

ISACONVERT™ – Непрерывное конвертирование никелевого / МПГ штейна с использованием шлака на основе феррита кальция

М.Л. Беккер, С. Николич, Дж.Р.Ф. Альвеар

Процесс ISASMELT™ представляет собой технологию плавки в жидкой ванне с продувкой методом погружения сверху (TSL), которая развивается и оптимизируется на протяжении последних 25 лет. К концу 2011 года общая установленная мощность технологии ISASMELT превысит 9 млн. тонн в год питания, перерабатываемого на меде- и свинцовоплавильных заводах по всему миру. На промышленных установках в Бельгии и Германии также применяется периодическое конвертирование меди в печах ISASMELT. Данная технология TSL является в равной степени эффективной при непрерывном конвертировании и поэтому получила название ISACONVERT™. Компания Xstrata Technology (XT) недавно запатентовала новый процесс ISACONVERT для непрерывного конвертирования никелевого/МПГ (металлы платиновой группы) штейна с использованием шлаковой системы на основе феррита кальция. В данной статье описывается разработка этого нового процесса и представлена концептуальная технологическая схема внедрения процесса на действующем металлургическом производстве меди/МПГ.

ВВЕДЕНИЕ

Технология продувки методом погружения сверху (TSL) ISASMELT™ хорошо известна как одна из стандартных технологий плавки первичной меди.¹ С момента начала промышленного производства на первой установке на комбинате Маунт Айза в 1991 году построено более 20 установок ISASMELT. Процесс был быстро принят в плавке первичной меди и первичного и вторичного свинца, и к концу 2011 года общая установленная мощность технологии ISASMELT превысила 9 млн. тонн в год. История развития технологии подробно описана в литературе.²⁻⁴ Технология TSL в равной степени эффективна при плавке сульфидных

концентратов никеля.^{5,6} Первая печь ISASMELT для плавки меди и никеля была построена в 1991 году по заказу Agip Australia.⁵

Процесс ISASMELT также хорошо подходит как для периодического, так и непрерывного конвертирования медного штейна в черновую медь^{7,8} и низкосортного никелевого штейна в файнштейн⁹ – процесс ISACONVERT™. В Европе периодическое конвертирование в печи ISASMELT применяется на двух заводах, а именно на заводе Umicore Precious Metals, Хобокен, Бельгия,¹⁰ и на заводе Aurubis AG, Лунен, Германия,¹¹ с 1997 и 2002 годов, соответственно.

ПРОЦЕСС КОНВЕРТИРОВАНИЯ НИКЕЛЯ / МПГ ISACONVERT

Технология ISACONVERT имеет много общего с печью ISASMELT.⁸ Она может быть без каких-либо сложностей реализована в закрытом исполнении с целью свести к минимуму выбросы в окружающую среду. Процесс использует технологию продувки TSL, обеспечивающую высокоэффективное смешивание и взаимодействие твердого штейна и флюса, которые могут подаваться через свод печи. Использование совершенных систем управления технологическим процессом позволяет в значительной степени автоматизировать работу печи. Поскольку печь является вертикальной, установка занимает очень малую площадь и может быть с легкостью включена в технологическую схему существующего металлургического завода, дополнив или заменив применяющуюся технологию. Значительно меньший объем отходящих газов процесса ISACONVERT, по сравнению с конвертером Пирса-Смита, позволяет сократить капитальные и эксплуатационные затраты на системы сбора и очистки отходящих газов.⁸

Последние прикладные исследования в совокупности с новаторскими испытаниями пилотной установки сделали возможным внедрение процесса ISACONVERT в промышленных масштабах для непрерывного конвертирования меди.⁸ Установка ISACONVERT в разрезе показана на рисунке 1. Эта технология была доработана компанией Xstrata Technology (XT) для решения задач

непрерывного конвертирования низкосортных никелевых/МПГ штейнов в высокосортные файнштейны. Результатом работ стал запатентованный процесс конвертирования никеля ISACONVERT. Как и в процессе конвертирования меди ISACONVERT, в процессе конвертирования никеля/МПГ используется шлаковая система на основе феррита кальция.

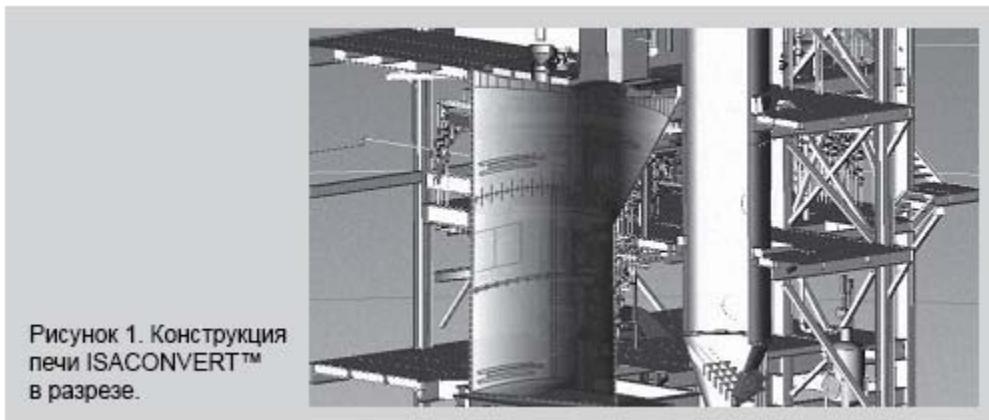


Рисунок 1. Конструкция печи ISACONVERT™ в разрезе.

ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ПРОЦЕССА КОНВЕРТИРОВАНИЯ НИКЕЛЯ / МПГ ISACONVERT

Питанием металлургического завода, перерабатывающего сульфид никеля, как правило, является никель-медный концентрат, который также может содержать небольшое количество кобальта и металлов платиновой группы.¹² Технологические схемы никелевой печи ISASMELT проработаны и представлены в имеющихся публикациях.⁹ Как правило, питание металлургического завода по производству МПГ имеет более низкое содержание никель-медных сульфидов и более высокое содержание огнеупорных оксидных материалов по сравнению с питанием традиционных металлургических заводов по производству никеля.¹² Продуктом плавки никель-медного концентрата или питания цикла МПГ, как правило, является штейн с высоким содержанием железа, который подвергают дальнейшей обработке, почти исключительно в нескольких конвертерах Пирса-Смита, чтобы получить конечный штейн с низким содержанием железа, так

называемый файнштейн. Исключение составляют металлургический завод Ватервал компании в ЮАР, на котором применяется процесс конвертирования Anglo Platinum (ACP),¹³ и металлургический завод компании Stillwater Mining Company (SMC) в штате Монтана, США, на котором установлены вращающиеся конвертеры верхней продувки (TBRC).¹⁴ В процессах ACP и SMC гранулированный штейн с высоким содержанием железа конвертируются в файнштейн, однако питание поступает непрерывно только в процесс ACP.

