

ВЛИЯНИЕ ВРЕМЕНИ ОХЛАЖДЕНИЯ СЛИТКОВ МЕДНО-НИКЕЛЕВОГО ФАЙНШТЕЙНА НА ПОКАЗАТЕЛИ СЕЛЕКТИВНОСТИ ЕГО ФЛОТАЦИОННОГО РАЗДЕЛЕНИЯ

© 2020 г. И.А. Индейкин, Р.В. Старых, Е.В. Салимжанова, В.Б. Фомичев, Л.В. Крупнов

Заполярный филиал ПАО «ГМК «Норильский никель», г. Норильск

ООО «Институт Гипроникель», г. Санкт-Петербург

Норильский государственный индустриальный институт

Статья поступила в редакцию 21.06.19 г., доработана 28.08.19 г., подписана в печать 02.09.19 г.

При флотационном разделении файнштейнов на никелевый и медный концентраты критерием оценки эффективности процесса является индекс селективного разделения, основанный на сумме извлечений металлов в целевые концентраты, что, в свою очередь, определяет суммарное количество загрязняющих (вторых) металлов в них. Известно, что помимо различных факторов, влияющих на технологический процесс разделения файнштейна в промышленном масштабе (соблюдение плотностных и реагентных режимов, параметров измельчения и т.д.), значимое влияние оказывает длительность предшествующей операции охлаждения слитков. Для оценки влияния условий кристаллизации файнштейна были проведены лабораторные исследования процесса разделения при соблюдении постоянства режимных параметров измельчения и флотации. В промышленных условиях были получены слитки файнштейна, характеризующиеся различным временем охлаждения. Образцы файнштейна в лабораторных условиях измельчали и флотировали в замкнутом цикле согласно действующей схеме флотации. Проведенные исследования позволили исключить многофакторность системы и рассматривать процесс разделения файнштейна только в зависимости от времени охлаждения расплава файнштейна, поскольку все остальные факторы в ходе лабораторных испытаний выдерживались неизменными. Проведены измерения температурного поля в теле слитка файнштейна при его охлаждении в условиях действующего производства — это отражается на химическом и фазовом составе различных участков слитка. Температура слитка, вследствие его массивности, достаточно сильно изменяется по объему материала. Малое изменение температуры поверхностей слитка может сопровождаться значительными изменениями температуры в его теле. Результаты измерения показали, что градиент температур от центра к периферии слитка превышает 400 °С. В связи с этим сокращение времени охлаждения файнштейна может приводить к значительным нарушениям режима охлаждения центральных зон слитка. Оптико-минералогический анализ образцов показал, что по мере увеличения времени остывания слитков закономерно повышается его раскристаллизация — образуются крупнозернистые структуры сульфидов меди и никеля с четкими границами раздела фаз. По результатам химического анализа определено, что максимальный индекс разделения меди и никеля файнштейна с получением медного и никелевого сульфидных концентратов, соответственно, достигается при охлаждении слитков файнштейна плавильного цеха Надеждинского металлургического завода в течение 72 ч.

Ключевые слова: флотационное разделение файнштейна, медно-никелевый файнштейн, никелевый концентрат, медный концентрат, индекс селективного разделения, кристаллизация, продолжительность охлаждения, градиент температур, фазовый состав.

Индейкин И.А. — гл. специалист Центра инженерного сопровождения производства Заполярного филиала (ЗФ) ПАО «ГМК «Норильский никель» (663319, Красноярский кр., г. Норильск, Ленинский пр-т, 8).
E-mail: IndeykinIA@nornik.ru.

Старых Р.В. — канд. техн. наук, вед. науч. сотрудник ООО «Институт Гипроникель» (195220, г. Санкт-Петербург, Гражданский пр-т, 11). E-mail: StarykhRV@nornik.ru.

Салимжанова Е.В. — канд. хим. наук, зам. директора Центра инженерного сопровождения производства ЗФ ПАО «ГМК «Норильский никель». E-mail: SalimzhanovaEV@nornik.ru.

Фомичев В.Б. — канд. техн. наук, доцент кафедры металлургии цветных металлов Норильского государственного индустриального института (663310, Красноярский кр., г. Норильск, ул. 50 лет Октября, 7).
E-mail: nii@noguz.ru.

Крупнов Л.В. — канд. техн. наук, зам. начальника Научно-технического управления, гл. металлург ЗФ ПАО «ГМК «Норильский никель». E-mail: KrupnovLV@nornik.ru.

Для цитирования: Индейкин И.А., Старых Р.В., Салимжанова Е.В., Фомичев В.Б., Крупнов Л.В. Влияние времени охлаждения слитков медно-никелевого фанштейна на показатели селективности его флотационного разделения. *Известия вузов. Цветная металлургия*. 2020. No. 1. С. 4–12.
DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2020-1-4-12.

Indeykin I.A., Starykh R.V., Salimzhanova E.V., Fomichev V.B., Krupnov L.V.

