

На правах рукописи



ФЕДОРОВ Сергей Андреевич

**РАЗРАБОТКА НАУЧНЫХ ОСНОВ ПОВЫШЕНИЯ ИЗВЛЕЧЕНИЯ
МИКРОДИСПЕРСНОГО ЗОЛОТА И ПЛАТИНЫ ИЗ
ТРУДНООБОГАТИМЫХ МИНЕРАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Специальность 05.16.02 – Metallургия черных, цветных и редких металлов

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Екатеринбург – 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте металлургии Уральского отделения Российской академии наук

Научный руководитель доктор технических наук
Амдур Алексей Миронович

Официальные оппоненты: Мамяченков Сергей Владимирович,
доктор технических наук, старший научный сотрудник, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», заведующий кафедрой металлургии цветных металлов, г. Екатеринбург

Тимофеев Константин Леонидович,
доктор технических наук, акционерное общество «Уралэлектромедь», начальник технического отдела инженерно-производственного управления, г. Верхняя Пышма

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук», г. Красноярск

Защита состоится «10» июня 2022 г. в 14:00 на заседании диссертационного совета Д 004.001.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте металлургии Уральского отделения Российской академии наук по адресу: 620016, г. Екатеринбург, ул. Амундсена, 101.

С диссертацией можно ознакомиться в Центральной научной библиотеке Уральского отделения Российской академии наук и на сайте Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института металлургии Уральского отделения Российской академии наук <http://www.imet-ural.ru>.

Автореферат разослан: «___» _____ 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук



Салина Валентина Алексеевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Значительный рост спроса на золото и платину, а также сокращение их легкообогатимых природных запасов заставляют вовлекать в производство забалансовые труднообогатимые руды и техногенные отходы горно-металлургического комплекса. Основная проблема извлечения золота из таких материалов заключается в том, что существенная доля его частиц имеет размеры менее 10 мкм. Такое микродисперсное золото при измельчении вскрывается незначительно. Тонкий помол минеральных материалов с помощью бисерных мельниц лишь немного повышает извлечение Au. В процессах гравитации и флотации металл извлекается с минералом – носителем. Цианированием микродисперсное золото извлекается лишь после разложения сульфидов. Показатель извлечения Au такими методами обогащения во многих случаях падает до 20% и ниже. В открытых источниках информации практически нет сведений о создании технологии извлечения микродисперсного золота как из труднообогатимых руд, так и из техногенных отходов. Известны работы, в которых предлагается укрупнять такие частицы золота в процессе лазерного нагрева. Однако они проводятся в основном на эмпирическом уровне, что сужает ценность полученных в опытных условиях результатов.

Отходы предприятий горно-металлургического комплекса содержат более 1000 т металлов платиновой группы и тонны золота только в хвостах обогащения. Наличие такого количества отходов свидетельствует о том, что на стадиях переработки сульфидного сырья терялась часть платины и золота, находящихся в микродисперсном состоянии. Одной из стадий является плавка Cu-Ni сульфидных материалов на штейн. При плавке происходит разделение расплава на сульфидную и оксидную составляющие (штейн и шлак). Платина и золото концентрируются в штейне, но часть их попадает в шлак, который в дальнейшем уходит в отвалы. Это приводит к потерям металлов. Чтобы уменьшить потери благородных металлов со шлаками при плавке сульфидных материалов на штейн, необходимо изучить механизм их перехода в шлак. Одним из вероятных вариантов этого перехода является флотация капле штейна, содержащих платину и золото, пузырьками газа, которые появляются вследствие разложения сульфидов. Вопросы описания флотации, влияния флюсов на потери ценных металлов являются важными для разработки способа повышения извлечения Au, Pt и других полезных компонентов в штейн при плавке сульфидных материалов.

Таким образом, тема диссертационной работы, направленной на разработку научных основ повышения извлечения микродисперсного золота и платины из труднообогатимых минеральных материалов при их высокотемпературной обработке, является актуальной.

Степень разработанности темы исследования. Теоретические основы поведения золота и платины на пирометаллургической стадии переработки сульфидных материалов рассмотрены А.В. Ванюковым, В.Я. Зайцевым, И.Н. Плаксиным, Н.А. Ватолиным, Л.И. Леонтьевым, Г.В. Скоповым, Е.Н.

Селивановым, Л.Ш. Цемекхманом, С.С. Набойченко, И.Н. Масленицким, Л.В. Чугаевым, В.Ф. Борбатов, А.И. Окуневым, М.В. Никитиным, Л.С. Стрижко, В.А. Макаровым, В.Г. Михеевым, П.Н. Самородским, В.Н. Шамовым, А.И. Юрьевым, С.И. Матвеевым, Н.А. Шабуниной, Л.И. Алексеева, В.Д. Чегодаевым, К. Avarmaa, H. Johto, P. Taskinen, T. Sakai, S.W. Ip, J.M. Toguri, X. Cheng, Z. Cui, L. Contreras, M. Chen, A. Nguyen, B. Zhaoi и др. Исследования касались минералогии платины в лежалых шлакоотвалах; распределения благородных металлов между шлаком и штейном; флотации капель штейна в шлаках различного состава в зависимости от парциального давления кислорода, межфазные натяжения в этой системе; прорыва пузырьком газа поверхности двух жидкостей. Однако этих данных недостаточно: необходимо расширить знания для обоснования технических решений по снижению потерь благородных металлов при плавке сульфидных материалов на штейн.

Исследование движения и укрупнения микродисперсных капель золота в оксидных расплавах, а также в пористых минеральных образцах при их нагреве, выполнены впервые.

Объектами исследований являются силикатно-карбонатная руда; медно-колчеданная руда; медно-никелевая сульфидная руда, штейн и шлак после ее плавления; конвертерный шлак; хвосты обогащения.

Предмет исследования – способы повышения извлечения золота и платины из труднообогатимых минеральных материалов в металлургических агрегатах.

Целью работы является разработка физико-химических основ повышения извлечения микродисперсного золота и платины из труднообогатимых минеральных материалов путем их высокотемпературной обработки.

В рамках поставленной цели решались следующие **задачи**:

1. Исследование влияние нагрева до различных температур на форму, размеры и состав частиц золота и платины в минеральных материалах.

2. Изучение флотации капель золота газовыми пузырьками в оксидном расплаве, как одного из основных механизмов укрупнения металлических микрокапель при плавлении минерального сырья; анализ стадий процесса.

3. Установление условий и стадий флотации золото- и платиносодержащих сульфидных капель газовыми пузырьками в оксидных расплавах – одной из основных причин потерь благородных и цветных металлов при плавке сульфидных материалов на штейн.

4. Разработка научных основ повышения извлечения микродисперсного золота из труднообогатимых минеральных материалов путем их плавления и последующей продувки расплава.

5. Разработка научных основ повышение извлечения золота и платины в штейн при плавке сульфидных материалов путем продувки шлака и уменьшением его вязкости за счет добавления в исходную шихту флюса флюорита.

Научная новизна работы

1. Установлено, что содержание металлических примесей в частицах золота растет с уменьшением их линейного размера, когда он меньше 2 мкм. Аналогичная зависимость имеет место для игольчатых образований PtFe. Это связано с повышением энергии Гиббса при диспергировании.

2. Рассмотрена модель нагрева дисперсной частицы золота, помещенной в среду с определенными свойствами, которая решалась численными методами с помощью пакета программ Matlab. В результате установлено, что в период нагрева во всех минеральных средах имеет место перепад температур по сечению дисперсных частиц золота. Из-за этого перепада капли золота движутся к поверхности пористых образцов (к источнику тепла) под действием термокапиллярного эффекта.

3. Установлен один из основных механизмов укрупнения капель золота в оксидном расплаве – флотация капель пузырьками газа и их последующая коагуляция: пузырек газа, поднимаясь в оксидном расплаве, на своем пути способен захватить десятки тысяч микрокапелек золота.

4. Показано, что формирование системы пузырек газа – капля золота в оксидном расплаве не будет тормозить общий процесс объединения микрокапелек золота пузырьками газа, не будет лимитирующим звеном всего процесса.

