

УДК 549.01:54.055

С.С. Потапов¹, А.А. Горячев², Д. В. Макаров², Н.В. Паршина¹

¹Институт минералогии ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН, г. Миасс

²Институт проблем промышленной экологии Севера
КНЦ РАН, г. Апатиты

К МИНЕРАЛОГИИ ШЛАКОВ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПЕРЕДЕЛА МЕДНО-НИКЕЛЕВЫХ РУД НА ПЛОЩАДКЕ МОНЧЕГОРСК АО «КОЛЬСКАЯ ГМК»

С применением рентгенофазового анализа, сканирующей электронной микроскопии и энергодисперсионной спектроскопии изучен минеральный состав шлаков металлургического передела на площадке Мончегорск АО «Кольская ГМК». Силикатная матрица шлака представлена диопсидом $\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$, оливином $(\text{Mg,Fe})(\text{SiO}_4)$, а так же конечными членами изоморфного ряда – форстеритом Mg_2SiO_4 и фаялитом Fe_2SiO_4 , что типично для шлаков. В незначительных количествах в шлаке присутствуют кварц SiO_2 и кристобалит SiO_2 . Методом РФА из сульфидных минералов установлен лишь пирит FeS_2 . Методом СЭМ ЭДС обнаружены кубанит CuFe_2S_3 , пентландит $(\text{Fe,Ni})_9\text{S}_8$, пирротин Fe_9S_{11} , самородное железо.

Ключевые слова: медно-никелевая руда, металлургические шлаки, минеральный состав, диопсид, оливин, форстерит, фаялит, кубанит, пентландит, самородное железо, Мончегорск, Кольская ГМК.

DOI: 10.17072/chirvinsky.2025.143

Введение. В современных условиях актуально вовлечение во вторичный передел отходов (а по сути – техногенных месторождений) горнорудного и металлургического производства. Именно с целью утилизации и использования отходов металлургического передела медно-никелевых руд площадки Мончегорск АО «Кольская ГМК» (ранее – комбинат «Североникель») проведено изучение минерального состава шлаков. «Североникель» – комбинат по производству никеля и меди, расположенный в г. Мончегорск Мурманской области (рис. 1).

Из истории комбината «Североникель». В 1930 г. академиком А.Е. Ферсманом было открыто месторождение медно-никелевых сульфидных руд Терраса в западной части массива Нюд. С этого времени началось систематическое геологическое изучение Мончегорского района.

С целью переработки руд месторождения Терраса в 1934 г. было принято решение о создании комбината «Североникель». А 29 апреля 1935 г. наркомом тяжелой промышленности СССР Серго Орджоникидзе



Рис. 1. Вид на комбинат «Североникель» АО «Кольская горно-металлургическая компания».

был подписан приказ об ударном строительстве на Кольском полуострове металлургического комбината мощностью 10 тыс. т никеля и 10 тыс. т меди в год. Одновременно со строительством комбината началось и строительство Мончегорска.

23 февраля 1939 г. комбинат дал первый товарный огневой никель, а с июля 1940 г. он начал также производить кобальт.

В 1941 г. в связи с началом Великой Отечественной войны оборудование комбината было, в основном, эвакуировано, главным образом, на Урал и в Норильск. Эвакуированные работники комбината помогли наладить выпуск никеля на Норильском комбинате.

В мае 1942 г. было принято решение о восстановлении комбината и уже осенью 1942 г. было восстановлено производство файнштейна, а полный цикл производства был восстановлен к осени 1945 г. 20 декабря 1942 г. было принято Постановление ГКО СССР о выпуске комбинатом «Североникель» нестандартного никеля.

В 1963 г. впервые в СССР на комбинате было налажено производство карбонильного никеля. В том же году «Североникелю» было присвоено имя В.И. Ленина. В 1966 г. комбинат был награждён орденом Ленина.

В 1979 г. на комбинате впервые была получена электролитная медь.

В 1982 г. на комбинате вступил в строй медно-никелевый комплекс по переработке рудного сырья и файнштейна Норильского горно-металлургического комбината.

В 1989 г. комбинат «Североникель» вошёл в состав государственного концерна «Норильский никель», который в 1994 г. был акционирован.

