

Published:
10.10.2025

KEYWORDS

identified, allowing to achieve maximum extraction of valuable components at minimal costs. The data obtained allow us to recommend a combined ore processing technology for the industrial development of the deposit, using counterflow decantation and zinc dust cementation, which ensures a high degree of metal recovery at relatively low capital and operating costs.

Nukrakon deposit, gold-silver ores, geological structure, mineral composition, oxidized ores, sulfide ores, cyanidation, sorption cyanidation, flotation enrichment, gravity methods, counterflow decantation, zinc dust cementation, metal extraction, technological parameters, ore enrichment.

Библиографический список

1. Голованов И.М. и др. Рудные месторождения Узбекистана. — Ташкент: Институт минеральных ресурсов, 2002. — 660 с.
2. Лодейщиков В.В., Игнатова К.Д. Рациональное использование серебросодержащих руд. — М.: Недра, 1973. — 224 с.
3. Костикова О. С. Оптимизация процессов обогащения серебро-полиметаллических руд для снижения вредного влияния шламов // Евразийский Союз Ученых (ЕСУ), 2015. — № 5 (14). — С. 14–18.
4. Евдокимов А. В., Дементьева Н. А., Коблов А. Ю. Переработка золото-серебросодержащей полиметаллической руды // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле, 2020. — Вып. 1. — С. 228–234. — ISSN 2218-5194.
5. Эзозхонов А.Н. и др. Исследование технологии переработки серебросодержащих руд с кучным выщелачиванием // Universum: технические науки: электрон. научн. Журн, 2023. — № 10(115). URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/16172>.
6. Эрнazarов М., Самадов А.У., Холикулов Д.Б. Исследования процесса цианирования золото-серебросодержащих руд // Навои: Горный вестник Узбекистана, 2009. — №1. — С. 79-80.
7. Санакулов К.С., Эргашев У.А., Ткаченко Е.С. Усовершенствование схемы рудоподготовки на Гидрометаллургическом заводе №2 // Навои: Горный вестник Узбекистана, 2019. — №2. — С. 65-67.

Information about authors:

Sanakulov Kuvandik Sanakulovich	— DSc, Professor, Chairman of the Management Board – General Director of Navoi Mining and Metallurgical Combine JSC, 210100, Uzbekistan, Navoi city, Navoi st. 27 ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9998-4366 , e-mail: info@ngmk.uz
Ismailov Djamshid Kabiljonovich	— Director of the LLC “O‘ZEORANGMETLITI”, 100070, Uzbekistan, Tashkent city, Bobur st. 15 ORCID: https://orcid.org/0009-0003-0054-3582 , e-mail: info@georang.uz

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ И МЕТОДЫ АНАЛИЗА ШЛАКОВ МЕДЕПЛАВИЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА КИСЛОРОДНОЙ ПЛАВКИ

**Маткаримов С.Т., Носирходжаев С.К., Мухаметджанова Ш.А., Очилдиев К.Т.,
Акрамов У.А.**

Ташкентский государственный технический университет, Ташкент, Узбекистан

Doi: [10.5281/zenodo.17338662](https://doi.org/10.5281/zenodo.17338662)

АННОТАЦИЯ

Получено:
18.07.2025

Пересмотрено:
23.07.2025

Пересмотрено:
07.08.2025

Опубликовано:
10.10.2025

В работе исследованы шлаки кислородной плавки меди, отобранные на разных этапах процесса. Основное внимание уделено шлакам, взятым при выпуске и закалённым в воде. Применены методы XRD, XRF, SEM-EDS и мокрый химический анализ. Обнаружены тонкодисперсные включения Cu_2S , фаялит и магнетит. Установлено, что механически унесённая медь связана с высоковязкой шлаковой матрицей. Результаты могут быть использованы для снижения потерь меди и оптимизации процесса плавки.

**КЛЮЧЕВЫЕ
СЛОВА**

медеплавильный шлак, кислородная плавка, Cu_2S , фаялит, механические потери меди, SEM-EDS, XRD, шлаковая матрица.

