

## **АННОТАЦИЯ**

диссертационной работы на тему:

### **«РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ЦВЕТНЫХ И БЛАГОРОДНЫХ МЕТАЛЛОВ ИЗ КОЛЛЕКТОРНЫХ ШТЕЙНОВ СПС-ПРОЦЕССА»**

представленной на соискание степени доктора философии (PhD) по специальности 6D070900 – «Металлургия»

**СЕЙСЕМБАЕВА РУСЛАНА СЕРИКОВИЧА**

#### **Актуальность исследования.**

Среди наиболее актуальных проблем развития цветной металлургии Казахстана особое значение имеет производство золота. В настоящее время ни количественные, ни качественные показатели золотодобывающей отрасли Казахстана не отвечают нуждам нашего государства. Ограниченные подтвержденные запасы металла, использование на основных золотоизвлекательных предприятиях устаревших, несовершенных, малопроизводительных, многооперационных и экологически опасных технологий добычи, обогащения и металлургической переработки золотосодержащих руд сегодня являются основными сдерживающими факторами роста и интенсификации производства золота в Казахстане. В результате этого допускаются большие потери золота, особенно на стадиях обогащения упорных руд с хвостами, в которых остается до 1,5-2,5 г/т золота. По этой причине общее его сквозное извлечение в товарную продукцию из подобного сырья не превышает 60-70 % и руды данного типа относятся к категории труднообогатимых.

Как известно, более 50 % имеющихся активных запасов руд золота характеризуются как сложные для обогащения, содержат вредные примеси – мышьяк, сурьму и углерод. По мнению экспертов, на долю подобных руд приходится около 60 % от текущих запасов. В металлургии золота данные руды относят к упорным. По мнению экспертов, рудная база Казахстана по среднему содержанию золота в руде (6,3 %) является перспективной для разработки. Однако значительная часть рудопроявлений плохо изучена, запасы по многим месторождениям требуют уточнения.

Для казахстанских месторождений сульфидных золотосодержащих руд характерно наличие большого количества вышеперечисленных вредных примесей в руде. В связи с этим определенная часть запасов характеризуется как упорное и труднообогатимое сырье. По многим таким месторождениям на данный момент нет эффективных технологий обогащения и металлургической переработки. По этой причине эти месторождения золота в настоящее время в промышленном масштабе не эксплуатируются.

Вопросы разработки и освоения новых технологий переработки золотосодержащего сырья являются одной из наиболее актуальных проблем цветной металлургии мира. При этом, одной из нерешенных и коренных задач золотодобывающей промышленности является организация

высокоэффективной переработки сложных по составу упорных коренных руд золота.

Основные современные проблемы золотодобывающих предприятий в мировой промышленной практике также связаны с изменением сырьевой базы в сторону ухудшения качества руд и концентратов с использованием традиционных технологий, которые не отвечают современным требованиям металлургического производства. Это имеет место, как в пирометаллургических, так и в гидрометаллургических способах извлечения этих металлов. Применяемые технологии не обеспечивают необходимый уровень охраны окружающей среды и требуют повышения научно-технологических показателей производства.

Полная пирометаллургическая плавка методом СПС-процесса и извлечения золота и других металлов из коллекторных штейнов может оказаться перспективной для крупных упорных месторождений золота, имеющих в труднодоступных и безводных районах нашей страны и ряда зарубежных стран (ЮАР, Россия, Китай, США, Киргизия и др.).

Актуальность данной работы связана с тем, что как в мировой практике, так и в Казахстане в настоящее время отсутствуют принципиально новые технологии эффективной переработки упорных коренных руд золота с высокими показателями по извлечению благородных металлов в товарную продукцию.

На многих предприятиях золотоперерабатывающей промышленности Казахстана, выпускающих золотосодержащие концентраты, отсутствует пирометаллургическая технология их переработки. Результаты данной работы позволят перерабатывать золотосодержащие руды, минуя стадию их обогащения, пирометаллургическими способами с получением промежуточных продуктов, пригодных для дальнейшей переработки. Поэтому тема данной работы является актуальной.

**Целью диссертационной работы** является разработка комплексной технологии переработки упорных коренных руд золота и сульфидных медных концентратов с получением металлизированной фазы, обогащенной золотом и серебром.

