

Технология продувки методом погружения сверху (TSL) ISASMELT™ – Применение в никелевой промышленности

М.Л. Беккер^{a,*}, С. Николич³, П.Дж. Макки^b

^a Xstrata Technology, Level 4, 307 Queen Street, Brisbane 4000, Australia

^b PJ Mackey Technology Inc., Kirkland, Quebec, Canada

* Ответственный автор:

Эл. почта: mbakker@xstratatech.com.au (М.Л. Беккер).

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

История статьи: Опубликована онлайн 25 октября 2010 года

Ключевые слова: Экстракционная металлургия, Пирометаллургия,
Сульфидные руды, Оксидные руд

АВТОРЕФЕРАТ

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. Технология в равной мере эффективна при плавке никелевых сульфидных концентратов, конвертировании никелевого штейна и производстве ферроникеля из латеритных руд. В настоящей статье описывается, каким образом особенности, которые делают технологию ISASMELT™ привлекательной для использования в плавке меди и свинца, могут быть применены при плавке и конвертировании никеля. Представлены концептуальные технологические схемы, основанные на результатах недавних полупромышленных и лабораторных испытаний.

1. Введение

Применение фурмы позволило использовать стационарные печи простой конструкции и с очень высокой скоростью реакции. Предшествующая технология была основана на подаче газов в жидкие шлаки или штейны, как правило, через фурмы, что усложняло конструкцию и приводило к проблемам с огнеупорами. Технология плавки в жидкой ванне с продувкой методом погружения сверху (TSL) была разработана и внедрена в промышленном масштабе на металлургическом комплексе Маунт Айза в Австралии в начале 1990-х годов и впоследствии получила название ISASMELT™. Развитие технологии на протяжении последних 30 лет было направлено преимущественно на плавку свинцовых и медных концентратов или вторичных материалов. Промышленные печи ISASMELT™, эксплуатируемые компанией Xstrata и ее лицензиатами, в настоящее время способны переплавлять свыше 9 млн. тонн питания в год.

2. Технология ISASMELT™

В технологии ISASMELT™ используется закрытая конструкции печи, предотвращающая выбросы в окружающую среду. Технология продувки через погружную фурму обеспечивает высокоэффективное перемешивание и протекание реакций между компонентами питания в расплавленной шлаковой ванне. 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. Принципиальная схема процесса показана на рисунке 1.

За 30 лет разработки и эксплуатации технологии продувки через погружную фурму на крупных заводах были внесены существенные технические усовершенствования, в частности, в конструкцию печи, системы подготовки питания, системы утилизации отходящих газов, стратегии эксплуатации и управления технологическим процессом, обслуживание огнеупоров и обучение

операторов. Результатом накопленного опыта стал продукт, сегодня хорошо известный рынку как технологический пакет ISASMELT™, лицензии на который предлагаются всем заинтересованным клиентам, - Burford (2009). Многие из усовершенствований, внесенных операторами установок, были доведены до сведения и внедрены другими лицензиатами. Обмен идеями и техническими усовершенствованиями происходит в форме отдельных поездок на объекты других лицензиатов, а также на регулярных семинарах для лицензиатов, организуемых Xstrata Technology. На рисунке 2 показано расположение действующих лицензионных промышленных установок.

3. Никелевая установка ISASMELT™ компании Agip

Менее известно, что процесс ISASMELT™ был также адаптирована для переработки никельсодержащего питания на самой ранней стадии своей разработки. В 1980-е годы на никелевых месторождениях, принадлежащих Mount Isa Mines Ltd., были проведены масштабные полупромышленные испытания. Испытания были также выполнены по заказу компании AGIP Australia Pty Ltd., которой принадлежало месторождение Радио Хилл в Западной Австралии, - Bakker et al. (2009). В 1991 году компания AGIP приняла решение построить полупромышленную установку ISASMELT™ для производства никель-медного штейна из концентрата. Это была первая установка ISASMELT™, построенная и сданная в эксплуатацию по заказу стороннего клиента. Ранее в 1991 году на комбинате Маунт Айза была сдана в эксплуатацию первая промышленная установка ISASMELT™, предназначенная для производства чернового свинца из концентратов. Год спустя были сданы в эксплуатацию две промышленные установки ISASMELT™, предназначенные для производства медного штейна из концентратов: одна на комбинате Маунт Айза, а другая в Майами, штат Аризона.

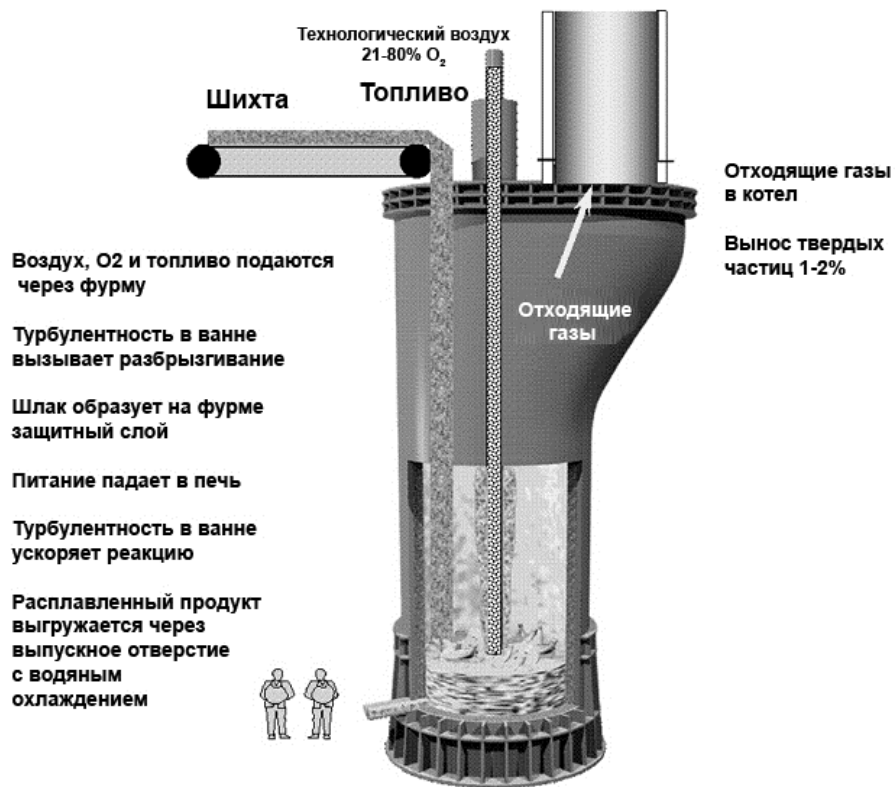


Рисунок 1. Принципиальная схема ISASMELT™.

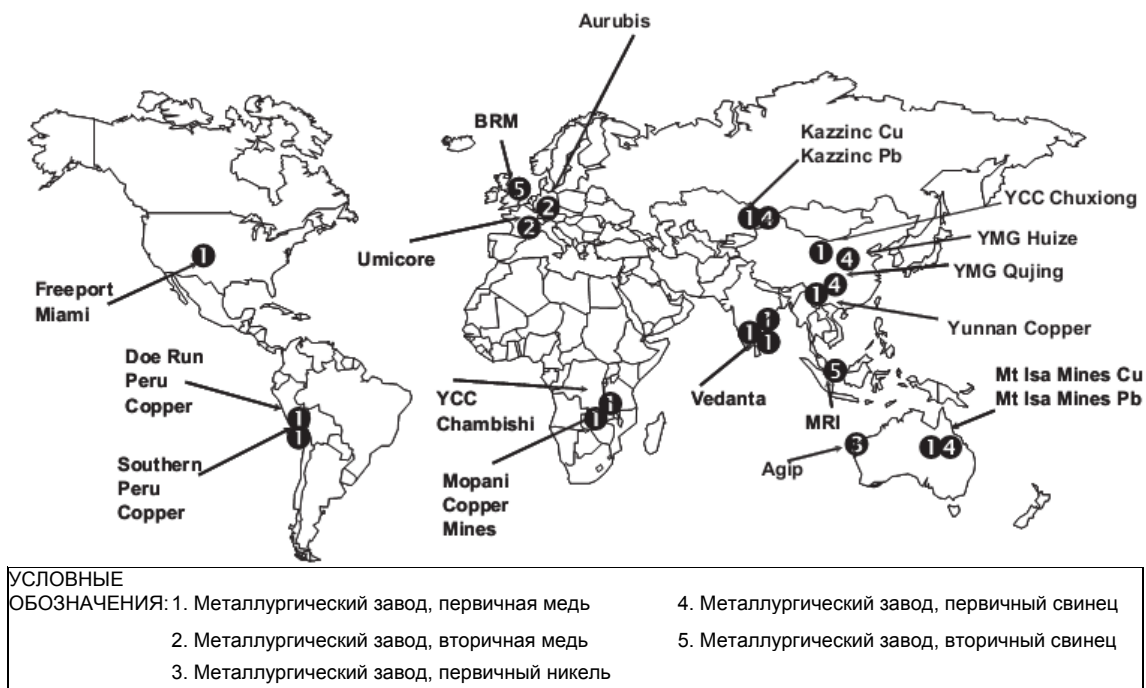


Рисунок 2. Расположение установок ISASMELT™.