Effect of copper-nickel matte ingot cooling time on its floatation separation selectivity indicators

A criterion used to evaluate the efficiency of converter matte foam separation into nickel and copper concentrates is a selectivity index based on the total recoveries of metals into target concentrates that in turn defines their cumulative impurities (secondary metals) content. In addition to various factors (meeting density and reagent flow charts, comminution parameters, etc.), the time of preceding cooling of ingots is also known to have a substantial effect on the process of converter matte separation at commercial scale. Laboratory studies on selective separation were made to evaluate the influence of converter matte crystallization conditions at constant comminution and floatation parameters. Commercial converter matte ingots produced at different cooling rates were ground and floated in the closed circuit under laboratory conditions according to the existing floatation flowsheet. The lab studies allowed to exclude the multifactor nature of the system and to examine the commercial converter separation process only from the viewpoint of converter matte melt cooling rate since the other factors were kept constant during the laboratory tests. The temperature field in the body of the converter matte ingot was measured during its cooling in the conditions of the current production – this is reflected in the chemical and phase composition of various ingot sections. The temperature of the ingot, due to its massiveness, varies considerably throughout the material volume. A small change in the ingot surface temperature can be accompanied by significant changes in the temperature in its body. The measurement results showed that the temperature gradient from the center to the periphery of the ingot exceeds 400 °C. In this regard, reducing the time of converter matte cooling can lead to significant violations of the cooling mode in the central zones of the ingot. In accordance with the optical mineralogical analysis of samples, the longer was the ingot cooling time, the higher was its decrystallization implying the formation of coarse-particle structures of copper and nickel sulfides with sharp interface boundaries. The chemical analysis revealed that the highest possible selectivity index of converter matte copper and nickel separation with resulting copper and nickel sulfide concentrates, respectively, is reached after 72 h of cooling for converter matte ingots from the smelting shop of the Nadezhdinsky Metallurgical Plant.

Keywords: converter matte floatation separation, copper-nickel matte, nickel concentrate, copper concentrate, selectivity index, crystallization, cooling time, temperature gradient, phase composition.

Indeykin I.A. — chief specialist of the Center for engineering support of production of the PJSC «MMC «Norilsk Nickel» (663319, Russia, Krasnoyarsk region, Norilsk, Leninskii pr., 8). E-mail: IndeykinIA@nornik.ru.

Starykh R.V. — Cand. Sci. (Tech.), leading scientific researcher of the Gipronickel Institute LLC (195220, Russia, St. Petersburg, Grazhdanskii pr., 11). E-mail: StarykhRV@nornik.ru.

Salimzhanova E.V. — Cand. Sci. (Chem.), deputy director of the Center for engineering support of production of the PJSC «MMC «Norilsk Nickel». E-mail: SalimzhanovaEV@nornik.ru.

Fomichev V.B. — Cand. Sci. (Tech.), associate prof., Department of non-ferrous metals metallurgy of the Norilsk State Industrial Institute (663310, Russia, Krasnoyarsk region, Norilsk, 50 Let Oktyabrya str., 7). E-mail: nii@noruz.ru.

Krupnov L.V. — Cand. Sci. (Tech.), deputy head of the Scientific and Technical Management, chief metallurgist of the PJSC «MMC «Norilsk Nickel». E-mail: KrupnovLV@nornik.ru.

Citation: Indeykin I.A., Starykh R.V., Salimzhanova E.V., Fomichev V.B., Krupnov L.V. Effect of copper-nickel matte ingot cooling time on its floatation separation selectivity indicators. *Izvestiya Vuzov. Tsvetnaya Metallurgiya (Universities' Proceedings. Non-Ferrous Metallurgy)*. 2020. No. 1. P. 4–12 (In Russ.).
DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2020-1-4-12.

Введение

В настоящее время, после вывода из эксплуатации никелевого завода (г. Норильск), фанштейн, производимый Надеждинским металлургическим заводом им. Б.И. Колесникова» (далее НМЗ) в Заполярном филиале ПАО «ГМК «Норильский никель», перерабатывается в АО «Кольская ГМК» (г. Мончегорск, Мурманская обл.) с получением товарных никелевого и медного концентратов. Основными критериями качества получения готовых концентратов является минимально достижимая

сумма загрязняющих (вторых) металлов с высоким индексом селективности, представляющая собой сумму извлечения металлов в одноименные концентраты:

$$\Sigma \varepsilon_{\text{индекс}} = \varepsilon_{\text{Cu}} + \varepsilon_{\text{Ni}},$$

где ε_{Cu} — извлечение меди в медный концентрат, %; ε_{Ni} — извлечение никеля в никелевый концентрат, %.

Медно-никелевый фанштейн — это сложная

система Ni—Cu—Fe—Co—S—O, о фазовых равновесиях которой сведения отсутствуют в связи с трудностями моделирования. В мировой практике исследованию более простых систем уделяется достаточно большое внимание [1—9]. Расплав файнштейна является гетерогенным и содержит кристаллы оксидной фазы, близкой по составу к магнетиту, распределение которой по объему изложницы неравномерно [10].

С целью улучшения показателей последующего флотационного разделения файнштейна проведен ряд исследований по его подготовке, в том числе по выбору оптимального режима его охлаждения, что позволит без значительного увеличения эксплуатационных затрат сформировать структуру слитка, необходимую для обеспечения удовлетворительных показателей его флотационной переработки [11—15] с получением качественных медного и никелевого концентратов.

Известно, что лучшие результаты разделения медно-никелевых файнштейнов были достигнуты при низкой скорости охлаждения за счет создания крупнозернистой структуры. Высокая скорость и недостаточная продолжительность охлаждения отрицательно сказываются на структуре медно-никелевого файнштейна, поскольку в большом количестве возникают тесные, трудно раскрываемые сростки минералов. Данный факт негативно влияет на процесс селективной флотации и требует изменения подготовки сырья к флотационному обогащению, а именно пересмотра степени измельчения файнштейна [16—18].