Непрерывное конвертирование никеля/МПГ не является новой технологией и исследовано с точки зрения повышения производительности и снижения уровня выбросов по сравнению с традиционными периодическими конвертерами Пирса-Смита. Как отмечено выше, основные принципы процесса уже реализованы в промышленном масштабе в установке ACP. Кроме того, компания Vale Inco предприняла масштабную программу исследований и разработок, занявшую 10 лет, с целью промышленного внедрения процесса непрерывного конвертирования никеля.¹⁵

Компания XT провела исследования конвертирования никеля/МПГ с использованием технологии ISACONVERT^{5,9,16} и успешно получила на пилотной установке файнштейн, содержащий менее 4% масс. железа. Следует отметить, что процесс ISACONVERT для никеля/МПГ является процессом непрерывного конвертирования с непрерывной подачей в ванну штейна и воздуха/кислорода. Ванна состоит из штейна и шлака в соответствии с заданным составом продукта. Процесс эффективно работает в условиях, аналогичных тем, которые наблюдаются в конечной точке процесса конвертирования, в настоящее время применяющегося при периодическом конвертировании никеля/МПГ.

На рисунке 2 показано, как процесс ISACONVERT может быть интегрирован в технологическую схему действующего металлургического завода первичного продукта (EPSF). Гранулированный штейн EPSF, известняковый флюс, закупленное питание, вынос печи, топливо, воздух и кислород непрерывно подаются в никелевую/МПГ печь ISACONVERT. Продукт, жидкий файнштейн,

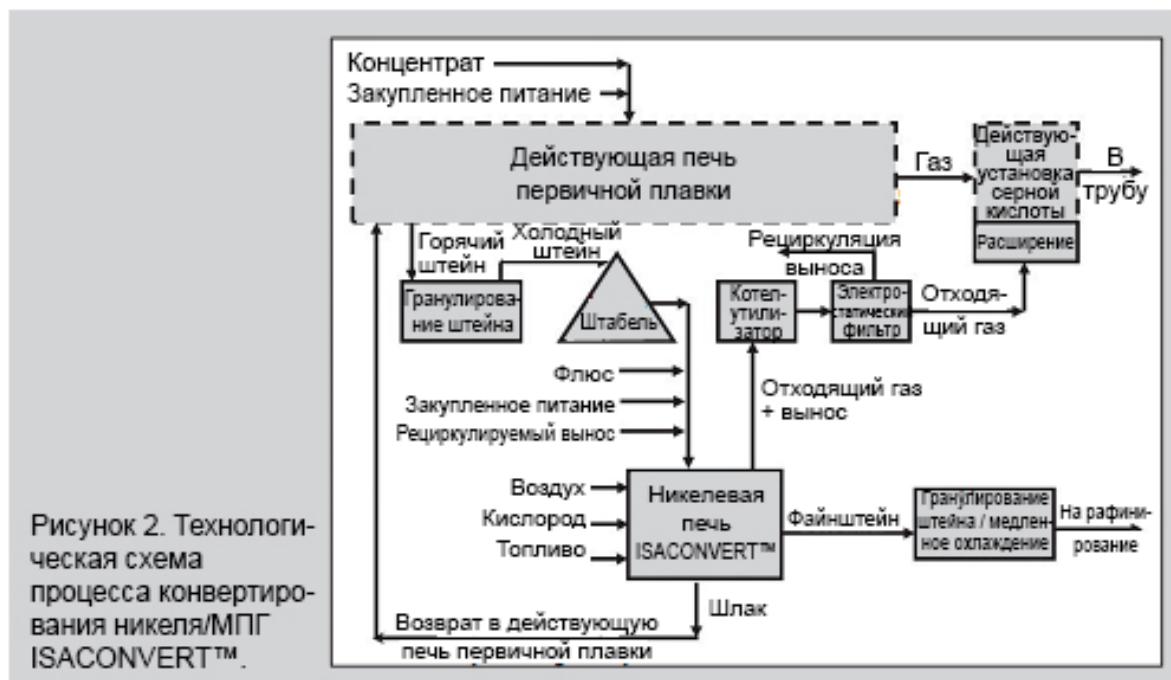
периодически выгружают через летку и, в зависимости от требований последующего рафинировочного или аффинажного завода, либо гранулируют для гидрометаллургической переработки¹⁷, либо медленно охлаждают для отделения никель-сульфидных, медных сульфидных и легированных фаз путем флотации перед рафинированием или аффинажем.¹⁸

Шлак выгружают через отдельную летку и возвращают в EPSF для извлечения ценных металлов. Отходящие газы печи ISACONVERT направляют в котел-утилизатор для утилизации тепла и обеспыливания с использованием электростатического осадителя, а затем на установку серной кислоты для извлечения серы. Вся пыль, собранная системами обработки газов, возвращается в печь ISACONVERT.

Если никелевый/МПГ конвертер ISACONVERT устанавливается вместо существующих конвертеров Пирса-Смита, может потребоваться переоборудование установки серной кислоты EPSF. Это позволит утилизировать поток высококонцентрированного диоксида серы (SO₂), производимый печью ISACONVERT. Технологическую схему ISACONVERT легко модифицировать таким образом, чтобы очистка шлака происходила отдельно от EPSF; в этот и другие варианты могут быть внесены изменения, позволяющие оптимизировать извлечение и свести к минимуму единичные операции и перемещение расплава.

