

ТЕХНОЛОГИЯ ВЫПЛАВКИ МЕДИ ISASMELT: УДАЛЕНИЕ ПРИМЕСЕЙ

Жерардо Р. Алвеар¹, Саймон П. Хант¹, Банци Чжан²

¹Xstrata Technology, 87 Wickham Terrace, Brisbane, 4000, Australia
isasmelt@xstrata.com.au

²Yunnan Copper Co., Ltd., Wang Jia Qiao, Wuhua District, Kunming 650102, P.R. China

Ключевые слова: ISASMELT, мышьяк, распределение, испарение примесей

Автореферат

Способность эффективно удалять примеси, содержащиеся в концентратах, является ключевым критерием при выборе технологии выплавки меди для новых или модернизируемых производств. Желательно, чтобы испарение таких примесей, как мышьяк и сурьма, происходило как можно раньше в процессе плавки, и желательно в плавильной печи, чтобы примеси не влияли на последующие технологические операции.

Технология ISASMELTTM позволяет эффективно удалять примеси путем интенсивного испарения. Этому способствуют такие особенности технологии, как интенсивное перемешивание ванны, а также гибкость технологического процесса, позволяющая оператору выбирать оптимальное для отделения примесей содержание штейна, и положительная роль влажности питания.

В данной работе рассматривается распределение второстепенных примесей в медеплавильной печи ISASMELTTM. В первой части работы представлены данные о распределении примесей As, Sb, Pb, Zn и Co в печи ISASMELTTM на медеплавильном заводе Маунт Айза. Во второй части, исходя из данных, полученных на заводе, и соображений термодинамики, рассматриваются возможности применения технологии ISASMELTTM для переработки сложных концентратов.

Введение

Xstrata является международной компанией горно-добывающей и перерабатывающей промышленности, производящей преимущественно медь, ферросплавы, уголь и цинк. Рудники, металлургические и рафинировочные заводы Xstrata расположены в Австралии, ЮАР, Испании, Германии, Англии и Аргентине, а главный офис компании находится в Швейцарии. В 2003 году Xstrata приобрела австралийскую компанию MIM Holdings Limited (MIM) вместе с технологиями, разработанными MIM на протяжении более чем 80 лет эксплуатации предприятий по добыче и производству меди, свинца и угля в Австралии и Европе. Одной из этих технологий была технология ISASMELTTM.

ISASMELTTM - это простая и экономически эффективная технология выплавки цветных металлов. В настоящее время технологию развивает, продает и поддерживает компания Xstrata Technology. Данная технология относится к числу самых эффективных и гибких пирометаллургических технологий среди существующих.

Разработка технологии ISASMELTTM от пилотной установки до промышленного применения была проведена в 1980-е и 1990-е годы на медеплавильном заводе MIM Маунт Айза в Австралии. Она быстро стала ключевым компонентом металлургических предприятий MIM. В настоящее время технология применяется в промышленном масштабе восемью компаниями в семи странах мира, а в 2006 году ожидается пуск еще двух заводов в Замбии и Перу. История разработки технологии описана в ряде публикаций [1-9].

Технология способна перерабатывать различные виды питания, от минеральных концентратов до металлолома и вторичных материалов металлургического производства. Требования к подготовке питания просты и, в отличие от некоторых других технологий выплавки меди, не предполагают сушки концентрата.

Важнейшим элементом технологии ISASMELTTM является специальная фурма ISASMELTTM. Фурма вставляется в ванну с расплавом печи ISASMELTTM, представляющей собой стационарную вертикальную емкость с огнеупорной футеровкой. Фурма используется для продувки расплава воздухом (или воздухом, обогащенным кислородом), создающей высокую турбулентность в ванне с расплавом. Слой шлака, застывшего на наружной поверхности фурмы ISASMELTTM, защищает ее от воздействия расплава. Установленный внутри фурмы завихритель увеличивает скорость технологического воздуха внутри фурмы, таким образом увеличивая интенсивность теплопередачи между сталью корпуса фурмы и струей технологического воздуха. Завихритель имеет особую конструкцию, обеспечивающую минимальное падение давления, что позволяет поддерживать общее падение давления в фурме на уровне не выше 80 кПа. Поэтому для подачи технологического воздуха в фурму достаточно одноступенчатого нагнетателя. Фурма имеет простую и надежную конструкцию. Текущий ремонт фурмы занимает не более 6 часов. Срок службы фурмы составляет, как правило, 10 - 20 дней.