5. Получены уравнения, описывающие условия флотации капли пузырьком в жидкости на примере системы газовой пузырек - сульфидная капля - шлак – одной из основных причин потерь золота и платины при плавке сульфидных материалов на штейн. Радиус пузырька может быть меньше радиуса капли.

Теоретическая и практическая значимость работы

1. Расширены научные знания о свойствах и поведении микродисперсных золота и платины, содержащихся в минеральных материалах: установлена зависимость увеличения содержания примесей в микрочастицах золота и платины при уменьшении их линейного размера; показано, что в период нагрева минеральной среде имеет место перепад температур по сечению дисперсных частиц золота, благодаря чему капли Au могут двигаться в порах материала под действием термокапиллярного эффекта.

2. Получены уравнения, описывающие условия и стадии флотации металлических и сульфидных капель в оксидных расплавах. Процесс флотации – один из основных механизмов укрупнения металлических и сульфидных капель в оксидных расплавах и одна из основных причин потерь золота, платины и других ценных компонентов при плавке сульфидных материалов на штейн.

3. Разработаны научные основы повышения извлечения микродисперсного золота из труднообогатимых руд и техногенных образований, основанный на укрупнении его частиц при расплавлении материала и его последующей продувки воздухом. На примере хвостов обогащения золотосодержащей руды (содержание в хвостах 1 г/т) показано, что извлечение Au в концентрат гравитационной сепарацией после плавления и продувки хвостов увеличилось

на 56.1%, цианированием на 12%. Содержание золота в гравитационном концентрате возрастает на порядок (с 2.77 до 43.6 г/т).

4. Разработаны научные основы повышения извлечения золота и платины в штейн при плавке сульфидного материала путем продувки шлака инертным газом и понижением вязкости этого шлака (один из вариантов – добавление в исходную шихту флюса флюорита). На примере медно-никелевых сульфидных материалов показано уменьшение содержания благородных и цветных металлов в шлаке в 1,1-5,5 раза и, соответственно, обогащение этими металлами штейна.

Методология и методы исследования. Экспериментальные исследования проводились на лабораторной базе ФГБУН Института металлургии Уральского отделения РАН. Пробоподготовка исследуемых минеральных проб перед экспериментами и химическими анализами состояла из дробления этих проб и последующим истиранием в вибрационном истирателе; перед исследованием проб под растровым электронным микроскопом из них изготавливались полированные аншлифы, которые в дальнейшем покрывались тонким слоем углерода (графита). Нагрев и плавление истертых образцов в диапазоне температур от 1100 до 1450°C осуществлялись в печи сопротивления с графитовым нагревателем, в корундовых и графитовых тиглях. Продувка расплава производилась через корундовую трубку атмосферным воздухом с расходом последнего не более 0,5 л/мин с помощью электрической воздуходувки. В работе использованы современные методы химического (рентгенофлуоресцентный спектрометр S4 Explorer и атомно-эмиссионный спектрометр Spectroflame Modula S), рентгенофазового (дифрактометр XRD 7000 C Shimadzu) и микроэнергодисперсионного (Oxford Instruments X-act, ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН) анализов. Идентификация фаз по данным РФА проведена с использованием базы данных PDF-2, а анализ дифрактограмм – с использованием программы Crystal Impact Match 3. Термодинамическое моделирование проведено с использованием программного комплекса HSC Chemistry. Моделирование нагрева частиц – в пакете программ Matlab.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Содержание примесей в частицах золота значительно увеличивается при их радиусе меньше 2 мкм, теряется огранка кристаллов, начинает больше преобладать глобулярная форма частиц. Аналогичная зависимость имеет место для платины.

2. Наличие капелек золота на поверхности пористых минеральных материалов при их нагреве свыше 1100°C внешним источником объясняется движением этих капелек под действием термокапиллярного давления. Однако вероятность соприкосновения капель и последующая их коагуляция при низком содержании золота в материале малы из-за значительных расстояний между этими каплями.

3. Флотация капелек золота газовыми пузырьками в оксидном расплаве приводит к укрупнению этих капелек и концентрированию их на поверхностях расплава, что приводит к значительному повышению извлечения золота (на 51,4%) методами гравитационной сепарации.

4. Подчеркнуто, что одной из основных причин перехода золота и платины из штейна в шлак при плавке сульфидных материалов – это флотация сульфидных капель. Газовый пузырек способен вынести в шлак на себе сульфидную каплю большим радиусом, чем сам пузырек.

5. Продувка шлака инертным газом способствует укрупнению дисперсных сульфидных капель, что ведет к уменьшению содержания благородных и цветных металлов в шлаке и обогащению ими штейна.

Достоверность полученных результатов базируется на использовании для экспериментов современного оборудования и установок, входящих в центры коллективного пользования «Урал - М» ИМЕТ УрО РАН и Южно-Уральский центр ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН, а также обновляемых баз данных (ICDD PDF 2) и современных методик экспериментов. Статьи по результатам исследования опубликованы в высокорейтинговых рецензируемых научных журналах (Доклады академии наук, Цветные металлы, Metallurg, Canadian Metallurgical Quarterly, Metals и др.).

Личный вклад автора. Изложенные в работе результаты получены лично автором или при его непосредственном участии. Автором выполнены: литературный обзор, термодинамическое моделирование и моделирование нагрева частиц золота, лабораторные эксперименты, анализ и обобщение полученных результатов.

Апробация работы. Основные результаты научно-квалификационной работы доложены и обсуждены на Всероссийских и международных научно-практических конференциях: «Менделеевский съезд по общей и прикладной химии» (Екатеринбург, 2016; Санкт-Петербург, 2019), «Фундаментальные исследования и прикладные разработки процессов переработки и утилизации техногенных образований» (Екатеринбург, 2017, 2019, 2021), «IUPAC High Temperature Materials Chemistry Conference» (Екатеринбург, 2018), «Физика. Технологии. Инновации» (Екатеринбург, 2019, 2021), «the 15th SGA Biennial Meeting» (Шотландия, 2019), «Перспективы развития металлургии и машиностроения с использованием завершенных фундаментальных исследований и НИОКР» (Екатеринбург, 2020), «Mendeleev – 2021» (Санкт-Петербург, 2021).

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 19 научных работ, в том числе 9 статей в рецензируемых научных журналах из перечня ВАК РФ и международных баз данных Scopus и Web of Science, 3 статьи в сборниках научных трудов, 1 заявка на патент РФ.

Связь диссертации с планами НИР. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов №19-38-90080\19, №18-29-24081 и №16-08-00768; стипендии Президента Российской Федерации молодым ученым и аспирантам; Государственного задания Министерства образования и науки РФ №11.256.2014/К; Государственного задания №075-03-2021-303 от 29.12.2020 г.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Работа соответствует паспорту научной специальности 05.16.02 – Металлургия черных,

цветных и редких металлов п. 1 «Рудное, нерудное и энергетическое сырье», п. 2 «Твердое и жидкое состояние металлических, оксидных, сульфидных, хлоридных систем», п. 4 «Термодинамика и кинетика металлургических процессов», п. 5 «Металлургические системы и коллективное поведение в них различных элементов», п. 9 «Подготовка сырьевых материалов к металлургическим процессам и металлургические свойства сырья», п. 11 «Пирометаллургические процессы и агрегаты», п. 14 «Металлургические шлаки и их использование».

Структура и объем работы. Работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, изложена на 144 страницах машинописного текста, содержит 51 рисунок, 16 таблиц, список использованных источников включает 133 наименования отечественных и зарубежных авторов.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, поставлена цель и сформулированы основные задачи исследования, научная новизна работы, ее теоретическая и практическая значимость, а также положения, выносимые на защиту.

В первой главе приводится литературный обзор типов труднообогатимых руд и техногенных отходов, формы нахождения в них золота и платины, способов извлечения благородных металлов из таких материалов. Изучение отечественной и зарубежной литературы позволило сделать следующие выводы:

1. Золото в труднообогатимых минеральных материалах присутствует в металлической форме и в виде сплавов (преимущественно с медью и серебром); частицы Au имеют размер менее 10 мкм (микродисперсные). Платина образует сплавы с железом, арсениды и сульфиды. Содержание Au и Pt в минеральном сырье редко превышает 1 г/т.

