

6. Аленичев В. М., Уманский А. Б., Ключников А. М. Разработка технологии кучного выщелачивания окисленных никелевых руд уральских месторождений // Изв. Томск. политех. ун-та, 2013. — Т. 322, № 3. — С. 124–128.
7. О перспективах кучного выщелачивания никеля / Г.И. Авдонин, Е.Ю. Михеев, В.А. Гуров и др. // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2011. — № 8. — С. 165–173.
8. De Graaf J.E. The treatment of lateritic nickel ores — a further study of the Caron process and other possible improvements. Part I. Effect of reduction conditions // Hydro-metallurgy. — 1979. — Vol. 5 (10). — P. 47–65.
9. Ciftci H., Atik S. Microbial leaching of metals from a lateritic nickel ore by pure and mixed cultures of mesophilic acidophiles // Metall. Res. Technol. — 2017. — Vol. 114. — Article № 508. — DOI: 10.1051/metal/2017049.
10. Патент EP 1 228 259 B1 Resin-in-pulp method for recovery of nickel and cobalt from oxidic ore leach slurry : 13.10.2000 / Duyvesteyn Willem P., Weenink Erik M.
11. Nicol M.J., Zainol Z. The development of a resin-in-pulp process for the recovery of nickel and cobalt from laterite leach slurries // International Journal of Mineral Processing. — 2003. — Vol. 72 (1–4). — P. 407–415. — doi: 10.1016/s0301-7516(03)00115-7.
12. Technology of hydrometallurgical processing of the nickel — magnesium ores from the Aganozero deposit / K. M. Smirnov, T. V. Molchanova, A. V. Anan'ev et al. // Russian Metallurgy (Metally). — 2018. — № 7. — P. 614–618.
13. Файзуллоев Н. С., Икромов Д. И., Маковская О. Ю. Изучение возможности сорбционного выщелачивания окисленных никелевых руд // Материалы XXVIII Международной научно-технической конференции 06–07 апреля 2023 г. — Екатеринбург : Изд-во ООО «Типография», 2023. — С. 301–305.

УДК 546

Контроль состояния пылегазовой смеси при обжиге медно-никелевого сырья

В. Ю. Бажин, А. З. Музипов

Санкт-Петербургский горный университет, г. Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. При изучении процессов добычи и переработки медно-никелевого сырья определены механизмы образования мелкодисперсных частиц, в том числе наноразмерного уровня. Выявлены причины и технологические переделы, являющиеся основными источниками образования сверхмалых частиц пыли. Определены особенности процесса пирометаллургического производства меди

из высокосернистых бедных руд, при переработке которых в печах кипящего слоя возникают проблемы с высокой концентрации пылегазовых смесей. Определены пути и способы снижения пылеуноса при обработке и нагреве рудных материалов, в том числе в условиях печи кипящего слоя. Выпущена программа ЭВМ расчета состояния атмосферы и температурного режима печи кипящего слоя с соответствующим свидетельством регистрации.

Ключевые слова: медно-никелевые руды, пылегазовая смесь, флотация, пыль, обогащение, наноразмерные включения, металлургическая печь.

В последние годы все больше внимания уделяется ресурсо- и энергосбережению. Большинство последних технологических инноваций в значительной степени были обусловлены необходимостью значительного улучшения экологии защиты окружающей среды. Подавляющее большинство пирометаллургических процессов сопровождаются большими объемами пылегазовых выбросов, утилизация которых происходит неэффективно. Причины пылеобразования могут быть различны, от нарушения температурного режима плавки до недостатка контроля на этапах подготовки сырья, и зависят от конкретного металлургического производства.

Рассмотрим с этой стороны процесс обжига медно-никелевого концентрата в печи кипящего слоя (КС). Источником сырья здесь являются бедные полиметаллические сульфидные руды, проходящие перед обжигом несколько переделов подготовки, таких как дробление, измельчение, классификация и флотация. Любое пирометаллургическое восстановление металлов из сульфидов подразумевает удаление железа и серы путем окисления кислородом. Для печи обжига в печи кипящего слоя обогащенные частицы руды размером до 74 мкм под действие подаваемого в печь воздуха находятся во взвешенном состоянии и постоянном перемешивании, так называемом кипении. К преимуществам данного типа обжига относится довольно высокая эффективная площадь обжига шихты [1–3].