Питание, загружаемое в турбулентную ванну сверху, быстро вступает в реакцию, что обеспечивает чрезвычайно высокую производительность при относительно небольшом объеме ванны. На медеплавильной печи ISASMELTTM, установленной на заводе Маунт Айза, за час подачи медьсодержащего питания (концентрат, оборотные материалы, иные

внутренние оборотные материалы завода) выплавлялось до 194 т продукта при полном объеме ванны около 15 м³.

С момента начала разработки технологии ISASMELTTM была отмечена ее способность эффективно удалять примеси за счет интенсивного испарения^(3, 4). Этому способствуют такие особенности технологии, как интенсивное перемешивание ванны, а также гибкость технологического процесса, позволяющая оператору выбирать оптимальное для отделения примесей содержание штейна, и положительная роль влажности питания.

В настоящей работе представлены данные о распределении примесей в медеплавильной печи ISASMELTTM на заводе Маунт Айза. Затем, исходя из данных о распределении примесей, полученных на заводе Маунт Айза, дополнительных эксплуатационных данных печи ISASMELTTM, установленной на предприятии Yunnan Copper Corporation, и соображений термодинамики, рассматриваются возможности применения технологии ISASMELTTM для переработки сложных концентратов.

Медеплавильный завод Маунт Айза

Описание завода

На рисунке 1 показана технологическая схема медеплавильного завода ISASMELTTM (CIP) Маунт Айза. Цех первичной плавки состоит из системы хранения и подачи питания, печи ISASMELTTM, системы отведения печных газов и двух вращающихся миксеров (RHF).

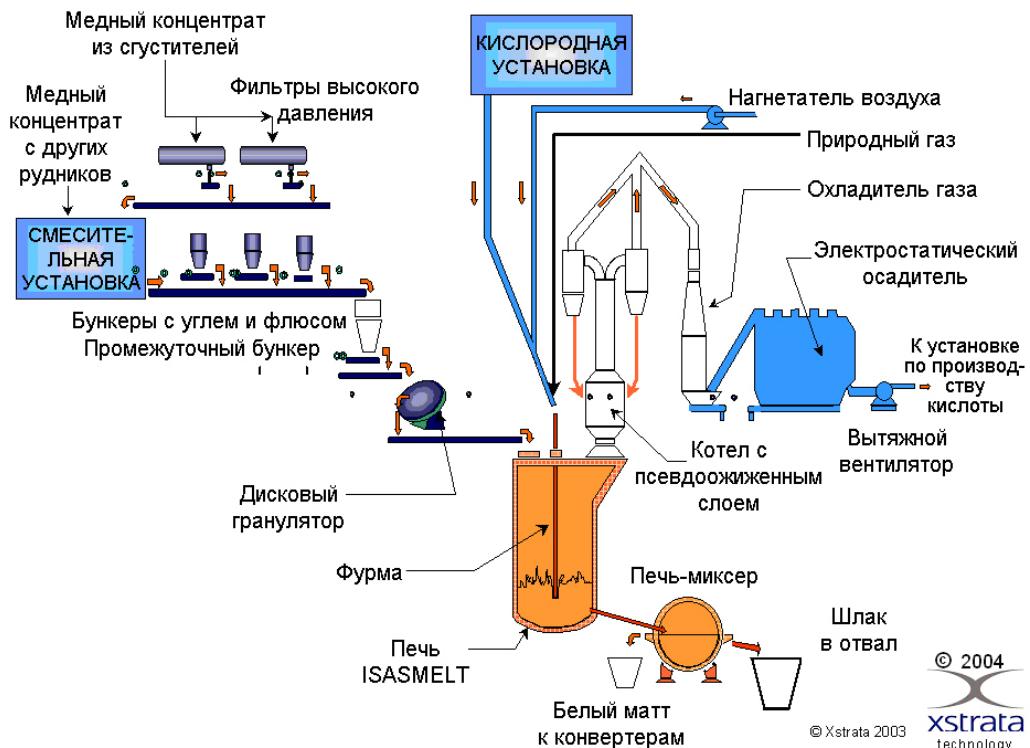


Рисунок 1 - Технологическая схема медеплавильного завода ISASMELTTM Маунт Айза.