2. Основные способы извлечения золота из труднообогатимых несulfидных материалов – гидрoметаллургические (в частности – цианирование). Однако извлечение микродисперсных частиц благородного металла низкое (20% и меньше).

3. При плавке сульфидных материалов в шлак переходит часть золота и платины. На данный процесс существенно влияет вещественный состав штейна и шлака. Основные потери благородных металлов связаны с сульфидными каплями, в которых они находятся. Одна из причин перехода сульфидных капель в шлак – их флотация газовыми пузырьками.

4. Рассмотрена стадия флотации: подъемная сила пузырька должна преобладать над силой тяжести за вычетом силы выталкивания.

5. Основная доля существующих способов, позволяющих повысить извлечение Au и Pt из сульфидных материалов при их плавке на штейн, строится на плавке исходной шихты с флюсами, восстановителями и выщелачиванием штейна после охлаждения расплава.

К настоящему времени не рассмотрены механизмы движения и укрупнения микрокапель золота в оксидных расплавах, стадии и условия флотации сульфидных капель (от прохождения пузырька через границу шлак-штейн до его всплывания вместе с капелькой). Решение данных вопросов позволит разработать научные основы способов повышения извлечения Au и Pt из труднообогатимых минеральных материалов.

Во второй главе рассматривается форма нахождения золота и платины в продуктах плавления минеральных материалов и поведение Au при нагреве и плавлении несulfидных минеральных материалов.

Установлено, что после плавления сульфидного материала (медно-колчеданной руды с добавленным золотом в количестве 1,3 кг/т в форме порошка с частицами менее 1-2 мкм) при температуре 1300°C и выдержке в течении 30 мин в штейне обнаружены каплевидные золотосодержащие интерметаллические частицы размерами от менее 1 до 43 мкм и средним содержанием Au 81 масс.%. Платина, после плавления медно-никелевой сульфидной руды с добавленным дисперсным порошком губчатой Pt в количестве 2,5 кг/т при температуре 1300°C и выдержке в течении 30 мин в штейне, образует сплавы с железом и никелем, которые представляют собой игольчатые образования PtFe длиной от 20 до 500 мкм и толщиной до 10 мкм.

В шлаках каплевидные частицы золота и игольчатые образования PtFe (средний размер их около 7 мкм) обнаружены только в сульфидных каплях. Размер капель варьируется от 2 мкм до 4 мм, они прикреплены к газовым пузырькам (рис. 1).

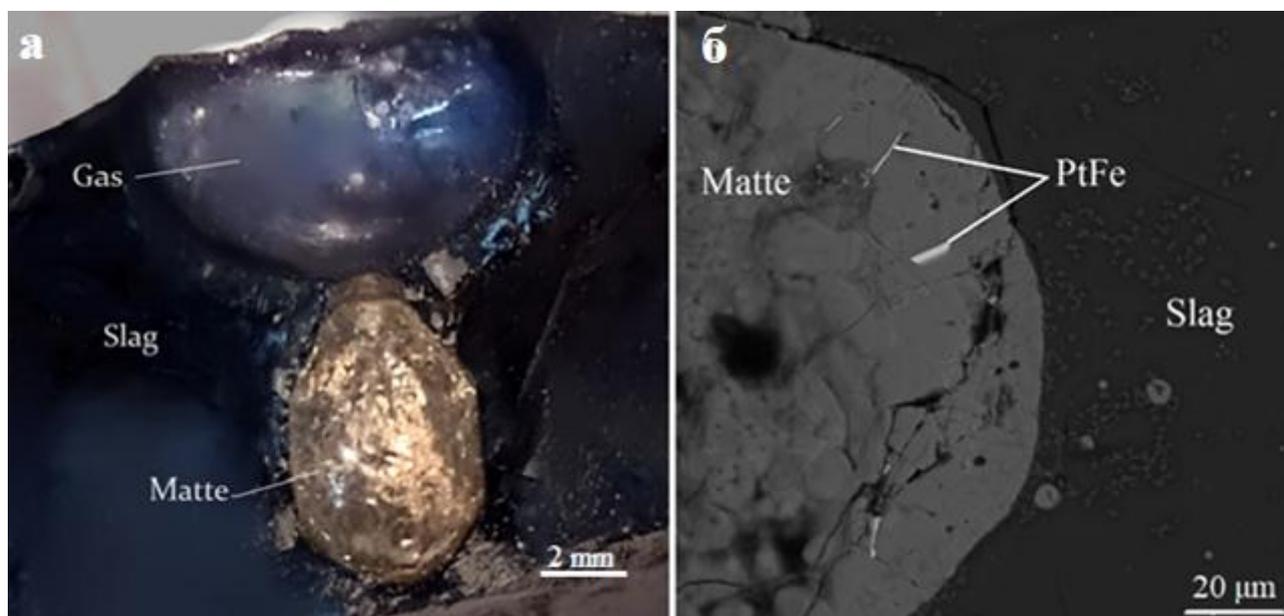


Рисунок 1 – Сульфидные капли в шлаке после плавления медно-никелевой сульфидной руды при температуре 1300°C: а – капля штейна (Matte) в момент отрыва от пузырька газа (Gas) в шлаке (Slag); б – капля штейна (Matte) в шлаке (Slag), содержащая платиновые фазы (PtFe)

Проанализировав сульфидные материалы до и после плавления, было установлено, что содержание примесей растет с уменьшением размера частиц рудного золота, рисунок 2. При радиусе менее 2 мкм оно убывало с уменьшением размеров частиц, причем в этой области возрастал разброс данных. Последнее свидетельствует о том, что на состав частиц сильно влияют случайные факторы. Размерный эффект выявлен также и для платины после плавления медно-никелевой сульфидной руды. Содержание платины падает с уменьшением толщины образований PtFe, рисунок 2. Это связано с повышением энергии Гиббса при диспергировании.

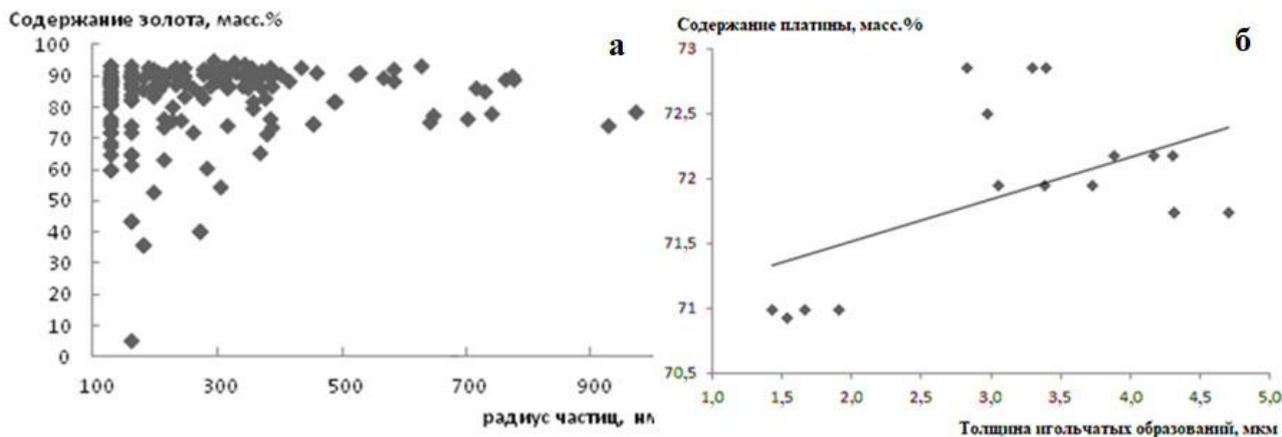


Рисунок 2 – Зависимость содержания благородного металла в частице от ее линейных размеров: а – для частиц золота в медно-колчеданной руде; б – для игольчатых образований интерметаллида PtFe в штейне после плавления медно-никелевой сульфидной руды

Экспериментально установлено, что при нагреве силикатно-карбонатной руды до температуры 1100°C в печи сопротивления в атмосфере воздуха, превышающей температуру плавления золота (1063°C), на ее поверхности появились капельки Au правильной сферической формы. Возможной причиной такого эффекта является термокапиллярное движение, которое возможно только в процессе нагрева капель жидкости.