Промышленная никелевая установка ISASMELT™ компании AGIP была введена в эксплуатацию в сентябре 1991 года и в течение 3 месяцев вышла на проектную мощность 7,5 т концентрата в час - Arthur and Hunt (2005). Она производила никель-медный штейн с содержанием 45% масс. из концентрата, содержавшего примерно 7% масс. никеля и 3,5% масс. меди. Установка показана на рисунке 3 - Bakker et al. (2009). На тот момент проект был признан успешным с технической и эксплуатационной точек зрения, однако из-за большого падения цен на никель объект пришлось закрыть в конце 1991 года. Затем установка была демонтирована.

4. Процесс ISACONVERT™

Результаты опытной эксплуатации полупромышленных установок непрерывного конвертирования меди и никеля в совокупности с результатами промышленной эксплуатации установок периодического конвертирования показывают, что печь ISASMELT™ хорошо подходит для непрерывного конвертирования, - печь ISACONVERT™ - Edwards and Alvear [7].

В технологии ISASMELT™ используется такая же закрытая конструкции печи, как и в ISASMELT™, предотвращающая выбросы в окружающую среду. Процесс использует технологию продувки TSL, обеспечивающую высокоэффективное смешивание и взаимодействие твердого штейна и флюса, которые могут подаваться через свод печи. Как и печь ISASMELT™, ISACONVERT™ занимает небольшую площадь и, как правило, может быть с легкостью установлена на действующих производствах.

Последние прикладные исследования в совокупности с новаторскими полупромышленными испытаниями сделали возможным внедрение процесса ISACONVERT™ в промышленных масштабах - Nikolic et al. (2009). Установка ISACONVERT™ в разрезе показана на рисунке 4.

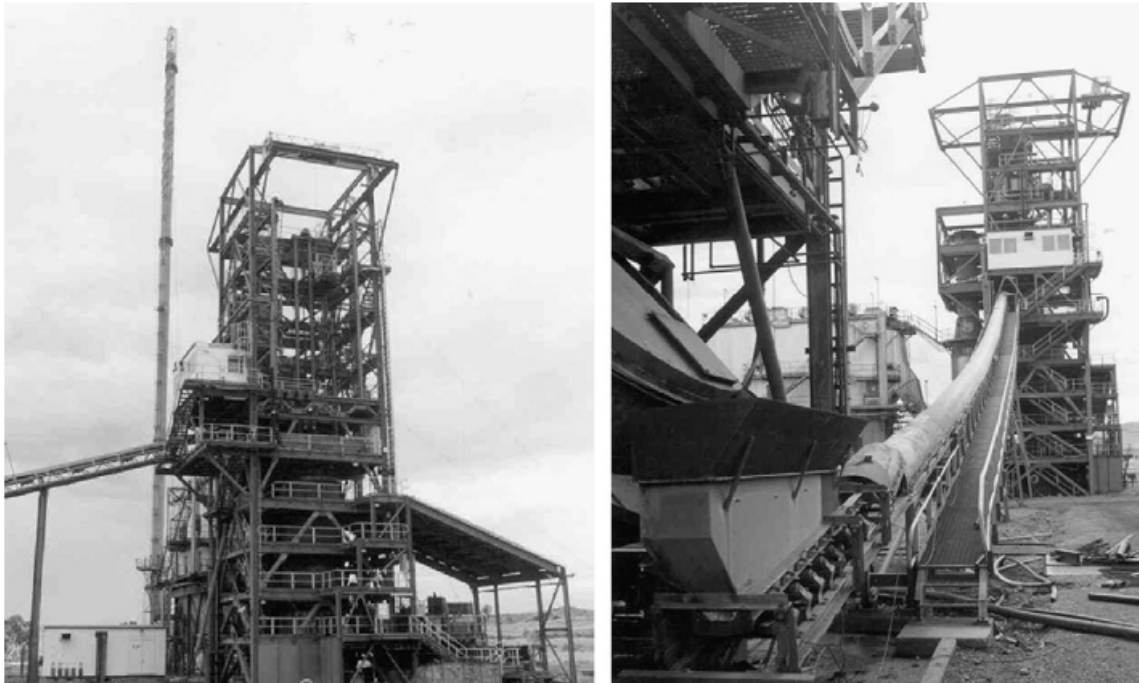


Рисунок 3. Фотографии никелевой установки ISASMELT™ компании AGIP.



Рисунок 4. Конструкция печи ISACONVERT™ в разрезе.

Применение печей ISASMELT™ и ISACONVERT™ в медной промышленности значительно сократить занимаемую площадь по сравнению с обычным медеплавильным заводом. То обстоятельство, что процессы выплавки и конвертирования очень похожи и легко управляются с использованием проверенной системы управления технологическим процессом, также упрощает эксплуатацию металлургического завода и логистику, позволяя осуществлять все операции из одного центрального пункта управления. Эти факторы снижают стоимость эксплуатации нового завода по сравнению с традиционной технологией, основанной на использовании конвертеров Пирса-Смита. Значительно меньший объем отходящих газов в процессе ISACONVERT™ позволяет сократить капитальные и эксплуатационные затраты на системы сбора и очистки отходящих газов.

5. Принцип действия процесса плавки сульфида никеля ISASMELT™

Питанием металлургического завода, перерабатывающего сульфид никеля, как правило, является никель-медный концентрат, который также может содержать небольшое количество кобальта и металлов платиновой группы. Продуктом плавки такого питания является первичный штейн с высоким содержанием железа, который подвергается дополнительной обработке, как правило, в конвертерах Пирса-Смита с получением конечного высокосортного штейна, часто называемого "файнштейн".

Проведенное TMS в 2007 году исследование металлургических заводов, перерабатывающих сульфид никеля, показало, что на долю взвешенной плавки приходится примерно 70% от мирового объема производства никеля (исходя из данных отчетности за 2004-2005 годы), а остальной объем производства - на долю плавки в электропечах - Warner et al. (2007). Однако, те самые особенности, которые делают процесс ISASMELT™ привлекательным для плавки меди и свинца, столь же применимы в условиях плавки никеля - Bakker et al. (2009).

Принципиальная технологическая схема основной плавки никеля с использованием процесса ISASMELT™ показана на рисунке 4. В никелевой печи ISASMELT™ происходит непрерывная переработка концентрата, флюсов

и рециркулируемого выноса печи. Образующиеся жидкий штейн и шлак периодически выпускают из печи ISASMELT™ в отдельную печь отжига шлака через одну летку. Отходящие газы печи ISASMELT™ направляют в котел-утилизатор для утилизации тепла и обеспыливания с использованием электростатического осадителя, а затем на установку серной кислоты для извлечения серы. Штейн основной плавки переносят ковшами из печи осаждения в конвертеры Пирса-Смита для получения фاینштейна. Также возможно применение непрерывного конвертирования (см. ниже). Печь осаждения также периодически освобождают от утилизируемого отработанного шлака. Вся пыль, собранная системами очистки газов, возвращается в печь ISASMELT™.

Возможность применения в производстве никеля процесса ISASMELT™ для получения фاینштейна с низким содержанием железа непосредственно из концентрата также показана пунктирной линией на рисунке 4. Это полностью устраняет необходимость в конвертерах Пирса-Смита. Прямой процесс выплавки никеля ISASMELT™ аналогичен прямому процессу выплавки никеля Outokumpu (DON), в котором ценные металлы, содержащиеся в шлаке, извлекают в печи отжига шлака. Процесс DON был впервые применен на заводе Харьявалта в Финляндии в 1995 году, а затем

в гораздо меньших масштабах на заводе Форталеза в Бразилии в 1998 году - Makinen and Taskinen (2006). Таким образом, процесс выплавки никеля ISASMELT™ позволяет производить либо штейн первичной плавки (содержание железа в штейне выше 15% масс.), либо фاینштейн (содержание железа в штейне ниже 4% масс.) в зависимости от потребностей заказчика.