Введение

Основная цель процесса выплавки штейна (кислородно- взвешенная плавка) состоит в том, чтобы извлечь как можно больше меди из концентрата в расплавленный штейн. Содержание штейна может варьироваться в зависимости от содержания меди в исходной руде, а также от типа и условий работы плавильной печи. Плохое извлечение меди из концентрата приводит к значительным потерям меди со шлаковыми отходами [1]. Чтобы уменьшить потери меди, необходимо детальное понимание химического состава шлакового и штейнового состава.

В настоящем разделе приведены экспериментальные исследования микроструктуры и фазового состава шлаков медеплавильного завода АО «Алмалыкский ГМК».

Объект и методика исследования. В качестве объектов исследования были отобраны пробы шлака, которые отбирались на разных стадиях процесса выплавки меди: при выпуске шлака, после транспортировки шлака на место осаждения и на площадке их хранения. Экспериментальные исследования включали методы XRD, XRF и SEM, которые также были подтверждены традиционным мокрым химическим анализом.

Для исследования был выбран образец шлака после выпуска из плавильного агрегата. Пробы шлака, взятые при выпуске шлака, обычно сразу после отбора закалывают в воду; поэтому эти образцы, вероятно, будут наиболее близки к исходному состоянию, при котором расплавленная шлаковая фаза находится внутри плавильной печи. На рисунке 1 представлено типичное изображение образца №1 шлака, взятого при выпуске шлака и после этого закаленного.



Рис. 1. Образец шлака №1, взятый при выпуске шлака

На рисунке 2 представлено светомикроскопическое изображение (LOM) пробы образца №1, полученный с использованием оптического микроскопа в отражённом свете при увеличении, соответствующем масштабу 10 мкм.



Рис. 2. LOM-изображение пробы №1

Исследуемая микроструктура характеризуется наличием мелкодисперсных округлых включений, равномерно распределённых в объёме стекловидной шлаковой матрицы. Светлые частицы интерпретируются как капли штейна, механически захваченные шлаком в процессе кислородной плавки медных концентратов.

Как видно из рисунка большинство сульфидных частиц очень мелкие (<1 мкм) и образовались, по-видимому, при быстром охлаждении. По оценкам, средний размер мелких сульфидов составляет менее 200–300 нм. Более крупные частицы (>1 –2 мкм), вероятно, будут захвачены штейном из-за ряда факторов (например, более высокой вязкости шлака).

На рисунке 3 представлена рентгенограмма шлаковой пробы, полученная методом рентгенофазового анализа (XRD). Основные пики, зарегистрированные в диапазоне углов $2\theta \approx 20^\circ$ до 75° .

Несмотря на большое количество шума, представленная рентгенограмма показала сильные, отчетливые пики (отмечены синим), которые можно четко идентифицировать как фазу фаялита (Fe_2SiO_4), расположенные в диапазонах $2\theta \approx 25$ – 50° . Другие пики менее выражены, довольно широки и малы и не могут быть окончательно проанализированы.

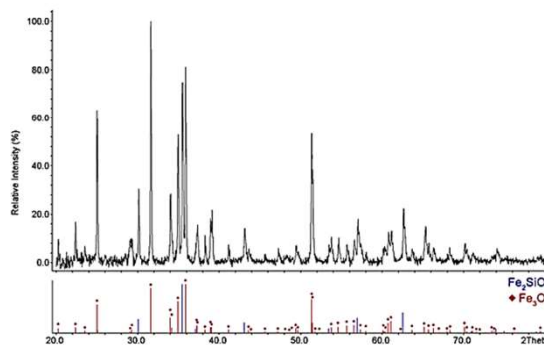


Рис. 3. Рентгенограмма пробы шлака №1

Некоторые из этих пиков (отмечены красным) могут быть отнесены к магнетитоподобной фазе (например, Fe_3O_4) с введенными в структуру другими атомами

(например, Al, Mg и т.д.). Пики данной фазы наблюдаются в интервалах $2\theta \approx 30.1^\circ$, 35.5° , 43.1° , 57.0° и 62.6° , что соответствует отражениям по плоскостям (220), (311), (400), (511) и (440) соответственно. Образование магнетитовой фазы характерно для шлаков медеплавильного производства [3,4].

На рисунке 4 представлены изображения микроструктуры шлаковой пробы № 1, полученные методом сканирующей электронной микроскопии в режиме обратного рассеяния электронов (BSE).