В таблице I показаны характерные технологические параметры медеплавильного завода CIP Маунт Айза. Медеплавильная печь ISASMELTTM позволяет переплавлять примерно 1 млн. тонн медного концентрата в год при стандартной интенсивности питания 170 т/ч (в пересчете на сухое питание без учета флюса), содержании влаги 8% и стандартном отношении SiO₂/Fe 0,85. Стандартное содержание меди в штейне составляет 60%. Содержание кислорода в обогащенном воздухе, подаваемом через фурму, составляет 60%. Температура в ванне поддерживается на уровне 1180°C +/- 5°C.

В таблице II показан обычный материальный состав питания печи ISASMELTTM на заводе Маунт Айза. Как можно заметить, основной примесью в концентрате является свинец, содержание которого составляет, как правило, 2 000 м.д. Содержание цинка, кобальта и мышьяка составляет обычно 1 000 - 1 500 м.д. Содержание висмута близко к 100 м.д., сурьмы - к 30 м.д.

Таблица I - Характерные технологические параметры медеплавильной печи ISASMELTTM на заводе Маунт Айза

Характеристика	Значение	Ед. изм.
Максимальная интенсивность питания	194	т/ч (сухое вещество)
Стандартная интенсивность питания	170	т/ч (сухое вещество)
Среднее содержание Cu в концентрате	25.8	%
Содержание влаги	7 - 8	%
Средняя интенсивность подачи кремнеземистого флюса	3.7	т/ч (сухое вещество)
Средняя интенсивность подачи угля	1.2	т/ч (сухое вещество)
Средняя интенсивность подачи оборотного материала	3.0	т/ч (сухое вещество)
Среднее содержание меди в штейне	59.5	%
Отношение SiO ₂ /Fe в шлаке	0.85 - 0.90	
Средний расход воздуха в фурме	11.9	нм ³ /с
Содержание кислорода	60	%
Температура ванны	1180	°C

Таблица II - Характерные технологические параметры медеплавильной печи ISASMELTTM
на заводе Маунт Айза

Хим. элемент/соединение	Характерное значение	Ед. изм.
Cu	25.8	%
Fe	24.0	%
S	25.0	%
Pb	2,000	м.д.
Zn	1,000	м.д.
Co	1,100	м.д.
As	1,500	м.д.
Sb	30	м.д.
Bi	120	м.д.
SiO ₂	16	%
CaO	0.8	%
MgO	1.0	%
Fe ₃ O ₄	1.0	%
Al ₂ O ₃	0.9	%

Распределение примесей

Распределение As, Pb, Zn и Co между штейном, шлаком и газообразной фазой в печи ISASMELTTM было определено на основании данных ежемесячного масс-баланса и среднего химического состава, собираемых на заводе с 2002 года. Содержание меди в питании на протяжении всего периода было практически постоянным. Доля примесей в газообразной фазе определялась отношением масс-балансов примесей в питании и в конденсате. Применительно к Bi и Sb, из-за низкой концентрации в питании для точного определения концентрации в расплаве измерения проводились на протяжении четырех дней.

На рисунке 2 показано распределение мышьяка между штейном, $D_{штейн}$, шлаком, $D_{шлак}$, и газообразной фазой, $D_{газ}$, при содержании меди в штейне 60%, температуре ванны 1180°C, содержании кислорода в обогащенном воздухе 60% и содержании мышьяка в питании от 0,10% до 0,26%. Символы соответствуют расчетным значениям (круг - штейн, треугольник - шлак), а кривые обозначают регрессию, построенную согласно расчетным значениям (сплошная линия - штейн, пунктирная линия - шлак). Испарение мышьяка увеличивается с увеличением содержания мышьяка в питании, достигая значений,

близких к 90%. Переход мышьяка в шлак уменьшается по мере увеличения содержания мышьяка в питании.

