

EDN: IBXFXL

УДК 669.2/.8

## **Results of the Study on Effect of Quartzite Feed to the Second Stage of Copper-Nickel Converter Matte Converting**

**Pavel V. Malakhov<sup>\*a</sup>, Vasilii P. Milichenko<sup>a</sup>,  
Roman A. Pakhomov<sup>b</sup>, Igor M. Dymov<sup>b</sup>**  
*<sup>a</sup>PJSC «MMC «Norilsk Nickel» Polar Branch  
Norilsk, Russian Federation  
<sup>b</sup>Gipronickel Institute LLC  
Saint Petersburg, Russian Federation*

Received 23.12.2024, received in revised form 10.01.2025, accepted 26.01.2025

**Abstract.** Expected growth of cobalt consumption and increase of the metal price promotes a pressing need to consider possibility to enhance recovery of cobalt from copper-nickel feed containing high amount of this metal in pyrometallurgical process chain at the Nadezhda Metallurgical Plant named after B.I. Kolesnikov (NMP) of PJSC “MMC “Norilsk Nickel” Polar Branch. Pyrometallurgical processing of copper-nickel sulphide ores and concentrates at NMP comprises three stages: smelting of the incoming feed in flash smelting furnaces (FSF) to produce high-grade matte and slag, FSF slag and recycled slag treatment in slag cleaning electric furnaces (EF) to produce waste slag and low-grade matte, and converting high-grade FSF and low-grade EF mattes to produce converter matte and converter slag which is recycled to EF.

Currently, total pyrometallurgical chain cobalt recovery does not exceed 55 % rel. of the incoming feed, i.e. 45 % rel. of cobalt are permanently lost with waste EF slag. At the same time, studies reveal that more than 30 % rel. of the total cobalt amount are circulated between EF and converter. Thus, decrease of cobalt concentration in the recycled materials will result in increase in cobalt recovery at NMP, and at Nor Nickel Polar Branch as a whole.

This paper presents the results of laboratory tests and pilot studies on increasing cobalt recovery rates during converting using quartz flux (quartzite) at the final stage of converting and finishing ready-to-tap converter matte by removing iron oxides dissolved in sulfide phase. Treatment of almost ready-to-tap converter matte with quartz flux instead of using blast oxygen (for additional oxidation of iron) leads to preservation of cobalt in converter matte.

**Keywords:** cobalt, pyrometallurgy, Nadezhda Metallurgical Plant, Nor Nickel, slag cleaning, converter slag, quartzite, high-grade matte.

---

© Siberian Federal University. All rights reserved

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0).

\* Corresponding author E-mail address: MalakhovPV@nornik.ru



## Результаты исследований по влиянию подачи кварцита на вторую стадию конвертирования медно-никелевого фанштейна

**П. В. Малахов<sup>а</sup>, В. П. Миличенко<sup>а</sup>,  
Р. А. Пахомов<sup>б</sup>, И. М. Дымов<sup>б</sup>**

*<sup>а</sup>ЗФ ПАО «ГМК «Норильский никель»*

*Российская Федерация, Норильск*

*<sup>б</sup>ООО «Институт Гипроникель»*

*Российская Федерация, Санкт-Петербург*

**Аннотация.** В связи с прогнозируемым ростом потребления кобальта и увеличением цены на этот металл возрастает необходимость рассмотрения возможности повышения извлечения кобальта в пирометаллургической цепочке по переработке медно-никелевого сырья, богатого кобальтом на Надеждинском металлургическом заводе имени Б.И. Колесникова (НМЗ) Заполярного филиала ПАО «ГМК «Норильский никель» (ЗФ). Пирометаллургическая переработка сульфидных медно-никелевых руд и концентратов на НМЗ включает в себя три передела: плавка исходного сырья в печах взвешенной плавки (ПВП) с получением богатого штейна и шлака, обеднение шлаков головного передела и оборотных в обеднительных электропечах (ОЭП) с получением отвального шлака и бедного штейна, конвертирование (КО) богатого штейна ПВП и бедного штейна ОЭП с получением фанштейна и конвертерного шлака, возвращающегося в ОЭП.

В настоящее время сквозное извлечение кобальта в пирометаллургическом производстве (ПМП) не превышает 55 % отн. от поступающего на переработку сырья, т.е. 45 % отн. кобальта безвозвратно теряется с отвальным отвальными шлаком ОЭП. В тоже время установлено, что более 30 % отн. от всего объема кобальта участвуют в обороте между ОЭП и конвертерным переделом. Таким образом, снижение концентрации кобальта в оборотных продуктах приведет к росту сквозного извлечения кобальта по НМЗ и ЗФ в целом.

В настоящей работе приведены результаты лабораторных и опытно-промышленных исследований по повышению показателей извлечения кобальта в конвертерном переделе при применении кварцевого флюса (кварцита) на финальной стадии конвертирования и доводки готового фанштейна удалением растворенных в сульфидной фазе оксидов железа. Промывка практически готового фанштейна кварцевым флюсом взамен применения кислорода дутья (доокисление железа) приводит к сохранению кобальта в фанштейне.

**Ключевые слова:** кобальт, пирометаллургия, НМЗ, Норильский никель, обеднение шлаков, конвертерный шлак, кварцит, фанштейн.

