлаждение и измельчение в порошкообразную смесь (рис. 5), пригодную для твердосплавных изделий. Способ, по утверждению авторов, позволяет полностью разрушить твердый сплав в 4 раза быстрее всех известных аналогов, при этом израсходовав на переработку в разы меньшее количество электроэнергии (около 2 кВт·ч/кг). Сущность способа состоит в следующем: в горячую зону реактора загружают цинк, а в холодную – отходы твердых сплавов в соотношении один к одному. На первом этапе цинк нагревается до 900 °С в атмосфере инертного газа при давлении 0,5–1 атм. Затем в реакционной зоне создают вакуум, около 4–5 Па, и выдерживают до 10 мин. Снижение давления в зоне реакции приводит к образованию активных паров цинка, диффундирующих в холодную зону с кусковыми отходами твердых сплавов. При этом пары цинка в процессе конденсации взаимодействуют с кобальтовой связкой, образуя расплавы, что приводит к первичной деструкции соединения между карбидом вольфрама и связкой. После охлаждения реактора продукт деструкции в виде хрупкого ячеистого материала перемещают в горячую зону и проводят второй этап. Одновременно с этим, в холодную зону загружают очередную порцию отходов кусковых сплавов. На втором этапе происходит нагревание материалов, полученных после первичной деструкции, осуществляют его в среде

инертного газа при тех же режимах. Процессы, протекающие в горячей зоне реактора, способствуют окончательной деструкции твердых отходов сплавов.

Использование прямых методов для переработки твердых и тяжелых сплавов в настоящее время ограничено по ряду причин. Прежде всего, успешность переработки определяет качественная сортировка лома по химическому составу, на практике это является ограничивающим фактором. Регенерация цинком также ограничена размером деталей, хотя непрореагировавшие части и могут быть переработаны в следующих циклах, поэтому большие детали должны быть дезинтегрированы на более мелкие части перед рециклингом. Повторная переработка посредством цинкования способна привносить в материал некоторые нежелательные примеси, например, железо (попадающее в скрап во время измельчения в шаровой мельнице) или другие элементы, внесенные в результате неточной сортировки или недостаточно тщательного отделения покрытий.

Тем не менее, по сравнению со всеми другими (косвенными) методами, прямая переработка выгодно отличается низким потреблением энергии и химических реагентов, минимальными потерями пригодного продукта в ходе переработки.

ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПЕРЕРАБОТКИ СКРАПА

Электроэрозионная обработка токопроводящих материалов, заключающаяся в изменении формы, размеров, шероховатости и свойств поверхности токопроводящей заготовки под действием электрических разрядов, возникающих между заготовкой и электродом-инструментом, широко применяется более полувека, в том числе для получения наноразмерных порошков металлов, сплавов и их соединений с уникальными характеристиками. Одним из видов электроэрозионной обработки материалов является объемное электроискровое диспергирование токопроводящих гранул в жидкости (или обработка распределенными контактными искровыми разрядами) для диспергирования токопроводящих материалов с производительностью 1–10 кг/ч при энергозатратах 2–12 кВт·ч/кг. Особая роль в исследовании основ и принципов электроэрозионной обработки принадлежит научной школе, созданной первым директором Института прикладной физики (ИПФ) АН МССР академиком Борисом Романовичем Лазаренко, общепризнанным изобретателем принципиально нового метода



Рис. 4. Реактор деструкции отходов твердых сплавов [16, 17].



Рис. 5. Продукт, полученный в реакторе (после первоначальной деструкции) [16, 17].

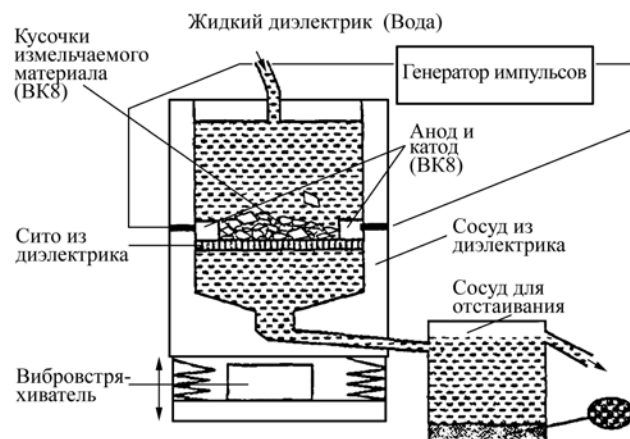


Рис. 6. Установка для электроэрозионного диспергирования в насыпном слое [48].

размерной обработки металлов, энтузиастом исследований нетрадиционных применений электричества и разработки на их основе новых технологий.