Процесс конвертирования никеля/МПГ ISACONVERT, представленный на рисунке 2, обладает двумя основными преимуществами по сравнению с традиционным периодическим конвертированием в конвертере Пирса-Смита: Во-первых, процесс ISACONVERT отличается низким и постоянным объемным расходом отходящих газов с высоким содержанием SO₂, которые могут перерабатываться в обычной установке серной кислоты. Это важное преимущество, учитывая строгие экологические нормы, регулирующие современные и будущие промышленные выбросы и промышленную гигиену. Хотя одним из возможных вариантов сбора отходящих газов конвертера Пирса-Смита является установка камина, при этом также требуется второй камин для сбора выбросов, миновавших первый камин,

что, как правило, влечет значительные дополнительные расходы. В процессе ISACONVERT конвертирование происходит в один этап и в одной печи, что позволяет использовать максимальное обогащение кислородом с минимальным разбавлением воздухом. Во-вторых, процесс ISACONVERT позволяет использовать в качестве питания твердый штейн, тем самым устранив необходимость в подаче расплавленного штейна в ковш, а также уменьшая риск неконтролируемых выбросов, что улучшает состояние промышленной гигиены на заводе. Использование твердого питания также позволяет развязать стадии плавки и конвертирования, что повышает гибкость процесса и упрощает обслуживание и эксплуатацию завода.



ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ШЛАКА ПРИ НЕПРЕРЫВНОМ КОНВЕРТИРОВАНИИ

Как в периодическом конвертере Пирса-Смита, так и в непрерывном процессе конвертирования никеля/МПГ АСР используется шлаковая система на основе силиката железа (фаялит). В конвертерных печах Пирса-Смита из расплавленного штейна плавильной печи, как правило, получают конечный штейн, содержащий 2-3% масс. железа. Быстрое осаждение магнетита (преимущественно никель-

феррита) в шлаке обуславливает содержание железа в конечном штейне конвертера Пирса-Смита не ниже примерно 2% масс. Некоторые операторы (Vale-Inco¹⁹ и Lonmin²⁰) позволяют оставшемуся шлаку отвердеть внутри конвертера Пирса-Смита, прежде чем продолжить цикл продувки, чтобы снизить содержание железа в штейне. Практика отверждения в цикле окончательной продувки приводит к образованию шлака, насыщенного диоксидом кремния и магнетитом и заключающего в себе файнштейн, который может быть извлечен только в новом цикле конвертирования,²⁰ что обуславливает неэффективность процесса. Если процесс продолжается при содержании железа в штейне ниже 2% масс. без затвердевания шлака, происходит либо чрезмерный унос магнетита/шлака в конечный штейн, либо чрезмерное наростообразование внутри печи.^{15, 20}

Первоначальная технологическая схема АСР предполагала двухстадийный периодический процесс получения файнштейна: на первой стадии содержание железа в штейне снижалось до ~13% масс., а на второй стадии до ~3% масс.¹³ Из-за трудностей, связанных с определением момента начала второй стадии конвертирования, происходили выбросы шлака из-за чрезмерного окисления ванны.¹³ Периодический характер процесса приводил к неудовлетворительному или неполному перемешиванию и неравновесной стратификации расплавов внутри печи. Последующее быстрое перемешивание слоев расплава из-за возмущений в ванне приводило к взрывному вспениванию содержания ванны при низком содержании железа в штейне.¹³ По этим причинам и для обеспечения постоянного потока SO₂ высокой концентрации, поступающего на установку по переработке отходящих газов, процесс АСР был переведен в непрерывный режим с непрерывной подачей в печь гранулированного штейна и конвертированием с конечным содержанием железа в штейне 3% масс.¹³

В программе исследований, предпринятой Vale Inco,¹⁵ рассматривалось три подхода к непрерывному конвертированию: собственная технология взвешенной плавки,²¹ технология конвертирования в ванне с верхней продувкой кислородом и донным перемешиванием азотом и технология конвертирования в ванне типа Noranda/El Teniente.²² Необходимо отметить, что основная цель программы

заключалась в разработке технологии непрерывного конвертирования, применимой на никелевом заводе Коппер Клифф, где требования рафинировочного завода обуславливают содержание железа в штейне не выше 0,5% масс. Хотя это технически осуществимо, испытания показали, что окисленный железо-силикатный шлак, получаемый при столь низком содержании железа, нестабилен и в процессе эксплуатации происходит чрезмерное наростообразование в реакторах.²² Поэтому предпочтение было отдано "двухстадийному" подходу с непрерывным конвертированием до содержания железа в штейне на уровне 2-3% с последующей периодической доводкой для получения конечного штейна желаемого сорта.

Предварительные пилотные испытания процесса ISACONVERT были проведены с использованием шлаков на основе силиката железа при конвертировании двух сортов первичного штейна, как показано в таблице I. Был получен конечный штейн, содержащий 0.7-13.5% масс. железа (первичный штейн 1)¹⁶ и 2.2-10 % масс. железа (первичный штейн 2).⁹ Результаты предварительных испытаний конвертирования железо-силикатного шлака показали, что для получения файнштейнов, содержащих менее 2% масс. железа, необходимо значительно повысить температуру процесса, чтобы обеспечить текучесть железо-силикатного шлака. Поэтому были рассмотрены возможности применения альтернативной шлаковой системы.

Таблица I. Первичный никелевый/МПГ штейн, использованный для конвертирования при испытаниях ISACONVERT™

Элемент	Среднее содержание в штейне 1 (% масс.)	Среднее содержание в штейне 2 (% масс.)
Ni	16.2	44.5
Cu	10.6	9.7
Co	0.53	2.9
Fe	40.1	25.3
S	26.9	17.2
SiO ₂	—	0.3

Конвертирование никелевого штейна с использованием шлака на основе феррита кальция успешно применяется в промышленном масштабе компанией SMC с 1991 года в конвертерах TBRC, производящих файнштейн, содержащий около 2% масс. железа.¹² Процесс TBRC представляет собой периодический процесс, аналогичный конвертерам Пирса-Смита. Первоначально для конвертирования в процессе TBRC компания SMC использовала шлак на основе силиката железа, но при низком содержании железа в штейне в результате чрезмерного окисления происходило внезапное вспенивание шлака, приводившее к потере шихты и создававшее потенциальную угрозу для безопасности оборудования и операторов.¹⁴ Поэтому SMC внесла изменения в химический состав шлака, заменив кремнеземистый флюс известняковым, чтобы предотвратить нестабильное состояние ванны. Учитывая успешное применение шлаков на основе феррита кальция в периодическом конвертировании никелевого штейна на заводе SMC и доказанную способность процесса ISACONVERT и других процессов использовать шлаки на основе феррита кальция для производства меди,^{7,8,23} компания XR изучила возможность применения данной шлаковой системы в непрерывном процессе TSL при производстве никелевого/МПГ штейна.