## Введение

Стремительное развитие в последние годы систем для хранения энергии и развития электро-транспорта способствует росту потребления металлов, используемых в составе аккумуляторов различного типа. Кобальт, один из таких металлов, получил широкое применение в литий-ионных аккумуляторах [1, 2]. Интенсивно развивающиеся направления батарей, не использующих в основе литий, также применяют кобальт в качестве анодного материала [3, 4]. Широкое применение кобальта в аккумуляторах способствует сохранению спроса на этот металл на высоком уровне и в будущем [5]. Ввиду прогнозируемого роста потребления кобальта актуально направление по повышению извлечения этого металла в пирометаллургическом производстве ЗФ. Ранее проведенный анализ распределения кобальта на производстве показал, что преобладающий объем кобальта (более 75 % масс.) с сырьем поступает в пирометаллургическое производство Надеждинского металлургического завода имени Б. И. Колесникова (НМЗ) [6].

В ранее выполненных работах [7–15] рассматривается текущая ситуация и проблематика по первичной пирометаллургической переработке сульфидных медно-никелевых концентратов ЗФ, содержащих кобальт. Кобальт при переработке концентратов из медно-никелевых руд в ПМП НМЗ является металлом-спутником никеля. Значительное влияние на показатели извлечения кобальта по существующей схеме переработки (рис. 1) сульфидного сырья в пирометаллургических агрегатах возможно только на переделах получения отвальной продукции (отвальный шлак на переделе ОЭП) и готовой продукции (медно-никелевый файнштейн на переделе КО).

Встречающиеся в литературе данные по переработке сульфидного сырья показывают высокую сходимость поведения кобальта и железа [16, 17]. Таким образом, повлияв на концентрацию железа в донной фазе, возможно изменить и показатели извлечения кобальта. Одним из направлений является повышение содержания железа в готовом файнштейне, в настоящее время железо в котором варьируется в диапазоне 2,5–3,5 % масс. [18, 19]. С другой стороны, рост количества железа в готовом файнштейне может затруднить разделение файнштейна на концентраты и переработку продуктов разделения файнштейна, в особенности на операции железоочистки никелевого концентрата от разделения файнштейна. Вместе с тем существуют технологические операции, позволяющие снизить количество железа в сульфидной массе без дополнительной продувки сульфидного расплава.

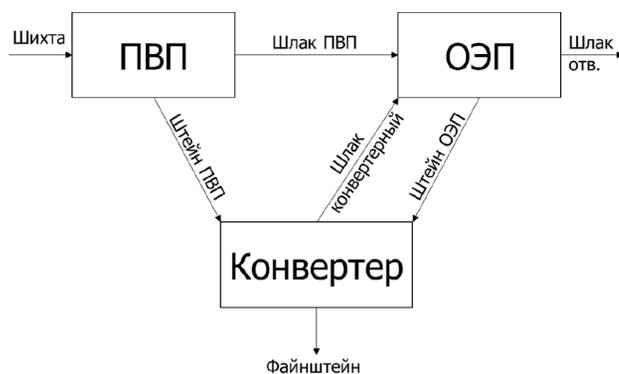


Рис. 1. Упрощенная схема потоков ПМП НМЗ

Fig. 1. Simplified flow diagram of pyrometallurgical process chain of the Nadezhda Metallurgical Plant

В ранних работах представлены результаты термодинамических расчетов и лабораторных исследований [20], где показано, что организация «свёртывания» варочного шлака избыточным количеством кварцевого флюса приводит к значительному сокращению содержания железа в фанштейне. Общее содержание Fe в фанштейне снижается до 1,0 % абс. Таким образом, одновременное применение повышенного содержания железа в конечном фанштейне с последующей промывкой кварцевым флюсом перед сливом приведет, с одной стороны, к росту извлечения цветных металлов в фанштейн, а с другой – позволит нивелировать негативный фактор, связанный с ростом железа в конечном продукте пирометаллургического передела НМЗ. Так, по результатам лабораторных исследований при прекращении продувки фанштейна на уровне 3,5–3,8 % масс. по содержанию остаточного железа за счет операции «свёртывания» шлака кварцевым флюсом конечное содержание Fe в фанштейне составит 2,8–3,1 % масс. При этом кобальт в фанштейне будет практически полностью сохраняться.

Теоретические предпосылки были проверены на практике при реализации опытно-промышленных испытаний (ОПИ) на конвертерном переделе НМЗ.

### Порядок проведения ОПИ

В работе представлены результаты промышленных испытаний на двух конвертерах, участвующих в исследовательской работе. С целью набора статистических данных существующей технологии с применением в качестве холодных присадок собственных оборотных продуктов проводился «базовый» этап. Отбор продуктов плавки выполнялся по схеме, представленной на рис. 2.

По окончании периода предварительного опробования проводились влияния кварцевого флюса (кварцита, фракция +30–80 мм, содержание диоксида кремния не менее 96 %) для удаления железа и кислорода из сульфидной массы – «перспективный» период. На рис. 3 представлена схема работы конвертера «перспективного» второго периода конвертирования («варка» фанштейна) и периоды отбора проб.

Согласно рис. 3 в опытный период производился отбор четырех проб сульфидной массы в течение одной плавки. Общая масса холодных оборотов на плавку достигала 15–28 тонн при средних показателях 23 тонны. После продувки и получения в конвертере недодутого фанштейна (сульфидная масса с содержанием железа более 3,7 % масс.) производилась за-