Основным критерием измельчения является разделение фазовых составляющих минерального сырья, а именно медных и никелевых минералов, с минимизацией шламовых частиц (менее 0,011 мм), содержание которых негативно влияет на показатели селективности и флотации в общем. Известно, что в случае наличия в питании флотации зерен минералов с размером частиц менее 10 мкм флотационное разделение ухудшается не только за счет неселективной флотации мелких классов, но и вследствие снижения эффективности разделения более крупных классов [18, 19]. Отмечено [10], что сокращение продолжительности охлаждения файнштейна в первую очередь отражается на качестве медного концентрата, поскольку повышается количество сульфидной фазы меди, находящейся в сростках с никельсодержащими минералами. При этом происходит также заражение медного концен-

трата примесными никельсодержащими компонентами, что влечет увеличение затрат на его дальнейшую металлургическую переработку и отражается на сложности рафинирования на конечных стадиях производства готовой продукции. Кроме того, ухудшение качества никелевого и медного концентратов по содержанию основного металла приводит к снижению извлечения никеля и меди в товарную продукцию.

Режим охлаждения файнштейна условно можно разделить на 3 периода:

- охлаждение расплава жидкого файнштейна, причем ввиду отсутствия зерен скорость охлаждения не определяет структуру;

- кристаллизация, т.е. формирование кристаллов из расплава и их последующий рост, при этом снижение скорости охлаждения сопровождается вытеснением сульфида меди из кристаллов сульфида никеля при уменьшении температуры;

- рекристаллизация, а именно изменение фазового состава, размера частиц, их формы при охлаждении твердого файнштейна. На этом этапе изменение скорости охлаждения может оказывать значительное влияние на получаемую структуру слитка, так как диффузионные ограничения в твердом значительно превышают таковые в жидкости.

Важным критерием, характеризующим качество концентратов и степень разделения меди и никеля, является содержание серы и железа в файнштейне, так как сульфидные медь и никель растворяют железо. Содержание серы определяет количество металлической фазы — основного источника загрязнения концентратов, получаемых при флотации. Увеличение доли серы приводит к улучшению структуры файнштейна [19], а также повышает его хрупкость, что способствует более легкому дроблению и измельчению материала на стадии подготовки к флотации.

При флотации хорошо дифференцированного крупнокристаллического файнштейна качество получаемых концентратов выше, чем при переработке мелкокристаллического файнштейна. Это объясняется уменьшением общего количества сростков в измельченном материале, а также достижением более полного раскрытия сростаний при относительно низкой степени измельчения [18, 20—23]. Для улучшения селективности разделения файнштейна на операции флотации необходимо, чтобы структура основных фаз (Ni_3S_2 , Cu_2S) была крупнозернистой с минимальным уровнем взаимных прорастаний, чтобы твердые растворы

характеризовались минимальным содержанием растворенных компонентов, а межфазные границы были бы хрупкими. Такое состояние частично достигается путем низких скоростей охлаждения файнштейна [10, 11].

В промышленных условиях охлаждение расплава и получение слитков файнштейна, характеризующихся описанной выше структурой, осуществляют в изложницах с футеровкой массой 15,5 т, объемом 5,5 м³, масса слитков колеблется в интервале 26—27 т.

К значимым факторам, влияющим на изменение скорости охлаждения, относятся температура окружающей среды и продолжительность охлаждения. Температура, определяемая сезоном, фактически не является управляемым параметром и составляет ориентировочно –10 °С. Продолжительность охлаждения файнштейна от состояния расплава 1150—1180 °С до температуры поверхностей слитка ~200 °С может варьироваться при его извлечении из изложницы; регламентированное значение составляет 72 ч.

В условиях изменения реконфигурации производства необходимо оценить возможность увеличения производительности передела за счет сокращения времени охлаждения файнштейна. Кроме того, периодически наблюдается преждевременное извлечение слитков из изложниц вследствие сбоя ритмичного хода технологического процесса (выход из строя оборудования, нарушения поставки сырья и др.) — переработка такого файнштейна должна негативно отражаться на качестве получаемых флотоконцентратов. Вместе с тем избыточно продолжительное охлаждение слитков снижает производительность предприятия.

Цель данной работы — изучение влияния продолжительности охлаждения слитков файнштейна в условиях действующего производства на его структуру и показатели флотационного разделения на медный и никелевый концентраты.

Методика проведения исследований

Были выполнены следующие исследования:

— на первом этапе — измерение температурного поля в теле слитка файнштейна при его охлаждении в изложнице в условиях действующего производства;

— на втором этапе — анализ особенностей структуры полученных слитков в зависимости от продолжительности их охлаждения, а также оцен-

ка показателей флотационного разделения файнштейна на медный и никелевый концентраты.

Для решения поставленной задачи первого этапа в пустой изложнице, подготовленной к заливке расплава, были размещены термодатчики (хромель-алюмелевые) в защитных чехлах на трех уровнях в центральной и периферийной частях будущего слитка. После заливки файнштейна в изложницу показания термодатчиков фиксировались контроллером сбора данных в непрерывном режиме с интервалом в 1 мин вплоть до изъятия слитка из изложницы.

В промышленных условиях оценить зависимость качества получаемых из файнштейна флотоконцентратов от какого-либо одного фактора чрезвычайно сложно, так как результат флотационного разделения файнштейна определяется режимом охлаждения расплава, условиями измельчения, флотации, т.е. совокупностью множества факторов, зафиксировать которые не представляется возможным. Обеспечить одинаковые условия проведения исследований, изменяя только один из показателей, влияющих на процесс флотации, можно только в лабораторных условиях. В связи с этим на втором этапе в промышленных условиях получены слитки файнштейна с временем охлаждения 85, 72, 60 и 50 ч.