Шлаковая система на основе феррита кальция успешно применяется в технологиях непрерывного конвертирования меди с середины 1970-х годов.²³ Полезные свойства шлаков на основе феррита кальция при конвертировании меди были описаны в 1980-х годах в работах Язава^{24,25} и Такэда.²⁶ Эти свойства включают в себя способность жидкой фазы содержать более высокие концентрации трехвалентного железа при высоких кислородных потенциалах, меньший объем шлака, меньшие потери ценных металлов и большую текучесть.

Таблица II. Сравнение шлаков на основе феррита кальция и силиката железа

Условия при Fe<4% В масс. в штейне	Шлак на основе феррита кальция	Шлак на основе силиката железа
Доля ценных металлов, попадающих в штейн (Ni, Cu и Co)	Выше	Ниже
Доля примесей, попадающих в шлак (As и Sb)	Выше	Ниже
Минимальная температура ликвидуса шлака (FactSage)	~1250°C	>1400°C
Текучесть	Выше	Ниже

Фонт²⁷ и Энао²⁸ исследовали в лабораторных условиях применение шлаков на основе феррита кальция при конвертировании никелевого штейна. Эти исследователи приводили к равновесию расплав штейна и шлака при 1500°C или 1600°C в течение определенных периодов времени при заданном парциальном давлении кислорода (Ро₂) и диоксида серы (Рsо₂) (задается соотношениями S₂/SO₂ и CO/CO₂). В конце каждого равновесного теста для анализа отбирались охлажденные образцы штейна и шлака. Результаты показали, что, по сравнению со шлаками на основе силиката железа, шлаки на основе феррита кальция обеспечивали более высокое извлечение ценных металлов (Ni, Cu и Co) при большей доле примесных элементов (As и Sb) в шлаковой фазе.^{27,28}

ХТ использовала пакет термодинамического моделирования FactSage²⁹, чтобы убедиться, что полезные свойства системы на основе феррита кальция с точки зрения текучести и концентрации трехвалентного железа также применимы к процессу конвертирования никелевого/МПГ штейна. Эти результаты моделирования, а также данные фундаментальных исследований^{27,28} приведены в таблице 11.

НЕПРЕРЫВНОЕ КОНВЕРТИРОВАНИЕ НА ПИЛОТНОЙ УСТАНОВКЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ШЛАКОВ НА ОСНОВЕ ФЕРРИТА КАЛЬЦИЯ

Цель пилотных испытаний конвертирования заключалась в том, чтобы определить химию технологического процесса получения никеля/МПГ ISACONVERT при

конвертировании штейна первичной плавки с высоким содержанием железа в файнштейн с низким содержанием железа с использованием шлака на основе феррита кальция. Результаты эксплуатации пилотной установки ISACONVERT описаны в литературе.⁹ Типичный состав штейна первичной плавки, использованного во всех испытаниях ISACONVERT с шлаками на основе феррита кальция, близок к составу штейна 1 в таблице I. Штейн первичной плавки был успешно конвертирован в штейн с содержанием железа в пределах от 2,6 до 8,0% масс.

В ходе испытаний в пилотную печь подавали твердый штейн и известняковый флюс с расходом 100-150 кг/ч твердой штейна без дополнительной обработки. Воздух и кислород подавались через отдельные ротаметры при соотношении с выходом 25-35% об. от общего обогащения кислородом. Природный газ подавался через копье для поддержания температуры ванны в пределах 1300-1380°C.

Пилотные испытания показали, что жидкие шлаки были получены при всех условиях проведения испытаний. Состав шлаков ISACONVERT, полученных в ходе испытаний, показан в таблице III.

Коэффициенты распределения никеля, меди и кобальта, определенные уравнением 1, показаны в зависимости от сорта штейна (сумма массового процента никеля, меди и кобальта) на рисунках 3-5, соответственно. На графиках сравниваются коэффициенты распределения, полученные при испытаниях процесса ISACONVERT с использованием шлака на основе феррита кальция, с показателями конвертеров Пирса-Смита и процесса TSL с использованием шлака на основе силиката железа. Были использованы следующие источники данных по конвертированию в конвертере Пирса-Смита и процессе TSL с использованием железо-силикатного шлака: Результаты проведенных ХТ пилотных испытаний конвертирования штейна в процессе TSL с использованием шлака на основе силиката железа;⁹ и результаты отбора проб из конвертеров Пирса-Смита на металлургическом заводе Фэлконбридж компании Xstrata Nickel (XNi)³⁰ и на завод

Томпсон компании Vale Inc.³¹

$$L_x^{s/m} = (\% \text{ масс. } X \text{ в шлаке}) / (\% \text{ масс. } X \text{ в штейне}) \quad (1)$$

где L - коэффициент распределения, s - шлак, X - элемент, распределение которого необходимо установить, m - штейн.

Сравнение данных как пилотной установки, так и металлургического завода показывает, что доля никеля (рисунок 3) и кобальта (рисунок 5), приходящаяся на шлак, ниже в процессе конвертирования никеля/МПГ ISACONVERT с использованием шлака на основе феррита кальция, чем в процессах с использованием шлака на основе силиката железа. Рисунок 5 показывает, что процесс конвертирования никеля/МПГ ISACONVERT с использованием шлака на основе феррита кальция значительно превосходит другие процессы с точки зрения распределения кобальта: доля кобальта в шлаке более чем на 40% ниже при содержании в штейне выше 76% масс. Доля меди (рисунок 4) в шлаке процесса ISACONVERT с использованием шлака на основе феррита кальция ниже, но только при высоких сортах штейна, соответствующих файнштейну. Для расчета коэффициента распределения меди на заводе XNi доступная информация является неполной.³⁰ Желаемый сорт файнштейна никеля/МПГ, как правило, соответствует требованиям последующего рафинировочного / аффинажного производства, устанавливающим допустимый уровень железа и серы в штейне. Сравнение процесса конвертирования никеля/МПГ ISACONVERT с использованием шлака на основе феррита кальция и процессов с использованием шлака на основе силиката железа с точки зрения сорта штейна по содержанию железа^{9,30,31} приведено на рисунке 6. При фиксированном содержании железа в штейне процесс конвертирования никеля/МПГ ISACONVERT с использованием шлака на основе феррита кальция позволяет получать штейн с массовой долей никеля, меди и кобальта, более чем на 5% превышающей аналогичный показатель процессов конвертирования с использованием шлака на основе силиката железа.