В 1998 г. комбинаты «Североникель» и «Печенганикель» были объединены в составе АО «Кольская горно-металлургическая компания».

В декабре 2002 г. на «Североникеле» было введено в эксплуатацию новое гидрометаллургическое отделение с уникальной технологией

«обжиг – выщелачивание – электроэкстракция», которая позволяет утилизировать до 98 % серы.

В 1989–1990 гг. комбинат выплавлял 140 тыс. т никеля в год, затем начался спад и в 1993–1996 гг. комбинат производил около 60 тыс. т никеля и меди, работая главным образом на норильской руде.

До закрытия плавильного цеха площадки Заполярный – Никель АО «Кольская ГМК» в декабре 2020 г., на площадке Мончегорск перерабатывали поступающий оттуда фэйнштейн. В настоящее время ведется переработка фэйнштейна из Заполярного филиала ПАО «Норильский никель», а также значительное количество вторичных материалов, содержащих цветные и драгоценные металлы.

Методика исследований. По проектной производственной программе по выпуску металлов комбината «Североникель» в зависимости от набора сырья образовывалось порядка 850–950 тыс. т в год электропечных шлаков. Период эксплуатации шлакоотвала 1937–2002 гг. Проектная площадь, отведенная под шлакоотвал (93.3 га), использована на 89 % (занимаемая отвалом площадь – 83.3 га). За годы эксплуатации накоплено около 60 млн. т шлака. Средневзвешенная плотность отвальных шлаков составляет 3.06 т/м³. Агрегатное состояние твёрдое, неплавающее.

Складирование огненно-жидких отходов осуществлялось переливом расплава из ковшей на бровку откоса отвала. Свежие слитые шлаки для скорейшего остывания заливались водой, что приводило к охлаждению, растрескиванию на отдельные и расчленению на глыбы, щебень, и дресву. Размеры и раскрытие образующихся трещин различны – от нескольких сантиметров до десятков метров в длину, ширина раскрытия колеблется от долей и нескольких миллиметров до 0.3–1.0 м.

21 ноября 2023 г. на отвалах площадки Мончегорск АО «Кольская ГМК» были отобраны образцы шлаков. Откос шлакоотвала был вскрыт с помощью фронтального погрузчика. Отбор шлаков выполнялся по всей мощности вскрытого массива. Была отобрана представительная проба массой 300 кг, вещественный состав которой затем исследовали комплексом физических и физико-химических методов.

Для исследований методом рентгенофазового анализа (РФА) были выбраны 5 образцов шлака разной крупности: крупный монолитный образец (СН-1); крупный пористый образец (СН-2); средний монолитный образец (СН-3); средний пористый образец (СН-4); мелкий смешанный шлак (СН-5) (рис. 2). Исследования проведены на дифрактометре ДРОН-2.0, CuK_α -излучение в лаборатории ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН (аналитики Е.Д. Зенович, П.В. Хворов). Расшифровка



Рис. 2. Исследованные образцы шлака.

дифрактограмм выполнена с использованием эталонов сравнения картотеки рентгеновских данных JCPDS или ASTM, а также электронной базы данных Минкрисст.

Для изучения внутреннего строения шлаков, химического состава минералов и внутрифазовой неоднородности были изготовлены искусственные аншлифы на основе эпоксидной смолы, куда были включены частицы изучаемых шлаков. Перед исследованием на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) на образцы наносилось углеродное напыление толщиной 20-25 нм на напылителе Quorum Q150 ES Plus. Исследование проводилось на сканирующем электронном микроскопе ZEISS EVO 24 (Carl Zeiss AG, Оберкохен, Германия), оборудованным энергодисперсионным рентгеновским спектрометром UltimMax 170 (Oxford Instruments PLC, Рединг, Великобритания). Ускоряющее напряжение 20 кЕв, ток 2.0 нА, время накопления спектра 30 с. Все изображения и спектры обрабатывались и рассчитывались с помощью ПО Oxford AzTec ED.