Для выполнения лабораторных исследований от полученных слитков на операции крупного дробления были отобраны представительные пробы кускового (–50 мм) файнштейна для осуществления химического и оптико-минералогического анализов. Исследования проводили на оптическом микроскопе марки «Axio Scope.A1» (Carl Zeiss, Германия).

Отобранные пробы были измельчены до регламентируемого содержания частиц класса крупности менее 45 мкм на уровне 83 ± 2 %. Полученный продукт использовали для проведения флотационной серии сравнительных опытов в лабораторных условиях в замкнутом цикле согласно представленной на рис. 1 схеме переработки.

Эксперименты проводили в лабораторных флотационных машинах механического типа с объемами камер 3,0—0,3 дм³. Применяемые реагенты: 5 %-ный раствор бутилового ксантогената калия (БКК) и раствор щелочи (220 г/дм³ NaOH) — были приготовлены с учетом установленного значения массовой доли основного вещества. По окончании экспериментов на основании данных по химическому составу полученных продуктов рассчитывали показатели обогащения.

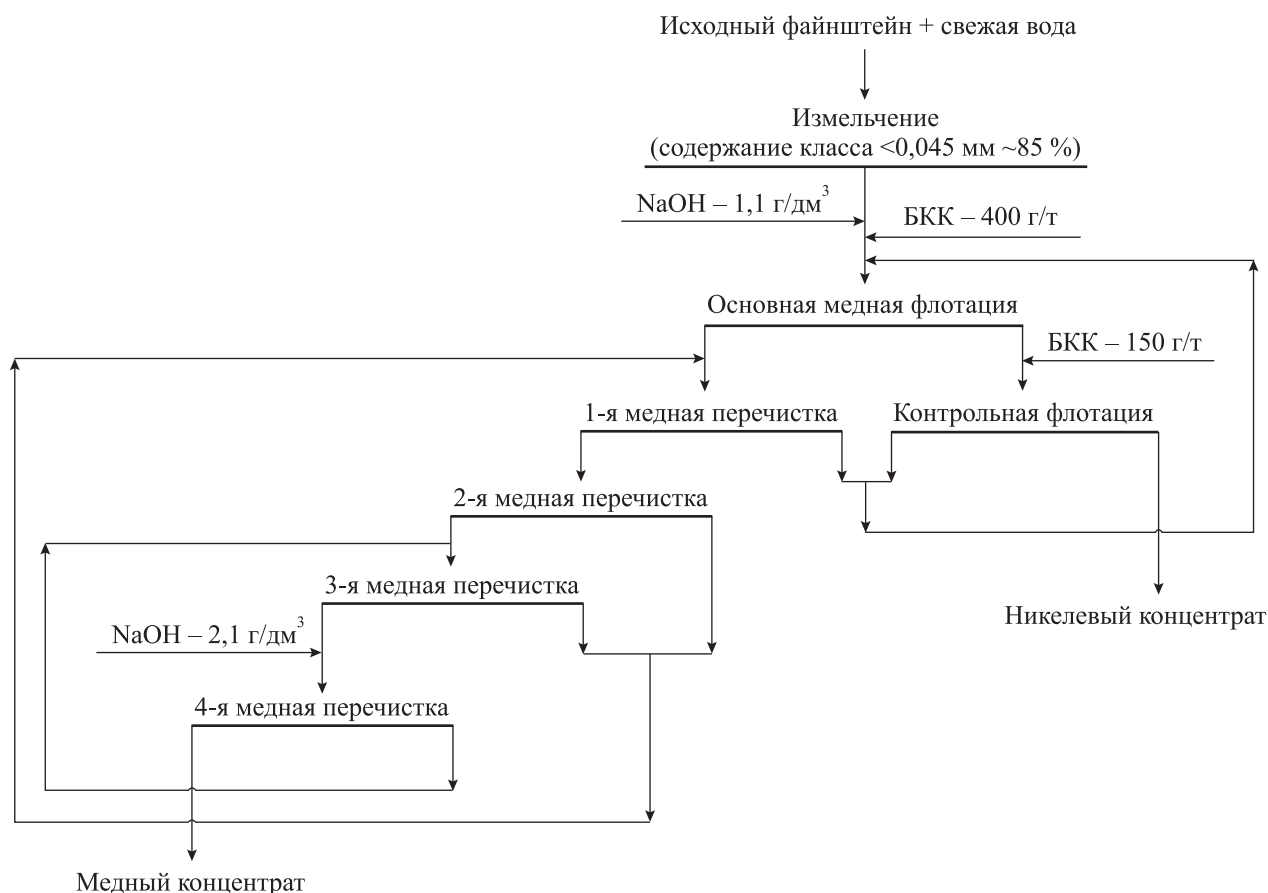


Рис. 1. Схема лабораторных опытов замкнутого цикла флотационного разделения файнштейна НМЗ

Обсуждение полученных результатов

Первый этап. Проведены измерения температурного поля в теле слитка файнштейна при его охлаждении 85, 72, 60 и 50 ч в условиях действующего производства. В качестве примера на рис. 2 представлены результаты измерения температуры поверхностей слитка файнштейна НМЗ, охлажденного в течение 72 ч сразу после его извлечения из изложницы.