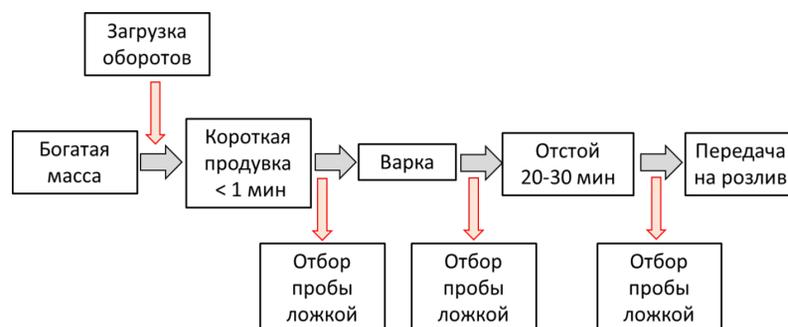


Рис. 2. Хронология ведения процесса и периоды отбора проб в «базовом» этапе

Fig.2. Chronology of the process and the sampling periods in the “basic” stage

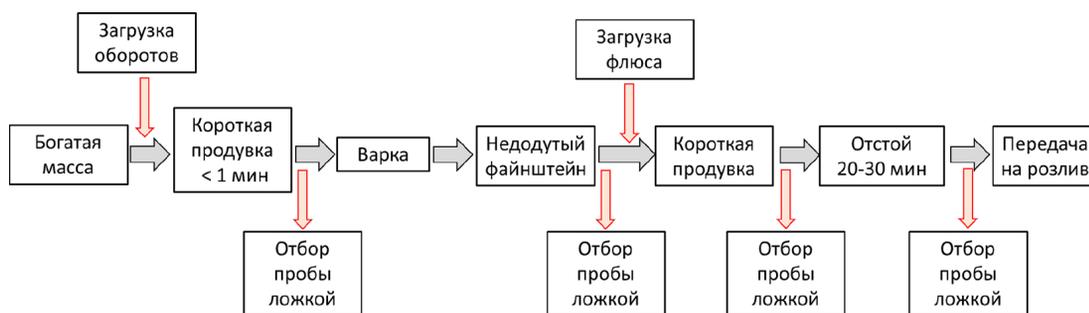


Рис. 3. Хронология ведения процесса и периоды отбора проб в опытном этапе

Fig. 3. Chronology of the process and sampling periods in the test stage

грузка флюса и выполнялась короткая продувка около 2–6 минут. Масса кварцита на стадии «свёртывания» шлака варьировалась в районе 3–8 тонн (среднее значение 4,5 тонны) на плавку. По окончании короткой продувки выполнялся отбор пробы файнштейна и его экспресс-анализ, в случае удовлетворительного анализа осуществлялся слив файнштейна из-под образовавшейся корки «свернутого» шлака. В среднем время ожидания от окончания продувки до слива первого ковша составляло 20–30 минут. На сливе также производился отбор пробы файнштейна.

### Результаты ОПИ

На конвертирование поступают как штейны ПВП, так и штейны ОЭП, в которых концентрация кобальта существенно выше, чем в штейне ПВП. Типичные составы штейнов ПВП и ОЭП представлены в табл. 1.

Каждая плавка до файнштейна крайне вариативна по соотношению штейна ПВП и ОЭП. Проведем термодинамические оценки поведения кобальта в шлаке и богатой массе на второй стадии конвертирования в зависимости от состава входящего сырья, результаты представлены на рис. 3.

Термодинамическое моделирование окислительной продувки сульфидного расплава различного состава выполнялось при помощи программного комплекса FactSage. Программное обеспечение FactSage позволяет проводить для термодинамического моделирования различных высокотемпературных химических процессов. Принцип работы программного обеспечения основан на поиске минимума энергии Гиббса рассматриваемой системы. Данное программное обеспечение работает как отдельно, так и в комплексе с иными вспомогательными средствами для проведения расчетов в Excel, Delphi и т.п. [21].

Таблица 1. Содержание основных компонентов в штейнах ПВП и ОЭП, %

Table 1. Content of the main components in FSF and EF matte, %

Наименование	Cu	Ni	Co	Fe	S
Штейн ПВП	18,11	37,66	0,66	15,30	26,43
Штейн ОЭП	10,76	19,32	1,99	47,85	18,81

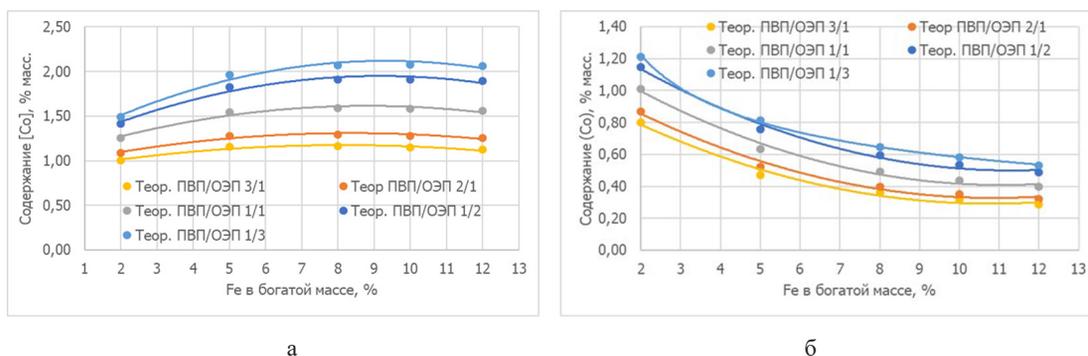


Рис. 4. Поведение кобальта в сульфидной фазе (а) и оксидной фазе (б) от содержания железа в богатой массе при различной шихтовке

Fig. 4. The behavior of cobalt in the sulfide phase (a) and the oxide phase (б) vs the iron content in the high-grade mass at different charge

Результаты термодинамических расчетов, не учитывающие механические формы потерь, показывают, что концентрация кобальта в шлаке существенно растет при снижении количества железа в богатой массе до 2–3 % масс. (рис. 4б), что также сопровождается снижением концентрации кобальта в богатой массе (рис. 4а). Богатой массой называют донный промпродукт первой стадии конвертирования, для рассматриваемого технологического цикла содержания железа в таком сульфидном расплаве не превышает 8–10 % масс.