Таблица III. Состав шлака ISACONVERT™

Элемент	Диапазон (% масс.)
Ni	4.1-12.8
Cu	0.9-2.3
Co	1.6-2.9
Fe	46.2-51.0
CaO	11.9-15.6
SiO ₂	1.7-2.2

Более высокий сорт файнштейна, получаемого при использовании шлака на основе феррита кальция, является результатом более низкого содержания серы в фазе штейна по сравнению с процессами, использующими шлак на основе силиката железа (см. рисунок 7). Исходный штейн, поступающий в процесс конвертирования никеля/МПГ, как правило, имеет низкое содержание серы (см. таблицу I), и конвертирование с использованием шлака на основе феррита кальция делает возможной дальнейшую металлизацию штейна до содержания серы менее 15% масс. Штейн, получаемый в процессах конвертирования никелевого штейна с использованием шлака на основе силиката железа, содержит больше серы, как минимум 20% масс., что обуславливает более низкий сорт штейна по сравнению с процессом конвертирования никеля/МПГ ISACONVERT. Минералогический анализ штейна конвертера Пирса-Смита показал, что металлизированные фазы файнштейна отличаются доминированием никеля и выступают в качестве собирателей МПГ.³² Увеличение металлизации процесса ISACONVERT (см. рисунок 7), следовательно, должно также привести к увеличению концентрации и переноса МПГ в конечный файнштейн по сравнению с конвертером Пирса-Смита или процессом TSL с использованием шлака на основе силиката железа.

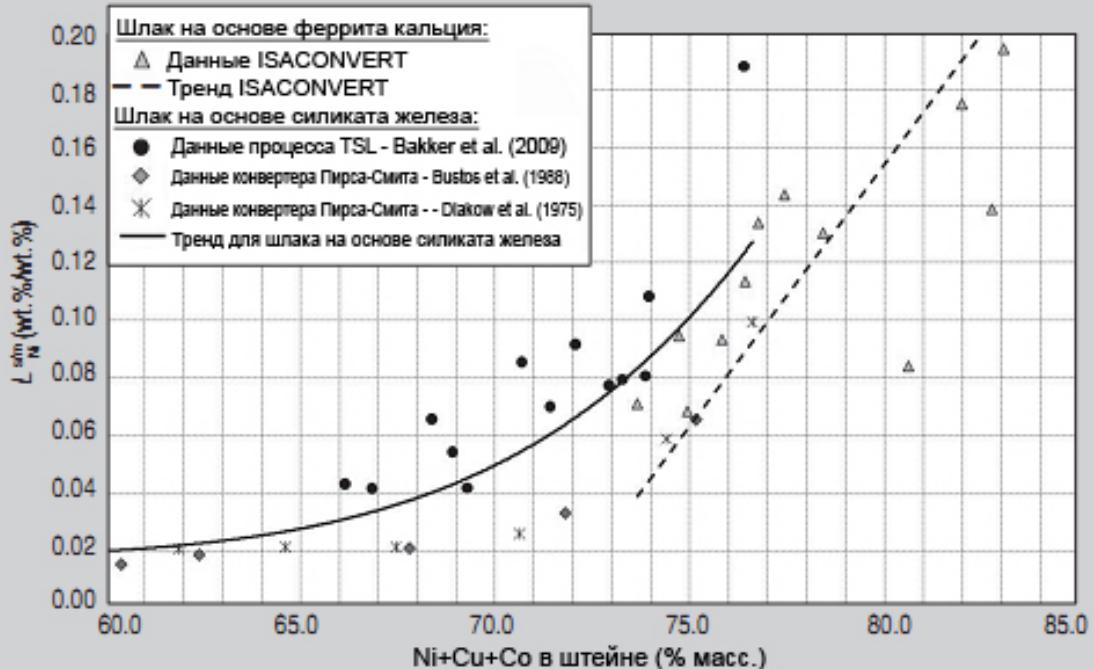


Рисунок 3. Коэффициент распределения никеля между шлаком и штейном в зависимости от сорта файнштейна (% масс. Ni+Cu+Co в штейне).