Результаты измерения температуры слитка показали (рис. 3), что градиент температур от центра к периферии превышает 400 °С, что должно отразиться на химическом и фазовом составах различных участков слитка. О неоднородности таких сплавов указывали ряд авторов в своих работах [10–14]. Периферийные области должны быть обогащены медной, более тугоплавкой составляющей, центральные области — более легкоплавкой никелевой. Указанные особенности целесообразно учитывать в процессе опробования слитков файнштейна: в составе проб должны

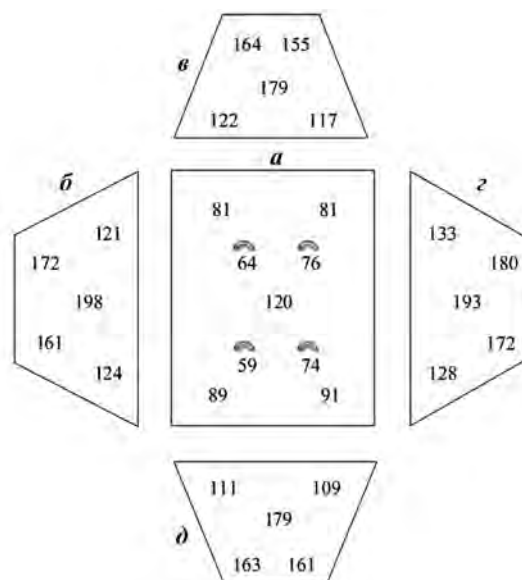


Рис. 2. Температуры (°С) различных участков поверхности слитка файнштейна НМЗ, охлажденного в течение 72 ч сразу после его извлечения из изложницы

а — верхняя поверхность слитка, б–д — боковые поверхности

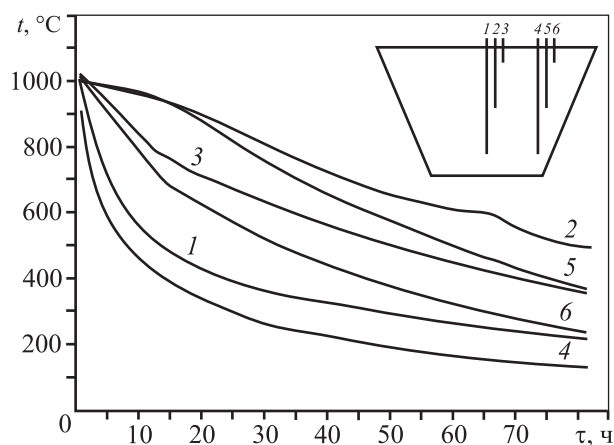


Рис. 3. Изменение температуры слитка фанштейна НМЗ при его охлаждении

Точки установки термопар в центре блока (1–3) и на его периферии (4–6) с указанием расстояния от дна (заглубления), мм: 1 – 320 мм от дна (заглубление 1030 мм); 2 – 740 (610); 3 – 1290 (60); 4 – 320 (1030); 5 – 740 (610); 6 – 1270 (80)

быть представлены все области образца с учетом коэффициентов вариации содержания компонентов по объему [16].

Как видно из приведенных данных, температура слитка, вследствие его массивности, достаточно сильно изменяется по объему материала. Наиболь-

шие вариации температуры поверхностей слитка могут сопровождаться значительными изменениями температуры в теле слитка. В связи с этим сокращение времени охлаждения фанштейна может приводить к существенным нарушениям режима охлаждения центральных зон слитка.

Второй этап. Как показал химический анализ, все полученные слитки фанштейна характеризовались близким химическим составом (в том числе 2,6–3,2 мас.% Fe; 22–23 мас.% S)

Проведенный оптико-минералогический анализ образцов выявил отличительные особенности структуры слитков. На рис. 4 представлены характерные изображения структуры исследованных образцов фанштейна, охлажденного в течение разного времени. Было установлено следующее:

— при снижении времени охлаждения фанштейна НМЗ от регламентированных 72 ч (рис. 4, б) до 60 ч (рис. 4, в) у хизлевудита формируются амебоподобные зерна с раздувами и пережимами; при $\tau = 50$ ч (рис. 4, г), выделяются многочисленные мелкодисперсные включения металла на основе меди;

— при увеличении времени охлаждения фанштейна до 85 ч (рис. 4, а) структурные особенности фанштейна значимо не изменились.

Показатели флотационного разделения фанштейнов НМЗ при различном времени охлаждения (τ)

Наименование продуктов	Выход, отн.%	Содержание, мас.%		Σ загряз., мас.%	Извлечение, отн.%		Индекс селективности, отн.%
		Ni	Cu		Ni	Cu	
τ = 85 ч							
Медный концентрат	46,1	5,0	68,5	8,0	5,9	95,1	189,1
Никелевый концентрат	53,8	67,7	3,0		94,0	4,9	
Исходный файнштейн	100,0	38,8	33,2		100,0	100,0	
τ = 72 ч							
Медный концентрат	45,8	5,2	68,3	7,9	6,0	95,5	189,4
Никелевый концентрат	54,2	68,7	2,7		93,9	4,4	
Исходный файнштейн	100,0	39,6	32,7		100,0	100,0	
τ = 60 ч							
Медный концентрат	39,6	5,9	67,6	8,4	5,3	94,8	189,4
Никелевый концентрат	60,3	69,4	2,4		94,6	5,1	
Исходный файнштейн	100,0	44,2	28,2		100,0	100,0	
τ = 50 ч							
Медный концентрат	35,7	6,1	67,1	8,8	4,7	93,1	188,3
Никелевый концентрат	64,2	68,8	2,7		95,2	6,8	
Исходный файнштейн	100,0	46,3	25,7		100,0	100,0	