Последователи научной школы успешно продолжают развивать идеи Б.Р. Лазаренко в лаборатории электрофизической и электрохимической обработки материалов ИПФ. К настоящему времени сотрудниками лаборатории достигнуты блестящие результаты в области применения импульсных процессов в электрохимической обработке материалов:

- разработаны общие методы расчета полей скоростей, температур, концентраций и потенциалов для высоких скоростей межфазного обмена. Исследованы кинетические зависимости высокоскоростного анодного растворения различных металлов и сплавов в концентрированных растворах неорганических солей и щелочей, адаптированных к условиям электрохимической обработки металлов [18–22];

- выявлено и исследовано явление термокинетической неустойчивости поверхностных слоев покрытия – резкое, нестационарное увеличение скоростей электрохимических процессов под взаимным влиянием тепловыделения и скоростей реакций [23–25];

- предложены механизмы описания перехода к неустойчивости в зависимости от характера кинетических ограничений скоростей электродных процессов [26–28];

- исследованы физические явления в межэлектродном промежутке и на границе раздела фаз, что позволило обосновать применение импульсных режимов в электрохимической обработке [29–32];

- разработаны новые технологические процессы электрохимической размерной обработки профилей сложных деталей, штампов и пресс-форм, создания искусственной шероховатости на внутренних поверхностях труб, электрохимического шлифования и др. [33–36];

– разработаны новые технологические процессы электрохимической закалки и восстановления деталей машин, оборудование для поверхностного упрочнения материалов.

Исследованиями влияния разрядных импульсов на характеристики порошкового продукта, производительность и энергоемкость процесса диспергирования, включая влияние начальных условий (жидкость, параметры слоя, материал гранул и т.п.) занимаются ученые из стран ЕС и Азии [37, 38]. В Украине решением данной проблемы, включая разработку и оптимизацию электротехнологического оборудования для реализации способа, занимаются специалисты Института электродинамики НАН Украины – академик НАН А.К. Шидловский, член-корреспондент НАН Украины А.А. Щерба и др. [39–41]. Общей характеристикой полученных результатов является то, что для каждого измельчаемого материала для обеспечения заданных характеристик порошкового продукта (гранулометрический и элементный состав, морфология и т.п.) выбор импульсных параметров (продолжительность импульса, амплитуда, скорость нарастания по фронту/спаду, частота следования), дозировки энергии в импульсе, рабочей жидкости (вода, жидкие углеводороды или смеси), параметров слоя гранул (характерный размер частиц/длина межэлектродного промежутка/высота слоя) строго индивидуальны. Особенно это актуально для таких неоднородных по механическим, тепло- и электрофизическим характеристикам материалов, как скрапы вольфрам–никель–железо и вольфрам–никель–медь [42].

По конкретной технологической задаче измельчения вольфрамсодержащего скрапа тяжелых псевдосплавов, в частности отходов тяжелых порошковых сплавов вольфрам–никель–железо, известны результаты работы специалистов Юго-Западного государственного университета РФ [43–47], которыми доказана возможность и показаны перспективы измельчения электроэрозионным способом на кондиционные компоненты шихты с последующим ее плазменно-искровым спеканием и анализом полученных сплавов на все базовые свойства и характеристики. Одна из схем технологического процесса (рис. 6) приведена в [48]. Однако, имеющихся результатов недостаточно для реализации технологических процессов рециклинга указанных сплавов, основанных на электроэрозионном методе диспергирования, в условиях промышленности.

Разработана технологическая схема переработки компактных вольфрамсодержащих отходов твердых сплавов вольфрам–кобальт-8,

закрывающаяся в электроэрозионном диспергировании в дистиллированной воде компактных отходов в насыпном слое с последующей карбидизацией полученного порошка. Регенерированный вольфрамкобальтовый порошок может использоваться для изготовления твердосплавного инструмента и получения износостойких покрытий. Показано, что при электроэрозионном диспергировании компактных образцов твердого сплава вольфрам–кобальт-8, вольфрам–кобальт-20 термическое воздействие искрового разряда приводит к образованию измененного поверхностного слоя, так называемой «вторичной структуры», при разрушении которого образуются частицы вольфрамкобальтового порошка различного гранулометрического состава, что обусловлено разным механизмом образования частиц (из газовой или жидкой фазы). Установлено, что энергетические параметры (энергия и длительность импульса) позволяют изменять соотношение частиц, образованных по разным механизмам, что позволяет получать порошки заданного состава и структуры [49, 50].

Эксперименты показывают, что дробление зерна карбида вольфрама происходит не всегда. Разрушение исходного зерна наблюдалось в случае, если температура канала разряда была ниже температуры перитектического распада, но превышала температуру плавления кобальтовой фазы. Если температура канала была выше 2525 °С, то после перитектического распада карбида вольфрама или его плавления происходила кристаллизация высокотемпературных фаз, что наблюдалось при электроэрозии обработки малокобальтовых сплавов вольфрам–кобальт-6 и вольфрам–кобальт-8 в керосине и техническом масле при $f = 1000$ Гц.