Результаты минералогических исследований. На полученных рентгенограммах образцов шлака (рис. 3) дешифрируются преимущественно рефлексы диопсида $\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$ и оливина $(\text{Mg,Fe})(\text{SiO}_4)$, а также конечных членов изоморфного ряда – форстерита Mg_2SiO_4 и фаялита Fe_2SiO_4 , что характерно для шлаков [1-7, 11]. Таким образом, минеральный состав силикатной матрицы изученных образцов шлака близок. В незначительных количествах в шлаке присутствуют кварц SiO_2 и кристобалит SiO_2 . Методом рентгенофазового анализа, видимо, из-за малого содержания, не установлены сульфиды цветных металлов (прежде всего, никеля и меди), но фиксируются рефлексы пирита FeS_2 . Судя по отсутствию гало в области 2θ 20-40° стекловатая фаза отсутствует или присутствует в незначительных количествах. То есть при остывании шлака произошла практически его полная кристаллизация.

В качестве примера приведём результаты исследования образца шлака СН-3 методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ)

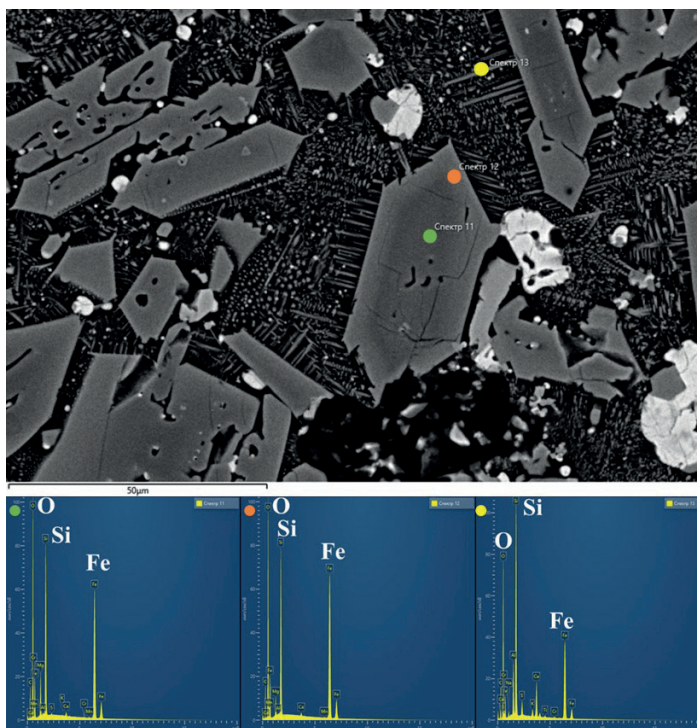


Рис. 4. СЭМ-фото и ЭД-спектры образца шлака СН-3.

и энергодисперсионной спектроскопии (ЭДС). Зафиксированные спектры отвечают минералам силикатной матрицы (рис. 4) и сульфидным минералам (рис. 5). В отдельных участках препарата шлака зафиксированы включения в силикатную матрицу самородного железа. На отдельных участках препаратов по ЭДС отмечено наличие ванадия и хрома. В образце зафиксировано значительное количество магния, входящего в состав форстерита. И наличие магния связано с включением серпентина и талька в исходной руде. Отмечены участки с повышенным содержанием меди и никеля, отвечающие, соответственно, кубаниту CuFe_2S_3 и пентландиту $(\text{Fe.Ni})_9\text{S}_8$ (причем часть никеля также может входить в состав пирротина в качестве изоморфной примеси. (см. рис. 5).

Потенциальные практические результаты исследований.

Известно, что извлечение полезных минеральных компонентов из техногенного сырья, каковым, в частности, являются отходы пирометаллургии, имеет большие перспективы [8-10, 12, 13]. Вовлечение металлургических шлаков во вторичный передел экономически целесообразно, его