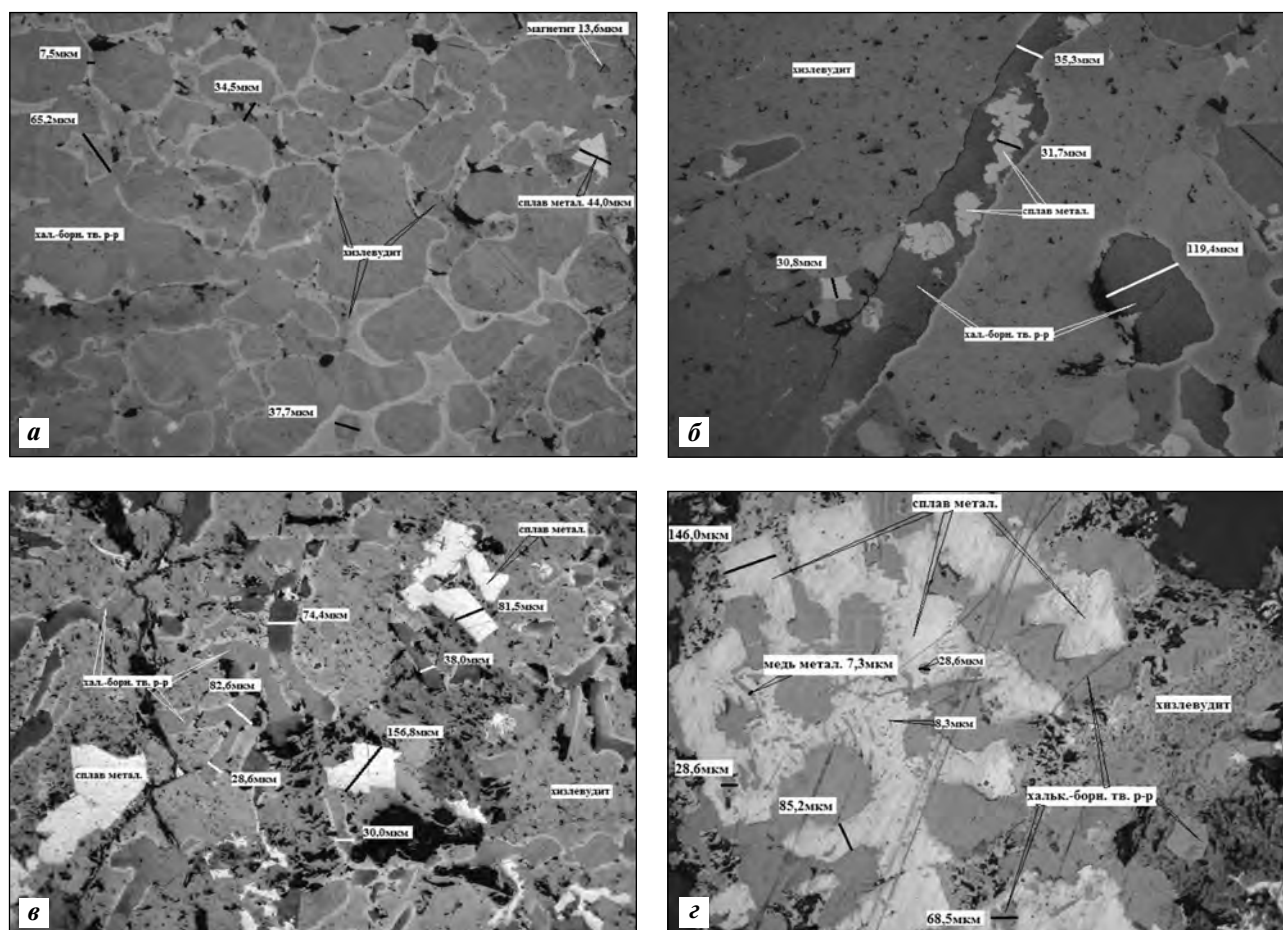


Рис. 4. Характерная структура файнштейна НМЗ, охлажденного в течение разного времени (увеличение 50–100×)
 τ, ч: **а** – 85, **б** – 72, **в** – 60, **г** – 50

Слева направо показаны зерна минералов и их размеры:

а – хизлеудит (7,5, 65,2 и 34,5 мкм), халькозин-борнитовый твердый раствор (37,7 мкм), вкрапление магнетита (13,6 мкм), включение металлического сплава (44,0 мкм);

б – включение металлического сплава (30,8 мкм), зерно металлического сплава шириной 31,7 мкм, поле халькозин-борнитового твердого раствора (119,4 мкм), включающее «амебоподобные» зерна хизлеудита;

в – халькозин-борнитовый твердый раствор (82,6, 74,4, 28,6, 30,0 и 38,0 мкм), зерна металлического сплава (156,8 и 81,5 мкм);

г – металлический сплав (85,2 мкм) в поле халькозин-борнита (146,0 мкм), включения халькозин-борнита (28,6, 8,3, 28,6 и 68,5 мкм) в металлический сплав, включение меди металлической (7,3 мкм) в зерно металлического сплава

Расчетные итоговые показатели лабораторных флотационных опытов в замкнутом цикле представлены в таблице. Анализ полученных данных показал, что при сокращении периода охлаждения файнштейна ниже 72 ч при неизменной схеме измельчения увеличивается сумма вторых металлов в готовых концентратах, а также снижается индекс селективности, что объясняется невозможностью качественной подготовки сырья к флотационному разделению файнштейна и раскрытию тесных сростков минералов. Известно, что обеспечение успешного флотационного разделения минералов, помимо прочих факто-

ров, достигается оптимальным высвобождением минеральных зерен при максимальном распределении их во флотоактивные классы крупности [17].