Разрушение карбидов вольфрама при электроэрозионном диспергировании сплавов с высоким содержанием кобальта происходит при более низких температурах, чем в малокобальтовых сплавах, поскольку повышение содержания кобальта приводит к снижению температуры плавления сплава и его эрозионной стойкости [51]. Температура плавления кобальта (1400 °С) вдвое ниже температуры плавления карбида вольфрама (2880 °С), поэтому вследствие нагрева при электроэрозионном диспергировании в сплаве образуется жидкая фаза кобальта, которая направляется в область с наименьшими сжимающими напряжениями. В процессе движения жидкой фазы возникает давление, которое в совокупности с действием электрического импульса может инициировать разрушение зерна WC, находящегося в твердофазном состоянии. Дробление зерна карбида

вольфрама при электроэрозионном диспергировании зависит от содержания кобальта и энергии электрического разряда. Высокоэнергетическое влияние искрового разряда приводит к плавлению легкоплавкой кобальтовой фазы, движение которой может повлечь за собой разрушение карбидов вольфрама. Отмечается, что измельчение зерен растет с повышением содержания кобальта. При большой энергии разряда электроэрозионное диспергирование малокобальтовых сплавов вольфрам–кобальт-6 и вольфрам–кобальт-8 в керосине и техническом масле с частотой прохождения импульсов $f = 1000$ Гц к дроблению вообще не привело.

При электроэрозионном диспергировании вольфрам–кобальт-8 в воде имело место хрупкое разрушение кристаллов на несколько частей, в то время как для сплава вольфрам–кобальт-20 при электроискровой обработке $f = 1000$ Гц отмечалось вязкое дробление зерен более чем в 200 раз; размеры раздробленных кристаллов, плакированных кобальтом, составляют от 150 до 250 нм, что соответствует требованиям к примесям в псевдосплавах на основе меди с повышенной стойкостью [52].

КОМПЛЕКСНЫЕ ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНЫЕ МЕТОДЫ ПЕРЕРАБОТКИ СКРАПА

Научно-техническую проблему повышения эффективности средств получения вольфрама из скрапа тяжелых сплавов групп вольфрам–никель–железо и вольфрам–никель–медь можно решить с помощью комплексирования метода электроэрозионного диспергирования и электрогидравлической обработки. В отличие от распространенных промышленных технологий переработки (цинковый метод, холоднотруйный, виброразмол, окисление–восстановление), которые, как показано, имеют существенные недостатки и отличаются либо крупнотоннажностью (вызывающей проблемы с логистикой), либо сложностью оборудования, либо сопутствующими экологическими проблемами (утилизация химических реагентов), электроэрозионные технологии лишены указанных недостатков вообще и характеризуются гибкостью, широкими диапазонами регулирования действующих факторов и комплексными механизмами измельчения твердого сырья. Если электроэрозионное диспергирование токопроводящих гранул в жидкости основано, прежде всего, на электротепловом действии электрических разрядов в зоне искровых контактов между частицами материала, то электрогидравлический метод разрушения материалов основан на гидродинамическом воздействии на частицы материала

(как токопроводящего, так и не токопроводящего) волнами давления, возникающими в результате расширения плазменного канала разряда. Электрогидравлический метод широко известен как эффективный инструмент тонкого измельчения твердых, особенно структурно- и компонентно-неоднородных материалов (например, рудных).

Электрогидравлическое измельчение твердых порошковых сплавов является принципиально новым подходом по сравнению с традиционными методами, применяемыми в технологиях их рециклинга. Исследования, которые проводились в последние годы в Институте импульсных процессов и технологий НАН Украины, были посвящены разработке новых способов селективной дезинтеграции твердых материалов и совершенствованию существующего электроэрозионного оборудования для их реализации. Авторы [53, 54] разработали метод, использующий высоковольтный электрический разряд как источник энергии для воздействия на мелкодисперсную структуру хвостов обогащения руды. Метод обеспечивает высокий прирост извлечения ценных металлических компонентов и обосновывает условия дальнейшей селективной дезинтеграции с использованием электрического разряда в воде. Получены зависимости давления ударной волны от прочностных характеристик руды, а также от емкости и расстояния от канала разряда [55].