Наряду с очевидными преимуществами обжига во взвешенном состоянии у этого процесса имеются и серьезные недостатки. К ним следует отнести в первую очередь усиленный унос пыли из печей, достигающий 50 % и более, и невозможность использования обжиговых печей для изготовления шихтовых смесей из материалов различной крупности и различного удельного веса.

К наиболее значимым источникам пылевых выбросов технологической цепочки переработки сульфидных медно-никелевых руд относятся:

- открытые работы по транспортировке, дроблению и измельчению материалов;
- собственно процессы обжига.

Обзор основных переделов рудоподготовки

Руды, концентраты и вторичное сырье зачастую поступают на производство в такой форме, в которой они не могут быть использованы непосредственно в основном процессе. Необходима предварительная подготовка сырьевых материалов для ускорения кинетических процессов в печи кипящего слоя посредством дробления, измельчения и грохочения.

Основным источником пыли, попадающей в КС, является сухое дробление. Исходная руда направляется на сухое дробление, которое осуществляется в две стадии. Перед каждой стадией дробления производится грохочение для выделения мелочи, благодаря чему реализуется принцип «не дробить ничего лишнего», исключается забивание дробилки. После второй стадии дробления мелкая дробленая руда подается на измельчение в шаровую мельницу, работающую в замкнутом цикле с классификатором, с целью выделения готовой фракции размером 0,1 мм.

Переработка бедных сульфидных руд с разными физико-химическими свойствами подразумевает применение различных схем обогащения, таких как:

1. Флотация без разделения коллективного концентрата.
2. Комплексная флотация минералов меди и никеля из исходной руды с последующим разделением коллективного концентрата на медный и никелевый.
3. Магнитная сепарация исходной руды с последующей флотацией [4].

На стадии обогащения возможно попадание тонкодисперсных твердых частиц в печь, поскольку частицы исходного флотационного концентрата имеют сложную сферическую форму с большим сочетанием выступов на поверхности конгломератов, подвергающуюся истиранию.

Собственно обжиг медно-никелевого концентрата в печи КС проводится с целью усреднения и разогрева шихты, удаления серы и окисления железа для перевода его в шлак при последующей плавке. Особенность обжига в КС состоит в псевдоожигании материала в печи за счет продувки воздухом (газом) таким образом, что каждая частица окружена потоком воздуха и непрерывно движется, обеспечивая перемешивание материала. Режим движения воздуха в печи практически сразу становится турбулентным, что благоприятно влияет на скорость перемешивания, однако способствует интенсивному пылевыносу.

Типовая система газоочистки медно-никелевого производства включает котел-утилизатор, сеть центробежных циклонов и рукавных фильтров. Размер частиц, выбрасываемых в процессе обжига, не превышает 0,2 мм. При этом содержание сульфидов в пыли непосредственно зависит от времени пребывания в печи.

Характеристика пылевых выбросов, полученных в результате обжига медно-никелевого концентрата

Исследования концентрации пылевых частиц в рабочей атмосфере медно-никелевого производства выявили значительные выбросы пыли на всех переделах. В шихтовом отделении наибольшая концентрация пыли была обнаружена у виброгрохота. В печном отделении пыль выделяется в основном с отходящими газами. Средний фракционный состав пыли представлен в табл. 1 [5].

Таблица 1

Фракционный состав пыли обжига медно-никелевого концентрата в печах КС

Крупность твердых частиц, мкм	менее 1	1–5	5–10	более 10
Содержание, %	73,3	18,9	3,4	3,4

В табл. 2 представлен вещественный состав пыли, улавливаемой электрофильтрами Кольской ГМК.

Таблица 2

Вещественный состав тонкодисперсной пыли обжига медно-никелевого концентрата в печах КС Кольской ГМК

Элемент	Ni	Cu	Pb	Co	Fe	Se	Ag	Te	Si
Содержание, %	17,2	19,58	0,91	1,39	1,63	2,73	0,14	0,11	0,72

Твердые частицы, выбрасываемые в процессе обжига концентрата, имеют мелкодисперсную структуру и стабильный вещественный состав и являются некондиционным продуктом для последующих технологических переделов.

В процессе обжига на выход циклонной пыли напрямую влияют показатели плавки:

- повышение температуры обжига на 100 °С (с 730 до 830 °С) способствует ускорению течения агломерационных процессов и поглощения им пылевидных частиц, что приводит к снижению выход пылевой фракции;
- повышение содержания кислорода в дутье, как и температуры кипящего слоя, способствует снижению крупности частиц пыли и выхода пылевой фракции;
- повышение интенсивности дутья, способствует увеличению выхода пыли за счет развитой турбулентности потоков.