6. Принцип действия процесса выплавки никеля ISACONVERT™

Штейн, полученный в результате основной плавки никелевого концентрата, почти полностью перерабатывают в фاینштейн в нескольких конвертерах Пирса-Смита. Исключение составляют металлургический завод Ватервал компании Anglo Platinum в ЮАР, на котором применяется процесс конвертирования Anglo Platinum (ACP), и металлургический завод Stillwater Mining Company в штате Монтана, США, на котором установлены

вращающиеся конвертеры верхней продувки (TBRC). В обоих случаях в соответствующих процессах конвертирования перерабатывается штейн основной плавки, но только процесс АСР имеет непрерывную подачу питания.

Непрерывное конвертирование никеля 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 АСР. Кроме того, компания Vale Inco в течение уже более чем десяти лет осуществляет масштабную программу исследований и разработок, предметом которой является непрерывное конвертирование никеля, - Warner and Diaz (2003). В течение этого периода компания Vale Inco изучила три подхода к непрерывному конвертированию: собственная технология взвешенной плавки (Victorovich (1993)), технология конвертирования в ванне с верхней продувкой кислородом и донным перемешиванием азотом и технология конвертирования в ванне типа Noranda/El Teniente (Donald et al. (2005)). Необходимо отметить, что основная цель программы заключалась в разработке технологии непрерывного конвертирования, применимой на никелевом заводе Коппер Клифф, Онтарио, где требования рафинировочного завода предполагают содержание железа в штейне не выше 0,5% масс. Хотя это технически осуществимо, испытания показали (Donald et al. 2005), что окисленный шлак, получаемый при столь низком содержании железа, является источником определенных проблем. 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.

Нишей, в которой, как представляется, может успешно применяться процесс ISACONVERT™, является производство файнштейнов с содержанием железа менее 4% масс. Принципиальная технологическая схема плавки никеля с использованием процесса ISACONVERT™ показана на рисунке 5. Следует отметить, что процесс плавки никеля ISACONVERT™ является процессом непрерывного конвертирования с непрерывной подачей в ванну штейна и

воздуха/кислорода. Ванна всегда состоит из продуктов конвертирования, так как технологический режим фактически удерживает процесс в точке, соответствующей точке окончания реакций конвертирования в конвертерах Пирса-Смита.

В никелевой печи ISACONVERT™ переработка штейна основной плавки, флюсов и рециркулируемого штейна печи отжига шлака и выноса происходит непрерывно. Продукт, жидкий файнштейн, периодически выпускают через летку в: (1) систему гранулирования или (2) систему медленного охлаждения (в зависимости от металлургического завода). Шлак выпускают из отдельной летки печи ISACONVERT™ в отдельную печь отжига шлака, в которой ценные металлы извлекают путем добавления восстановителя (кокса и/или концентрата) с получением отдельного штейна и очищенной шлаковой фазы. Штейн из печи отжига шлака гранулируют и возвращают в печь ISACONVERT™, а шлак утилизируется. 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™.

Описанный процесс конвертирования никеля ISACONVERT™ обладает двумя основными преимуществами по сравнению с традиционным периодическим конвертированием в конвертере Пирса-Смита.

Во-первых, процесс ISACONVERT™ отличается 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 установка камина остается одним из возможных вариантов поддержания необходимо уровня SO₂ в отходящих газах конвертера Пирса-Смита, при этом также требуется второй камин для сбора выбросов, миновавших первый камин, что, как правило, увеличивает общую стоимость конвертеров Пирса-Смита. В процессе ISACONVERT™ конвертирование происходит в один этап, что позволяет использовать максимальное обогащение кислородом с

минимальным разбавлением воздухом и меньшим объемом отходящих газов, которые без дополнительной подготовки могут быть направлены в установку серной кислоты.

Во-вторых, процесс ISACONVERT™ отличается гибкостью, позволяющей использовать в качестве питания твердый штейн, что устраняет необходимость в подаче расплавленного штейна в ковше, а также уменьшает риск неконтролируемых выбросов и улучшает состояние промышленной гигиены на заводе. Кроме того, использование твердого или гранулированного питания позволяет развязать стадии плавки и конвертирования, что повышает гибкость процесса и упрощает обслуживание и эксплуатацию завода.

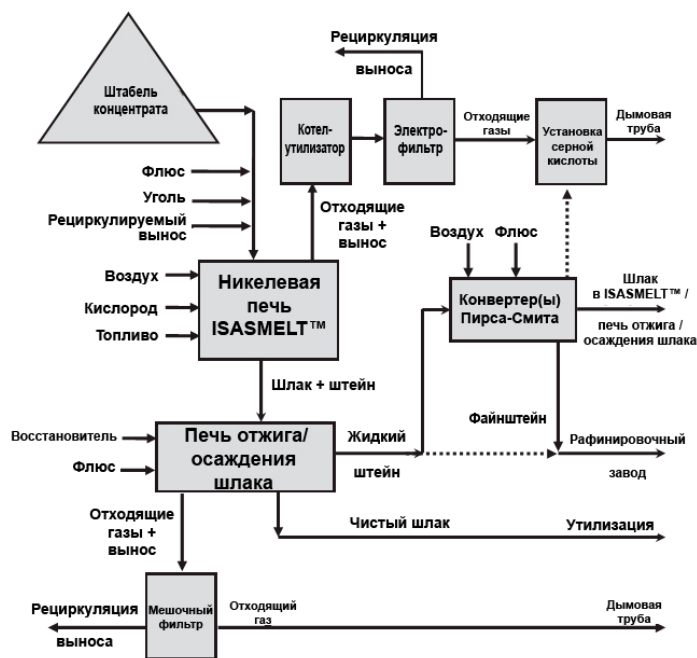


Рисунок 5. Технологическая схема никелевой установки ISASMELT™.

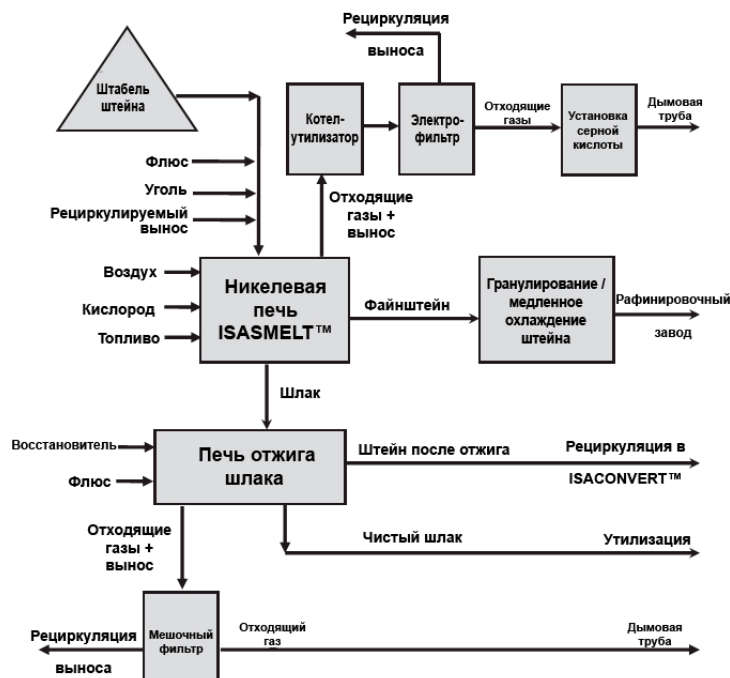


Рисунок 6. Технологическая схема никелевой установки ISACONVERT™.

7. Принцип действия процесса плавки латерита ISASMELT™

Проведенное TMS в 2007 году исследование металлургических заводов, перерабатывающих латеритный никель, показало, что для плавки/восстановления никеленосных латеритов применяется практически исключительно технология вращающейся печи - электропечи (RKEF) - Warner et al. (2006). Процесс RKEF, как правило, используется для переработки сапролитов, образованных силикатами магния и алюминия с низким содержанием железа (или иногда "переходного" материала); продуктами плавки в электропечи являются ферро-никелевый сплав, поставляемый на рынок (после рафинирования), и утилизируемый шлак. В некоторых случаях в печь восстановления добавляют серу для получения в электропечи штейна с низким содержанием серы, из которого обычным конвертированием получают файнштейн. Технология ISASMELT™ была недавно изучена с точки зрения плавки никелевых латеритных руд этого типа.