В то же время, подтверждены общие тенденции и для модельных задач определены условия стабилизации формы и амплитудных значений временных зависимостей электрических характеристик искровых разрядов в двумерном срезе технологического реактора объемного электроискрового диспергирования при использовании различных материалов гранул (сталь и графит) за счет варьирования емкости батареи накопителей [56, 57]. Результатом этих исследований стал обоснованный выбор схем и параметров электроэрозионного оборудования для селективного диспергирования материалов с разным пределом прочности. Учитывая определенные ранее уровни силовых механических нагрузок, формируемых подводным искровым разрядом, их знакопеременный характер, различную природу видов гидродинамического действия на объект обработки, а также особенности сырья, имеющего неоднородное по объему частиц акустическое сопротивление и определенные межфазные граничные зоны по компонентам сплава, можно считать, что электрогидравлический метод имеет широкие перспективы

применения в качестве инструмента дезинтеграции вольфрамсодержащего скрапа.

Особенно высоким эффект электрогидродинамического действия должен быть при комплексировании обработки с объемным электроискровым диспергированием, которое за счет теплового механизма воздействия на вещество приводит к неоднородному уменьшению содержания компонентов порошкового сплава по объему его частиц. Комплексирование методов электрогидравлического и электроэрозионного диспергирования позволит объединить указанные механизмы действия, имеющие селективный характер, для такого неоднородного сырья, как отходы тяжелых порошковых сплавов, и, таким образом, будет способствовать улучшению, прежде всего, гранулометрического и элементного состава измельченного вольфрамсодержащего скрапа и уменьшению суммарных удельных энергозатрат при его переработке.

Почти полное отсутствие нижней границы относительно объемов сырья для переработки, простота электроэнергетической и технологической составляющих реализации обоих методов должны обеспечить создание простого, надежного, гибкого по производительности переработки оборудования для технологии рециклинга отходов производства тяжелых порошковых сплавов, основанного на комплексной электрогидравлическо-электроэрозионной обработке материалов. В качестве исходного сырья могут применяться фрагменты скрапа размерностью от единиц до нескольких десятков миллиметров (при необходимости предварительно измельченные до определенных заранее максимальных исходных размеров), а продуктом являются порошковые микрокомпоненты с нормальным распределением и линейными размерами до 50–100 мкм. Научные основы комплексного электроразрядного метода дезинтеграции скрапа псевдосплавов на высокодисперсный вольфрам и другие порошковые микрокомпоненты с обеспечением необходимого их исходного морфологического состава на сегодняшний день развиты недостаточно для его технологической реализации в промышленных условиях.

Анализ патентной информации, которая была рассмотрена в ходе предварительных исследований, показывает, что способы и устройства для электроразрядной дезинтеграции тяжелых псевдосплавов вольфрама на порошковые микрокомпоненты актуальны в современных условиях промышленной деятельности, могут использоваться для получения вольфрамового порошка и других компонентов из отходов псевдосплавов. Согласно патентной

информации, получаемые материалы применимы в производстве износостойких материалов, используются в машиностроении, производстве защитных контейнеров для радиоактивных элементов.

Разработкой методов и оборудования для электроразрядной переработки псевдосплавов на основе вольфрама занимаются: Юго-Западный государственный университет [58–62], Chongqing University of Science and Technology [63], Shandong Wellstone Tungsten Ind Co Ltd [64], Yangzhou Polytechnic Institute [65], Shanghai Banenvir Environmental Protection Technology Co Ltd [66, 67], Shenzhen Btr Nanometer Tech Co Ltd [68], Guangdong Zhengxin Hard Material Technology Research and Development Co Ltd [69], Beijing University of Technology [70], CAMILLE D'ASSISTANCE MINIERE ET INDUSTRIELLE Cie [71].

Однако необходимо отметить, что идея комплексной электрогидравлическо-электроэрозионной дезинтеграции скрапа тяжелых псевдосплавов на порошковые микрокомпоненты не отражена в патентных источниках.

ВЫВОДЫ

Таким образом, целью дальнейшей работы по усовершенствованию электрофизических методов переработки вольфрамсодержащих псевдосплавов должна быть разработка научных основ комплексной электрогидравлическо-электроэрозионной дезинтеграции скрапа тяжелых псевдосплавов на порошковые микрокомпоненты. Для достижения цели необходимо:

- с учетом научных представлений о феноменологии разрядно-импульсного действия на вещество провести математическое моделирование электротепловых и гидродинамических процессов, сопровождающих переработку скрапа тяжелых псевдосплавов электроэрозионным и электрогидравлическим методом и предложить варианты их комплексного применения для получения порошковых микрокомпонентов;

- разработать концепцию и реализовать экспериментальное оборудование, содержащее независимые энергоисточники для высоковольтной электрогидравлической и низковольтной электроэрозионной обработки вольфрамсодержащего скрапа в условиях последовательного, циклического и совмещенного синхронизированного действия;

- экспериментально исследовать влияние исходных условий реализации, импульсных и энергетических параметров высоковольтных разрядов в жидкости на процессы дезинтеграции тяжелых псевдосплавов;

– экспериментально исследовать влияние параметров электроэрозионной обработки тяжелых псевдосплавов на процессы дезинтеграции;