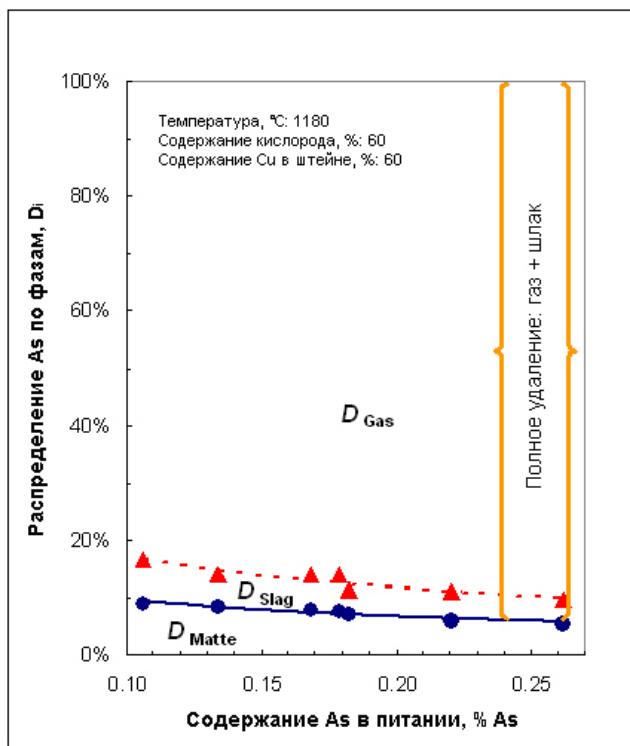


Рисунок 2 - Распределение мышьяка между штейном, шлаком и газообразной фазой (содержание Cu в штейне: 60%, $T: 1180^{\circ}\text{C}$, содержание кислорода: 60%, содержание As в питании: 0,10 и 0,26%).

На рисунке 3 показана зависимость между содержанием мышьяка в питании и содержанием мышьяка в медном штейне (сплошная линия, основная ось у) и в шлаке (пунктирная линия, дополнительная ось у). Как можно заметить, содержание мышьяка в штейне увеличивается по мере увеличения содержания мышьяка в питании. Аналогичная зависимость наблюдается применительно к содержанию мышьяка в шлаке.

На рисунке 4 показано расчетное распределение свинца между штейном, шлаком и газообразной фазой при содержании меди в штейне 60%, температуре ванны 1170°C, содержании кислорода в обогащенном воздухе 60% и содержании свинца в питании от 0,10% до 0,26%. Символы соответствуют определенным значениям распределения, а кривые соответствуют кривым регрессии, построенным согласно определенным значениям. Полученные результаты указывают на небольшое уменьшение перехода свинца в штейн по мере увеличения содержания свинца в питании. Достигнутые показатели удаления свинца составляют 35-40%.

На рисунке 5 показана зависимость между содержанием свинца в питании и содержанием свинца в штейне (сплошная линия) и в шлаке (пунктирная линия). Содержание свинца в штейне и шлаке увеличивается по мере увеличения содержания свинца в питании.

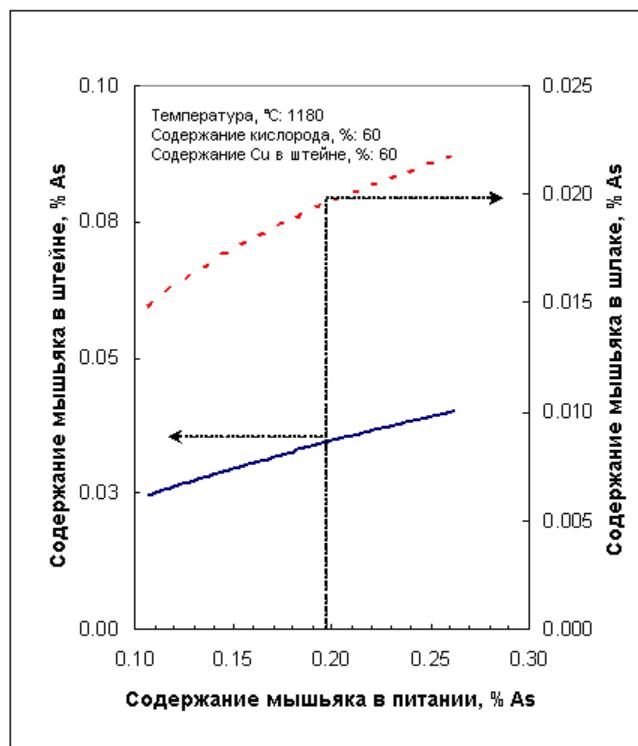


Рисунок 3 - Зависимость между содержанием мышьяка в питании и содержанием мышьяка в медном штейне (сплошная линия, основная ось у) и в шлаке (пунктирная линия, дополнительная ось у)