Принципиальная технологическая схема основной плавки латеритного никеля с использованием процесса ISASMELT™ показана на рисунке 7. Печь

ISASMELT™ в непрерывном режиме плавит сухое латеритное питание и рециркулируемую пыль. Источником тепла для плавки являются уголь и обогащенный кислородом воздух. В зависимости от перерабатываемой руды может потребоваться добавление флюса. Образующиеся жидкий штейн и шлак периодически выпускают из печи ISASMELT™ в отдельную печь отжига/осаждения шлака через одну летку. Как вариант, печь ISASMELT™ может использоваться для плавки/предварительного восстановления с целью максимального использования энергии топлива, при этом основной объем операции восстановления, а следовательно и образования никелевого сплава, происходит в печи отжига шлака. Другой вариант заключается в том, чтобы ввести стадию прокаливания, например, в печи прокалики перед ISASMELT™. Возможен дожиг отходящих газов ISASMELT™ в верхней части печи (с добавлением, при необходимости, некоторого объема воздуха, обогащенного кислородом) с передачей тепла поступающему питанию. Отходящие газы печи ISASMELT™ направляют в котел-утилизатор для утилизации тепла и обеспыливания с использованием электростатического осадителя, а затем в дымовую трубу. Получаемый жидкий ферро-никелевый сплав периодически выпускают из электропечи в: (i) систему грануляции или (ii) систему литья (в зависимости от спецификаций продукции) или (iii) в ковш для дальнейшего рафинирования, если это необходимо. Печь осаждения также периодически освобождают от отработанного шлака, который утилизируют или используют для регенерации тепла. Вся пыль, собранная системами очистки газов, возвращается в печь ISASMELT™.

Альтернативный вариант этой технологической схемы заключается в добавлении питания, содержащего серу (см. пунктирные линии и технологические блоки на рисунке 6), к общему объему питания печи ISASMELT™ для получения штейна с низким содержанием железа.

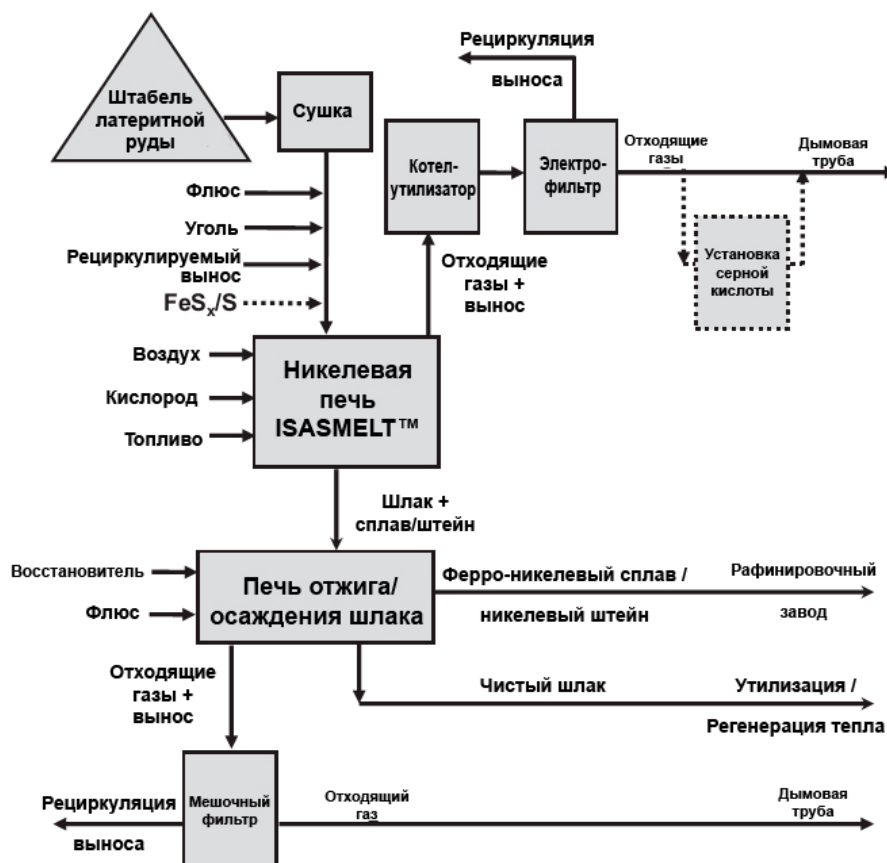


Рисунок 7. Технологическая схема установки ISASMELT™ для плавки латеритного никеля.

8. Испытания пилотной никелевой установки ISASMELT™

Недавно было проведено еще несколько испытаний пилотных установок ISASMELT™ для сбора дополнительных данных относительно возможности применения:

- (i) процесса ISASMELT™ для плавки никелевых/медных концентратов с получением либо первичного штейна с высоким содержанием железа, либо файнштейна;
- (ii) процесса ISACONVERT™ для конвертирования первичного штейна с высоким содержанием железа в файнштейн; и
- (iii) процесса ISASMELT™ для плавки латеритных никелевых руд с

получением ферро-никелевого сплава (как пилотные, так и лабораторные испытания).

Основные задачи этих испытаний заключались в том, чтобы определить состав получаемого никелевого штейна/сплава и шлака, коэффициенты распределения элементов между штейном/сплавом и шлаком (в частности, никеля и кобальта), а также получить шлаки для последующих испытаний отжига шлака.

8.1. Пилотная установка ISASMELT™

Пилотная установка ISASMELT™ состоит из стационарной цилиндрической печи с внутренним диаметром (по огнеупору) приблизительно 400 мм и высотой примерно 2000 мм. Печь выложена хромомагнетитовым огнеупорным кирпичом и теплоизоляционным кирпичом с высоким содержанием глинозема. Во время работы печь содержит расплавленную ванну с максимальной глубиной около 600 мм. Контролируемый объем воздуха и кислорода вводят в ванну с помощью фурмы 32 мм (1,25 дюйма) или 38 мм (1,5 дюйма) из нержавеющей стали. Известное количество питания подается на калиброванный ленточный конвейер с изменяемой скоростью ленты, который сбрасывает питание в желоб в верхней части печи, как правило, с расходом от 100 кг/ч до 250 кг/ч. Через фурму подается мазут для поддержания желаемой температуры ванны. В некоторых случаях может также добавляться однородный уголь. Расплавленные продукты могут выгружаться путем открытия одной из двух леток и сбора в чугунные ковши. Отходящие газы процесса охлаждаются и очищаются от выноса печи, а затем поступают в щелочной скруббер для удаления серосодержащих газов перед выпуском в атмосферу.

8.2. Испытания плавки никеля в печи ISASMELT™

В результате плавки никелевых концентратов были получены штейны с различным содержанием железа: от 1,6 % масс. до 20,0% масс. Цель испытаний заключалась в том, чтобы подтвердить гибкость процесса, позволяющую получать из концентрата штейн любого сорта в соответствии с

требованиями заказчика - от штейна первичной плавки (содержание железа выше 15% масс.) до файнштейна (содержание железа ниже 2-4% масс.). Типичный состав никелевого/медного концентрата представлен в таблице 1.

Таблица 1 - Состав никелевого/ медного концентрата.

Элемент	Среднее содержание (% масс.)
Ni	17.1
Cu	4.3
Co	0.4
Fe	31.0
S	27.0
SiO ₂	9.8
MgO	6.5
Al ₂ O ₃	1.0
CaO	0.7

Таблица 2 - Состав шлака ISASMELT™.

Элемент	Диапазон (% масс.)
Ni	0.8-7.0
Cu	0.3-1.5
Co	0.2-0.3
Fe	32.0-37.6
SiO ₂	25.6-34.9
MgO	6.7-10.3
Al ₂ O ₃	3.8-5.1
CaO	1.4-2.5

Концентрат был гранулирован вместе с заранее определенным количеством кремнеземистого флюса (в соответствии с планируемым составом шлака) и загружен в печь с расходом, равным 150 кг/ч влажного концентрата. Гранулированный уголь подавался на питающий конвейер с расходом, равным 5% расхода концентрата, в качестве дополнительного источника тепла плавки, учитывая коэффициент потери тепла в соответствии с размерами пилотной печи. Воздух и кислород для плавки подавались через отдельные ротаметры при соотношении с выходом 40-45% об. от общего обогащения кислородом. Мазут подавался по фурме для поддержания температуры ванны между 1310°C и 1450°C в зависимости от условий проведения испытаний.