В период ОПИ на передел конвертирования поступали продукты различного состава с вариативным соотношением штейнов ПВП/ОЭП от 3/1 до 1/3. Рассмотренный массив данных при последующей обработке результатов был разделен на две основные группы по соотношению штейнов ПВП/ОЭП 2/1 и 1/2. Результаты термодинамических расчетов и данных, полученных в результате ОПИ по распределению кобальта в сульфидной фазе от содержания железа, представлены на рис. 5.

На рис. 5 показано, что концентрация  $Co$  в донной фазе по теоретическим расчетам для рассмотренных соотношений выше, чем по данным промышленного эксперимента, что может

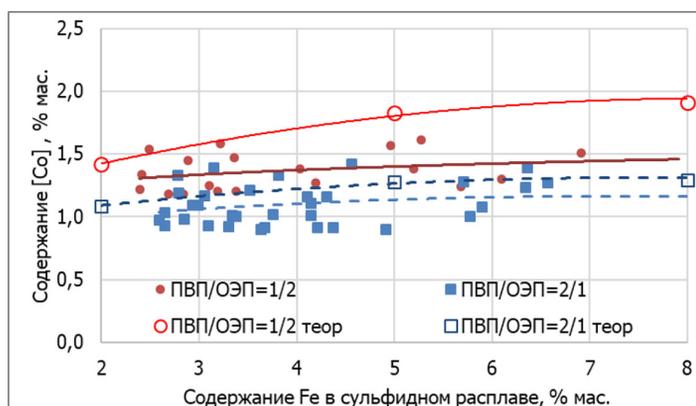


Рис. 5. Изменение содержания кобальта в сульфидной фазе для соотношения штейнов ПВП/ОЭП = 2/1 и 1/2

Fig. 5. The change in the cobalt content at a sulfide phase for the ratio of FSF/EF matte = 2/1 and 1/2

быть обусловлено присутствием механических потерь в промышленных шлаках, а также отсутствием в термодинамическом комплексе FactSage 6.4 полной базы данных по распределению кобальта в рассматриваемых системах. На графиках показано снижение концентрации кобальта в рассматриваемом диапазоне составов сульфидной массы с 8 до 2 % масс. железа как для термодинамических расчетов, так и для результатов промышленного исследования. Таким образом, для повышения показателей извлечения кобальта на первом периоде конвертирования на основании теоретических и практических данных показано, что при текущих составах штейнов ПВП и ОЭП (табл. 1) необходимо вести первый период конвертирования до содержания железа в богатой массе не ниже 8 % масс.

Рассмотрим зависимость поведения железа в донной фазе опытного периода работы от содержания кобальта до и после подачи кварцевого флюса. Результаты содержания железа в донной фазе от концентрации кобальта в сульфидной массе представлены на рис. 5.

На представленных зависимостях рис. 6 показано, что при введении кварцевого флюса доля железа существенно снижается по отношению к концентрации кобальта в донной фазе. Содержание железа в фاینштейне снижается на 0,48–1,55 % абс., что соответствует диапазону 8,3–28,6 % отн. Средние показатели снижения Fe в фاینштейне при «свёртывании» шлага кварцитом при реализации ОПИ соответствуют уровню 0,85 % абс., что коррелируется с результатами ранее выполненных лабораторных и расчетных работ [9].

Произведем оценку влияния подачи кварцита на стадию «варки» фاینштейна (второго периода конвертирования), на рис. 7 выполнено сравнение двух периодов работы «базового» и «опытного» для соотношения штейна ПВП/ ОЭП, равного 2/1.

Представленные на рис. 7 результаты показывают, что при использовании кварцита во втором периоде конвертирования концентрация кобальта в донной фазе в зоне существования фاینштейна увеличивается на 0,10–0,11 % абс., что соответствует 9–12 % отн. росту концентрации кобальта в товарном фاینштейне. Рассмотрим поведение кобальта более подробно (рис. 8).

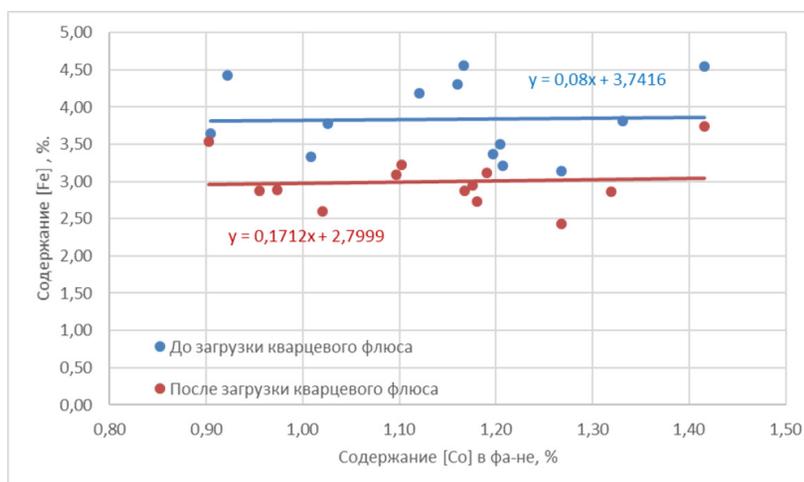


Рис. 6. Зависимость доли железа в фاینштейне от кобальта до и после загрузки кварцевого флюса

Fig. 6. Converter matte iron content vs cobalt content before and after loading quartz flux

