

месторождении Кальмакыр АО «Алмалыкский горно-металлургический комбинат». – Алмалык, 2023, – 36 с.

4. Нормативный справочник по буровзрывным работам / Авдеев Ф.А., Барон В.Л., Гуров Н.В., Кантор В.Х. – М.: «Недра», 1986. – 511 с.

**Information about authors:**

|                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
|---------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Ochilov Shuhratulla</b>      | – DSc, Associate Professor, Head of the Department of Geological Exploration Techniques and Technology, University of Geological Sciences, 100164, Tashkent, Mirzo Ulugbek district, Olimlar Str., 64, Uzbekistan<br>ORCID: <a href="https://orcid.org/0000-0002-4629-1734">https://orcid.org/0000-0002-4629-1734</a> , e-mail: <a href="mailto:o.shuhrat@mail.ru">o.shuhrat@mail.ru</a>                       |
| <b>Fatkhiddinov Asliddinjon</b> | – PhD, Associate Professor, Department of Mechanical Engineering Technology; Almalyk branch of Tashkent State Technical University, 110100, Tashkent region, Almalyk, M.Ulug'bek Str., 45, Republic of Uzbekistan<br>ORCID: <a href="https://orcid.org/0009-0000-7396-815X">https://orcid.org/0009-0000-7396-815X</a> , <a href="mailto:asliddinjonfathiddinov@gmail.com">asliddinjonfathiddinov@gmail.com</a> |
| <b>Raimkulova Sarvinoz</b>      | – PhD student, Department of Mining Engineering, Tashkent State Technical University, 100095, Tashkent, Uzbekistan.<br>E-mail: <a href="mailto:raimkulovasarvinoz19@gmail.com">raimkulovasarvinoz19@gmail.com</a> ORCID: <a href="https://orcid.org/0000-0003-1766-7752">https://orcid.org/0000-0003-1766-7752</a>                                                                                             |

## ИССЛЕДОВАНИЕ ОСНОВНЫХ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ПОТЕРИ МЕДИ СО ШЛАКАМИ В ПРОЦЕССАХ КИСЛОРОДНОЙ ПЛАВКИ

Мухаметджанова Ш.А., Маткаримов С.Т., Носирходжаев С.К., Очилдиев К.Т., Сайназаров А.М.

Ташкентский государственный технический университет, Ташкент, Узбекистан

Doi: [10.5281/zenodo.17338748](https://doi.org/10.5281/zenodo.17338748)

### АННОТАЦИЯ

Получено:  
19.07.2025  
Пересмотрено:  
24.07.2025  
Пересмотрено:  
08.08.2025  
Опубликовано:  
10.10.2025

В статье рассматриваются механизмы потерь меди со шлаками при кислородно-факельной плавке, включая растворённые и механические формы. Установлено, что основная часть потерь обусловлена растворением меди в шлаке при высоком окислительном потенциале, связанном с повышенным содержанием магнетита. Анализируется влияние состава шлака, содержания меди в штейне, уровня сернистости, а также физико-химических свойств системы на процессы диспергирования и коалесценции штейновых частиц. Особое внимание уделено роли магнетита в стабилизации сульфидной взвеси и повышении растворимости меди. Приведены рекомендации по снижению потерь меди путём оптимизации состава шлака и технологических параметров процесса.

### КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Кислородно-факельная плавка, шлак, потери меди, механические потери, растворённые потери, магнетит, межфазное натяжение.

### Введение

Повышение эффективности пирометаллургических процессов переработки сульфидных медных концентратов остаётся одной из актуальных задач цветной металлургии. Особое внимание в этом контексте уделяется снижению потерь ценных металлов, прежде всего меди со шлаками. Несмотря на то, что современные технологии обеспечивают высокий уровень извлечения меди, даже незначительные потери при больших объёмах производства ведут к существенным экономическим и ресурсным потерям. Особенно актуальна проблема

снижения остаточной меди в шлаке в условиях переработки сложного сырья [1].