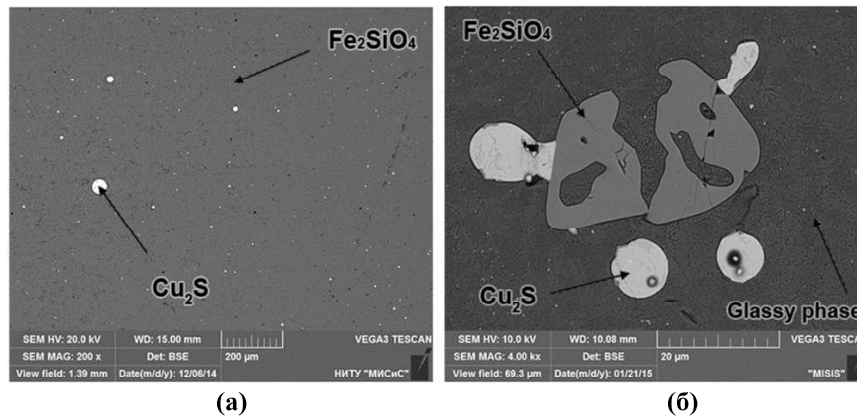


Рис. 4. (а) Типичная микроструктура, (б) частицы магнетита, обнаруженные в пробе №1

СЭМ-ЭДС-анализ выявил в шлаке как минимум две разные области (рис. 4 (а)): область со средней стехиометрией «1Fe : 2Si» (сбалансированной по кислороду) и фазу сульфида меди с приблизительной стехиометрией Cu₂S. Бывшая оксидная «фаза» представляет собой смесь двух мелкодисперсных областей, слегка отличающихся контрастом обратнорассеянных электронов (одна ярче, другая темнее), так как спектры ЭДС каждой из этих областей различаются в 1–2 раза при процентах Fe друг от друга. Она содержит небольшие количества Al, Ca, Mg, K и Ti, а также до 1 мас. % Cu и ~0,3–0,5 мас.% серы (S).

Фаза сульфида меди может содержать умеренное количество железа (Fe до 5–10 мас.%) и состоит из рассеянных сферических частиц диаметром от 0,1 до 200 мкм. Поскольку фаза, подобная FeSi₂O₅, неизвестна, на основании результатов РФА можно предположить, что кристаллы фаялита очень малы, рассеяны в матрице (стекловидной фазе) и не могут быть обнаружены с помощью SEM EDS анализатора. Другая фаза, обнаруженная с помощью СЭМ - это магнетит (рис. 4 (б)), окруженный стекловидной фазой с кристаллами фаялита.

На рисунке 5 приведены карты распределения кремния (Si), серы (S) и кислорода (O) в образце шлака № 1, полученные методом энергодисперсионного анализа (EDS) в режиме картирования. Наиболее крупное округлое включение ярко выделяется по интенсивности линии S Kα1, что однозначно указывает на присутствие серосодержащей фазы - сульфида меди (Cu₂S), что согласуется с результатами SEM-анализа (см. рисунок 4 (а)).

Карта распределения Si Kα1 демонстрирует равномерное распределение кремния по всей матрице, что характерно для силикатной (фаялитовой) шлаковой фазы. Аналогичная картина наблюдается и по кислороду OKα1, что подтверждает наличие кислородсодержащих силикатов в основной массе шлака.

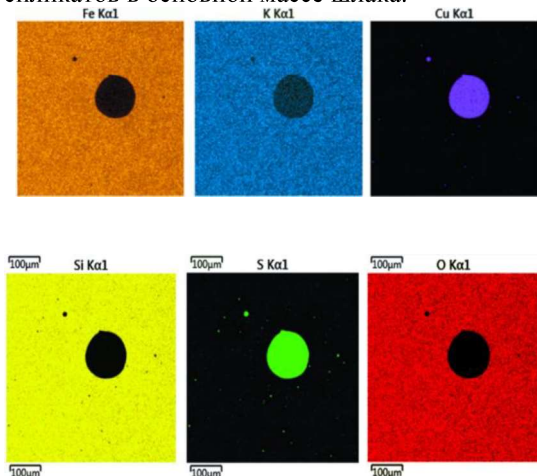


Рис. 5. Распределение элементов в образце №11

Контраст между фоном и включением в картах Si и O позволяет заключить, что капля сульфида меди не содержит значимого количества ни кремния, ни кислорода, а следовательно, не принадлежит к силикатной или окисной фазе, что дополнительно подтверждает её идентификацию как Cu₂S. Таким образом, анализ распределения элементов подтверждает факт существования металлической (или штейновой) капли, окружённой силикатной шлаковой матрицей.