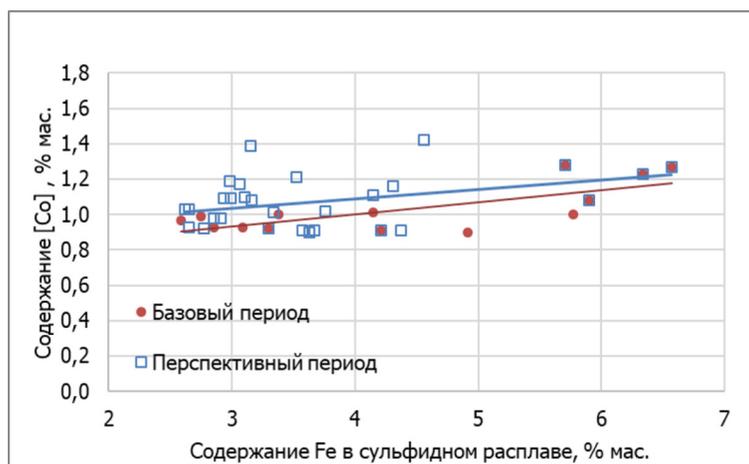


Рис. 7. Зависимость содержания кобальта в сульфидной массе в «базовом» и «перспективном» периодах  
Fig. 7. Dependence of cobalt content in the sulfide mass in the “base” and “test” periods

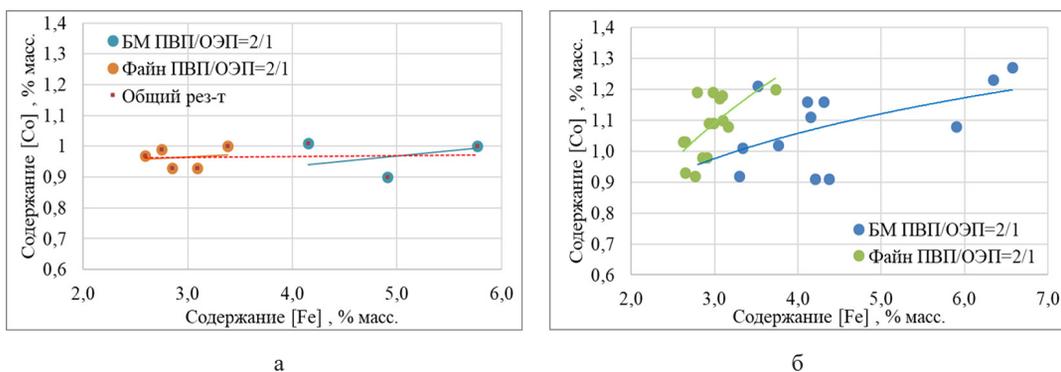


Рис. 8. Зависимость содержания кобальта от содержания железа до и после второго периода конвертирования в штатном режиме (а) и при «сварачивании» кварцевым флюсом (б)

Fig. 8. Cobalt content vs iron content before and after the second conversion period in base mode (a) and during “cooling” with quartz flux (б)

При отдельном рассмотрении поведения кобальта в богатой массе и готовом файнштейне для двух рассматриваемых периодов при соотношении штейнов ПВП/ОЭП, равном 2 к 1, можно отметить, что в случае с «базовым» периодом зависимости концентрации кобальта от содержания железа в донной фазе линейны, и в целом ход кривой может быть продолжен от богатой массы к файнштейну (результаты представлены пунктирной линией). В то же время для «опытного» периода зависимость концентрации кобальта в донной фазе от содержания железа в файнштейне носит принципиально иной характер. Зависимость на рис. 7б показывает, что введение кварцита позволяет повысить содержание кобальта в донной фазе на 0,11 % абс. при содержании Fe в донной фазе на уровне 3 % масс.

*Результаты исследований методом РЭМ-РСМА*

Отобранные пробы сульфидной массы подвергались исследованиям методами РЭМ-РСМА, методика исследования и подготовки образцов, которая заключается в изготовлении шлифа, описана в работах [22, 23].

Так как опробованные продукты близки по составу, на рис. 9 приводятся изображения микроструктур и составов для одной пары образцов сульфидной массы, отобранной до и после загрузки кварцита.

В табл. 2 и 3 представлены составы основных фаз, отмеченных на микроструктурах, а также состав оксидной фазы сульфидной массы, отобранной до и после загрузки кварцита на стадию сворачивания шлака во втором периоде конвертирования.

По результатам, представленным на изображениях микроструктур и составов отдельных фаз в табл. 2 и 3 установлено, что основными компонентами являются следующие фазы:

- сульфид никеля (состава хизлевудитового твердого раствора) – основа материала;
- сульфид на основе меди (халькозин-борнитовый твердый раствор с характерной «паркетной» структурой распада);
- кристаллы металлической фазы на основе Ni. Суммарная объемная доля металлических фаз во всех пробах не превышает 5 % масс.

Также в подчиненном и сугубо подчиненном объеме в файнштейна диагностированы:

- сульфид на основе никеля-железа, представленный в объеме хизлевудитового твердого раствора;