Жидкие шлаки были получены при всех условиях проведения испытаний. Соотношение железа и кремния в шлаке ISASMELT™, полученном при испытаниях, составляло от 0,9 до 1,4. Состав шлаков ISASMELT™, полученных в ходе испытаний, показан в таблице 2.

Коэффициенты распределения никеля, определенные в соответствии формулой (1) ниже, показаны на рисунке 7 в зависимости от содержания железа в массовом штейне как для тестов ISACONVERT™, так и для тестов ISACONVERT™ (будет рассмотрено ниже в разделе, посвященном испытаниям процесса ISACONVERT™). Анализ массового штейна и шлака был выполнен на ложечных пробах, отобранных при выпуске продукта.

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

На рисунке 7 для сравнения представлены лабораторные результаты, описанные в Henao (2003), и результаты, полученные при отборе проб при продувке никель-медного штейна в конвертере Пирса-Смита на заводе Фальконбридж Xstrata Nickel (XNi) (Bustos et al. (1988)) и на заводе Томпсон Vale Inco (Diakow et al. (1975)). В исследовании Энао расплав штейна и шлака был уравновешен при 1500°C или 1600°C в течение определенного периода времени при заданном парциальном давлении кислорода (P_{O_2}) и диоксида серы (P_{SO_2}) (задается соотношениями S_2/SO_2 и CO/CO_2). В конце каждого равновесного теста для анализа отбирались охлажденные образцы штейна и шлака. Данные на заводах Фальконбридж XNi и Томпсон Vale Inco были получены путем отбора проб штейна и шлака в конвертере в конце каждой продувки. Интересно, что все данные на рисунке 7 очень хорошо согласуются.

Коэффициенты распределения кобальта, определенные в соответствии формулой (1), показаны на рисунке 8 в зависимости от содержания железа в штейне как для тестов ISACONVERT™, так и для тестов ISACONVERT™. На рисунке 8 для сравнения представлены лабораторные результаты, описанные в Font (1999), и, в соответствии с рисунком 7, промышленных данные, описанные в Bustos et al. (1988) и Diakow et al. (1975). В исследовании Font (1999) расплав штейна и шлака был уравновешен (как и в более поздней работе Henao (2003), указанной выше) в течение определенного периода времени при заданном парциальном давлении кислорода (P_{O_2}) и диоксида серы (P_{SO_2}) (задается соотношениями S_2/SO_2 и CO/CO_2). В конце каждого теста для анализа отбирались образцы застывшего штейна и шлака.

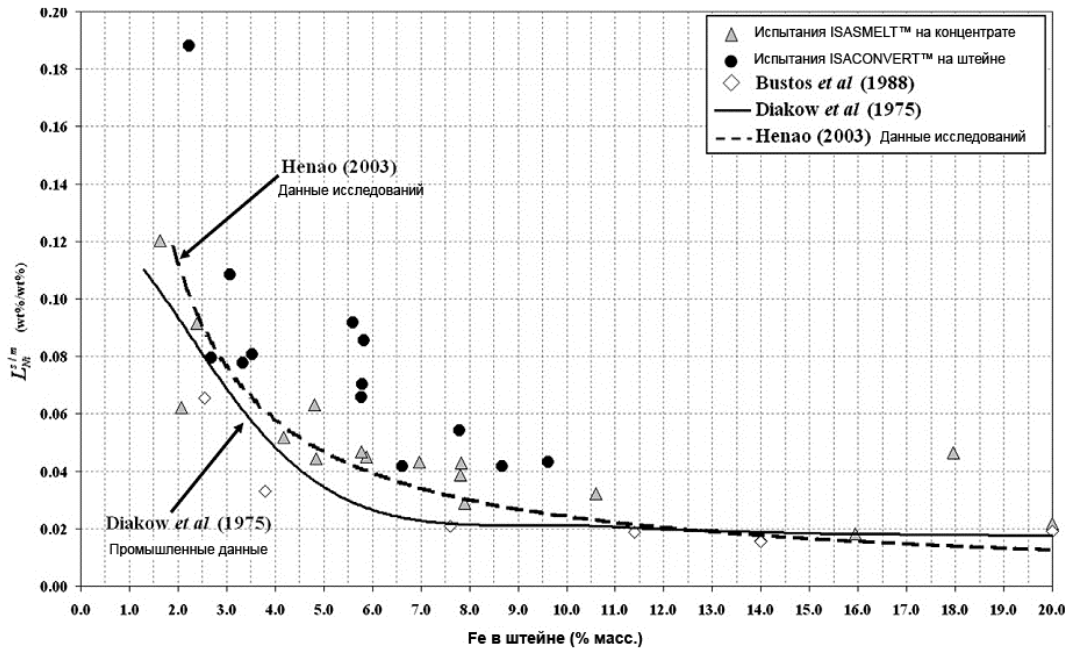


Рисунок 8. Содержание никеля в шлаке в зависимости от содержания железа в штейне ISASMELT™.

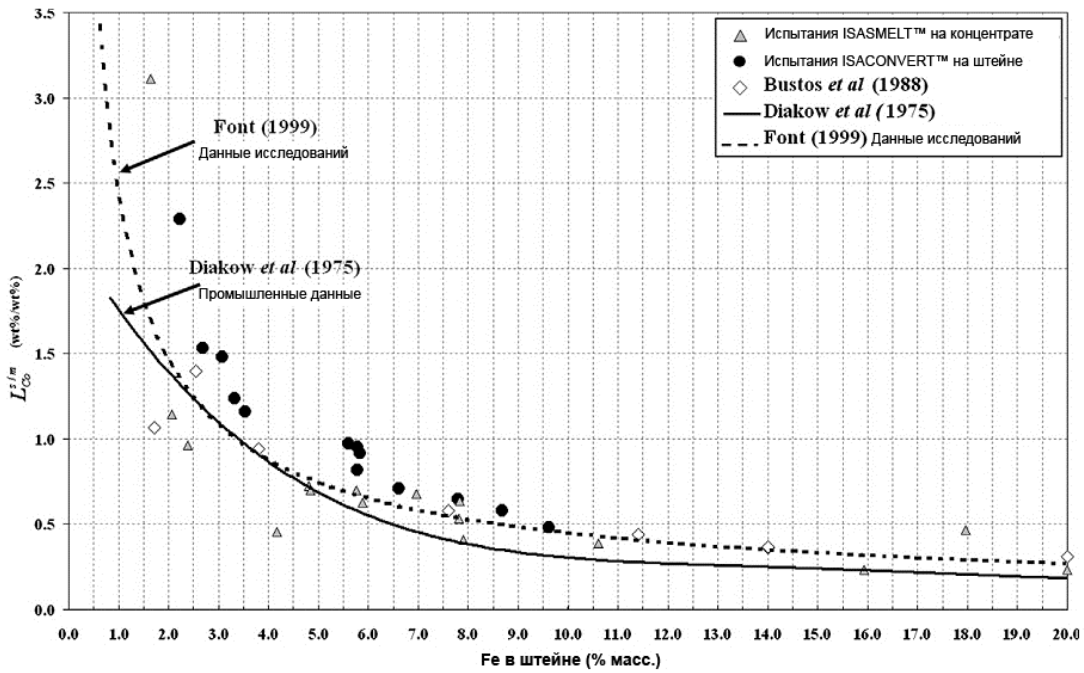


Рисунок 9. Распределение кобальта в зависимости от содержания железа в штейне ISASMELT™.

Данные заводов Фальконбридж XNi и Томпсон Vale Inco были получены тем же методом, что и данные, представленные на рисунке 7. Как и на рисунке 7, интересно отметить, что все данные о распределении кобальта между шлаком и штейном на рисунке 8 очень хорошо согласуются.

Из рисунков 7 и 8 следует, что по мере уменьшения содержания железа в штейне коэффициенты распределения как никеля, так и кобальта между шлаком и штейном увеличиваются. Это, как предполагается, связано с более высоким кислородным потенциалом (P_{O_2}) системы вследствие более низкого содержания железа в штейне. Далее, как отмечено, данные на рисунках 7 и 8 показывают, что результаты полупромышленной эксплуатации как ISASMELT™, так и ISACONVERT™ хорошо согласуются с ранее опубликованными данными по подобным системам штейна и шлака.