– оценить динамику химических превращений в системе тяжелый псевдосплав–рабочая жидкость с учетом свойств использованной жидкой среды, гранулометрического состава, структуры и морфологических особенностей продуктов дезинтеграции;

– определить принципы комплексования, диапазоны динамических и энергетических параметров электроразрядных импульсов и пределы существования режимов электрогидравлической и электроэрозионной обработки тяжелых псевдосплавов, которые вместе с условиями выбора рабочей жидкости будут обеспечивать заданный фракционный и элементный состав порошкового продукта, максимальную производительность и минимальные удельные энергозатраты процесса;

– разработать рекомендации по физико-технической реализации метода комплексной электрогидравлическо-электроэрозионной дезинтеграции скрапа тяжелых псевдосплавов на микрокомпоненты.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

ЛИТЕРАТУРА

- Елютин, А.В., Колобов, Г.А., Давыдов, С.И., Печерица, К.А., *Вторичные тугоплавкие редкие металлы (цирконий, гафний, ванадий, ниобий, тантал)*, Запорожье: Просвіта, 2012. 120 с.
- Верхотуров, А.Д., Ершова, Т.Б., Коневцов, Л.А., Об основных идеях, парадигмах и методологии науки о материалах, *Химическая технология*, 2006, № 9, с. 11.
- Бондаренко, В.П., Мартынова, Л.М., Галков, А.В., Переработка скрапа твердых сплавов группы ВК (обзор), *Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения*, 2007, № 10, с. 387.
- Коломоєць, В.Т., Шаповал, О.М., Ситник, О.О., Золотарьов Г.Р., и др., Сировинна база твердосплавної промисловості України, *Інструментальний світ*, 1998, № 4, с. 49.
- Zeiler, B., Bartl, A. and Schubert, W.-D., Recycling of tungsten: Current share, economic limitations, technologies and future potential, *Int. J. Refract. Metals Hard Mater.*, 2021, т. 98, 105546.
- Shedd, K.B., Tungsten recycling in the United States in 2000, in: Sibley, S.F., *Flow studies for recycling metal commodities in the United States*, U.S. Geological Survey Circular 1196–R, 2011, p. R1.
- Lassner, E. and Schubert, W.-D., *Tungsten: properties, chemistry, technology of the element, alloys, and chemical compounds*, New York: Kluwer Academic/Plenum Publishers, 1999. 422 с.
- Зеликман, А.Н., Никитина, Л.С., *Вольфрам*, М.: Металлургия. 1978. 272 с.
- Burghard Z., Andreas B. and Schubert, W.-D., Recycling of tungsten: Current share, economic limitations, technologies and future potential. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2021.
- Pastukhov A.M. and Skripchenko S.Y., Process for recovering molybdenum and tungsten from MoS₃/WS₃ precipitates, *Hydrometallurgy*, 2015, vol. 157, no. 1, p. 78.
- Борисов, А.А., Боровский, Г.В., Вычеров, В.А., *Производство и эксплуатация режущего инструмента*, М.: ИТО, 2011. 104 с.
- Зеликман, А.Н., Каспарова, Т.В., Биндер, С.И., Получение твердых сплавов из регенерированных смесей WC – Co, полученных из кусковых отходов цинковым методом, *Цветные металлы*, 1993, № 1, с. 47.
- Троценко, И.Г., Герасименко, Т.Е., Мешков, Е.И., Совершенствование технологии переработки отходов твердых сплавов. Часть 1. Анализ современного состояния технологий, *Вестник МГТУ им. Носова*, 2019, т. 17, № 4, с. 25.
- Malyshev, V.V. and Gab, A.I., Resource-saving methods for recycling waste tungsten carbide-cobalt cermets and extraction of tungsten from tungsten concentrates, *Theor. Found. Chem. Eng.*, 2007, vol. 41, p. 436.
- Luo, L., Kejun, L., Shibayama, A. and Yen, W., Recovery of tungsten and vanadium from tungsten alloy scrap, *Hydrometallurgy*, 2004, vol. 72, № 1–2, p. 1.
- Троценко, И.Г., Герасименко, Н.П., *Способ переработки кусковых отходов твердых сплавов*, РФ пат. 2643291. Опубликовано 31.01.18.
- Троценко, И.Г., *Реактор деструкции отходов твердых сплавов газообразным цинком*, РФ пат. 2581690. Опубликовано 20.04.2016.
- Păun, D., Cojocaru, M. and Mihailov, V., Mathematical modeling of the influence of main carburizing thermo-chemical treatment parameters on the surface hardness of parts made of MSRR 6009 steel, *Surf. Eng. Appl. Electrochem.*, 2012, vol. 48, no. 3, с. 244.
- Силкин, С.А., Тиньков, О.В., Петренко, В.И., Цынцару, Н.И., Дикусар, А.И., Электроосаждение сплавов Co–W: роль температуры, *ЭОМ*, 2006, т. 42, № 4, с. 11.
- Силкин, С.А., Петренко, В.И., Дикусар, А.И., Анодная обработка упрочняющих электрохимических покрытий в электролитах для электрохимической размерной обработки. Часть I. Микрообработка CoW покрытий в нитратных и