Для обоснования возможности термокапиллярного движения капель золота микронного размера надо определить перепад температуры ΔT на торцах при нагреве. Сделать это экспериментально крайне затруднительно. Поэтому была предложена модель нагрева дисперсной частицы золота, помещенной в среду с определенными свойствами, которая решалась численными методами с помощью пакета Matlab. Установлено, что в период нагрева имеет место перепад температуры по сечению как твердых, так и жидких микродисперсных частиц золота. Он зависит от теплофизических свойств вмещающего материала и размера частиц. Однако, вероятность соприкосновения капель и последующая коагуляция при низком содержании золота в рудных материалах мала из-за значительных расстояний между частицами золота (2,1 мм при гипотетически равномерном распределении частиц радиусом 1 мкм по объему и содержанию 3 г/т).

При расплавлении минерального материала капельки золота, в отсутствие газовых пузырьков, будут осаждаться на дно оксидного расплава. Оценена скорость осаждения металлических капелек по формуле Стокса. Начиная с радиуса 5 мкм, время осаждения такой капли будет длиться больше часа. С учетом того, что мощность расплавов шлака в различных производственных печах значительна, и варьируется от 40 до 180 см (на примере рудно-термической печи), то время осаждения капель будет измеряться в сутках. В связи с этим, коагуляция микродисперсных капель золота при их осаждении в оксидном расплаве маловероятна. Второй вариант укрупнения капель, наиболее вероятный – это их флотация газовыми пузырьками, которой посвящена следующая глава.

В третьей главе проанализированы условия и стадии флотации металлических и сульфидных капель, как одного из основных механизмов укрупнения микродисперсных капель золота и одной из основных причин потерь Au и Pt при плавке сульфидных материалов на штейн.

Условие флотации для твердой частицы золота в шлаке (рис. 3) можно записать в виде:

$$2\pi R\sigma_s \cos \theta > \frac{4}{3}\pi R^3 g(\rho_{Au} - \rho_s), \quad (1)$$

где R – периметр смачивания; ρ_{Au} , ρ_s – плотность золота и расплава соответственно; σ_s – межфазное натяжение на границе расплав – газ.

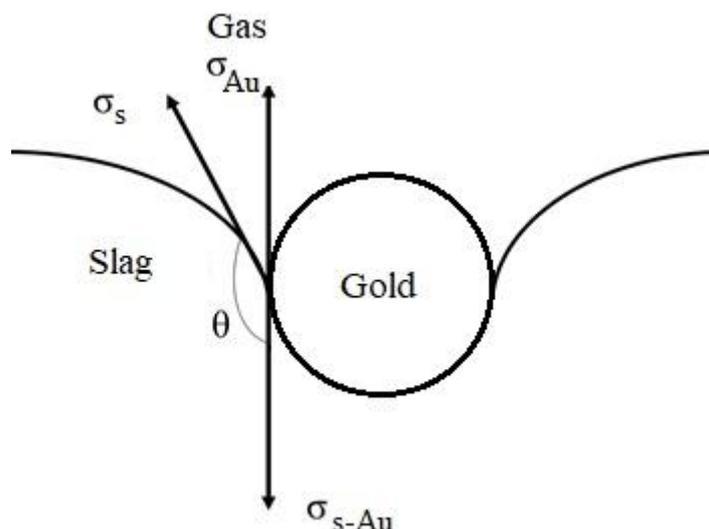


Рисунок 3 – Схема флотации капли золота в шлаке: σ_s – поверхностное натяжение шлака, σ_{Au} – поверхностное натяжение золота, σ_{s-Au} – межфазное натяжение на границе шлак-золото, θ – угол смачивания (между векторами σ_{s-Au} и σ_s)

При флотации капля присутствуют две жидкости и газ. Радиусы кривизны капли на границе с газом и на границе с расплавом из-за разности капиллярных давлений будут неодинаковыми. В результате форма капли искажается. Для равновесия на периметре смачивания необходимо, чтобы геометрическая сумма

всех трех векторов натяжения (σ_{s-Au} - на границе оксидный расплав - золото, σ_{Au} - на границе золото - газ, σ_s - на границе оксидный расплав - газ) была равна нулю. В случае оксидный расплав - золото, как показали опыты, угол смачивания θ (между векторами σ_{s-Au} и σ_{Au}) близок к 140° . Таким образом, излом поверхности капельки золота на трехфазной границе будет не столь большим, поверхность золото - газ не очень отличается от продолжения поверхности золото - оксидный расплав.

Условие флотации (1) выполняется для каплей золота радиусом до 1700 мкм. Капли будут флотироваться пузырьками газа, если архимедова подъемная сила пузырька больше силы тяжести капли:

$$V_g \rho_s > V_{Au} \rho_{Au}, \quad (2)$$

где V_g , V_{Au} – объем пузырька и капли золота соответственно.

Плотность золота примерно в 6 раз больше плотности оксидного расплава. Следовательно, радиус пузырей газа, флотирующих капли золота, должен по крайней мере в 2 раза превышать их радиус.

Изучение микрофотографий оксидного расплава после экспериментов показало присутствие пузырьков радиусом до 2 мм, что достаточно для флотации довольно крупных каплей золота в соответствии с уравнением (2). На поверхности оксидного расплава наблюдались капли золота диаметром 40 мкм и более, а на дне расплава – более крупные капли диаметром до 1 мм (рис. 4), прикрепленные к газовым пузырькам.

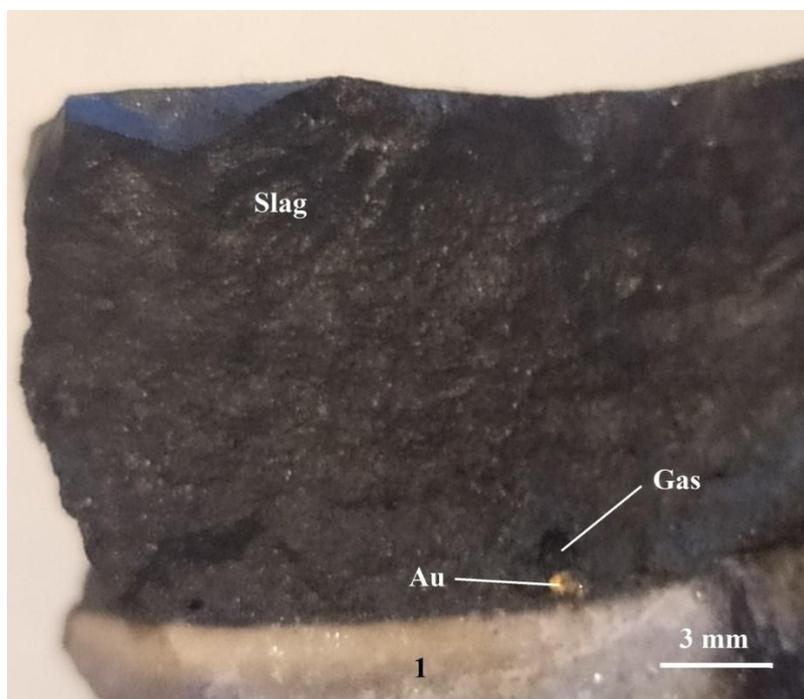


Рисунок 4 – Крупная капля золота в шлаке (Slag) на дне тигля (1), прикрепленная к газовому пузырьку (Gas)

Пузырек объемом V_g способен поднять капельки золота, объем которых V_{Au} не превышает величины $\frac{3}{19}V_g$. В наших опытах содержание золота составляло около $4 \cdot 10^{-6}$ г/г расплава, радиус исходных частиц 3 мкм, радиус пузырьков достигал 1 мм, а толщина расплава 5 см. В этом случае пузырек на своем пути вверх должен собрать и вынести на поверхность расплава около 44 тыс. капелек золота. Далее они путем коагуляции объединяются. В результате образуются крупные капли (до 300 мкм в диаметре и более).