При флотационном разделении файнштейна снижение периода охлаждения до $\tau = 50$ ч привело к росту суммы вторых металлов от установленной нормы на ~1,0 мас.%. В ходе экспериментов было выявлено, что увеличение времени охлаждения до $\tau = 85$ ч не способствует улучшению показателей селективности, т.е. при одинаковых условиях розлива и температуры окружающей среды оно нецелесообразно.

Заключение

Таким образом, выполненные исследования позволили установить следующее:

1. Температура центральных зон слитка фанштейна может превышать температуру поверхности более чем на 400 °С, что определяет неоднородность химического и фазового составов охлажденных слитков фанштейна НМЗ.

2. Ухудшение качества разделения фанштейна на медный и никелевый концентраты при сокращении времени охлаждения обусловлено преимущественно ростом содержания никеля в медном концентрате вследствие снижения крупности образующихся при кристаллизации фаз и увеличения взаимного прорастания медной и никелевой составляющих.

3. Необходимо выдерживать оптимальное время охлаждения медно-никелевого фанштейна, составляющее 72 ч. При этом последующее флотационное его разделение позволяет получить сумму вторых металлов в готовых медном и никелевом концентратах на уровне 8 мас. %.

4. В случае производственной необходимости снижения времени охлаждения слитков фанштейна требуется, для обеспечения качественных показателей флотации и раскрытия сростков структурных составляющих, изменять схему подготовки сырья для флотационного разделения фанштейна и внедрять многостадийную схему измельчения или технологию дезинтеграторного раскрытия структурных составляющих с освобождением их из сростков, что требует проведения дополнительных исследований.

Литература/References

1. Kullerud G., Moh G. High-temperature phase relations in the Cu—Ni—S system. *Carnegie Inst. Wash. Year Book*. 1967. Vol. 66. P. 409—413.
2. Bethke P.M., Barton P.B. Distribution of some minor elements between coexisting sulfide minerals. *Econ. Geol.* 1971. Vol. 66. P. 140—163.
3. Barton P.B. Solid solutions in the system Cu—Fe—S. Part 1. The Cu—S and CuFe—S joins. *Econ. Geol.* 1973. Vol. 68. No. 4. P. 455—465.
4. Schlitt W.J., Craig R.H., Richards K.J. The miscibility gap and distribution of nickel in the molten system Cu—Ni—S. *Met. Trans. B*. 1973. Vol. 4B. P. 1994—1996.
5. Lee S.L., Larrian M.J., Kellogg H.H. Thermodynamic properties of molten sulfides. III. The system Cu—Ni—S. *Met. Trans. B*. 1980. Vol. 11B. P. 251—255.
6. Chuang Y.Y., Chang Y.A. Extension of the associated solution model to ternary metal-sulfur melts: Cu—Ni—S. *Met. Trans. B*. 1980. Vol. 11B. P. 251—255.
7. Рябко А.Г., Гродинский Г.И., Серебряков В.Ф. Исследование системы Cu—Cu₂S—NiS—Ni. *Изв. вузов. Цвет. металлургия*. 1980. No. 4. С. 23—26.
Ryabko A.G., Grodinskii G.I., Serebryakov V.F. A study of the system Cu—Cu₂S—NiS—Ni. *Izvestiya vuzov. Tsvetnaya metallurgiya*. 1980. No. 4. P. 23—26 (In Russ.).
8. Potter R.W. The low temperature phase relations in the system Cu—S derived from an electrochemical investigation. *Geol. Soc. Am. Abstr. Prog.* 1974. No. 6. P. 915—916.
9. Sineva S.I., Sarykh R.V., Zakhryapin S.B. Study of the liquidus and solidus surfaces in the quaternary Fe—Ni—Cu—S system. III. Constructing a meltability diagram and determination of miscibility gap boundaries for the ternary Cu—Ni—S sulfide system. *Russ. Metallurgy*. 2010. No. 5. P. 448—455.
10. Травничек М.Н., Масляницкий И.Н. Изменение структуры медно-никелевых фанштейнов в зависимости от режима охлаждения. *Цвет. металлы*. 1970. No. 10. С. 31—34.
Travnichek M.N., Maslyanitskii I.N. Changes in the structure of copper-nickel Feinstein depending on the cooling mode. *Tsvetnye metally*. 1970. No. 10. P. 31—34 (In Russ.).
11. Власов О.А. Подготовка медно-никелевого фанштейна к разделению на концентраты. Фазовый состав промышленного медно-никелевого фанштейна. В кн.: *Процессы сульфидирования в металлургии*. Saarbrücken: LAP Lambert Acad. Publ., 2012. С. 136—138.
Vlasov O.A. Preparation of copper-nickel Feinstein for separation into concentrates. The phase composition of the industrial copper-nickel Feinstein. In: *Sulfidation processes in metallurgy*. Saarbrücken: LAP Lambert Acad. Publ., 2012. P. 136—138 (In Russ.).
12. Рябко А.Г., Гродинский Г.И., Серебряков В.Ф. Оптимизация процесса охлаждения медно-никелевых фанштейнов. В сб. науч. тр.: *Новые направления в пирометаллургии никеля*. Ленинград: Гипроникель, 1980. С. 22—25.
Ryabko A.G., Grodinskii G.I., Serebryakov V.F. Optimization of the cooling process, the copper-nickel Feinstein. In: *New directions in Nickel pyrometallurgy*. Leningrad: Gipronikel', 1980. P. 22—25 (In Russ.).
13. Ерцева Л.Н., Серегин П.С., Фокеева И.Г., Короткова О.В. Изучение распределения микропримесей в фанштейне.