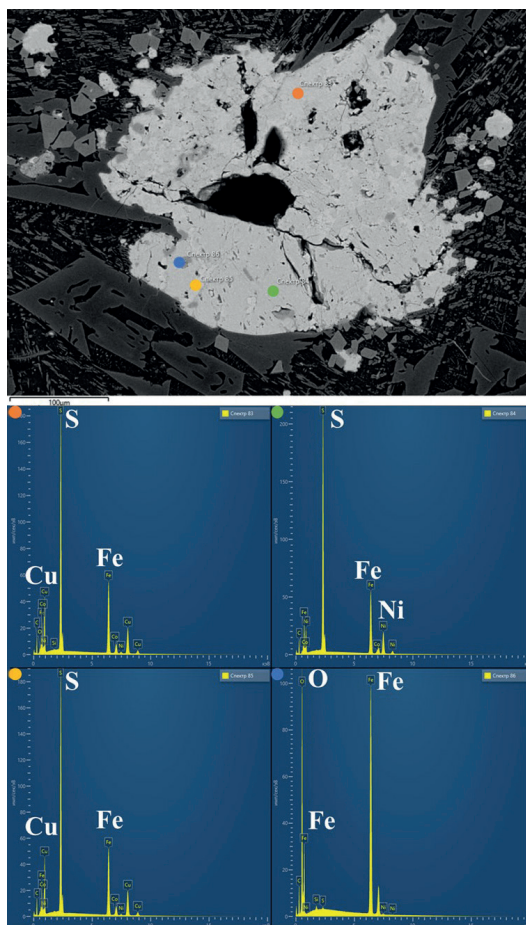


Рис. 5. СЭМ-фото и ЭД-спектры образца шлака СН-3.

следствием является уменьшение загрязнения природной окружающей среды, улучшение экологической обстановки, получение новых видов сырья и товарной продукции. Комплексность переработки металлургических шлаков подразумевает извлечение рудной металлической компоненты с последующим вовлечением силикатной матрицы в производство строительных материалов, в частности, добавки в цемент, в качестве заполнителя в строительных работах, изготовление бетонов на основе шлака, изготовления керамических материалов, стёкол, стекловолокна и стекловаты, прессованных материалов и др. Всё это позволит оптимизировать экологическую ситуацию, получить экономический эффект

и наладить производство новой товарной продукции. Всё это возможно на основании детального исследования минерального и химического состава шлаков, изучения их технологических свойств и разработки новых нетрадиционных технологий извлечения рудной компоненты (металла) и широкого применения силикатной матрицы шлаков для получения новых продуктов.

В дальнейшем целесообразно провести детальное опробование шлакоотвала с отбором представительных проб на поверхности и в объёме отвала по сети разведочных линий. Это позволит определить изменчивость вещественного состава шлаков.

Авторы выражают благодарность к.г.-м.н. А.А. Компанченко за проведение исследований на сканирующем электронном микроскопе.

Исследование выполнено неформальным творческим коллективом по теме «Минералого-геохимические исследования и палеоэкологические реконструкции природных и техногенных процессов» в рамках государственного задания Института минералогии ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН (регистрационный № АААА-А-21-121011990025-5) с использованием аналитических возможностей центров коллективного пользования.

Библиографический список:

1. Ерохин Ю.В., Козлов П.С. Фаялит из шлаков Среднеуральского медеплавильного завода (г. Ревда) // Минералогия техногенеза–2010. Миасс: ИМин УрО РАН, 2010. С. 32-40.
2. Ерохин Ю.В., Захаров А.В., Леонова Л.В. Вещественный состав шлаков Карабашского медеплавильного завода // Вестник МГТУ им. Г. И. Носова. 2019. Т. 17. № 3. С. 12-18.
3. Козлов П.С., Ерохин Ю.В., Козлова И.В. Фаялитовые шлаки Мариинского перерабатывающего завода // Минералогия техногенеза–2011. Миасс: ИМин УрО РАН, 2011. С. 39-50.
4. Макаров Д.В., Потапов Д.С., Потапов С.С., Корнева Е.А., Светлов А.В., Баярова Ю.Л. Исследование отвальных шлаков медно-никелевого производства ОАО «Кольская ГМК» // Современные методы технологической минералогии в процессах комплексной и глубокой переработки минерального сырья. Плаксинские чтения–2012. Материалы международного совещания. 10-14 сентября 2012 г. Петрозаводск: Кар НЦ РАН, 2012. С. 329-332.
5. Потапов Д.С., Потапов С.С. К минералогии металлургических шлаков уральских заводов // Материалы симпозиума «Минералогические перспективы». Сыктывкар: Геопринт, 2011. С. 347-349.
6. Потапов Д.С., Потапов С.С. Минералого-геохимические исследования металлургических шлаков как основа для их использования и переработки // Новые технологии обогащения и комплексной переработки труднообогатимого природного и техногенного минерального сырья. Плаксинские чтения 2011. 19-24 сентября 2011 г. Верхняя Пышма. Екатеринбург: Издательство «Форт Диалог-Исеть», 2011. С. 76-80.
7. Потапов Д.С., Потапов С.С., Макаров Д.В. Минералогия гранулированных шлаков комбината «Печенганикель» // Минералогия техногенеза–2012. Миасс: ИМин УрО РАН, 2011. С. 95-101.
8. Потапов Д.С., Потапов С.С. Вторичный передел металлургических шлаков