Шлаки, образующиеся при плавке медных концентратов, представляют собой сложные многокомпонентные системы, чьи свойства зависят от состава, температуры, режимов охлаждения и взаимодействия с сульфидной (штейновой) фазой. Химическая и фазовая неоднородность шлаков, особенности их структурной организации и поведение капель штейна при кристаллизации существенно влияют на остаточное содержание меди в твёрдом шлаке. Понимание этих процессов требует как всестороннего экспериментального анализа, так и применения современных

методов термодинамического моделирования [2].

Настоящая работа направлена на комплексное исследование потерь меди со шлаками медеплавильного производства на АО «Алмалыкский ГМК» с применением кислородной плавки. Основной задачей исследования является анализ факторов, влияющих на потери меди между шлаковой и сульфидной фазами, определение условий минимизации потерь меди и оптимизации технологических параметров процесса пирометаллургических процессов.

#### Анализ основных факторов, влияющих на потери меди со шлаками.

При переработке сульфидных медных концентратов образуются шлаки, представляющие собой силикатные системы, содержащие Fe, Si, Ca, Al, Mg, а также примеси Cu, Zn, Pb и другие элементы. Одной из главных задач металлургии меди является снижение остаточного содержания меди в шлаке до минимально возможных значений, не влияя при этом негативно на производительность и стабильность процесса [3].

Многочисленные исследования указывают на то, что медь в шлаке может находиться в трёх формах: в виде дисперсных капель штейна, химически связанной меди (в твёрдых оксидных фазах, таких как fayalite, magnetite), а также в виде растворённой в аморфной или стекловидной фазе. Однако большинство работ подчёркивают, что основным источником остаточной меди являются именно мелкодисперсные капли штейна, не успевающие отделиться от шлака в процессе охлаждения [4].

Физико-химические свойства шлака, такие как вязкость, поверхностное натяжение, плотность и температура плавления, оказывают решающее влияние на поведение сульфидных капель в жидкой фазе. Особое внимание в литературе уделено влиянию режима охлаждения на распределение меди.

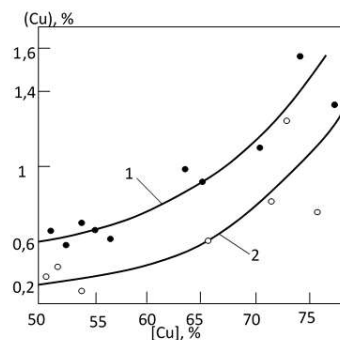
Таким образом, существующие исследования подчёркивают важность системного подхода к анализу шлаков, включающего как физико-химический анализ, так и инженерные методы управления технологическим процессом с целью минимизации потерь меди.

Обсуждение результатов исследования потерь меди со шлаками. Медь со шлаками теряется в двух формах: в растворённом виде и в виде механических потерь. Количество механических и растворённых потерь меди в шлаках кислородно-факельной плавки соотносятся как 2:3 (общие 1,40 %, из них 0,55 % - механические, 0,85 % - растворённые потери).

Основной причиной образования сульфидной взвеси в шлаках кислородно-

факельной плавки является процесс сульфидирования или восстановления растворённых в шлаковом расплаве цветных металлов. Влияние этого процесса проявляется в чередовании процессов окисления – восстановления и изменении окислительного потенциала шлакового расплава. Окислительный потенциал шлака определяется концентрацией в расплаве свободных анионов O<sup>2-</sup>, которая зависит от содержания в шлаке сильных катионов-модификаторов, прежде всего Fe<sup>3+</sup>, и кремнезёма. Именно окислительным потенциалом шлакового расплава определяется содержание в нём растворённой меди, а его снижением – образование тонкодисперсной сульфидной взвеси [5].