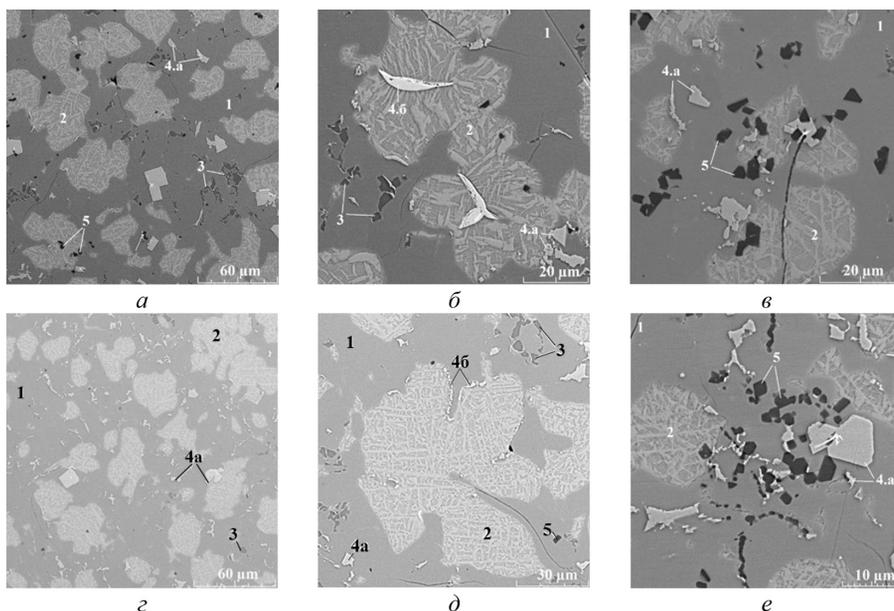


Рис. 9. Строение сульфидной массы перед загрузкой кварцита (а-в) и готового файнштейна (г-е) (1 – сульфид никеля, 2 – сульфид меди-железа, 3 – сульфид железа-никеля, 4 – металлические фазы (а – на основе никеля, б – на основе меди), 5 – окс. фазы)

Fig. 9. The structure of the sulfide mass before loading quartzite (a-b) and ready-to-tap converter matte (c-e) (1 – nickel sulfide, 2 – copper-iron sulfide, 3 – iron-nickel sulfide, 4 – metal phases (a – nickel-based), 5 – oxide phases)

Таблица 2. Состав сульфидов и металлической фазы

Table 2. Composition of sulfides and metal phase

Точка отбора	Составляющая	Состав,% масс.				
		S	Fe	Co	Ni	Cu
до загрузки кварцита	Средний состав пробы	24,0	3,4	0,8	45,5	25,7
	Сульфид меди-железа	22,0	5,0	0,2	1,3	71,6
	Сульфид никеля	26,5	0,6	1,1	71	0,8
	Сульфид никеля-железа	32,6	26,2	7,4	32,9	0,9
	Мет. фаза на основе никеля	0,2	10,3	1,7	78,4	8,9
	Мет. фаза на основе меди	1,1	1,2	0,1	1,5	88,2
после загрузки кварцита	Средний состав пробы	23,8	2,7	0,8	46,6	25,5
	Сульфид меди-железа	21,9	4,9	0,2	1,3	71,7
	Сульфид никеля	26,5	0,5	1,3	70,4	1,3
	Сульфид никеля-железа	32,5	25,6	8,1	32,8	1,0
	Мет. фаза на основе никеля	0,2	8,7	1,6	78,9	10,2
	Мет. фаза на основе меди	0,8	0,9	0,2	1,8	95,7

Таблица 3. Состав оксидной составляющей в исследуемых пробах

Table 3. The composition of the oxide component in the studied samples

Место отбора проб	Оксидная фаза,% масс.				
	Fe	Co	Ni	Cu	O
до загрузки кварцита	68,91	0,90	3,31	0,80	26,08
на сливе	65,77	1,20	6,21	0,80	26,03

– металлическая фаза на основе меди. Как правило, указанные фазы, ассоциированы с халькозин-борнитовым твердым раствором;

– включения оксидной фазы (по составу приближающейся к магнетиту с существенными примесями цветных металлов), объемная доля оксидных фаз во всех пробах не превышает 1 % масс.

Результаты исследований показывают снижение доли железа как по среднему составу, так и в отдельных фазах проанализированных проб. Снижение железа в пробах после добавки кварцита составляет в среднем 0,85 % масс. Наиболее заметное снижение доли железа отмечается в оксидной составляющей исследуемых проб (3,1 % абс.) и в металлическом растворе на основе никеля (1,6 % абс.).

### Выводы

В результате проведенных термодинамических расчетов и опытно-промышленных испытаний при переработке штейнов ПВП и ОЭП на конвертерном переделе было показано:

1. Для повышения показателей извлечения кобальта в первый период конвертирования штейнов до богатой массы необходимо вести окислительную продувку таким образом, чтобы содержание железа в донной фазе не снижалось ниже 8 % масс.

2. По результатам промышленных испытаний подтверждены теоретические и лабораторные исследования о том, что применение кварцевого флюса на втором периоде конвертирования при охлаждении файнштейна позволяет связать часть оксидного железа, растворенного в сульфидной фазе, и снизить его концентрацию в среднем на 0,85 % абс. Что в результате приводит к росту концентрации кобальта в товарном продукте пирометаллургического передела НМЗ на 0,07–0,11 % абс.

### Список литературы / References

[1] Gen W.E., Busse G.M. & House K.Z. The predicted persistence of cobalt in lithium-ion batteries. *Nat Energy* 7, 1132–1143 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41560-022-01129-z>

[2] *Crux Investor. The Ultimate Guide to the Cobalt Market: 2022*, June 14, 2022. [Electronic resource] – Access: <https://www.cruxinvestor.com/posts/the-ultimate-guide-to-the-cobalt-market-2022>

[3] Yuan F., Shao Y.C., Wang B. et al. Recent progress in application of cobalt-based compounds as anode materials for high-performance potassium-ion batteries. *Rare Met.* 41, 3301–3321 (2022). <https://doi.org/10.1007/s12598-022-02052-8>

[4] *Cobalt Institute. Cobalt Market Report 2021, 2022*. [Electronic resource] – Access: <https://www.cobaltinstitute.org/resource/state-of-the-cobalt-market-report-2021/>

[5] Goldman S. *Battery Metals Watch: The End of the Beginning*, 29 May 2022. [Electronic resource] – Access: <https://www.goldmansachs.com/insights/goldman-sachs-research/battery-metals-watch-the-end-of-the-beginning>

[6] Крупнов Л. В., Малахов П. В., Озеров С. С., Пахомов Р. А. Анализ металлургии кобальта России и подходы по повышению извлечения металла в готовую продукцию. *Цветные металлы*, 2023, 7, 25–33 [Krupnov L. V. Malakhov P. V., Ozerov S. S., Pakhomov R. A. Analyzing Russian cobalt metallurgy and ways to raise recovery. *Tsvetnye Metally*, 2023, 7, 25–33. (in Rus.)]