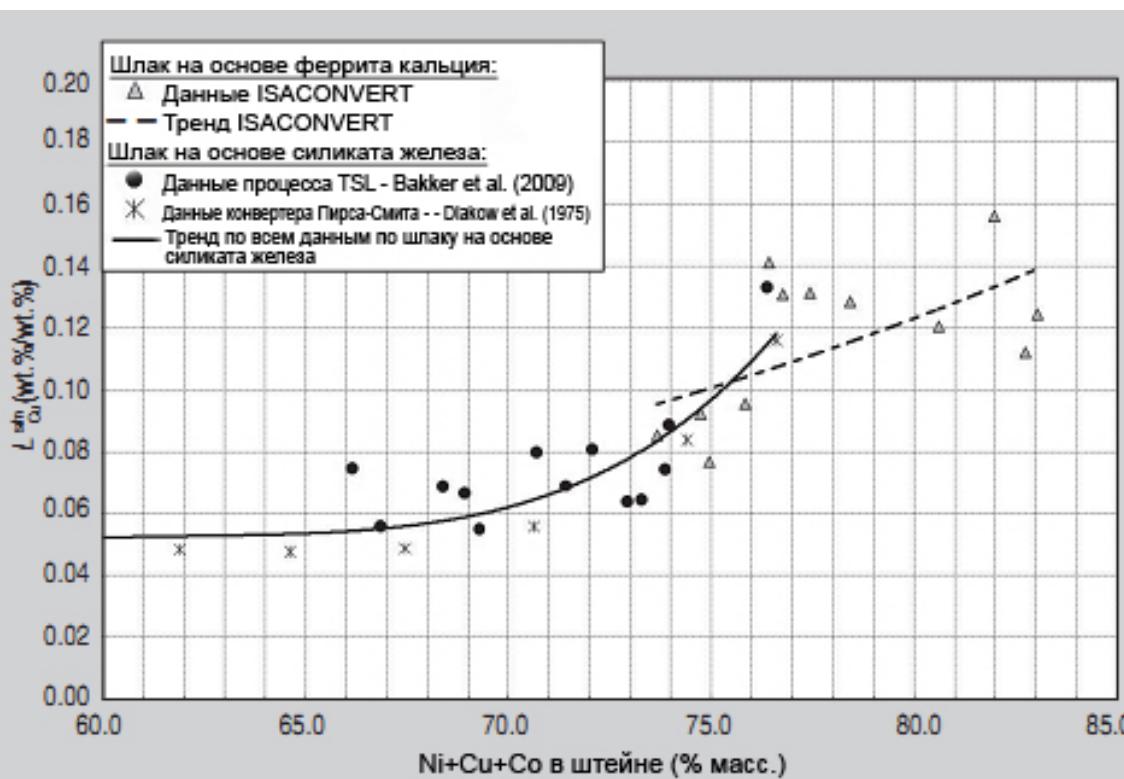
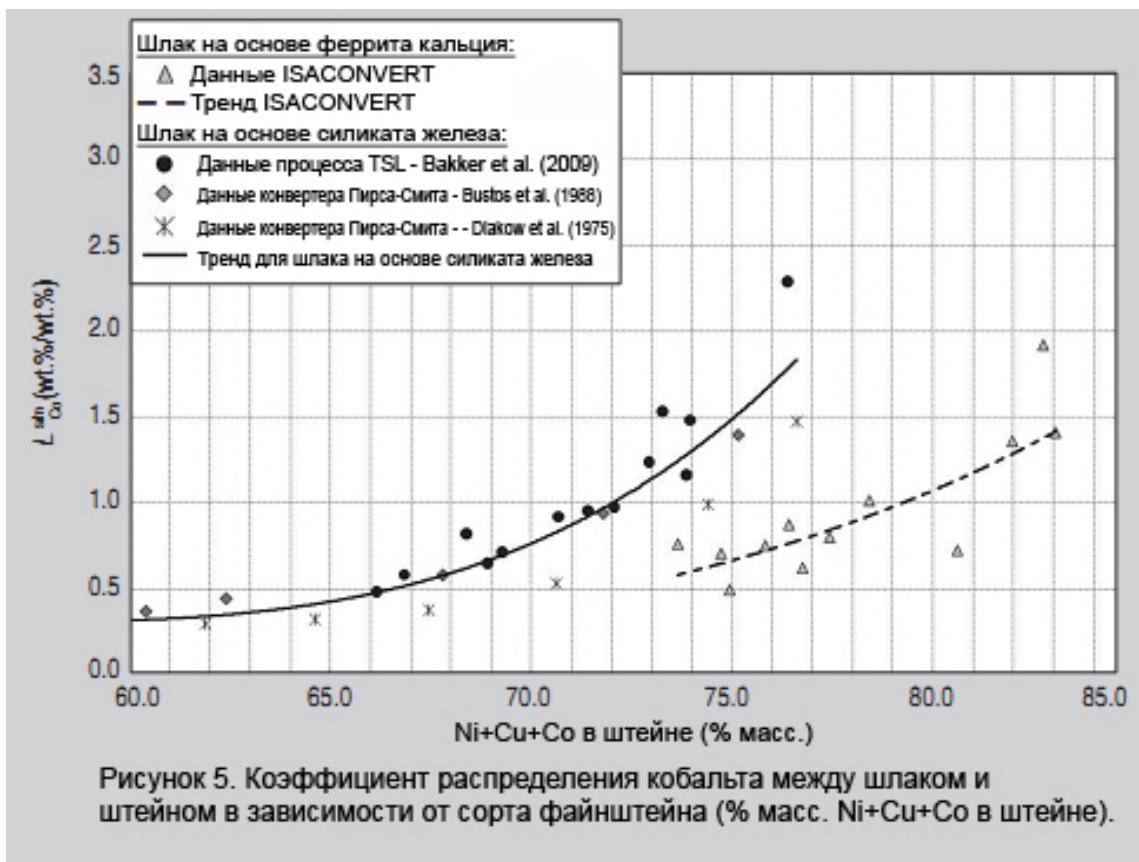


Рисунок 4. Коэффициент распределения меди между шлаком и штейном в зависимости от сорта файнштейна (% масс. Ni+Cu+Co в штейне).



ВЫВОДЫ

Технология ISASMELT TSL широко применяется в плавке первичных и вторичных меди и свинца. Периодическая плавка и конвертирование с помощью технологии ISASMELT также хорошо известны. Технология является в равной степени эффективной при непрерывном конвертировании и поэтому получила название ISACONVERT™.

Особенности, которые обуславливают привлекательность технологии ISACONVERT при конвертировании меди и в равной степени применимы к конвертированию никеля/МПГ, следующие: (1) Постоянный объемный расход отходящих газов с высоким содержанием SO_2 , которые могут перерабатываться в обычной установке серной кислоты. (2) Конвертирование происходит в один этап и в одной печи, что позволяет использовать максимальное обогащение кислородом с минимальным разбавлением воздухом. (3) В качестве питания

может быть использован твердый штейн, что устраниет необходимость подачи расплавленного штейна в ковше, снижает неконтролируемые выбросы и позволяет развязать плавку и конвертирование, увеличивая гибкость и упрощая техническое обслуживание и эксплуатацию металлургического завода.

Процесс ISACONVERT успешно опробован в полупромышленном масштабе в качестве технологии конвертирования медного/никелевого штейна. Результаты показали, что, по сравнению с процессами с использованием шлака на основе силиката железа, процесс конвертирования никеля/МПГ ISACONVERT с использованием шлака на основе феррита кальция: (1) обеспечивает более высокий сорт файнштейна (сумма массового процента никеля, меди и кобальта в штейне) благодаря более низкому конечному содержанию серы в штейне; (2) обеспечивает более высокое извлечение ценных металлов в файнштейн. Последнее уменьшает долю никеля и меди в шлаке, в свою очередь, более чем на 40% уменьшая долю кобальта в шлаке.