как фактор оздоровления экологической ситуации // Экологические системы и приборы. 2013. № 9 (сентябрь). С. 24-35.

9. *Потапов С.С.* Металлургические шлаки как потенциальное вторичное техногенное сырьё // Антропогенная трансформация природной среды: материалы Международного семинара «Научные чтения памяти Н.Ф. Реймерса и Ф.Р. Штильмарка. 14-17 декабря 2009 г. Пермь: ПГУ, 2009. С. 272-275.

10. *Потапов С.С., Потапов Д.С., Паришина Н.В., Макаров Д.В., Светлов А.В., Ерохин Ю.В.* Минералого-геохимические исследования шлаков металлургического передела медно-никелевых руд как потенциального техногенного сырья // Рациональное недропользование: сб. науч. трудов / Под ред. С.Е. Гавришева. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. Гос. техн. ун-та им Г.И. Носова, 2014. С. 195-202.

11. *Потапов С.С., Паришина Н.В., Наумкин Д.В.* Минеральный состав метеоритного вещества // Деятельность всероссийские научные чтения памяти ильменского минералога В.О. Полякова. Миасс: ИМин УрО РАН, 2018. С. 38-48.

12. *Светлов А.В., Потапов С.С., Потапов Д.С., Кравченко Е.А., Ерохин Ю.В., Потокин А.С., Селиванова Е.А., Суворова О.В., Кумарова В.А., Нестеров Д.П., Макаров Д.В., Маслобоев В.А.* Исследование возможности извлечения цветных металлов и производства строительных материалов из шлаков медно-никелевого производства // Вестник Мурманского государственного технического университета. 2015. Т. 18. № 2. С. 335-344.

13. *Anton Svetlov, Sergey Potapov, Daniil Potapov, Yury Erokhin, Anatoly Usov, Alexander Potokin, Olga Suvorova, Victoria Kumarova, Dmitry Makarov.* Extraction of Nonferrous Metals and Production of Building Materials from Copper-Nickel Smelting Slags // Inzynieria Mineralna. Journal of the Polish Mineral Engineering Society. 2015. July – December. P. 243-248.

TO THE MINERALOGY OF SLAG FROM METALLURGICAL CONVERSION OF COPPER-NICKEL ORES AT THE MONCHEGORSK SITE OF JSC KOLA MMC

Potapov S.S., Goryachev A.A., Makarov D.V., Parshina N.V.

s.potapov-60@yandex.ru

The mineral composition of slags from metallurgical processing at the Monchegorsk site of JSC Kola MMC was studied using X-ray phase analysis, scanning electron microscopy and energydispersive spectroscopy. The silicate matrix of the slag is represented by diopside $\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$, olivine, $(\text{Mg,Fe})(\text{SiO}_4)$, as well as end members of the isomorphic series – forsterite Mg_2SiO_4 and fayalite Fe_2SiO_4 , which is typical for slags. Quartz SiO_2 and cristobalite SiO_2 are present in the slag in small quantities. The X-ray diffraction method revealed only pyrite FeS_2 among sulfide minerals. The SEM EDS method revealed cubanite CuFe_2S_3 , pentlandite $(\text{Fe,Ni})_9\text{S}_8$, pyrrhotite $\text{Fe}_{n+1}\text{S}_n$, and native iron.

Keywords: copper-nickel ore, metallurgical slags, mineral composition, diopside, olivine, forsterite, fayalite, cubanite, pentlandite, native iron, Monchegorsk, Kola MMC.