**Объектами исследований** явились штейны и шлаки, получаемые по способу СПС-процесса при прямой плавке упорных руд золота, продукты переработки штейнов - огарки и летучие составляющие – сера, мышьяк и углерод, - металлические расплавы коллекторы золота.

**Предмет исследования** – физико-химические свойства и составы объектов исследования; пирометаллургическая переработка коренных упорных руд золота и сульфидных медных концентратов; процесс окислительного обжига штейнов; процесс восстановления огарков штейна.

**Задачи исследования, их место в выполнении научно-исследовательской работы в целом.**

Основными задачами диссертационной работы являются:

– детальное экспериментальное изучение физико-химических свойств и составов объектов исследования;

– проведение лабораторных тигельных плавков упорных руд золота с сульфидными медными концентратами с определением оптимальных выходов и составов золотосодержащих медных штейнов и изучение их физико-химических и термических свойств и структуры;

– разработка технологических параметров процесса обжига сульфидных коллектирующих золото систем;

– разработка процессов жидкофазного восстановления золотосодержащих огарков с получением металлизированной фазы

#### **Методы исследования.**

К числу основных методов исследования и анализов, примененных при выполнении диссертационной работы, относятся:

– критический анализ патентно-информационных источников;

– исследования проводились методами химического, рентгенофазового, термического анализов;

– выполнение химического анализа образцов на оптическом эмиссионном спектрометре с индуктивно – связанной плазмой Optima 2000 DV (США, PerkinElmer);

– проведение рентгенофазового анализа проб с использованием прибора D8 Advance (Bruker AXS GmbH) с помощью программного обеспечения EVA, Search/match и Базы данных карточек ASTM;

– минералогический анализ проб проводили под микроскопом МИН-8, OLYMPUS, Leica DM 2500P с помощью программы Stream BasicR;

– выполнение термического анализа проб проведено с использованием прибора синхронного термического анализа STA 449 F3 Jupiter посредством программного обеспечения NETZSCHProteus;

– Изучение составов проб и составляющих их природных и искусственных образований проводился на электронно-зондовом микроанализаторе марки JEOL JXA 8230 Electron Probe Microanalyzer;

– эксперименты проводились на индукционной плавильной установке УИП-16-10-0,005, а также использовалась высокотемпературная камерная печь НТС 08/16 Nabertherm GmbH;

– для изучения процесса окислительного обжига золотосодержащего штейна была создана установка на базе трубчатой лабораторной печи СУОЛ-0,25.1/12-М1 с нихромовым нагревателем;

– изучение состава газовой фазы осуществлялся при помощи газоанализатора ПЭМ-2М.

#### **Основные положения, выносимые на защиту.**

На защиту диссертационной работы выносятся следующие положения:

– процесс переработки коренных упорных руд золота и сульфидных медных концентратов;

– результаты опытов по изучению процесса обжига исследуемых штейнов в интервале температур 600-900 °С без циркуляции потока окислительной газовой фазы;

– результаты опытов по изучению процесса восстановления золотосодержащих огарков;

- процесс экспериментального изучения влияния расхода кокса на степень восстановления огарка;
- результаты опытных восстановительных плавков золотосодержащих огарков.

#### **Основные результаты исследования:**

– впервые исследованы особенности строения и свойств штейнов прямой плавки руды месторождения Бакырчик следующего состава:  $\text{Cu}_9\text{Fe}_9\text{S}_{16}$  (моихукит),  $\text{Cu}(\text{OH})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  (гидроксид меди),  $\text{FeS}$  (троилит),  $\text{CaS}$  (олдхамит),  $\text{Cu}_{1,1}\text{Fe}_{1,1}\text{S}_2$  (талнахит),  $\text{CaFe}_2\text{O}_4$  (хармунит),  $\text{ZnS}$  (сфалерит),  $\text{CuAsS}$  (лаутит),  $\text{PbS}$  (галенит),  $\text{CuFe}_2\text{S}_3$  (изокубанит) с целью их дальнейшей пирометаллургической переработки;

– впервые дифференциально термическими исследованиями были установлены полиморфные превращения штейна прямой плавки руды с фазовыми переходами средней и низкой интенсивности с максимальным развитием при 140, 686, 761 °С соответствующие  $\text{FeS}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  и  $\text{Fe}^0$ ;

– установлена температура плавления штейна прямой плавки руды в интервале 900-1200 °С;

– полученные составы штейнов методом прямой плавки руды обеспечивают извлечение до: 98 % Au, 97 % Ag и 95 % Cu;