Заклучение

Проведённый комплексный анализ структуры и фазового состава шлака, отобранного после выпуска из плавильного агрегата кислородной плавки, подтвердил существование как растворённой, так и механически унесённой меди в виде тонкодисперсных сульфидных включений (Cu_2S).

Светомикроскопия и сканирующая электронная микроскопия показали, что большая часть сульфидных частиц имеет размер менее 1 мкм, что указывает на их образование в результате быстрого охлаждения и затруднённую коалесценцию в условиях высокой вязкости шлаковой фазы.

Рентгенофазовый анализ выявил наличие кристаллической фазы фаялита (Fe_2SiO_4) и магнетитоподобных соединений, что подтверждает высокоокислительные условия процесса.

SEM-EDS-анализ продемонстрировал присутствие фаялитовой и стекловидной матрицы, обогащённой кислородом, кремнием и железом, а также наличием медно-сульфидной фазы с переменным содержанием Fe.

Картирование распределения элементов выявило чёткое разграничение между силикатной и сульфидной фазами, подтверждая, что сульфидные капли не растворены в шлаке и могут быть классифицированы как механические потери.

Полученные данные дают основание утверждать, что образование и стабилизация тонкодисперсных сульфидов меди, их взаимодействие с высоковязкой шлаковой матрицей, а также фазовое поведение магнетита и фаялита являются ключевыми факторами, определяющими величину потерь меди со шлаками. Результаты исследования могут быть использованы для оптимизации условий плавки и снижения безвозвратных потерь меди в медеплавильном производстве.

KISLORODLI ERITISH ASOSIDAGI MIS ERITISH ISHLAB CHIQRISHINING SHLAKLARINI EKSPERIMENTAL TADQIQOT QILISH VA TAHLIL USULLARI

Matkarimov S.T., Nosirxo'jayev S.Q., Muxametjanova Sh.A.,
Ochildiyev K.T., Akramov U.A.

Toshkent Davlat Texnika Universiteti, Toshkent, O'zbekiston

ANNOTATSIYA

Kelib tushgan:
18.07.2025
Ko'rib chiqilgan:
23.07.2025
Qabul qilingan:
07.08.2025
Chop etilgan:
10.10.2025

Ushbu ishda kislorodli eritish jarayonida olingan shlak namunalari tahlil qilindi, ayniqsa, eritish vaqtida olingan va suvda sovutilgan namunalar o'rganildi. XRD, XRF, SEM-EDS va an'anaviy nam kimyoviy tahlil usullari qo'llanildi. Cu_2S zarrachalari, fayalit va magnetit fazalari aniqlandi. Misning yo'qotilishi shlakning yuqori qovushqoqligi bilan bog'liq ekani aniqlandi. Natijalar eritish jarayonini optimallashtirish va mis yo'qotilishini kamaytirishga xizmat qilishi mumkin.

KALIT SO'ZLAR

mis eritish shlaki, kislorodli eritish, Cu_2S , fayalit, misning mexanik yo'qotilishi, SEM-EDS, XRD, shlak matritsasi.

EXPERIMENTAL STUDY AND ANALYSIS METHODS OF SLAGS FROM COPPER SMELTING IN OXYGEN-BLOWN FURNACES

Matkarimov S.T., Nosirkhodzhaev S.K., Mukhametdzhanova Sh.A.,
Ochildiyev K.T., Akramov U.A.

Tashkent State Technical University, Tashkent, Uzbekistan

ABSTRACT

Received:
18.07.2025
Revised:
23.07.2025
Accepted:
07.08.2025

This study analyzes slags from oxygen-blown copper smelting, focusing on quenched samples taken during tapping. XRD, XRF, SEM-EDS, and wet chemical methods were used. Fine Cu_2S inclusions, fayalite, and magnetite were identified. Mechanically entrained copper was linked to the high-viscosity slag matrix. The findings help reduce copper losses and improve smelting efficiency.