- нитратно-щелочных растворах, *ЭОМ*, 2011, т. 47, № 4, с. 60.
21. Силкин, С.А., Пасинковский, Е.А., Петренко, В.И., Дикусар, А.И., Анодная обработка упрочняющих покрытий в электролитах для электрохимической размерной обработки. Часть II. Микрообработка в хлоридных растворах азотированных поверхностей стали, полученных электрохимико-термической обработкой, *ЭОМ*, 2012, т. 48, № 1, с. 4.
 22. Баранов, С.А., Рехвиашвили, С., Сокуров, А.А., Некоторые вопросы моделирования термодинамических свойств малых капель, *ЭОМ*, 2018, т. 54, № 2, с. 63.
 23. Дикусар, А.И., Силкин, С.А., Образование и разрушение оксидных пленок при высокоскоростном анодном растворении хромоникелевых сталей в электролитах для их электрохимической размерной обработки, *ЭОМ*, 2022, т. 58, № 2, с. 1.
 24. Белевский, С.С., Готеляк, А.В., Силкин, С.А., Дикусар, А.И., Макроскопический размерный эффект микротвердости покрытий из сплавов металлов группы железа с вольфрамом: роль электродного потенциала и кислородсодержащих примесей, *ЭОМ*, 2018, т. 54, № 2, с. 9.
 25. Баранов, С.А., Дикусар, А.И., Кинетика электрохимической нанонуклеации при индуцированном соосаждении металлов группы железа с тугоплавкими металлами (W, Mo, Re), *ЭОМ*, 2021, т. 57, № 5, с. 1.
 26. Белевский, С.С., Ющенко, С.П., Дикусар, А.И., Электроосаждение нанокристаллических Co-W покрытий из цитратных электролитов в контролируемых гидродинамических условиях. I. Электроосаждение Co, *ЭОМ*, 2009, т. 45, № 6, с. 12.
 27. Белевский, С.С., Цынцару, Н.И., Дикусар, А.И., Электроосаждение нанокристаллических Co-W покрытий из цитратных электролитов в контролируемых гидродинамических условиях. II. Скорость электроосаждения и состав покрытий, *ЭОМ*, 2010, т. 46, № 2, с. 9.
 28. Силкин, С.А., Белевский, С.С., Градинарь, А.С., Петренко, В.И. и др., Электроосаждение нанокристаллических Co-W покрытий из цитратных электролитов в контролируемых гидродинамических условиях. III. Микро- и макрораспределение скоростей осаждения, состава и механических свойств, *ЭОМ*, 2010, т. 46, № 3, с. 9.
 29. Гологан, В.Ф., Бобанова, Ж.И., Букарь, С.В., Ивашку, С.В. и др., Применение индуктивно-емкостных устройств в электротехнологических процессах, *ЭОМ*, 2011, т. 47, № 3, с. 100.
 30. Анисович, А.Г., Урбан, Т.П., Терешко, И.В., Логвин, В.А., и др., Трансформация структуры гальванического покрытия меди после воздействия плазмы тлеющего разряда, *ЭОМ*, 2019, т. 55, № 5, с. 31.
 31. Гологан, В.Ф., Бобанова, Ж.И., Ивашку, С.Х., К вопросу о влиянии параметров индуктивно-емкостного устройства на процесс осаждения гальванических покрытий, *ЭОМ*, 2013, т. 49, № 3, с. 9.
 32. Бобанова, Ж.И., Петренко, В.И., Силкин, С.А., Ющенко, С.П., и др., Электроосаждение аморфных сплавов Co-W: роль гидродинамических условий, *ЭОМ*, 2005, т. 41, № 6, с. 86.
 33. Padgurskas J., Žunda A., Rukuiža R., Andriušis A., et al., Investigation of tribological properties of carbide coatings deposited by electrospark at piezoelectric tribocontact, *Surf. Eng. Appl. Electrochem.*, 2015, vol. 51, no. 2, с. 125.
 34. Popescu N., Cojocaru M., Mihailov V., Experimental studies on bulk tempering of 34CrNiMo6 steel, *Surf. Eng. Appl. Electrochem.*, 2012, vol. 48, no. 1, p. 28.
 35. Гузун, М.В., Бобанова, Ж.И., Вида-Симити Иоан, Жумате Николае, Структура, физико-механические и эксплуатационные свойства композиционных покрытий на основе железа и его сплавов, *ЭОМ*, 2006, т. 42, № 5, с. 20.
 36. Кроитору, Д.М., Гурьянов, Г.В., Бобанова, Ж.И., Ботошан, Н.И., Технология восстановления и упрочнения цилиндров двигателей износостойкими покрытиями, *ЭОМ*, 2008, т. 44, № 6, с. 16.
 37. Liu, Y., Li, X., Li, Y., Zhao, Zh. and Bai F., The lattice distortion of nickel particles generated by spark discharge in hydrocarbon dielectric mediums, *Appl. Phys. A*, 2016, т. 122, no. 3, p. 174.
 38. Nguyen, P.K., Lee, K.H., Kim, S.I., Ahn, K.A., et al., Sparkerosion: a high production rate method for producing Bi_{0.5}Sb_{1.5}Te₃ nanoparticles with enhanced thermoelectric performance, *Nanotechnology*, 2012, vol. 23, 415604.
 39. Асанов, У.А., Цой, А.Д., Щерба, А.А., Казекин, В.И., *Электроэрозионная технология соединений и порошков металлов*, Фрунзе: Илим, 1990. 256 с.
 40. Шидловский, А.К., Щерба, А.А., Муратов, В.А., Формирование выходных характеристик преобразователя с учетом свойств объемной электроэрозионной загрузки, *Техн. Электродинамика*, 1988, № 1, с. 28.
 41. Щерба, А.А., Захарченко, С.М., Лопатько, К.Г., Шевченко, Н.И., и др., Разрядно-импульсные системы производства нанокolloидных растворов биологически активных металлов методом объемного электроискрового диспергирования, *Праці Ін-ту електродинаміки НАН України*, 2010, № 26, с. 152.
 42. Шидловська, Н.А., Захарченко, С.М., Перекоп, А.О., Особливості розподілів за діаметрами отриманих за субмілісекундні тривалості розрядних імпульсів іскроерозійних частинок алюмінію і лунок на поверхні його гранул, *Техн. електродинаміка*, 2021, № 1, с. 10.