Конечное содержание мелкодисперсной штейновой взвеси в шлаках определяется соотношением процессов диспергирования и коалесценции. Небольшая концентрация штейновых частиц и высокая вязкость среды (шлака) определяют большую устойчивость мелкодисперсной взвеси в промышленных шлаках. Поэтому вопросы уменьшения диспергирования и улучшения коалесценции взвешенных частиц имеют принципиально важное значение для снижения потерь меди со шлаками. Необходимо отметить, что одним из главных факторов, влияющих как на образование мелкодисперсной взвеси, так и на её стабилизацию, является магнетит [6].



**Рис. 1. Зависимость потерь меди в шлаках кислородной плавки от содержания меди в штейне: 1 – общие; 2 – растворимые; область между кривыми 1 и 2 – механические потери**

На рисунке 1 представлена экспериментально установленная зависимость потерь меди в шлаках кислородно-взвешанной плавки от содержания меди в штейне. Кривая 1 характеризует общие потери меди, включающие как химически растворённую, так и механически унесённую медь. Кривая 2 отражает лишь растворимую часть потерь, обусловленную растворением меди в силикатной матрице шлака, преимущественно в виде оксидных или силикатных соединений.

Область между кривыми 1 и 2 количественно описывает механические потери меди,

происходящие вследствие уноса мелкодисперсных капель штейна в объёме шлака. С увеличением содержания меди в штейне наблюдается рост как общих, так и растворимых потерь. Это связано с увеличением активности меди в жидком штейне, что способствует её переходу в шлаковую фазу, а также с изменением термодинамических условий равновесия между фазами.

При этом вклад механических потерь остаётся относительно стабильным или возрастает менее значительно. Это может указывать на то, что при более высоком содержании меди в штейне улучшаются условия для фазового разделения, что, в свою очередь, снижает интенсивность механического уноса капель штейна в шлак.

Таким образом, представленные зависимости позволяют провести количественную оценку различных механизмов потерь меди и использовать полученные данные при оптимизации параметров плавки с целью снижения безвозвратных потерь ценных компонентов.

В шлаке кислородно-взвешенной плавки очень велико количество растворённой меди (0,85 % Cu), что объясняется большим окислительным потенциалом (15% Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) и основностью шлака. Высокое содержание магнетита определяет низкое межфазное натяжение на границе раздела шлак–штейн и значительные механические потери меди (0,55 % Cu). Количество меди, теряемое со шлаками кислородно-факельной плавки, определяется самим характером процесса, основанным на глубоком окислении сульфидов. Существенная генерация магнетита приводит к повышению растворимости сульфида меди в шлаке, а чередование процессов окисления–восстановления — к образованию тонкодисперсной сульфидной взвеси.

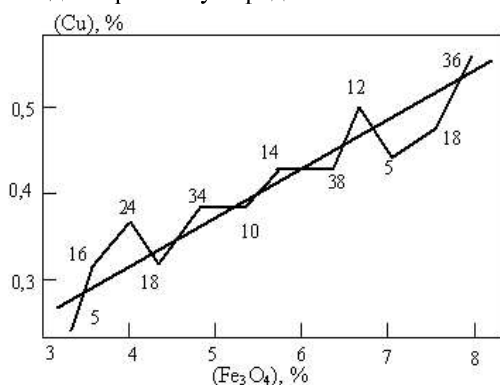


Рис. 2. Зависимость содержания меди в шлаке от содержания магнетита

На рисунке 2 представлена зависимость содержания меди в шлаке от массовой доли магнетита (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>), построенная на основе экспериментальных данных, полученных при анализе промышленных образцов шлаков кислородной плавки.

Анализ графика показывает наличие устойчивой тенденции: с увеличением содержания магнетита в шлаке наблюдается рост концентрации меди. Такая зависимость обусловлена совокупностью факторов, влияющих на распределение меди между фазами. Повышенное содержание Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> свидетельствует о более окислительной атмосфере в системе, которая способствует окислению сульфидной меди с последующим её переходом в шлаковую фазу в виде оксидов или комплексных силикатов. Кроме того, избыток магнетита может способствовать ухудшению фазового разделения между шлаком и штейном за счёт увеличения вязкости шлака и повышения вероятности механического уноса капель штейна. Это приводит к дополнительным потерям меди в виде металлических или сульфидных включений.