Чтобы представить информацию о температуре ликвидуса шлаков, полученных при испытаниях пилотных установок, для оценки фазовых равновесий в шлаковой системе NiO-MgO-FeO-Fe₂O₃-SiO₂-Al₂O₃-CaO был использован пакет FactSage™ (Bale et al. (2002)). Результаты расчетов в FactSage™ в следующих условиях: $P_{O_2} = 10^{-7.6}$ атм., Al₂O₃ = 4% масс., CaO = 1,5% масс. и MgO = 10% масс. представлены на псевдотроичной диаграмме NiO-FeO-SiO₂ на рисунке 9. Результаты расчета в FactSage™ ликвидуса и состава шлака при пилотных испытаниях были представлены графически путем приведения к осям псевдотроичной диаграммы. Можно заметить, что, как и ожидалось, все шлаки, полученные в ходе испытаний, находились в пределах области первичной фазы оливина (p.p.f.).

8.3. Испытания процесса ISACONVERT™ в конвертировании никеля

Цель испытаний конвертирования заключалась в том, что испытать процесс ISACONVERT™ в условиях конвертирования твердого штейна первичной плавки с высоким содержанием железа в файнштейн с низким содержанием железа. Типичный состав штейна первичной плавки представлен в таблице 3. Как будет показано ниже, штейны первичной плавки были успешно конвертированы в конечные файнштейны с содержанием железа от 2,2 до 9,6% масс..

При проведении испытаний штейн с заранее определенным количеством обогащенного кремнеземистого флюса (в соответствии с желаемым соотношением железа и кремнезема в шлаке) загружали в печь с расходом, равным 200 кг/ч необработанного твердого штейна. Гранулированный уголь добавляли к питанию с расходом, равным 5% от расхода штейна, из соображений, описанных выше в разделе о полупромышленной плавке. Воздух и кислород подавались через отдельные ротаметры при соотношении с выходом 35-40% об. от общего обогащения кислородом. Как и при плавке, мазут подавался по фурме для поддержания температуры ванны между 1310°C и 1380°C в зависимости от условий проведения испытаний.

Было установлено, что жидкие шлаки были получены при всех условиях проведения испытаний в диапазоне соотношений железа и кремнезема в шлаке ISACONVERT™ от 1,1 до 2,3. Состав шлаков ISACONVERT™, полученных в ходе испытаний, показан в таблице 4.

Таблица 3 - Состав никелевого штейна первичной плавки.

Элемент	Среднее содержание (% масс.)
Ni	44.5
Cu	9.7
Co	2.9
Fe	25.3
S	17.2
SiO ₂	0.3

Таблица 4 - Состав шлака ISACONVERT™.

Элемент	Диапазон (% масс.)
Ni	2.2-6.4
Cu	0.6-1.2
Co	1.3-2.5
Fe	37.8-48.0
SiO ₂	25.6-34.9

Как отмечено выше, содержание никеля в шлаке и коэффициент распределения кобальта между шлаком и штейном при испытаниях ISACONVERT™ показаны на рисунках 7 и 8. Испытания процесса ISACONVERT™ применительно к никелю были направлены на достижение низкого содержания железа в штейне. Как видно на рисунке 7, содержание Ni в шлаке значительно возрастает при снижении содержания Fe в штейне. Учитывая более окисленную среду при низком содержании железа в штейне,

шлак в этих условиях имеет более высокий ликвидус. Однако в данном случае Fe/SiO₂ можно скорректировать, чтобы понизить температуру ликвидуса.

Как и при испытаниях плавки, для оценки условий конвертирования и прогнозирования температур ликвидуса в упрощенной шлаковой системе NiO-FeO-Fe₂O₃-SiO₂-Al₂O₃-CaO-MgO был использован пакет FactSage™ (Bale et al. (2002)). Прогнозы были экстраполированы путем нормализации данных на псевдотроичную систему NiO-FeO-SiO₂ (рисунок 10). В расчетах FactSage™ были использованы следующие условия: P_{O₂} = 10^{-7,6} атм., Al₂O₃ = 2,5% масс., CaO = 1,5% масс. и MgO = 2,5% масс. Состав конечных шлаков ISACONVERT™ показан на рисунке 10 с расчетным ликвидусом. Как и шлаки ISASMELT™, большинство шлаков ISACONVERT™ находились в пределах области первичной фазы оливина (p.p.f.).

8.4. Испытания плавки латеритного никеля в печи ISASMELT™

Цель испытаний плавки латеритного никеля заключалась в том, чтобы показать возможность получения ферро-никелевого сплава как в лабораторных, так и в полупромышленных условиях. Испытания были проведены на рудах двух латеритных месторождений, имеющих разное географическое расположение. Типичный состав двух латеритных руды, использованных для проведения испытаний, приведен в таблице 5. Эти латеритные руды успешно прошли плавку в восстанавливающих условиях с получением ферро-никелевого сплава и шлака с низким содержанием никеля. При лабораторных испытаниях были получены ферро-никелевые сплавы, содержащие от 15 до 40% масс. Ni, при исходных соотношениях SiO₂/MgO и Fe/Ni 1,2-3,1 и 10-20, соответственно. В то же время, при пилотных испытаниях были получены ферро-никелевые сплавы, содержащие от 60 до 85% масс. Ni, при исходных соотношениях SiO₂/MgO и Fe/Ni 2,0-3,6 и 5-12, соответственно.

Таблица 5 - Состав питания при плавке латеритного никеля.

Элемент	Среднее содержание, лабораторные испытания (% масс.)	Среднее содержание, пилотные испытания (% масс.)
Ni	0.6-1.8	0.3-3.6
Fe	5.0-25	8.4-20.9
SiO ₂	22-46	40-46
MgO	12-25	12-22
Al ₂ O ₃	2.5-8.5	0.7-3.0
CaO	0.1-1.1	0.2-2.5

Лабораторные испытания проводились порционно в небольших тиглях (вмещающих около 1 кг расплава). После первоначальной плавки ванну восстанавливали постепенным добавлением угля. В связи с тем, что испытания имели предварительный характер, к руде добавляли флюс - высокосортный кремнезем и/или известняк, - чтобы обеспечить образование жидкого шлака. При этом учитывается, что на практике флюсование обычно не применяется. При проведении пилотных испытаний латеритные руды с добавлением кремнеземистого и известнякового флюса подавали в печь с расходом 150-200 кг руды в час. На конвейер также подавался однородный уголь для восстановления и в качестве источника части необходимой энергии плавки. Оставшуюся часть тепла, необходимого для поддержания ванны в расплавленном состоянии, обеспечивал мазут, подаваемый через фурму.

Было установлено, что жидкие шлаки были получены при всех условиях проведения испытаний; состав шлаков как лабораторных, так и пилотных испытаний приведен в таблице 6.

Тренд весового процентного содержания никеля в шлаке в ходе лабораторных испытаний по мере добавления угля в расплав в тигле показан на рисунке 11. Лабораторные испытания были направлены на получение выбранных сортов ферро-никелевых сплавов при низком содержании никеля в шлаке. Было также установлено, что уровень никеля в шлаке сильно зависит от времени осаждения. Представляется возможным оптимизировать рабочую температуру

и расход флюса для получения минимального времени осаждения и максимального извлечения ферро-никелевого сплава.