– установлена оптимальная температура обжига штейнов – 800 °С, обеспечивающая снижение содержания серы и углерода в огарках до 4,89 и 1,50 %, соответственно, за счет окислительного потенциала газовой фазы;

– электронно-зондовыми исследованиями огарков установлено, что они образуются новообразованиями в виде соединений  $\text{FeO}_2$ , составляющего около 75-77 % и новообразованным минералом ольдгамитом с формулой  $\text{CaS}$ , составляющего 10 %;

– дифференциально термическим анализом установлено, что температура плавления огарков с появлением жидкой фазы составила – 1241 °С, что определило температуру дальнейшей восстановительной плавки;

– при восстановительной плавке огарков было определено, что с уменьшением выхода металлизированной фазы она закономерно обогащается металлами: золотом от 189,2 до 808,1 г/т, серебром от 139,75 до 544,8 г/т и медью от 2,19 до 6,82 %, что свидетельствует о возможности закономерного регулирования содержаний этих металлов в металлизированном сплаве путем изменением степени восстановления огарка;

– экспериментально методом жидкофазной восстановительной плавки огарка определен оптимальный состав шлака:  $\text{SiO}_2$  – 33-35 %;  $\text{CaO}$  – 20-25 %; около  $\text{Al}_2\text{O}_3$  – 10 %; Au – 0,1 г/т и Ag – 2,0 г/т, который обеспечивает низкие потери металлов при получении металлических сплавов, содержащих %: 70-75 Fe; 1-2 Cu; 145-150 г/т Au и 100-120 г/т Ag;

#### **Обоснование новизны и важности полученных результатов.**

Новизна данной работы обусловлена тем, что в мировой практике золотодобычи нет примеров вскрытия упорных углисто-мышьяковистых коренных руд золота методами их прямой плавки с целью их сократительной пирометаллургической селекции (СПС-процесс). При этом характерное СПС-

процессу высокое извлечение золота из упорных коренных руд в коллекторные продукты основаны на новых физико-химических подходах, когда в условиях высоких температур и жидкофазных взаимодействий в расплаве имеет место практически полное вскрытие упорного золотосодержащего сырья. При этом полученные в условиях СПС-процесса такие золотосодержащие сплавы, коллектирующие 95-98 % золото и серебро, также являются новыми полупродуктами в металлургии золота.

Разработана высокоэффективная технология переработки упорных коренных руд золота с высокими показателями по извлечению благородных металлов. Из технологической схемы были полностью исключены малоэффективные для упорных золото-мышьяк-углеродистых коренных руд золота процессы тонкого измельчения, обогащения и соответственно потери золота с хвостами. Из шихты в процессе ее плавки в виде отвальных шлаков, направляемых на производство строительных материалов, полностью удаляются все минералы пустой породы, составляющие 70-80 % от веса шихты, а в газовую фазу в процессе пироселекции шихты практически полностью переходят мышьяк, углерод и другие летучие составляющие. В области высоких температур и при жидкофазных взаимодействиях в условиях восстановительно-сульфидирующего процесса исключается отрицательное влияние на вскрытие коренных руд золота всех форм упорности. Золото, серебро и медь на 95-98 % переходят в коллекторный расплав, выход которого от веса шихты составит 5-15 % в результате почти десятикратного сокращения объемов исходной шихты. Отсутствие в технологическом цикле специальных золотоизвлекательных переделов и возможность переработки больших объемов упорных руд и полученных штейнов.

#### **Соответствие направления развития науки или государственным программам.**

Главные предпосылки для выполнения данной работы непосредственно связаны с нерешенными проблемами золотодобывающей отрасли мира и Казахстана по привлечению больших объемов упорных коренных руд золота для извлечения из них благородных и цветных металлов.

Выполненные за последнее время аналитические обзоры многими ведущими учеными-металлургами главных стран-производителей золота в области критического анализа технологического уровня многих действующих золотоизвлекательных предприятий мира показали на отсутствие высокоэффективных технологий и аппаратуры для переработки больших объемов упорных руд золота. По этой причине доля производства золота из таких руд составляет лишь 8-10 %, тогда как запасы золота в упорных рудах мира в общем балансе составляет 40-50 %. Это положение особо характерно для Казахстана, где богатейшие золотом месторождения сегодня в полном объеме не перерабатываются.