Дополнительным фактором, влияющим на поведение меди, является содержание серы в штейне. При снижении сернистости снижается стабильность сульфидной меди, что увеличивает её склонность к переходу в шлак. В условиях высоких концентраций серы, наоборот, медь удерживается в штейне в виде сульфидов, что снижает её растворимость в шлаке.

Ещё одной причиной потерь является большое количество пыли, которое осаждается на ванну печей взвешенной плавки, лёточный выпуск шлака с нижних слоёв позволяет значительно ослабить влияние этого негативного явления на потери меди.

Значительное количество меди теряется в шлаках в виде тонкодисперсной капель штейна, коалесценция которых зависит от межфазного натяжения. Магнетит снижает межфазное натяжение на границе раздела шлак–штейн и, таким образом, ухудшает коалесценцию штейновой взвеси. Кроме того, магнетит повышает окислительный потенциал шлака, что определяет увеличение растворимости меди в шлаке [7].

На потери меди со шлаками также отрицательно влияет повышенное содержание кислорода в атмосфере печи [8]. Повышенное содержание оксида кальция до 12 – 13 % снижает все формы потерь меди. Большее влияние этот компонент оказывает на уменьшение растворённых потерь, меньшее — на снижение механических. Это связано с тем, что два основных фактора, определяющих величину этих потерь (межфазное натяжение и вязкость), снижаются при повышении содержания оксида кальция в шлаках до указанных пределов. В этих условиях положительное влияние снижения вязкости на содержание мелкодисперсной взвеси ослабляется ухудшением межфазного натяжения.

**Заклучение**

Проведённое исследование показало, что потери меди со шлаками кислородно-факельной плавки происходят в двух основных формах - механической и растворённой, при этом преобладают растворённые потери (0,85 % против 0,55 %), обусловленные высоким окислительным потенциалом шлака и значительным содержанием магнетита. Магнетит оказывает двойственное влияние: с одной стороны, он способствует увеличению растворимости меди в шлаке за счёт окисления сульфидной меди, с другой — снижает межфазное натяжение, ухудшая коалесценцию капель штейна и повышая механические потери. Содержание меди в шлаке возрастает с

увеличением её концентрации в штейне и количества магнетита, что связано с изменением термодинамических условий фазового равновесия. Влияние серы также существенно: при её высоком содержании медь стабилизируется в виде сульфидов, что снижает её растворимость в шлаке. Снижение потерь возможно путём уменьшения окислительного потенциала, оптимизации содержания компонентов шлака (в частности, кальция до 12–13 %), снижения образования пыли и изменения условий выпуска шлака, что позволяет уменьшить как механические, так и растворённые потери меди и повысить эффективность процесса плавки.

## KISLORODLI ERITISH JARAYONLARIDA MISNING SHLAKLAR BILAN YO‘QOTILISHIGA TA‘SIR QILUVCHI ASOSIY OMILLARNI O‘RGANISH

**Muxametjanova Sh.A., Matkarimov S.T., Nosirxo‘jayev S.Q., Ochildiyev K.T., Saynazarov A.M.**

*Toshkent Davlat Texnika Universiteti, Toshkent, O‘zbekiston*

**ANNOTATSIYA**

Kelib tushgan:

19.07.2025

Ko‘rib chiqilgan:

24.07.2025

Qabul qilingan:

08.08.2025

Chop etilgan:

10.10.2025

Ushbu maqolada kislorod-mash‘ala eritish jarayonida misning shlaklar bilan yo‘qotilish mexanizmlari, jumladan, erigan va mexanik shakllari tahlil qilinadi. Tadqiqot natijalariga ko‘ra, yo‘qotishlarning asosiy qismi misning shlakdagi yuqori oksidlovchi potentsialga ega muhitda erib ketishi bilan bog‘liq. Magnetit miqdorining oshishi misning eritmadagi eruvchanligini kuchaytiradi hamda shlak–штейн fazalari orasidagi fazaviy ajralishni yomonlashtiradi. Shteyndagi mis miqdori, shlak tarkibi, sulfidlar darajasi va tizimning fizik-kimyoviy xususiyatlari mis yo‘qotilishiga sezilarli ta‘sir ko‘rsatadi. Shteyn tomchilarining dispersiyalanishi va koalesensiyasi jarayonlari, shuningdek, magnititning roliga alohida e‘tibor qaratilgan. Mis yo‘qotilishini kamaytirish uchun shlak tarkibini va texnologik parametrlarni optimallashtirish bo‘yicha tavsiyalar berilgan.

**KALIT SO‘ZLAR**

kislorod-mash‘ala eritish, shlak, mis yo‘qotilishi, mexanik yo‘qotishlar, erigan yo‘qotishlar, magnetit, fazalararo taranglik.

## STUDY OF THE MAIN FACTORS AFFECTING COPPER LOSSES WITH SLAGS IN OXYGEN SMELTING PROCESSES

**Mukhametdzhanova Sh.A., Matkarimov S.T., Nosirkhodzhaev S.K., Ochildiv K.T., Sainazarov A.M.**

*Tashkent State Technical University, Tashkent, Uzbekistan*

**ABSTRACT**

Received:

19.07.2025

Revised:

24.07.2025

Accepted:

08.08.2025

Published:

10.10.2025

This article examines the mechanisms of copper losses with slags during oxygen-fuel smelting, focusing on both dissolved and mechanical forms. The study reveals that the majority of losses result from copper dissolving into the slag due to its high oxidative potential, strongly influenced by elevated magnetite content. Increased magnetite not only enhances copper solubility but also impairs phase separation between slag and matte. Factors such as copper content in matte, slag composition, sulfur levels, and the physicochemical properties of the system significantly affect copper loss. Particular attention is paid to the dispersion and coalescence of matte droplets and the role of magnetite in stabilizing sulfide suspensions. Recommendations are provided for minimizing copper losses through slag composition optimization and technological parameter adjustment.

**KEYWORDS**

oxygen-fuel smelting, slag, copper losses, mechanical losses, dissolved losses, magnetite, interfacial tension

## Библиографический список

1. Matkarimov S. T., Berdiyarov B. T., Mukhametjanova Sh. A. Understanding the possibility of obtaining iron-bearing alloys from copper slags. *Tsvetnye Metally*. 2023. No. 9. pp. 31–2. Mukhamedzhanova Shoira, Matkarimov Sokhibjon Development of resource-saving technology for copper production at “Almalyk MMC” JSC, E3S Web of Conferences 525, 04001 (2024) GEOTECH-2024 DOI 10.1051/e3sconf/202452504001
3. Ismailov, J., Berdiyarov, B., Nosirkhujayev, S., Ochilidiyev, K., Nuraliyev, O. Possibilities for improving the technology of roasting zinc concentrates E3S Web of Conferences, 2024, 525, 040033. наша статья
4. Металлургия тяжелых цветных металлов [Электронный ресурс]: электронное учебное пособие / Н. В. Марченко, Е. П. Вершинина, Э. М. Гильдебрандт. – Электронные данные (6 Мб). – Красноярск: ИПК СФУ, 2009.
5. Mark E. Schlesinger; Kathrun C. Sole; William G. Davenport; Gerardo R.F. Alvear Flores. *Extractive Metallurgy of Copper*, Hardback ISBN: 9780128218754, 6th Edition – December 2, 2021
6. H. Jalkanen, J. Vehvilainen, and J. Poijarvi: *Scand. J. Metall.*, 2003, vol. 32, pp. 65–70.
7. R.H. Davies, A.T. Dinsdale, J.A. Gisby, J.A.J. Robinson, and S.M. Martin: *CALPHAD*, 2002, vol. 26, pp. 229–71
8. The International Centre for Diffraction Data: PDF-2 Database, Release 2014. <http://www.icdd.com/products/pdf2.htm>, 2014. Accessed 16 Nov 2015.