Published:

10.10.2025

KEYWORDScopper smelting slag, oxygen-blown smelting, Cu₂S, fayalite, mechanical copper losses, SEM-EDS, XRD, slag matrix**Библиографический список**

1. Mukhamedzhanova Sh.A., Matkarimov S.T. Development of resource-saving technology for copper production at "Almalyk MMC" JSC S.A.
2. Маткаримов С.Т., Бердияров Б. Т., Мухаметджанова Ш. А. Исследование возможности получения железосодержащих сплавов из шлаков медного производства // Цветные металлы. 2023. № 9. С. 31–36.
3. Ким В. В., Юсупходжаев А. А., Сайназаров А. М. Определение оптимального режима кислородно-факельной плавки сульфидных медных концентратов // Горный журнал. 2009. № 8. Специальный выпуск. С. 68–71

Information about authors:

Muxametjanova Shoir	- PhD, Associate professor of the department of Metallurgy; Tashkent State Technical University, 100095, Tashkent, University Str., 2, Republic of Uzbekistan
Abdusamatovna	ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6184-6443 e-mail: shoira.muhamet@gmail.com
Matkarimov Sohijon	- DSc, professor of the department of Metallurgy; Tashkent State Technical University, 100095, Tashkent, University Str., 2, Republic of Uzbekistan
Turdalievich	ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2393-6576 , e-mail: sohibtm@gmail.com
Nosirxo'jayev Sardor Qodirjon o'g'li	- Head of the department of Metallurgy, PhD, Associate professor; Tashkent State Technical University, 100095, Tashkent, University Str., 2, Republic of Uzbekistan ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1651-5634 , sardornosirxojayev77@gmail.com
Ochildiyev Qahramon Turdalievich	- PhD, Associate professor of the department of Metallurgy; Tashkent State Technical University, 100095, Tashkent, University Str., 2, Republic of Uzbekistan ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9891-7508 , qahramonochildiyev@gmail.com
Akramov Ural Akram o'g'li	Senior lecturer at the department of Mining electromechanics, Tashkent State Technical University, 100095, Tashkent, University Str., 2, Republic of Uzbekistan

РАЗРАБОТКА СПОСОБОВ СНИЖЕНИЯ РАЗБРОСА КУСКОВ ГОРНОЙ ПОРОДЫ ПРИ ВЕДЕНИИ ВЗРЫВНЫХ РАБОТ НА КАРЬЕРАХ

Ш.А. Очилов¹, А.У. Фатхиддинов², Б.А. Гаибназаров², С.М. Раимкулова³, У.Р. Газибекова³

¹Университет геологических наук, Ташкент, Узбекистан

²Алмалыкского филиала Ташкентского государственного технического университета имени Ислама Каримова, г. Алмалык, Узбекистан

³Ташкентского государственного технического университета имени Ислама Каримова, Ташкент, Узбекистан

Doi: 10.5281/zenodo.17338706

АННОТАЦИЯ

В статье рассматриваются результаты промышленных взрывов при использовании базового и разработанного способов снижения разброса кусков горных пород при ведении взрывных работ на карьерах. Приведены их преимущества и недостатки. Важное внимание уделяется организации контрольных мер для защиты охраняемых объектов от разлетающихся в результате взрыва кусков горных пород и минимизации их рисков. Выполнены расчеты безопасного расстояния по действию ударно-воздушной волны при взрыве на земной поверхности для зданий и сооружений и расстояния, опасного для людей по разлету отдельных кусков породы. Полученные величины безопасных расстояний значительно меньше, по сравнению с традиционными нормативами, направленными на снижение воздействия взрывных работ на окружающую среду. Предложенный способ позволяет предотвратить опасный разброс кусков породы газами взрыва в процессе их истечения через устье скважины и увеличить продолжительность импульса взрыва, что позволяет получить требуемую степень дробления массива горных пород.

Получено:

16.07.2025

Пересмотрено:

21.07.2025

Пересмотрено:

05.08.2025

Опубликовано:

10.10.2025