[7] Крупнов Л. В. Старых Р. В. Использование твердых углеводородов для регулирования степени окисления сульфидного медно-никелевого сырья при автогенной взвешенной плавке. *Цветные металлы*, 2020, 8, 55–60 [Krupnov L. V., Starykh R. V. The use of solid hydrocarbons to control oxidation degree of sulfide Cu-Ni feedstock for autogenous flash smelting. *Tsvetnye Metally*, 2020, 8, 55–60 (in Rus.)]

[8] Крупнов Л. В. *Механизм образования тугоплавкой настывки в печах взвешенной плавки и способы ее устранения*: автореф. дис. канд. техн. наук. Санкт-Петербург: Нац. минерально-сырьевой ун-т «Горный», 2015. 19 с. [Krupnov L. V. *Mechanism of refractory accretion formation in flash smelting furnaces and methods of accretion removal*: Author's abstract of Cand. Sci. (Eng.) thesis. Saint-Petersburg: Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Saint Petersburg Mining University”, 2015. 19 p. (in Rus.)]

[9] Денисова Я. В., Мархаева А. М., Царева С. А. Использование инструментов цифровизации в реальном секторе экономики на примере компании ПАО «ГМК «Норильский никель». *Управление устойчивым развитием*, 2023, 6, 12–19 [Denisova Ya.V., Markhaeva A. M., Tsareva S. A. Application of digitalization tools in real economy: the case of PJSC “MMC “Norilsk Nickel”. *Upravlenie Ustoychivym Razvitiem*, 2023, 6, 12–19. (in Rus.)].

[10] Богатырев Д. М., Цымбулов Л. Б., Озеров С. С. Исследование распределения благородных металлов при окислительной плавке сульфидного медно-никелевого концентрата в барботажном режиме. *Цветные металлы*, 2024, 1, 33–40 [Bogatyrev D. M., Tsybulov L. B., Ozerov S. S. Study of the distribution of noble metals during oxidative melting of a cobalt-nickel sulfide concentrate in a bubbling regime. *Tsvetnye Metally*, 2024, 1, 33–40]

Ozerov S.S. Study of noble metals distribution during oxidative smelting of sulfide copper-nickel concentrate in bubbling mode. *Tsvetnye Metally*, 2024, 1, 33–40. (in Rus.).

[11] Крупнов Л. В., Цымбулов Л. Б., Малахов П. В., Озеров С. С. Работа автогенных агрегатов в Заполярном филиале компании «Норникель» при переработке сырья с пониженным энергетическим потенциалом. *Цветные металлы*, 2022, 2, 40–49 [Krupnov L. V., Tsymbulov L. B., Malakhov P. V., Ozerov S. S. Operation of autogenous smelting units at Nor Nickel's Polar Division when processing raw materials with low energy potential. *Tsvetnye Metally*, 2022, 2, 40–49. (in Rus.)].

[12] Крупнов Л. В., Пахомов Р. А., Талалов В. А., Малахов П. В. Варианты изменения конструкции печей взвешенной плавки для улучшения динамики газового потока / Л. В. Крупнов. *Сб. тезисов докладов XIV международной конференции, посвященной 40-летию Института химии и химической технологии Сибирского отделения РАН. Красноярск, 6–9 сентября 2021 г.* / Электрон. текстовые дан. – Красноярск: Научно-инновационный центр, 2021. – С. 70–73 [Krupnov L. V., Pakhomov R. A., Talalov V. A., Malakhov P. V. Possible options of flash smelting furnace redesign to improve gas flow dynamics. *Proceedings of XIV international conference dedicated to 40th anniversary of The Institute of Chemistry and Chemical Technology of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences. Krasnoyarsk, 6th-9th of September, 2021* / Electronic text data. – Krasnoyarsk: Science and Innovation Center, 2021. – p. 70–73. (in Rus.)].

[13] Крупнов Л. В., Румянцев Д. В., Цемехман Л. Ш., Озеров С. С., Малахов П. В. Исследование условий возникновения промежуточного слоя в печах Ванюкова. *Современные технологии производства цветных металлов: материалы Междунар. науч. конф., Екатеринбург, 27 октября 2023 г.* / науч. ред. О. Ю. Маковская; Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2023. 52–61 [Krupnov L. V., Romyantsev D. V., Tsemekhman L. Sh., Ozerov S. S., P. V. Malakhov P. V. Conditions for Intermediate Layer Formation in Vanyukov Furnaces. *Modern Technologies in Non-Ferrous Metallurgy: Proceedings of International Scientific Conference, Yekaterinburg, October 27<sup>th</sup>, 2023* / Ed. by O. Yu. Makovskaya. Yekaterinburg; Ural University Press, 2023. 52–61. (in Rus.)]

[14] Крупнов Л. В. Мидюков Д. О., Малахов П. В. Направления поддержания сырьевой базы медно-никелевой подотрасли. *Обогащение руд*, 2022, 2, 37–42 [Krupnov L. V. Midyukov D. O., Malakhov P. V. Maintenance of raw material basis of copper-nickel industry. *Obogaschenie rud*, 2022, 2, 37–42 (In Rus.)].