Таким образом, флотация дисперсных капель в расплавах протекает с высокими скоростями и приводит к их значительному укрупнению в отличие от флотации твердых частиц.

Флотация является многостадийным процессом. Ее основная стадия: формирование системы пузырек газа – капля золота в расплаве. У смачивания, которое имеет место при флотации, как и у гетерогенной химической реакции, можно выделить транспортное звено и собственно кинетический акт смачивания на границе фаз. Для дисперсных капелек размером в несколько микрон следует рассматривать движущую силу смачивания $\Delta\sigma$ и кинетическое сопротивление натеканию на периметре.

Стадии достижения равновесия системы приведены на рисунке 5. Когда поднимающийся в шлаке пузырек встречает капельку золота и касается ее, то и пузырек, и капелька имеют форму сферы. В начальный момент краевой угол $180^\circ - \theta_{s-Au}$ между вектором натяжения границе расплав - золото и горизонталью равен нулю. После касания в дополнение к существовавшим поверхностям расплав - газ (вокруг пузырька) и расплав - золото (вокруг капельки) появится третья поверхность золото - газ и периметр смачивания. К периметру приложены векторы трех натяжений по перечисленным поверхностям σ_{Au} – золото - газ, σ_s – расплав - газ, σ_{s-Au} – расплав - золото. Пойдет процесс перемещения периметра смачивания, роста размеров поверхности золото - газ и приближение $180^\circ - \theta_{s-Au}$ к равновесному значению, установившемуся в системе на рисунке 5 (экспериментальное значение $180^\circ - \theta_{s-Au} = 40^\circ$). Это процесс растекания. Условие равновесия следующее: сумма векторов трех натяжений, приложенных к периметру смачивания, должна быть равна нулю. Последовательно соединенные три вектора натяжений должны образовать замкнутый треугольник.

В начальный момент после касания поднимающегося пузырька газа и встреченной им капельки золота все три натяжения, приложенные к периметру натекания, направлены по одной линии при $180^\circ - \theta_{s-Au} = 0^\circ$ – по горизонтали. Движущая сила $\Delta\sigma$ процесса перехода системы капля золота – пузырек к равновесию в силикатных расплавах по нашим расчетам будет равна $\Delta\sigma = 150$ мДж/м². Два натяжения, тянущие периметр смачивания вправо на рисунке 11 превосходят третье, тянущее влево, на 150 мДж/м². Переход к равновесию будет сопровождаться ростом краевого угла $180^\circ - \theta_{s-Au}$ от нуля до 40° . По величине $\Delta\sigma$ определяли скорость движения периметра смачивания по полученным ранее экспериментальным данным, и рассчитывали время растекания τ . Для частицы радиусом 3 мкм это время составит 10^{-4} с.

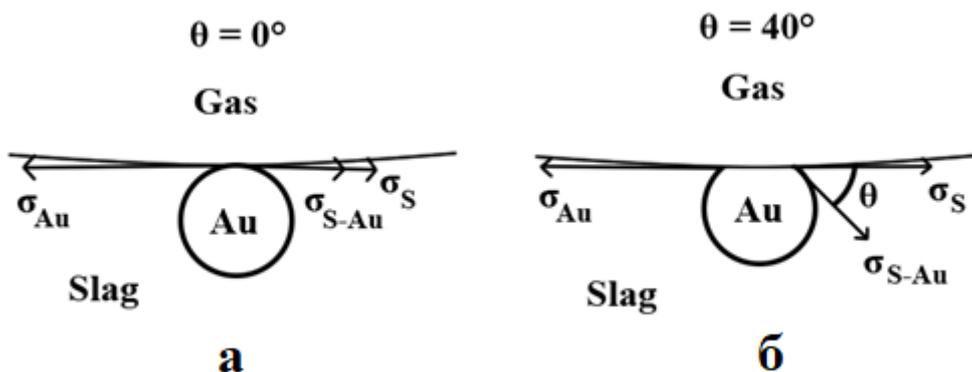


Рисунок 5 – Стадии формирования флотационной системы капля золота – пузырек газа в шлаке от касания до равновесного состояния: а – момент касания; б – равновесие

Таким образом, формирование равновесной системы пузырек-капля не будет тормозить общий процесс объединения микрокапелек золота пузырьками газа, не будет лимитирующим звеном всего процесса.

Что касается флотации сульфидных капель в оксидном расплаве, то в работе она рассматривается, как основная причина потерь благородных и цветных металлов. Пузырек, образующийся при разложении сульфидов, должен пройти через границу штейн-шлак, оторвать от штейна сульфидную капельку и всплывать вместе с ней к поверхности оксидного расплава. Чтобы пузырек «оторвал» капельку штейна от сульфидного расплава и всплывал с ней в шлаке, необходимо выполнить два условия:

1. Капли удерживаются на пузырьках межфазным натяжением, которое можно назвать силой сцепления. Чтобы капля не оторвалась от пузырька, сила сцепления капли штейна с пузырьком должна быть больше ее силы тяжести.

2. Выталкивающая сила, приложенная к пузырьку, должна быть больше силы тяжести капли. В противном случае капля утонет.

Условия сведены в систему уравнений, которая проанализирована далее:

$$\begin{cases} 2\pi r \sigma_{m-s} \sin \theta > c \frac{4}{3} \pi r^3 \rho_m g, \\ \frac{4}{3} \pi R^3 (\rho_s - \rho_g) g \geq c \frac{4}{3} \pi r^3 (\rho_m - \rho_s) g \end{cases} \quad (3)$$

где r – радиус капли штейна, $\sigma_{m-s} \sin \theta$ – вертикальная компонента межфазного натяжения на границе штейн-шлак, θ – угол между натяжениями на границе штейн-шлак σ_{m-s} и штейн-газ σ_m , c – объемная доля от целой капли, ρ_m – плотность штейна, R – радиус газового пузырька, ρ_s и ρ_g – плотность шлака и газа соответственно.

Стадия, близкая к равновесной, показана на рисунке б.

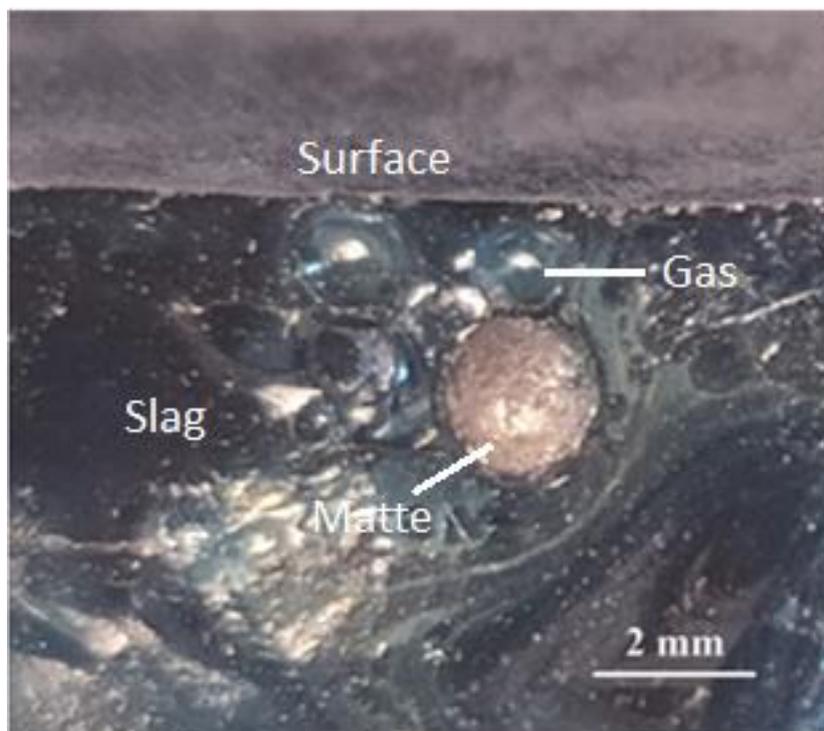


Рисунок 6 – Капля штейна (Matte) в шлаке (Slag) вблизи ее поверхности (Surface), захваченная пузырьком (Gas)

Для экспериментально изученных нами шлака и штейна максимально возможная величина радиуса капельки штейна, удерживаемая силой сцепления на поверхности газового пузырька, составляет около 4,2 мм. В шлаках обнаруживались сульфидные капельки радиусом до 2 мм. Из условия (3) получим следующие соотношение радиусов капли и пузырька $R \geq 0.7 \div 0.9r$. Размеры пузырька, поднимающего каплю штейна, могут быть даже меньше ее размеров, что видно из рисунка 6. Оценена скорость всплывания системы капля штейна – газовый пузырек по уравнению Стокса: для сульфидной капли максимально рассчитанного нами радиуса (4,2 мм) скорость всплывания будет составлять примерно 0,5 мм/с.