43. Агеев Е.В., Латыпов Р.А., Семенихин Б.А., Агеева Е.В., *Состав и свойства порошков, полученных электроэрозионным диспергированием твердых сплавов*, Курск: Юго-Зап. гос. ун-т., 2011. 123 с.
44. Агеева, Е.В., Кругляков, О.В., Хорьякова, Н.М., Агеев, Е.В., *Твердые сплавы, полученные из электро-эрозионных порошков*, Курск: ЗАО «Университетская книга», 2015. 164 с.
45. Селютин, В.Л., Агеев, Е.В., Агеева, Е.В., Новиков, Е.П., *Способ получения порошка псевдосплава ВНЖ методом электроэрозионного диспергирования в дистиллированной воде*, РФ пат. RU2683162, 2019.
46. Алтухов, А.Ю., Агеева, Е.В., Кругляков, О.В., Осьминина, А.С., Рентгеноструктурный анализ спеченных вольфрамсодержащих изделий, полученных искровым плазменным спеканием электроэрозионных порошков, *Изв. Юго-Зап. гос. ун-та. Серия: Техника и технология*, 2018, № 1(76), с. 118.
47. Агеева, Е.В., Булычев, В.В., Расчетная оценка влияния электроконтактного теплового источника на процесс электроэрозионного диспергирования, *Изв. Юго-Зап. гос. ун-та. Серия: Техника и технология*, 2019, т. 9, № 1(30), с. 29.
48. Дворник, М.И., Ершова, Т.Б., Верхотуров, А.Д., Разупрочнение отходов твердых сплавов закалкой для последующего дробления, *Перспективные материалы*, 2008, № 5, с. 89.
49. Hallberg, R.T., Ludvigsson, L., Preger, C., Mueller, B.O. et al., Hydrogen-assisted spark discharge generated metal nanoparticles to prevent oxide formation, *Aerosol Sci. Technol.*, 2017, vol. 52, no. 3, с. 347.
50. Ершова, Т.Б., Верхотуров, А.Д., Бутуханов, В.Л., Разработка и получение порошковых материалов с использованием вольфрамсодержащего минерального сырья, *Перспективные материалы*, 2011, № 4, с. 86.
51. Sasai, S., Santo, A., Shimizu, T., Kojima, T. and Itoh H., Recycling process of WC-Co cermets by hydrothermal treatment, *J. Mater. Sci.*, 2005, vol. 40, с. 5167.
52. Агеев, Е.В., Латыпов, Р.А., Разработка установки для получения порошков из токопроводящих материалов, *Изв. Самарского научн. центра РАН*, 2009, т. 11(31), № 5(2), с. 234.
53. Ризун, А.Р., Голень, Ю.В., Денисюк, Т.Д., Рачков, А.Н., и др., Разработка и внедрение электроразрядного процесса селективной дезинтеграции хвостов обогащения полиметаллических руд, *Наука та інновації*, 2013, т. 9, № 2, с. 5.
54. Ризун, А.Р., Яковлев, В.А., Голень, Ю.В., *Способ переработки хвостов флотаций полиметаллических руд*, Пат. Украины. 66243, 2011. Бюл. № 24/201.
55. Ризун, А.Р., Кононов, В.Ю., Рачков, А.Н., Электроразрядная селективная дезинтеграция рудного сырья, *ЭОМ*, 2013, т. 49, № 4, с. 102.
56. Петриченко С.В., Листовский Д.И., Кускова Н.И., Стабилизация разрядных импульсов и особенности согласования искровой нагрузки при электроэрозионном диспергировании металлических и графитовых гранул в жидкости, *ЭОМ*, 2016, № 52(2), с. 8.
57. Петриченко, С.В., Кускова, Н.И., Листовский, Д.И., Сравнение электрических характеристик искровых разрядов в слое металлических и графитовых гранул, погруженных в жидкость, *ЭОМ*, 2015, т. 51, № 3, с. 38.