## Information about authors:

|                                              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|----------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Muxametjanova Shoira Abdusamatovna</b>    | – PhD, Associate professor of the department of Metallurgy; Tashkent State Technical University, 100095, Tashkent, University Str., 2, Republic of Uzbekistan<br>ORCID: <a href="https://orcid.org/0000-0002-6184-6443">https://orcid.org/0000-0002-6184-6443</a> <a href="mailto:shoira.muhamet@gmail.com">shoira.muhamet@gmail.com</a> |
| <b>Matkarimov Sohijon Turdalievich</b>       | – DSc, professor of the department of Metallurgy; Tashkent State Technical University, 100095, Tashkent, University Str., 2, Republic of Uzbekistan<br>ORCID: <a href="https://orcid.org/0000-0003-2393-6576">https://orcid.org/0000-0003-2393-6576</a> , e-mail: <a href="mailto:sohibtm@gmail.com">sohibtm@gmail.com</a>               |
| <b>Nosirxo'jayev Sardor Qodirjon o'g'li</b>  | – Head of the department of Metallurgy, PhD, Associate professor; Tashkent State Technical University, 100095, Tashkent, University Str., 2, Uzbekistan<br>ORCID: <a href="https://orcid.org/0000-0003-1651-5634">0000-0003-1651-5634</a> , <a href="mailto:sardornosirxojayev77@gmail.com">sardornosirxojayev77@gmail.com</a>           |
| <b>Ochilidiyev Qahramon Turdalievich</b>     | – PhD, Associate professor of the department of Metallurgy; Tashkent State Technical University, 100095, Tashkent, University Str., 2, Uzbekistan<br><a href="https://orcid.org/0000-0002-9891-7508">https://orcid.org/0000-0002-9891-7508</a> , <a href="mailto:qahramonochilidiyev@gmail.com">qahramonochilidiyev@gmail.com</a>        |
| <b>Saynazarov Abdukahhar Matibragimovich</b> | – Head of the Technological Department, Central Office, Almalyk Mining and Metallurgical Complex JSC, Tashkent A.Temur Str., Republic of Uzbekistan<br>e-mail: <a href="mailto:a.saynazarov@agmk.uz">a.saynazarov@agmk.uz</a>                                                                                                            |

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ БУРОВЗРЫВНЫХ РАБОТ НА НИЖНИХ ГОРИЗОНТАХ КАРЬЕРОВ С УЧЕТОМ ТЕХНИКО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

Ш.А.Очилов

Университет геологических наук, Ташкент, Узбекистан

Doi: 10.5281/zenodo.17338796

## АННОТАЦИЯ

Получено:  
14.07.2025Пересмотрено:  
19.07.2025Пересмотрено:  
03.08.2025Опубликовано:  
10.10.2025

В статье рассмотрены ключевые факторы, определяющие выбор бурового оборудования и организацию буровзрывных работ (БВР) на нижних горизонтах карьеров. Представлена методика расчета производительности буровых станков с учетом геомеханических свойств массива, степени износа инструмента и энергетических характеристик бурения. Предложена система расчетов параметров скважин и зарядов с учетом удельной энергоемкости разрушения, а также взаимосвязь между технологическим циклом бурения и организацией работы экскавационного оборудования. Разработаны рекомендации по рациональному определению числа буровых станков, их резервированию и оптимизации взаимодействия в технологической цепи.

## КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

карьер, уступ, бурение, буровой станок, скорость бурения, производительность, горные породы, энергоемкость бурения, шарошечное бурение, буровзрывные работы, трещиноватость, плотность, обводненность, термические напряжения.