Поскольку капли золота и твердые частицы платины выносятся в шлак вместе с каплями штейна, проведена оценка их адгезии к штейну W_A . Адгезию для систем золото-штейн-шлак и платина-штейн-шлак рассчитывали по уравнению Дюпрэ. Работа адгезии для системы золото – штейн составляет ~ 1600 мДж/м², для платины – штейн ~ 3000 мДж/м². Полученные значения весьма существенны и сопоставимы с работой когезии для золота и платины. Следовательно, эти металлы прочно сцеплены с каплями штейна и движутся вместе с ними в шлаке.

Факт, что золото и платина оказываются в шлаке вместе с ассоциированными каплями штейна, подтверждается следующими опытными данными. Установлено, что количество золота в шлаке увеличивается с ростом содержания в нем серы, пропорционального массе штейна, и достигает постоянного значения при больших содержаниях S (рис. 7а). Поскольку медь, никель, кобальт находятся в виде сульфидов, то они также переходят в шлак в

составе капель штейна путем флотации (рис. 7б). Полученные данные в целом согласуются с анализами из публикаций других исследователей.

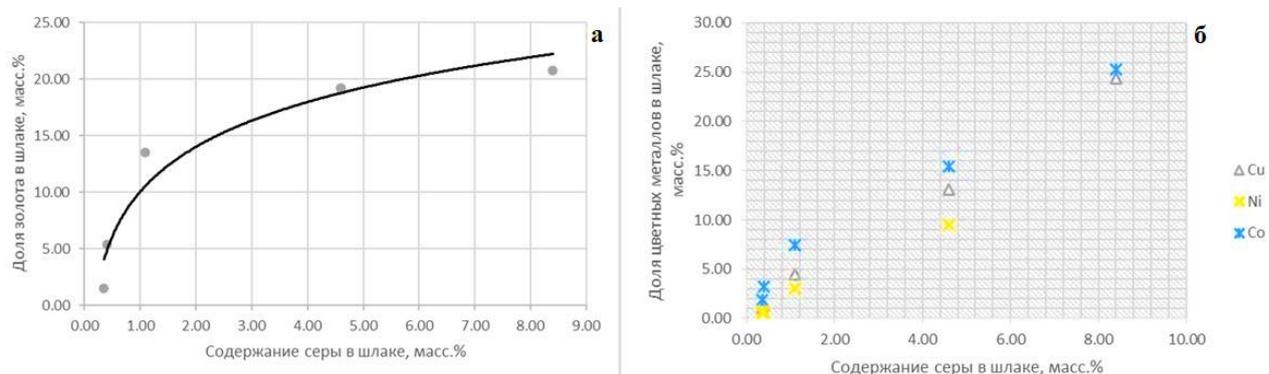


Рисунок 7 – Доля золота (а) и цветных металлов (б) в шлаке в зависимости от содержания в нем серы

В четвертой главе на основании проведенных исследований по поведению золота и платины в сульфидных и оксидных расплавах при плавлении минеральных материалов проводились лабораторные испытания по повышению извлечения Au и Pt из труднообогатимых минеральных материалов путем их высокотемпературной. Разработаны научные основы для двух способов.

Первый способ строится на плавлении золотосодержащего несульфидного сырья и последующей продувки образовавшегося расплава. В результате будет образоваться большое количество укрупненных капелек золота. Данные металлические капельки, после охлаждения расплава, его дробления и истирания, должны свободно извлекаться традиционными способами обогащения золота: гравитационной сепарацией и цианированием. Для этого проведен ряд лабораторных испытаний на золотосодержащем минеральном материале. В качестве объекта исследований выбраны хвосты после гравитационного обогащения золотосодержащих руд с содержанием золота 1 г/т. Содержание сульфидов менее 0,2 масс.%. Материал истирался, плавился в графитовых тиглях в печи сопротивления с графитовым нагревателем при температурах 1370-1450°C. Когда минеральная масса расплавлялась, в нее помещалась корундовая трубка, через которую подавался атмосферный воздух (расход 0,5 м/мин) в течение 5-10 мин. После продувки расплав охлаждался, дробился и истирался. Полученный продукт подвергли гравитационной сепарации и цианированию.

Установлено, что до высокотемпературной обработки хвостов обогащения извлечение золота в концентрат методом гравитационной сепарации достаточно низкое – 4,7% (содержание Au 2,77 г/т, выход концентрата 1,7%). Плавление хвостов и последующая его продувка смогла увеличить извлечение золота до 33,3% (содержание Au 4,58 г/т, выход концентрата 8%) – при температуре 1370°C и времени продувки не более 5 мин. Увеличение температуры до 1450°C и времени продувки до 10 мин позволили увеличить извлечение золота еще на более, чем 20% и, к тому же, на порядок повысить содержание Au в концентрате

– 43,6 г/т (выход самого концентрата 1,7%). При цианировании хвостов обогащения до их плавления извлечение золота в раствор составило 65%. После плавления материала и продувки расплава извлечение золота в раствор повысилось до 77%.

Получаемый после плавления минеральных материалов шлак, как показали исследования на примере силикатно-карбонатной руды, может применяться при закладке горных выработок в качестве заполнителя закладочных смесей вместе с вскрышными и пустыми породами месторождений.

Для определения эффективности предлагаемого способа извлечения микродисперсного золота из труднообогатимых минеральных материалов АО «Механобр Инжиниринг» произвел его технико-экономическую оценку на примере золотосодержащей силикатно-карбонатной руды. Показано, что будет увеличен выход золота с 5,70 до 7,35 т (в сравнении с цианированием и бисерным измельчением, при среднем содержании Au в руде 7 г/т). Это уменьшит себестоимость металла примерно на 15%.

Второй способ строится на следующем. Флотация служит одним из основных механизмов укрупнения дисперсных сульфидных капель: пузырек, пройдя от границы шлак-штейн до поверхности шлака, захватит на своем пути тысячи сульфидных микрокапелек, объединив их в одну крупную. Укрупненная капля оторвется от пузырька и будет двигаться в сторону границы шлак-штейн. Таким образом, возможным вариантом снижения содержания сульфидных капель в шлаках и, соответственно, золота и платины, при плавке сульфидных материалов – это продувка шлака газом и уменьшение его вязкости.

Для проведения испытаний выбрано два флюса – кальцит (CaCO_3) и флюорит (CaF_2). Данный выбор флюсов обосновывается следующим образом.

Кальцит (CaCO_3) диссоциирует с образованием газа CO_2 , который будет продувать шлак. Этот газ не окисляет сульфидные капельки. Однако, образующийся при этой диссоциации CaO способен существенно влиять на физико-химические свойства шлака. Поэтому количество добавляемого кальцита не превышало 10 масс.%. Шлаки с флюоритом в своем составе имеют невысокие значения поверхностного натяжения, температуры плавления и вязкости. Благодаря понижению вязкости расплава, скорость осаждения сульфидных королек в нем увеличивается, согласно уравнению Стокса.

Эксперименты проводились в печи сопротивления с графитовым нагревателем в корундовых тиглях, в атмосфере воздуха при температуре 1300°C , время выдержки 30 мин.