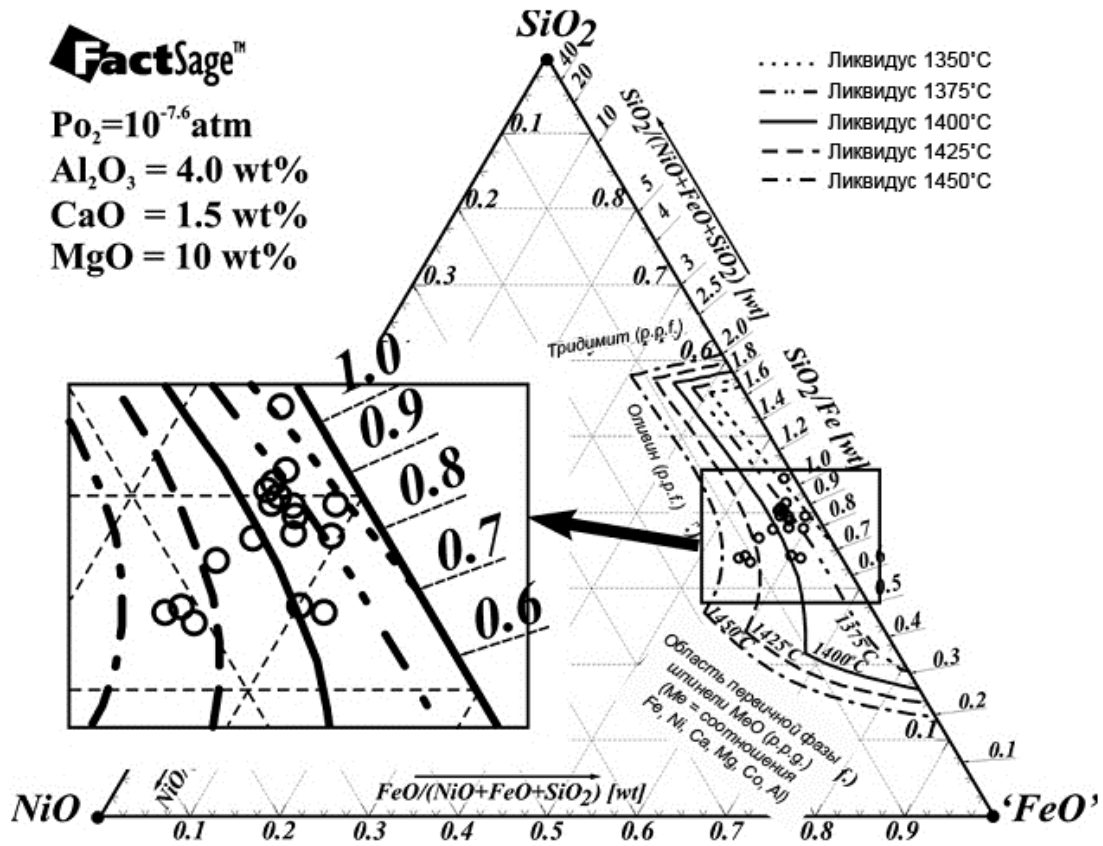


Рисунок 10. Ликвидус в системе NiO-FeO-SiO₂-Al₂O₃-CaO-MgO при P_{O₂} = 10^{-7.6} атм., Al₂O₃ = 4,0% масс., CaO = 1,5% масс. и MgO = 10% масс.

Таблица 6 - Состав шлака латеритного никеля в процессе ISASMELT™.

Элемент	Среднее содержание, лабораторные испытания (% масс.)	Среднее содержание, пилотные испытания (% масс.)
Ni	0.03-0.3	-
Fe	7.1-21	18-25
SiO ₂	35-50	44-50
MgO	20-27	14-18
Al ₂ O ₃	5.0-6.9	2.6-3.3
CaO	2.8-8.6	0.2-2.3

Для расчета температур ликвидуса в условиях шлака, образующегося при плавке латеритного никеля, был использован пакет FactSage™ (Bale et al. (2002)). Шлаки были представлены упрощенной системой FeO-Fe₂O₃-SiO₂-Al₂O₃-CaO-MgO-Cr₂O₃. Из-за низкого содержания оксида никеля в шлаке после восстановления никель не учитывался в расчетах FactSage™. Прогнозы были экстраполированы путем нормализации данных на псевдотроичную систему MgO-FeO-SiO₂ (рисунок 12). В расчетах FactSage™ были использованы следующие условия: P_{O₂} = 10^{-11,1} атм., Al₂O₃ = 4,0% масс., CaO = 0,2% масс. и Cr₂O₃ = 1,0% масс. Состав шлаков ISASMELT™ в условиях лабораторных и пилотных испытаний показан на рисунке 12 в виде серого круга вместе с расчетами ликвидуса в FactSage™. В зависимости от состава и температуры массового шлака, область первичной фазы шлаковой системы шлака в показанных границах может соответствовать пироксену, оливину или тридимиту/кристобалиту (см. рисунок 13).

9. Перспективы развития

Компания Xstrata Technology доказала, что процесс ISASMELT™ является перспективной технологией плавки первичной и вторичной меди и свинца. На медеплавильных и свинцовоплавильных заводах по всему миру в печах ISASMELT™ перерабатывается более 9 млн. тонн питания в год. Особенности, которые делают технологию ISASMELT™ привлекательной для использования в плавке меди и свинца, могут быть также применены при плавке и конвертировании никеля. Процесс ISASMELT™ уже успешно опробован в промышленном масштабе в качестве технологии плавки меди/никеля.

В настоящей работе описаны последние успешные лабораторные и пилотные испытания процессов ISASMELT™ и ISACONVERT™:

- (i) испытания процесса ISASMELT™ в качестве технологии получения штейна первичной плавки с высоким содержанием железа и фанштейна непосредственно из концентратов;
- (ii) испытания процесса ISACONVERT™ в качестве технологии получения фанштейна из штейна с высоким содержанием железа; и

(iii) испытания процесса ISASMELT™ в качестве технологии получения ферро-никелевых сплавов различных марок из никелевых латеритных руд.

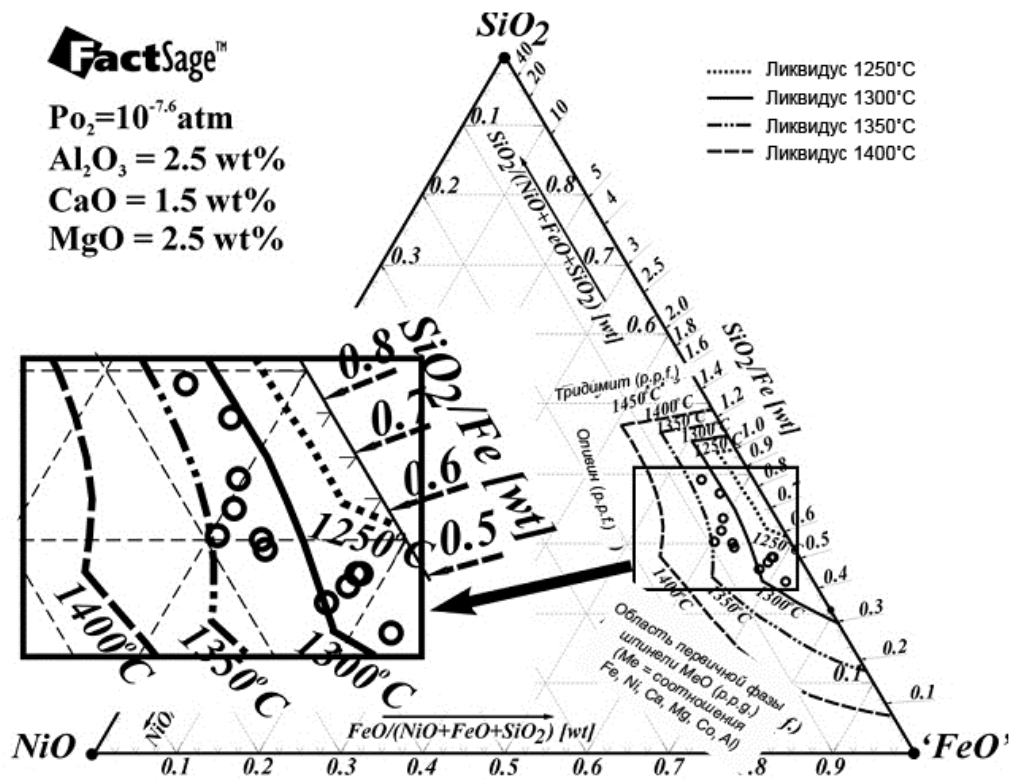


Рисунок 11. Ликвидус в системе NiO-FeO-SiO₂-Al₂O₃-CaO-MgO при $P_{O_2} = 10^{-7.6}$ атм., Al₂O₃ = 2,5% масс., CaO = 1,5% масс. и MgO = 2,5% масс.