- штейнах комбината «Печенганикель». *Цвет. металлы*. 2002. No. 10. С. 22—25.
- Ertseva L.N., Seregin P.S., Fokeeva I.G., Korotkova O.V.* The study of the distribution of micro-impurities in the Feinstein plant «Pechenganickel». *Tsvetnye metally*. 2002. No. 10. P. 22—25 (In Russ.).
14. *Фокеева И.Г., Цымбулов Л.Б., Ерцева Л.Н.* Исследование закономерностей кристаллизации файнштейнов с повышенным содержанием меди. *Цвет. металлы*. 2005. No. 7. С. 42—46.
- Fokeeva I.G., Tsybulov L.B., Ertseva L.N.* Investigation of regularities of crystallization of Feinstein with high copper content. *Tsvetnye metally*. 2005. No. 7. P. 42—46 (In Russ.).
15. *Selivanov E.N., Gulyaeva R.I., Udoeva L.Yu., Verchinin A.D.* The effect of the microstructure on oxidation of sulfidmetal alloys of cooper and nickel. *Defect Diffus. Forum*. 2011. Vol. 312. P. 306—311.
16. *Лисиенко В.Г., Щелоков Я.М., Ладыгичев М.Г.* Флотационное разделение медно-никелевых файнштейнов. В сб.: *Оборудование промышленных предприятий: Справ. изд. в 6 т. Т. 1. Развитие цветной металлургии. Тяжелые цветные металлы*. М.: Теплотехник, 2008. С. 143—146.
- Lisienko V.G., Shchelokov Ya.M., Ladygichev M.G.* Flotation separation of copper-nickel Feinstein. In: *Equipment of industrial enterprises. Vol. 1. Development of non-ferrous metallurgy. Heavy non-ferrous metals*. Moscow: Teplotekhnika, 2008. P. 143—146 (In Russ.).
17. *Иванов В.А., Цымбулов Л.Б., Мироевский Г.П.* Совершенствование методик опробования файнштейна АО «Норильская горная компания» в расплавленном и твердом состоянии. М.: ВИНТИ, 2000. No. 5. С. 64—25.
- Ivanov V.A., Tsybulov L.V., Miroevskii G.P.* Improvement of Feinstein testing technique of JSC «Norilsk Mining Company» in molten and solid state. Moscow: VINITI, 2000. No. 5. P. 64—25 (In Russ.).
18. *Юсупов Т.С., Кириллова Е.А., Шумская Л.Г.* Структурно-химические особенности минеральных сростков в связи с процессом их дезинтеграторного раскрытия. В сб.: *Ресурсосбережение и охрана окружающей среды при обогащении и переработке минерального сырья*. Новосибирск: Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, 2016. С. 38—40.
- Yusupov T.S., Kirillova E.A., Shumskaya L.G.* Structural and chemical features of mineral accretions in connection with the process of their disintegrator disclosure. In: *Resource-saving and environmental protection for the enrichment and processing of mineral raw materials*. Novosibirsk: Institut geologii i mineralogii SO RAN, 2016. P. 38—40 (In Russ.).
19. *Бочаров В.А., Игнаткина В.А., Юшина Т.И.* Флотационное обогащение полезных ископаемых. М.: Горн. книга, 2017.
- Bocharov V.A., Ignatkina V.A., Yushina T.I.* Flotation enrichment of minerals. Moscow: Gornaya kniga, 2017 (In Russ.).
20. *Mark E. Schlesinger, Matthew J. King, Kathryn C. Sole, William G.I. Davenport.* Extractive metallurgy of copper. Amsterdam: Elsevier, 2011. P. 441—445.
21. *Власов О.А.* Производственные испытания файнштейна, обработанного серой с целью повышения его качества. В сб.: *Процессы сульфидирования в металлургии*. Saarbrücken: LAP Lambert Acad. Publ., 2012. С. 170—183.
- Vlasov O.A.* Production tests of Feinstein treated with sulfur to improve its quality. In: *Sulfidation processes in metallurgy*. Saarbrücken: LAP Lambert Acad. Publ., 2012. P. 170—183 (In Russ.).
22. *Карамзин В.В., Младецкий И.К., Пилов П.И.* Показатель обогатимости руд. Расчеты технологических показателей обогащения полезных ископаемых: Учеб. пос. 2-е изд. М.: Горн. книга, 2018. С. 53—57, 119—124.
- Karamzin V.V., Mladetskii I.K., Pilov P.I.* Indicator of ore beneficiation. Calculations of technological indicators of mineral enrichment. Moscow: Gornaya kniga, 2018. P. 53—57, 119—124 (In Russ.).
23. *Peng Y., Grano S., Fornasiero D., Ralston J.* Control of grinding conditions in the flotation of chalcopyrite and its separation from pyrite. *Int. J. Miner. Process.* 2003. Vol. 69. No. 1/4. P. 87—100.