Большинство технологических процессов, эксплуатируемых даже на передовых предприятиях производства золота не решают полностью коренные проблемы эффективной переработки упорных коренных руд золота.

Даже современные технологии допускают большие потери золота, начиная от обогащения руд и до цианирования продуктов с хвостами этих переделов.

Исходя из этого, была предложена прямая плавка упорных руд золота на золотосодержащие штейны, минуя все процессы их обогащения. Создание и освоение высокопроизводительного пирометаллургического метода вскрытия упорного золотосодержащего сырья – СПС-процесса требует новых способов извлечения благородных и цветных металлов из коллекторных продуктов, обеспечивающие также высокую производительность агрегатов, лучшие технологические показатели, экономичность и возможность более эффективного освоения в промышленном масштабе.

Это положение, являясь основным обоснованием данной работы, требует выполнения значительного объема исследований по испытаниям новых коллекторных продуктов и методов извлечения из них золота и других металлов.

Как показали исследования по изучению процессов прямой плавки различных по составу упорных коренных руд золота, полученные при СПС-процессах переработки особоупорных руд золота, коллекторные штейны существенно отличались по составу от штейнов, полученных при плавках золотомышьяковых концентратов и особенно по содержаниям благородных металлов. К тому же в литературе отсутствуют сведения и исследования по вскрытию таких штейнов пирометаллургическими методами.

Исходя из этого, первой задачей исследований в данной работе было детальное изучение процесса обжига коллекторных штейнов, полученных в основном при прямой плавке упорных коренных руд золота, минуя их обогащение.

Ранее были проведены исследования по определению параметров процесса штейнообразования с подбором сульфидизатора в условиях плавки золотосодержащих руд и концентратов при 1500 °С и оптимальных составах шлаков. При этом в ходе испытаний и разработок СПС-процесса прямой плавки упорных руд ряда месторождений Казахстана основное внимание уделялось изучению концентрации золота и серебра в железистых сульфидных штейнах, а для извлечения из них золота, как было отмечено выше, был использован метод оксигидрохлорирования.

С целью поиска и разработки других методов концентрации золота, второй задачей исследований было изучение возможностей получения новых видов коллекторов благородных металлов и извлечения из них золота и других металлов.

Высокий научно-технический уровень выполняемых исследований достигнут исследованием проблемы в области физико-химии и технологии современных пирометаллургических процессов в цветной металлургии, в частности в области пирометаллургии благородных металлов. Кроме того, были использованы современные физико-химические методы изучения руд и новые высокотемпературные пироустановки.

В диссертационной работе использованы результаты исследований переработки упорных золотосодержащих руд и концентратов, полученных

при выполнении научно-исследовательских работ в рамках грантового финансирования научных исследований на 2015 – 2017 гг. по теме: «Исследование и разработка технологических параметров новых процессов извлечения золота и цветных металлов из коллекторных сульфидных и металлических расплавов сократительной пирометаллургической селекции упорных руд золота».

Настоящая работа является продолжением исследований, проведенных по проекту «Разработка комплексной технологии пирометаллургической селекции упорных золотосодержащих руд и концентратов с переводом золота в штейн методом сократительной электроплавки и извлечения золота из штейнов способом электромембранного оксигидрохлорирования (месторождения Жолбарысты, Шован ТОО «Терискей», Маятас ТОО «Маятас», Саяк-4 и др.)» программы «Научно-технологическое сопровождение интенсификации производства золота в Республике Казахстан» на 2011-2014 гг.

**Вклад докторанта в подготовку каждой публикации.**

По теме диссертационной работы опубликовано 13 печатных работ, в том числе 2 статьи в журналах, рецензируемых базой данных Scopus, 4 статьи из списка научных журналов, рекомендованных ККСОН МОН РК, 5 тезисов докладов, получено 2 патента.

Основные положения диссертационной работы доложены на 4 международных конференциях, в их числе:

- Международная научно-практическая конференция «Современные проблемы и инновационные технологии решения вопросов переработки техногенных месторождений Алмалыкского горно-металлургического комбината» (Узбекистан, 2019)

- 2<sup>nd</sup> International Conference on Materials Science and Engineering ICMSE-2019 (Cairo, Egypt, 2019)

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения и 4 приложений. Работа изложена на 140 страницах машинописного текста, содержит 39 таблиц, 41 рисунок.