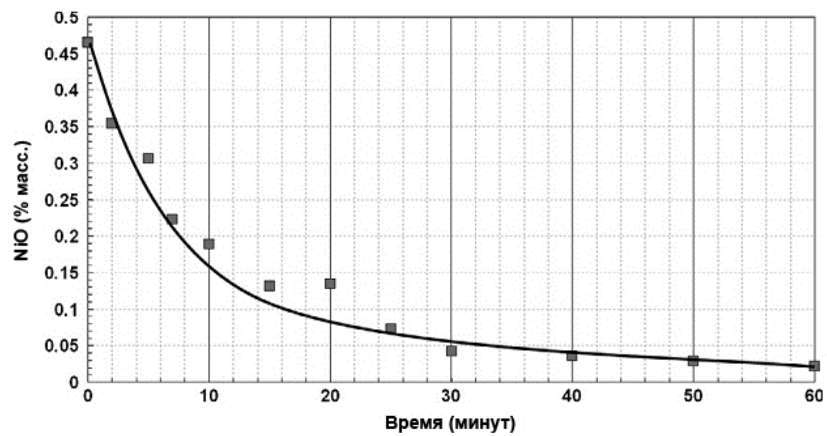


Рисунок 12. Восстановление никеля из шлаковой ванны при лабораторных испытаниях

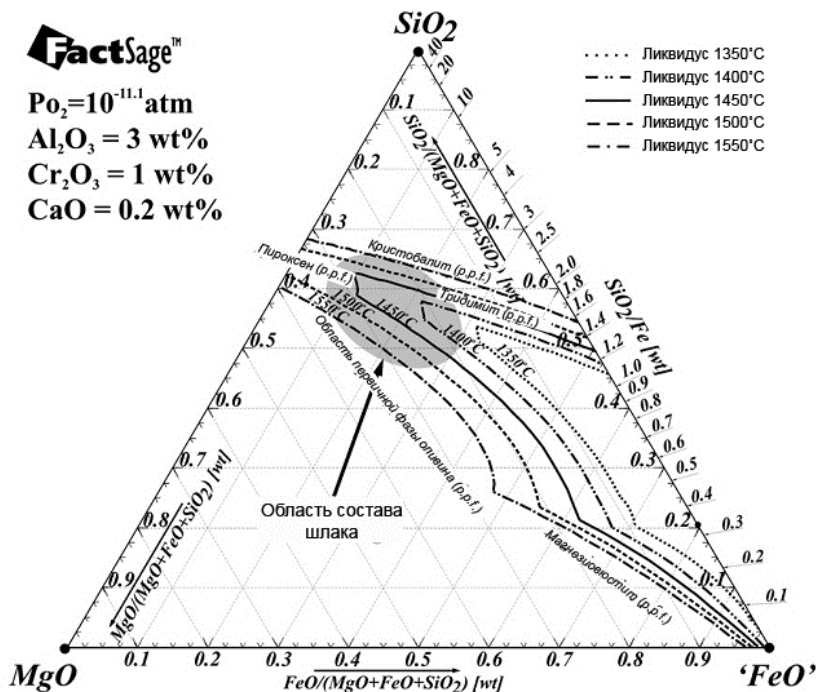


Рисунок 13. Ликвидус в системе FeO-Fe₂O₃-SiO₂-Al₂O₃-CaO-MgO-Cr₂O₃ при P_{O₂}=10^{-11.1} атм., Al₂O₃ = 4,0% масс., CaO = 0,2% масс. и Cr₂O₃ = 1,0% масс.

Для дальнейшего развития процесса ISASMELT™ для никелевой промышленности могут потребоваться улучшения существующей конструкции печи, в частности:

- (i) Охлаждение печи - эксплуатация при температурах выше 1300°C требует наличия систем охлаждения печи, обеспечивающих достаточно долгую продолжительность кампании;
- (ii) Блоки выпускного отверстия - для выпуска никелевого штейна/сплава необходимо доработать блоки выпускного отверстия;
- (iii) Пневматическая подача - применение сухого способа подачи концентрата через фурму ISASMELT™, чтобы свести к минимуму потребность в топливе; и
- (iv) Оптимизация процесса отжига шлама ISASMELT™ для максимального извлечения ценных металлов.

В настоящее время ведутся работы, необходимые для внесения этих усовершенствований.

Благодарности

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

Список использованной литературы

Arthur, P.S., Hunt, S.P., 2005. ISASMELT™ - 25 Years of Continuous Evolution. In: Nilmani, M., Rankin, W.J. (Eds.), John Floyd International Symposium on Sustainable Developments of Metals Processing, NCS Associates, Melbourne, Australia, pp. 73-94.

Bakker, M.L., Alvear, G.R.F., Kreuh, M., 2009. ISASMELT TSL Making a splash for nickel. In: The 48th Annual Conference of Metallurgists 2009. Pyrometallurgy of Nickel and Cobalt, Sudbury, Canada, 2009.

Bale, C.W., Chartrand, P., Deckerov, S.A., Eriksson, G., Hack, K., Mahfoud, R.B., Melançon, J., Pelton, A.D., Petersen, S., 2002. CALPHAD 26, 189-228.

Burford, B., 2009. The ISASMELT™ Technology Package: Over 30 Years of Innovation, AusIMM Bulletin, No. 1, February 2009, pp. 26-30.

Bustos, A.A., Ip, S.W., O'Connell, G., Kaiura, G.H., Toguri, J.M., 1988. In: Tyroler, G.P., Landolt, C.L. (Eds.), Converting Simulation at Falconbridge Limited, Extractive Metallurgy of Nickel and Cobalt, The Metallurgical Society, Inc., AIME, USA, pp. 335-354.

Diakow, J.S., Mak, Y.F., OIT, R.G., 1975. Metallurgy of the Converting Process in the Thompson Smelter, Paper Presented to the 14th Annual Conference of Metallurgists, Edmonton, Alberta, August 1975, The CIM, Montreal, Quebec, Canada, 1975.

Donald, J.R., Warner, A.E.M., Dalvi, A.D., Scholey, K., Ross, A., Harris, C., 2005. In: Ross, A., Warner, T., Scholey, K., (Eds.), Risks and Opportunities in Continuous Converting for Nickel at Inco, Converter and Fire Refining Practices, The Minerals, Metals & Materials Society, USA, 2005, pp. 295-307.

Edwards, J.S., Alvear, G.R.F., 2007. Converting using ISASMELT™ Technology,

Copper 07, vol. III, Book 2: The Carlos Diaz Symposium on Pyrometallurgy. In: Warner, A.E.M., Newman, C.J., Vahed, A., George, D.B., Mackey, P.J., Warczok, A. (Eds.), MetSoc, Toronto, CA, 2007, CIM, Montreal, 2007, vol. 3, Book 2, pp. 17- 28.

Font, J.M., 1999. Phase equilibrium and minor elements distribution between slag and matte phases in nickel smelting, Ph.D. Thesis, Tohoku University, 1999.

Henao, H.M.Z., 2003. Phase equilibrium between Ni-S or Ni-Fe melt and slag in nickel smelting, Ph.D. Thesis, Tohoku University, 2003.

Makinen, T., Taskinen, P., 2006. The State of the Art in Nickel Smelting: Direct Outokumpu Nickel Technology. In: Kongoli F., Reddy, R.G., (Eds.), Sohn International Symposium Advanced Processing of Metals and Materials, The Minerals, Metals & Materials Society, USA, 2006, pp. 313-325.

Nikolic, S., Edwards, J.S., Burrows, A.S., Alvear, G.R.F., 2009. 1SACONVERT™ - TSL Continuous Copper Converting Update. In: Kapusta, J. and Warner, T. (Eds.), In: International Peirce-Smith Converting Centennial: Held During TMS 2009 Annual Meeting and Exhibition. The Minerals, Metals & Materials Society, USA, February 15-19, pp. 407-414.

Victorovich, G.S., 1993. Oxygen Flash Converting for Production of Copper, Extractive Metallurgy of Copper, Nickel and Cobalt. In: Reddy, R.G., Weizenbach, R.N., (Eds.), In: Proceedings of the Paul E. Queneau International Symposium. The Metallurgical Society, Inc., AIME, USA, 1993, vol. 1, pp. 501- 529.

Warner, A.E.M., Diaz, C.M., 2003. An Overview of the Metallurgy of Nickel-Copper Matte Converting. In: Kongoli, F., Itagaki, K., Yamauchi, C., Sohn, H.Y., (Eds.), Yazawa International Symposium Metallurgical and Materials Processing: Principles and Technologies. The Minerals, Metals & Materials Society, USA, 2003, pp. 113-129.

Warner, A.E.M., Diaz, C.M., Dalvi, A.D., Mackey, P.J., Tarasov, A.V., 2006. JOM World Nonferrous Smelter Survey Part III: Nickel: Laterite, JOM, April 2006, pp. 11-20.

Warner, A.F.M., Diaz, C.M., Dalvi, A.D., Mackey, P.J., Tarasov, A.V., Jones, R.T., 2007. JOM World Nonferrous Smelter Survey Part IV: Nickel: Sulfide, JOM, April 2007, pp. 58-72.