Таким образом, для снижения пылевыноса и поддержания устойчивого технологического процесса необходимо обеспечить:

1. Постоянное соотношение физических свойства частиц концентрата (размер и плотность) со скоростями газовых потоков в печи.
2. Непрерывную подачу однородных по химическому и гранулометрическому составам материалов в печь.

3. Расчет и поддержание эффективного с точки зрения энергетических и сырьевых затрат теплового режима обжига.

Способы решения проблем пылеобразования и пылевыноса

Существует несколько путей борьбы с выбросами тонкодисперсных частиц в печи КС. Традиционные способы подразумевают снижение пылеобразования за счет предотвращения попадания наночастиц в концентрат на переделах шихтоподготовки. Для этого применяют приготовление влажных шихт, покрывающих и связывающих агентов. К традиционным методам относится также разработка способов отсева частиц диаметром менее 0,7 мкм.

Поскольку на пылеобразование влияют не только механические, но и кинетические причины, суть которых заключается в технологическом режиме плавки, данный подход является малоэффективным.

Современный подход подразумевает борьбу с выносом твердых частиц непосредственно в печи КС. Актуальным является проведение комплексной модернизации процесса обжига в КС и использование комплексного моделирования процесса движения пылегазовой смеси [6].

Выводы

В связи возрастающим в последние годы вниманием к решению экологических проблем, имеющих место в металлургическом производстве, решение вопросов, связанных с образованием и утилизацией вредных газов и пыли, является актуальной задачей цветной металлургии. Актуальной проблемой для предприятий, перерабатывающих сульфидные медно-никелевые руды, является пылеобразование на переделах рудоподготовки и в пирометаллургических процессах.

Итогом работы является выпущенная программа, которая обеспечивает выполнение следующих функций: сбор данных, моделирование образования и движения пылегазовой смеси и изменение температуры в печи кипящего слоя, генерирует предупреждающие сигналы о работе оборудования, а также создает задание для ПЛК для аварийной остановки работы. Программа может быть использована по направлению подготовки 15.03.04 «Автоматизация технологических процессов и производств в металлургической промышленности», по дисциплине «Пирометаллургическое оборудование».

Библиографический список

1. О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2019 году : доклад ; Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации. — М., 2021. — 494 с.

2. *Bocharov V. A.* Problema razdeleniya mineralnykh kompleksov pri pererabotke massivnykh upornykh rud tsvetnykh metallov (Problems of separation of mineral complexes in the time of processing of massive refractory ores of non ferrous metals) // *Tsvetnye Metally = Non ferrous metals.* — 2014. — No. 5. — P. 16–23.

3. Study of copper fixation mechanisms on Bayer Process Electrostatic precipitator Microparticles (BPEM) using 1H and 27Al NMR spectroscopy / J. Sancho-Gorostiaga et al. // *Journal of Water Process Engineering.* — 2021. — Vol. 39. — P. 101872.

4. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям добыча и обогащение руд цветных металлов ИТС-23–2017. — М. : Бюро НДТ, 2017. — 336 с.

5. *Абрамов А. А.* Флотационные методы обогащения : учебник для вузов : в 4-х т. Т. IV. — 3-е изд., перераб. и доп. — М. : Изд-во МГУ, «Горная книга», «Мир горной книги», 2008. — 710 с.

6. Свидетельство программы ЭВМ № 2023665210. Программа расчета состояния атмосферы и температурного режима печи кипящего слоя. Авторы: Музипов А. З., Бажин В. Ю. Оpubл. 12.07.2023, Бюл. № 7.

УДК 669.054.1, 669.782

Математическое моделирование окислительного рафинирования металлургического кремния

Н. В. Немчинова, А. А. Зайцева, И. И. Дранишников

*Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия*

Аннотация. Из-за постоянно растущих требований к металлургическому кремнию перед производителями остро стоит вопрос о повышении его качества. В промышленных условиях применяют окислительный способ рафинирования кремния продувкой расплава воздухом в рафинировочном котле. Целью данной работы является составление математической модели окислительного рафинирования для выявления механизма формирования примесных включений в кремнии, выплавляемом в руднотермических печах. Для этого был выбран программный комплекс «Селектор», позволяющий производить расчеты при различных температуре, давлениях, химическом составе вводимых компонентов. Была составлена схема окислительного рафинирования металлургического кремния с указанием температурных зон (резервуаров), соответствующих температурным зонам реального процесса, и взаимодействия потоков веществ между резервуара-