В качестве опытного образца для установления влияния CaCO_3 на изменения содержания золота, платины и цветных металлов (Cu, Ni, Co) в шлаке после плавления сульфидного материала выбрана медно-никелевая сульфидная руда. CaCO_3 добавлялся в количестве 5 и 10% от массы шихты. Доля элемента в шлаке от его суммарного количества в продуктах плавления определялось по следующей формуле:

$$c = \frac{c_s}{c_s + c_m} \cdot 100\%, \quad (4)$$

где c_s – содержание элемента в шлаке, c_m – содержание элемента в расплаве.

Данные по содержанию элементов в шлаке и значений, полученных по формуле (4), приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Распределение серы, цветных и благородных металлов между шлаком и штейном после плавления сульфидной медно-никелевой руды без и с добавлением CaCO_3

	Без CaCO_3		С CaCO_3 в количестве 5 масс.%		С CaCO_3 в количестве 10 масс.%	
	Доля элемента в шлаке от его суммарного кол-ва в продуктах плавления, %	Содержание в шлаке, масс.%	Доля элемента в шлаке от его суммарного кол-ва в продуктах плавления, %	Содержание в шлаке, масс.%	Доля элемента в шлаке от его суммарного кол-ва в продуктах плавления, %	Содержание в шлаке, масс.%
Cu	2,0	0,38	0,6	0,13	1,1	0,15
Ni	2,6	0,45	0,3	0,08	1,0	0,14
Co	4,3	0,02	1,6	0,007	2,4	0,008
Pt	12,0	$2,15 \cdot 10^{-4}$	-	-	12,0	$2,06 \cdot 10^{-4}$
Au	6,1	$0,45 \cdot 10^{-4}$	2,9	0,22	5,0	$0,29 \cdot 10^{-4}$
S	3,6	4,60	1,3	1,12	1,5	1,13

Результаты экспериментов показали, что после добавки CaCO_3 в количестве 5 масс.% произошло существенное снижение содержания серы в шлаке в 4 раза. Это в свою очередь привело и к снижению золота в шлаке в 2 раза, цветных металлов в 3-5,5 раз. Содержание платины в шлаке упало с 2,15 до 2,06 г/т. Количество выделившегося при плавке газа увеличилось на 2,5 масс.% (что соответствует расходу газа 0,2-0,3 л/мин). При увеличении содержания добавки CaCO_3 до 10 масс.% содержания благородных металлов в шлаке также падают, но уже в меньшем количестве по сравнению с 5% добавкой кальцита. Количество золота в шлаке уменьшилось в 1,5 раза, цветных металлов – в 2,5-3 раза. Количество выделившегося газа увеличилось на 7,5 масс.%.

Для изучения влияния флюса CaF_2 на распределение ценных компонентов между штейном и шлаком использовалась смесь медно-никелево-железного штейна и модельного шлака ($\text{CaO}/\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 = 40/40/20$) в соотношении 5:3. CaF_2 добавлялся в количестве 10% и 12% от массы шихты. Результаты приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Распределение серы, цветных и благородных металлов между шлаком и штейном после плавления шихты из смеси Cu-Ni-Fe штейна и модельного шлака без и с добавлением CaF₂ (в масс.%)

	Без CaF ₂		С CaF ₂ в количестве 10 масс.%		С CaF ₂ в количестве 12 масс.%	
	Доля элемента в шлаке от его суммарного кол-ва в продуктах плавления, %	Содержание в шлаке, масс.%	Доля элемента в шлаке от его суммарного кол-ва в продуктах плавления, %	Содержание в шлаке, масс.%	Доля элемента в шлаке от его суммарного кол-ва в продуктах плавления, %	Содержание в шлаке, масс.%
Cu	0,8	0,1	0,55	0,05	0,5	0,05
Ni	0,4	0,03	0,7	0,03	0,2	0,01
Co	2,0	0,005	1,5	0,003	1,0	0,002
Au	3,3	0,75·10 ⁻⁴	2,2	0,1·10 ⁻⁴	2,2	0,1·10 ⁻⁴
S	0,8	0,41	0,8	0,35	0,6	0,34

Добавка флюорита в смесь медно-никелево-железного штейна и модельного шлака понизило температуру плавления смеси до температуры 1210-1220°С (температура плавления смеси без добавления CaF₂ 1270°С). Заметно уменьшилось содержание серы, цветных металлов в 1,5-2 раза, золото в шлаке не обнаружено – оно ниже чувствительности использованной методики – 0,1-0,2 г/т. В связи с этим в расчет по формуле (4) брались указанные значения. Влияние CaF₂ на количество платины в шлаке не установлено, вероятно, из-за недостаточной точности ее определения применяемой методикой (атомно-эмиссионная спектроскопия).

Таким образом, добавление кальцита и флюорита снижают потери благородных и цветных металлов со шлаками в 1,1-5,5 раза.

На основе полученных экспериментальных данных и теоретических представлений разработано устройство, позволяющее повысить извлечение золота из сульфидных техногенных материалов (Заявка на пат. 2021138671 Российская Федерация, МПК С22В 11/02, С22В 9/05. Устройство для обогащения золотосодержащего минерального материала / А.М. Амдур, С.Я. Давыдов, С.А. Федоров; заявители ФГБОУ ВО УГГУ и ФГБУН ИМЕТ УрО РАН. – № 2021138671; заявл. 24.12.2021). По заявке 21.01.2022 получено уведомление о положительном результате формальной экспертизы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе изложено решение актуальной задачи повышения извлечения золота и платины из труднообогатимых минеральных материалов с помощью их

высокотемпературной обработки. Для достижения цели диссертационной работы был изучен механизм укрупнения микродисперсного золота в процессе нагрева и плавления минерального материала, рассмотрен механизм перехода золота и платины из штейнового расплава в шлаковый. По результатам работы были сделаны следующие выводы:

1. Экспериментально установлена зависимость роста содержания примесей в микродисперсных частицах рудного золота радиусом менее 2 мкм от их линейного размера. Аналогичная зависимость имеет место и для игольчатых образований платины: при уменьшении их толщины содержание примесей растет. Это связано с повышением энергии Гиббса при диспергировании.

2. Рассмотрена модель нагрева дисперсной частицы золота, помещенной в среду с определенными свойствами, которая решалась численными методами с помощью пакета программ Matlab. Установлено, что в дисперсных частицах и каплях золота существует перепад температур по их сечению, независимо от среды, в которой они находятся. Из-за разности температур на противоположных торцах металлических капель последние под действием перепада лапласовского давления способны двигаться к поверхности пористого тела в сторону источника тепла (если капля не смачивает стенки пор).

3. Установлено, что укрупнение частиц золота происходит после расплавления вмещающей породы в процессе их флотации: пузырек газа, поднимаясь в оксидном расплаве на своем пути способен захватить десятки тысяч микрокапелек золота, которые объединяются в одну крупную. Флотация дисперсных капель Au в оксидных расплавах протекает с высокими скоростями и приводит к их значительному укрупнению (до 1 мм).

4. Рассмотрено формирование системы пузырек газа – капля золота в оксидном расплаве, которое относится к кинетическому акту смачивания на границе фаз. Показано, что формирование равновесной системы пузырек-капля не будет тормозить общий процесс объединения микрокапелек золота пузырьками газа, не будет лимитирующим звеном всего процесса.

5. Экспериментально показано, что золото и платина в шлаке после плавления сульфидных материалов находятся в сульфидных каплях, образуют сплавы и интерметаллиды с Cu, Fe и Ni размерами не более 5-7 мкм.

6. На базе экспериментальных данных установлен один из основных механизмов перехода золота и платины из штейна в шлак: капли штейна вместе с ассоциированными с ними частицами благородных металлов выносятся в шлак пузырьками газов путем флотации. Это приводит к потерям цветных металлов, золота и платины.

7. Получены уравнения, описывающие условия всплывания капли штейна вместе с пузырьком в шлаке, основанные на следующем. 1. Чтобы капля не оторвалась от пузырька, сила сцепления капли штейна (межфазное натяжение) с пузырьком должна быть больше ее силы тяжести. 2. Выталкивающая сила, приложенная к пузырьку, должна быть больше силы тяжести капли.