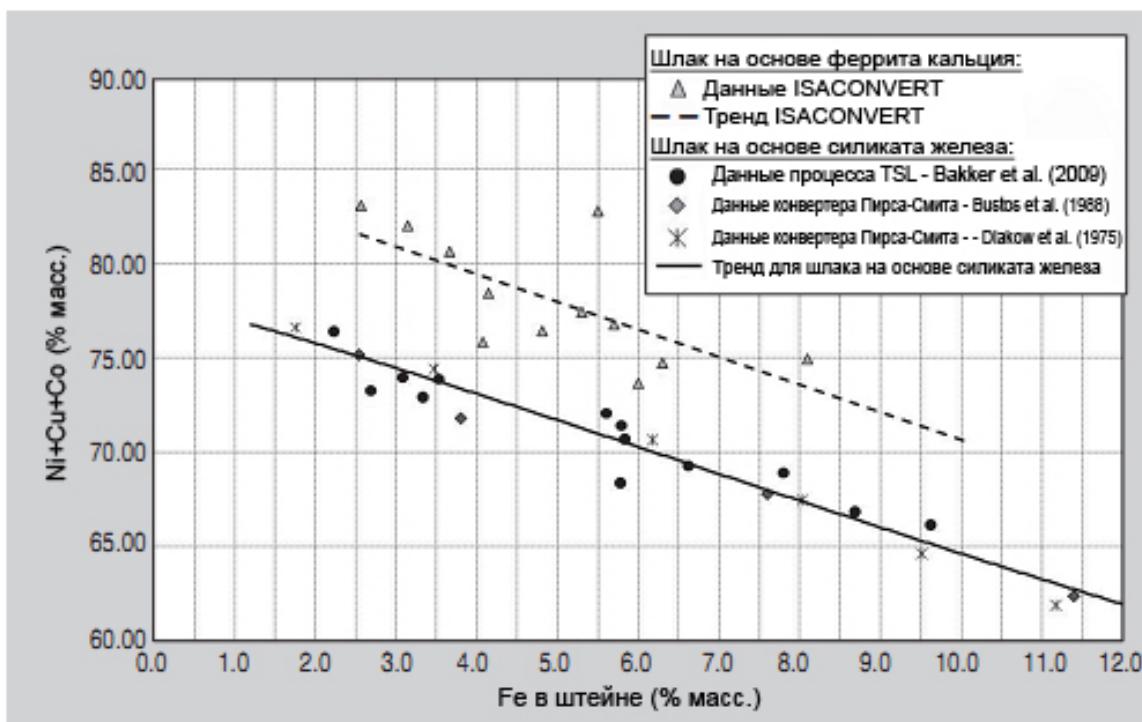
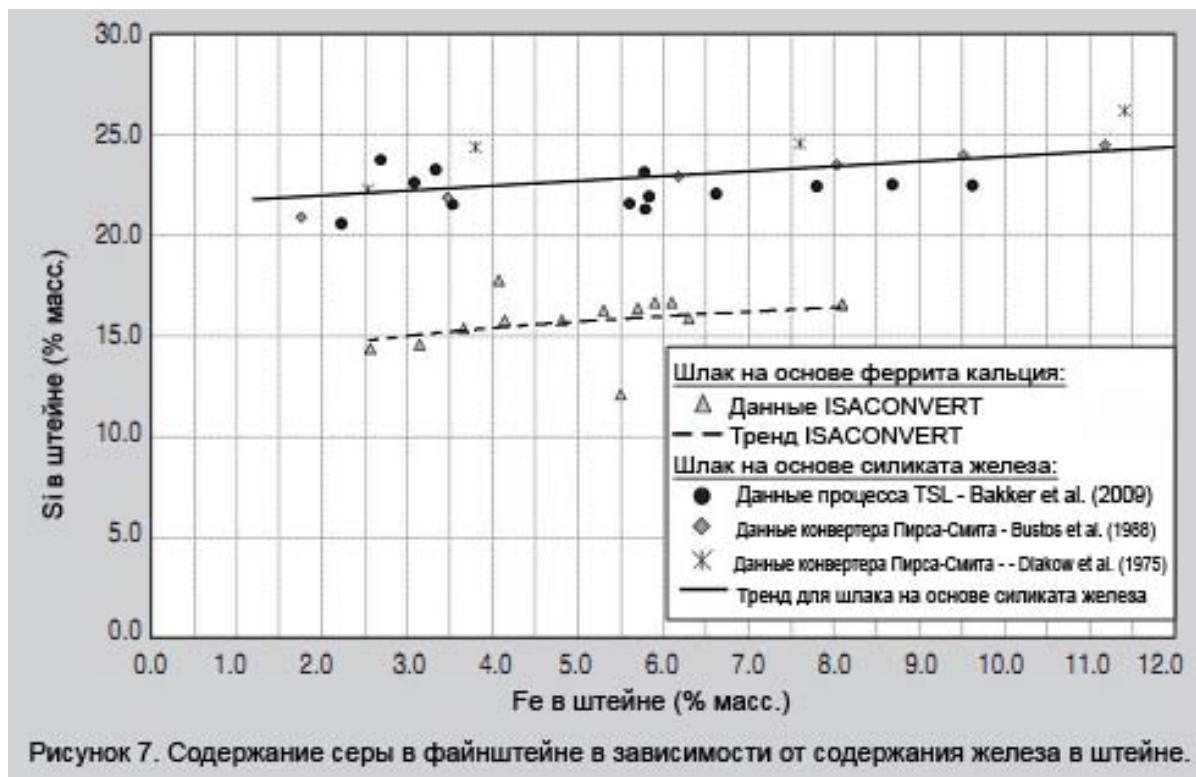


Рисунок 6. Сорт штейна (% масс. Ni+Cu+Co) в зависимости от содержания железа в штейне.



БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают признательность компании Xstrata Technology за разрешение опубликовать настоящую статью.

Список использованной литературы

1. C. Diaz, Proc. Copper 2010, vol. 7 (Hamburg, Germany: GDMB, 2010), pp. 2543-2562.
2. G. Alvear, P. Arthur, and P. Partington, Proc. Copper 2010, vol. 7 (Hamburg, Germany: GDMB, 2010), pp. 615-630.
3. B. Burford, AusIMM Bulletin, No. 1 (February 2009), pp. 26-30.
4. B. Errington, P. Arthur, J. Wang, and Y. Dong, Proc. Inf I. Symp. Lead and Zinc Processing, ed. T. Fujisawa et al. (Tokyo: MMIJ, 2005), pp. 581-599.