58. Агеева, Е.В., Агеев, Е.В., Хардинов, С.В., Селютин, В.Л., *Способ получения порошка тяжелых вольфрамовых псевдосплавов электро-эрозионным диспергированием отходов сплава ВНЖ в керосине*, РФ пат. RU2747205, 2021.
59. Селютин, В.Л., Агеев, Е.В., Агеева, Е.В., Новиков, Е.П., *Способ получения порошка псевдосплава W-Ni-Fe методом электро-эрозионного диспергирования в дистиллированной воде*, РФ Пат. RU2683162. 2019. Бюл. № 9.
60. Агеева, Е.В., Хардинов, С.В., Агеев, Е.В., Осьминина, А.С., *Способ получения стальных порошков электроэрозионным диспергированием отходов шарикоподшипниковой стали в воде*, РФ пат. RU2597443. 2016. Бюл. № 25.
61. Агеева, Е.В., Агеев, Е.В., Алтухов, А.Ю., Хардинов, С.В., *Способ получения вольфрам-титаноко-бальтовых порошков из отходов сплава Т30К4 в спирте*. РФ пат. RU2709561. 2019. Бюл. № 35.
62. Агеев, Е.В., Агеева, Е.В., Сабельников, Б.Н., *Способ получения безвольфрамовых твердосплавных порошковых материалов в воде дистиллированной*, РФ пат. RU2763431. 2021. Бюл. № 1.
63. Xia Wentang, Xiang Xiaoyan, Yin Jianguo, Yin Limeng, et al., *Comprehensive recycling method for waste hard alloy*, China Pat. CN105586491. 2016.
64. Zhao Lanhua and Zhou Jianfeng, *Method for recycling tungsten alloy scraps*, China Pat. CN111500866. 2020.
65. Guo Shuanghua, Gao Qing, Xie Chengjia and Zhang Peipei, *Method for preparing tungsten-molybdenum-iron alloy through smelting*, China Pat. CN113789452. 2021.
66. Zheng Mingsong, Xie Anbo and Zheng Zihao, *Integrated equipment for electrolyzing and recycling tungsten powder from tungsten alloy waste*, China Pat. CN215799950. 2022.
67. Zheng Mingsong, Xie Anbo and Zheng Zihao, *Integrated equipment for recycling tungsten powder from electrolysis of tungsten alloy waste*, China Pat., CN113151866. 2021.

68. Yue Haifeng, Yang Chen, Huang Youyuan, He Xueqin et al., *Method for recovering valuable metals from electrode waste*, China Pat. CN113957247. 2022.
69. Ye Huiming, Ye Shaoliang, Ye Ge and Zhu Youming, *Recycling method of waste hard alloy*, China Pat. CN113322378. 2021.
70. Nie Zuoren, Li Ming, Xi Xiaoli, Liu Qingqing and Ma Liwen, *Method for directly preparing tungsten-base alloy powder by electrolyzing discarded hard alloy*, China Pat. CN108149279. 2018.
71. Abdelaziz Bentaj, Nadir Ouayahya, Jean Louis Clement and Jean Pierre Tutusaus, *Method and system*

for reusing materials and/or products by pulsed power, US Pat. US9120101. 2015.

Summary

Modern methods of recycling scrap tungsten pseudo-alloys are considered. The improvement of the method of electroerosive dispersion of conductive granules by strengthening its electrohydraulic action for effective disintegration of tungsten pseudo-alloys into micro-components is discussed.

Keywords: tungsten pseudo-alloys, electroerosion, electrohydraulic method, disintegration