8. Экспериментально установлено, что продувка шлака инертным газом при плавке сульфидных материалов и добавка флюорита в количестве не более

12 масс.% в исходную шихту снижает содержание серы в шлаке более, чем в 3 раза, золота и платины в 1,1-2 раза. На основании этих результатов разработаны научные основы способа повышения извлечения золота и платины в штейн при плавке сульфидных материалов (например, в рудно-термических печах, отстойных камерах в технологии Аустрелт и взвешенной плавки).

9. Разработаны научные основы способа повышения извлечения микродисперсного золота, основанный на их укрупнении, из труднообогатимых несulfидных минеральных материалов (руд и техногенных отходов) путем их высокотемпературной обработки, который заключается в плавлении материала и продувке образующегося расплава воздухом. Лабораторные испытания предлагаемого способа на хвостах обогащения (содержание Au 1 г/т) показали повышение извлечения золота до 56,1% гравитационной сепарацией (до высокотемпературной обработки – 4,7%) и до 77% цианированием (до высокотемпературной обработки – 65%). Шлаки после извлечения из них золота, как показал анализ характеристик, можно использовать в качестве корректирующей добавки в цемент или при закладке горных выработок.

Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы

Разработанные научные основы способов повышения извлечения микродисперсного золота и платины предназначены для применения в металлургической отрасли, в частности, для операции перед гравитационным обогащением и для доизвлечения золота и платины из шлаков и прочих техногенных отходов. Потенциальным потребителем предлагаемых способов являются горно-металлургические комбинаты (например, АО «Полиметалл», ЗАО «Русская медная компания», ПАО «ГМК «Норильский никель» и пр.), занимающиеся производством золота, платины и содержащих их концентратов. В перспективе дальнейшей разработки темы – масштабные исследования по повышению извлечения золота и других ценных компонентов из отходов горно-промышленного комплекса путем их высокотемпературной обработки.

Основное содержание диссертации изложено в следующих печатных работах:

В научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Амдур, А.М. Движение дисперсных капель золота в пористых телах и оксидных расплавах при нагреве / А.М. Амдур, Н.А. Ватолин, С.А. Федоров, А.Н. Матушкина // Доклады Академии наук. – 2015. – Т. 465, № 3. – С. 307–309.

2. Амдур, А.М. Содержание примесей в дисперсном рудном золоте / А. М. Амдур, Н. А. Ватолин, В.В. Павлов, А.Н. Матушкина, С. А. Федоров // Доклады Академии Наук. – 2016. – Т. 470, № 5. – С. 671-673.

3. Ватолин, Н.А. Механизм флотации металлических дисперсных капель в оксидных расплавах / Н.А. Ватолин, А.М. Амдур, В. В. Павлов, С. А. Федоров // Расплавы. – 2018. – № 6. – С. 636-642.

4. Amdur, A.M. Behaviour of The Gold Dispersed Drops in The Ore on Being Heated / A.M. Amdur, S.A. Fedorov, A.N. Matushkina, R.A. Apakashev // Non-ferrous metals. – 2016. – № 2 (41). – pp. 3-6.

5. Amdur, A.M. Characterization Dispersed Ore Gold / A.M. Amdur, V.V. Pavlov, S.A. Fedorov, A.N. Matushkina // Canadian Metallurgical Quarterly. – 2020. – Vol. 59, № 3. – pp. 331-334.

6. Амдур, А.М. Флотация дисперсных капель золота и штейна в расплавах / А.М. Амдур, В.В. Павлов, С.А. Федоров // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020. – № 3-1. – С. 399-409.

7. Amdur, A. Behavior of platinum in the system of the matte-slag in the processing of copper-nickel materials / A. Amdur, E. Selivanov, S. Fedorov, V. Pavlov, S. Krasikov // Journal of Mining and Metallurgy, Section B: Metallurgy. – 2021. – № 57 (2). – pp. 209-215.

8. Федоров, С.А. Обзор техногенного и вторичного сырья металлов платиновой группы и его классификация / С.А. Федоров, А.М. Амдур // Metallurg. – 2021. – № 7. – С. 100-105.

9. Amdur, A.M. Transfer of Gold, Platinum and Non-Ferrous Metals from Matte to Slag by Flotation / A.M. Amdur, S.A. Fedorov, V.V. Yurak // Metals. – 2021. – № 11 (10). – pp. 1-14.

В других изданиях:

10. Amdur, A. Reasons for Loss of Platinum when Processing Copper-Nickel Sulfide Ore / A. Amdur, S. Fedorov, V. Pavlov // Proceedings of the conference METAL 2020, 20-22 May 2020. – Ostrava: Tanger Ltd., 2020. – pp. 930-935.

11. Amdur, A. Influence of CaF₂ and CaCO₃ Flux Additives on the Distribution of Gold and Platinum between Matte and Slag during Melting of Copper-Nickel Sulfide Materials / A. Amdur, S. Fedorov // Proceedings of the conference METAL 2021, 26-28 May 2021. – Ostrava: Tanger Ltd., 2021. – pp. 1197-1202.

12. Ватолин, Н.А. Разработка процессов подготовки и обогащения продуктов, содержащих тонкодисперсное золото / Н.А. Ватолин, А.М. Амдур, А.Н. Матушкина, С.А. Федоров // Труды Конгресса с международным участием и Конференции молодых ученых «Фундаментальные исследования и прикладные разработки процессов переработки и утилизации техногенных образований», V Форума «Уральский рынок лома, промышленных и коммунальных отходов», 05-09 июня 2017 г. – Екатеринбург: УрО РАН, 2017. – С.293-295.

13. Vatolin, N.A. The mechanism of flotation of dispersed metal droplets in oxide melts / N.A. Vatolin, A.M. Amdur, V.V. Pavlov, S.A. Fedorov // Book of Abstracts of the 16th IUPAC High Temperature Materials Chemistry Conference (HTMC-XVI), 02-06 July 2018. – Ekaterinburg: Ural State Pedagogical University, 2018. – p. 194.

14. Fedorov, S. Platinum Behaviour in Sulfide and Oxide Melts during The Metallurgical Processing of Copper-Nickel Ores / S. Fedorov, A. Amdur, I. Blinov // Proceedings of the 15th SGA Biennial Meeting, 27-30 August 2019. – Scotland, 2019. – Vol. 4. – pp. 1505-1507.

15. Амдур, А.М. Формы выделения золота в сульфидных рудах и продуктах их обогащения / А.М. Амдур, С.А. Федоров, А.Н. Матушкина // Труды VI-го Конгресса с международным участием и научно-технической

конференции молодых ученых по переработке и утилизации техногенных образований «ТЕХНОГЕН – 2019», 18-21 июня 2019 г. – Екатеринбург: УрО РАН, 2019. – С. 147-150.

16. Амдур, А.М. Комплексное использование золотосодержащих силикатно-карбонатных хвостов обогащения / А.М. Амдур, С.А. Федоров // Труды научно-практической конференции с международным участием и элементами школы молодых ученых «НИОКР-2020», 06-09 октября 2020 г. – Екатеринбург: УрО РАН, 2020. – С. 482-485.

17. Амдур, А.М. Повышение извлечение золота из хвостов обогащения путем их высокотемпературной обработки / А.М. Амдур, С.А. Федоров, П.Ф. Каримова // Труды V-го Конгресса с международным участием и научно-технической конференции молодых ученых по переработке и утилизации техногенных образований «ТЕХНОГЕН – 2021», 23-26 ноября 2021 г. – Екатеринбург: УрО РАН, 2021. – С. 150-152.

18. Федоров, С.А. Вещественный состав карбонатно-силикатных руд воронцовского месторождения до и после их плавления / С.А. Федоров // Сборник статей XIII Всероссийской научной конференции «Уральская минералогическая школа- 2017», 02-04 ноября 2017 г. – Екатеринбург: УрО РАН, 2017. – С. 201-205.

19. Амдур, А. М. Поведение золота при нагреве и плавлении медного сульфидного материала / А.М. Амдур, С.А. Федоров // Проблемы теоретической и экспериментальной химии: тезисы докладов XXX Российской молодежной научной конференции с международным участием, 06-09 октября 2020 г. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2020. – С. 199.