5. P. Bartsch, B. Anselmi, and C.R. Fountain, "The Radio Hill Project," ed. W.A. Pyrosem, E.J. Grimsey, and N.D. Stockton (Perth, Australia: Murdoch University Press, 1990).
6. M. Zhou, A. Wan, G Li, R. Baldock, and H. Li, Supplemental Proceedings Volume 1: TMS2010-Materials Processing and Properties (Warrendale, PA: TMS, 2010), pp. 525-534.
7. J.S. Edwards and S. Jahanshahi, "Copper Converting," U.S. patent 5,888,270 (30 March 1999).
8. S. Nikolic, J.S. Edwards, A.S. Burrows, and G.R.F. Alvear, International Peirce-Smith Converting Centennial, ed. J. Kapusta and T. Warner (Warrendale, PA: TMS, 2009), pp. 407-414.
9. M.L. Bakker, S. Nikolic, and P.J. Mackey, "ISA- SMELT™ TSL Applications for Nickel" (Presented at Nickel Processing 2010, Minerals Engineering International, Falmouth, U.K., 2010).
10. F. Vanbellen and M. Chintinne, Advanced Processing of Metals and Materials, ed. F. Kongoli and R.G. Reddy (Warrendale, PA: TMS, 2006), pp. 43-52.
11. S. Schmidt, Aurubis AG-Huttenwerke Kayser, unpublished (March 2006).
12. A.E.M. Warner, C.M. Diaz, A.D. Dalvi, P.J. Mackey, A.V. Tarasov, and R.T. Jones, JOM, 59 (4) (2007), pp. 58-72.
13. P. Viviers and K. Hines, First Extractive Metallurgy Operators' Conference (Brisbane, Australia: AusIMM, 2005), pp. 101-108.
14. G.K. Roset, J.W. Matousek, and P.J. Marcantonio, JOM, 44 (4) (1992), pp. 39-42.
15. A.E.M. Warner and C.M. Diaz, An Overview of the Metallurgy of Nickel-Copper

Matte Converting, Yazawa International Symposium Metallurgical and Materials Processing: Principles and Technologies, ed. F. Kongoli, K. Itagaki, C. Yamauchi, and H.Y. Sohn (Warrendale, PA: TMS, 2003), pp. 113-129.

16. PGM Matte Converting, XT Internal Report (1996).
17. E.O. Stensholt, O.M. Dotterud, E.E. Henriksen, P.O. Ramsdal, F. Stalsen, and E. Thure, CIM Bulletin, 94 (1051) (2001), pp. 101-104.
18. A.E.M. Warner, J. Liu, F. Javor, R. Lawson, W. Shellshear, T. Hoang, and R. Falcioni, Converter and Fire Refining Practice, ed. A. Ross, T. Warner, and K. Scholey (Warrendale, PA: TMS, 2005), pp. 27-43.
19. S. Marcuson, International Peirce-Smith Converting Centennial, ed. J. Kapusta and T. Warner (Warrendale, PA: TMS, 2009), pp. 103-126.
20. G.A. Bezuidenhout, J.J. Eksteen, W. Wendt, and W. Persson, "Implementation of Semtech Optical Spectrometry System at Lonmin for Converter Fe End-point Control" (Presented at Nickel Processing 2010, Minerals Engineering International, Falmouth, U.K., 2010).
21. G.S. Victorovich, Proceedings of the Paul E. Que- neau International Symposium, Volume 1, ed. R.G. Reddy and R.N. Weizenbach (Warrendale, PA: TMS, 1993), pp. 501-529.
22. J.R. Donald, A.E.M. Warner, A.D. Dalvi, K. Scholey, A. Ross, and C. Harris, Converter and Fire Refining Practices, ed. A. Ross, T. Warner, and K. Scholey (Warrendale, PA: TMS, 2005), pp. 295-307.
23. W.G.L. Davenport et al., Extractive Metallurgy of Copper, 4th ed. (Oxford, U.K.: Pergamon, 2002).
24. A. Yazawa, Y. Takeda, and Y. Waseda, Can. Metall. Q., 20 (1981), pp. 129-134.

25. A. Yazawa and Y. Takeda, Trans. Jpn. Inst. Met., 23 (1982), pp. 328-333.
26. Y. Takeda, S. Nakazawa, and A. Yazawa, Can. Metall. Q., 19 (1980), pp. 297-305.
27. J.M. Font, "Phase Equilibrium and Minor Elements Distribution between Slag and Matte Phases in Nickel Smelting" (Ph.D. thesis, Tohoku University, 1999), pp. 63,66.
28. H.M.Z. Henao, "Phase Equilibrium between Ni-S or Ni-Fe Melt and Slag in Nickel Smelting" (Ph.D. thesis, Tohoku University, 2003), pp. 54,60.
29. C.W. Bale, A.D. Pelton, and W.T. Thompson, "Facility for the Analysis of Chemical Thermodynamics" (FactSage version 6.1) (Ecole Polytechnique de Montreal, 2002).
30. A.A. Bustos, S.W. Ip, G. O'Connell, G.H. Kaiura, and J.M. Toguri, Extractive Metallurgy of Nickel and Cobalt, ed. G.P.Tyroler and C.A. Landolt (Warrendale, PA: TMS, 1988), pp. 335-354.
31. J.S. Diakow, Y.F. Mak, and R.G. Orr, "Metallurgy of the Converting Process in the Thompson Smelter" (Paper presented to the 14th Annual Conference of Metallurgists, Edmonton, Alberta, The CIM, Montreal, Quebec, Canada, August 1975).
32. E. Thyse, G. Akdogan, and J.J. Eksteen, "The Effect of Changes in Iron-endpoint during Peirce-Smith Converting on PGE-containing Nickel Converter Matte Mineralization" (Presented at Nickel Processing 2010, Minerals Engineering International, Falmouth, U.K., 2010).

Главные металлурги М.Л. Беккер и Дж.Р.Ф. Альвеар и инженер-металлург С. Николич являются работниками компании Xstrata Technology, (Level 4, 307 Queen Street, Brisbane, 4000, Australia). С доктором Беккером можно связаться по электронной почте mbakker@xstrata.com.