[15] Pakhomov R.A., Malakhov P.V., Krupnov L. V., Dymov I.M. Improving cobalt extraction through oxidative blowing of copper-nickel matte. *12th International Conference on Molten Slags, Fluxes and Salts (MOLTEN 2024)*. (Brisbane, Australia, 17–19 June 2024). P. 1187–1193. <https://doi.org/10.62053/ZFVS 9836>

[16] Резник И. Д., Соболев С. И., Худяков В. М. *Кобальт. В 2 т. Т. 1: Исторический очерк. Сырьевые источники кобальта. Пирометаллургия кобальта*. – М.: Машиностроение, 1995 [Reznik I. D., Sobol S. I., Khudyakov V. M. *Cobalt. In 2 volumes. Vol. 1: Brief history. Cobalt resources. Cobalt pyrometallurgy*. Moscow: Mashinostroenie, 1995 (In Rus.)].

[17] Бровкин В. Г., Пиотровский В. К. *Переработка жидких конверторных шлаков*. М: Metallurgiya, 1978. 104 с. [Brovkin V. G., Piotrovskiy V. K. *Processing of liquid converter slags*. Moscow: Metallurgiya, 1978. 104 p. (In Rus.)].

[18] Цемехман Л. Ш., Фомичев В. Б., Ерцева Л. Н., Н. Г. Кайтмазов, С. М. Козырев, В. И. Максимов, Шнеерсон Я. М., Дьяченко В. Т. *Атлас минералогического сырья, технологических*

продуктов и товарной продукции ЗФ ОАО ГМК «Норильский никель». – М.: Руда и металлы, 2010.– 336 с. [Tsemekhman L. Sh., Fomichev V.B., Ertseva L.N., Kaytmazov N.G., S.M. Kozyrev, V.I. Maksimov, Shneerson Ya.M., Dyachenko V.T. *The atlas of mineral raw materials, technological industrial products and marketable products of the Polar Division of OJSC Norilsk Nickel MMC*. Moscow, Ore and Metals, 2010. 336 p. (in Rus.)].

[19] Атлас минерального сырья, технологических промышленных продуктов и товарной продукции ЗФ ПАО «ГМК «Норильский никель»: монография / А.И. Девичкин, Л.В. Крупнов и др.; под общ. ред. Л.Б. Цымбулова. СПб.: Политех-пресс, 2021. 398 с. [The atlas of a mineral raw materials, technological industrial products and marketable products of the Polar Division of PJSC “MMC “Norilsk Nickel”. A.I. Devochkin, L.V. Krupnov et al., Ed. by L.V. Tsybulov. Saint-Peterburg: Polytech-Press, 2021. 398 p. (In Rus.)].

[20] Малахов П. В., Крупнов Л. В., Пахомов Р. А., Озеров С. С., Румянцев Д. В. Повышение извлечения кобальта при конвертировании на медно-никелевый фэйнштейн. *Сб. тезисов докладов XVI Международной конференции «Металлургия цветных, редких и благородных металлов» имени члена-корреспондента РАН Геннадия Леонидовича ПАШКОВА (5–8 сентября 2023 года, Красноярск, Россия)*. Электрон.текстовые дан. – Красноярск: ОУ «ККДНиТ», 2023. С. 301–318 [Malakhov P.V., Krupnov L.V., Pakhomov R.A., Ozerov S.S., Rummyantsev D.V. Increase of cobalt recovery while converting Cu-Ni feed to obtain high-grade matte. *Proceedings of XVI International Conference “Non-Ferrous, Rare and Noble Metallurgy” named after Russian Academy of Science correspondent member Gennadiy L. Pashkov (5<sup>th</sup>-8<sup>th</sup> September, 2023, Krasnoyarsk, Russia)*. Electronic text data. Krasnoyarsk, 2023. 301–318 (In Rus.)].

[21] Bale C. W., Bélisle E., Chartrand P., Decterov S.A., Eriksson G., Gheribi A.E., Hack K., Jung I.H., Kang Y.B., Melançon J., Pelton A.D., Petersen S., Robelin C., Sangster J., Spencer P. and Van Ende M-A. FactSage Thermochemical Software and Databases, 2010–2016. *Calphad*. 2016, 54, 35–53. <www.factsage.com>

[22] Савинова Ю.А., Румянцев Д.В., Мишина О.Ю., Банникова С.А., Сомов П.А. Исследование вещественного состава и морфологии тонкодисперсных металлургических пылей методами сканирующей электронно-ионной микроскопии и рентгеноспектрального микроанализа. *Сб. тезисов докладов XXVIII Российской конференции по электронной микроскопии*. 5–10 сентября 2020, Черногловка [Savinova Yu. A., Rummyantsev D.V., Mishina O. Yu., Bannikova S.A., Somov P.A. Analyzing the material composition and morphology of finely dispersed metallurgical dusts by means of scanning electron/ion microscopy and X-ray microanalysis. *Proceedings of the 28th Russian Electron Microscopy Conference*. 5–10 September 2020, Chernogolovka. (In Rus.)].

[23] Криштал М. М., Ясников И. С., Полуниин В. И., Филатов А. М., Ульянинков А. Г. *Сканирующая электронная микроскопия и рентгеноспектральный микроанализ в примерах практического применения*. М.: Техносфера, 2009. 208 с. [Krishtal M.M., Yasnikov I.S., Polunin V.I., Filatov A.M., *Scanning electron microscopy and X-ray spectral microanalysis: case of practical application*. Moscow: Technosfera, 2009. 208 p. (In Rus.)].