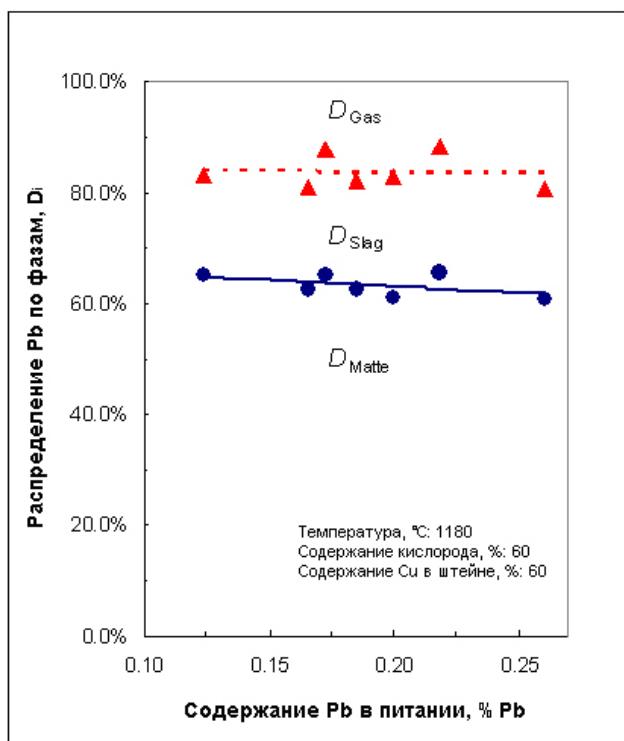


Рисунок 4 - Распределение свинца между штейном, шлаком и газообразной фазой (содержание Cu в штейне: 60%, T: 1180°C, содержание кислорода: 60%, содержание Pb в питании: 0,10 и 0,26%.

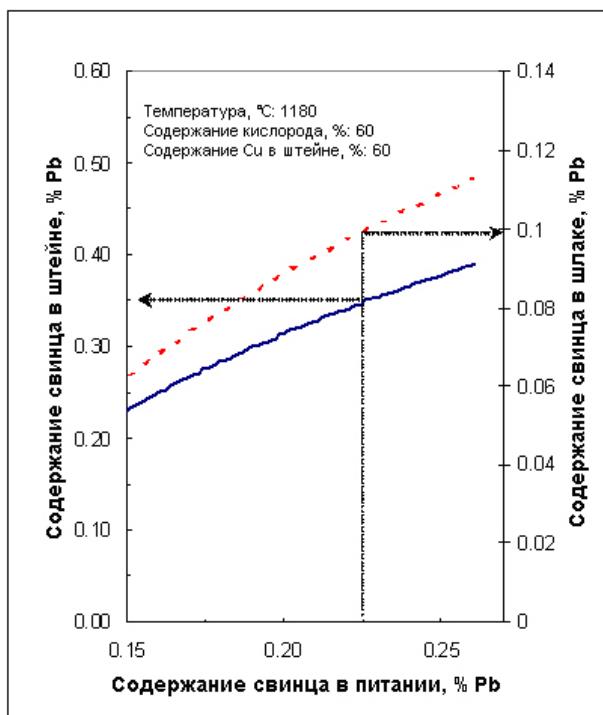


Рисунок 5 - Зависимость между содержанием свинца в питании и содержанием свинца в медном штейне (сплошная линия, основная ось у) и в шлаке (пунктирная линия, дополнительная ось у)

На рисунке 6 показана зависимость между содержанием цинка в питании и распределением цинка между штейном, шлаком и газообразной фазой при содержании меди в штейне 60%, температуре ванны 1180°C, содержании кислорода в обогащенном воздухе 60% и содержании цинка в питании от 0,025% до 0,175%. Символы соответствуют расчетным значениям (круг - штейн, треугольник - шлак), а кривые обозначают регрессию, построенную согласно расчетным значениям (сплошная линия - штейн, пунктирная линия - шлак). Распределение цинка между штейном, шлаком и газообразной фазой остается неизменным при увеличении содержания цинка в питании. Цинк преимущественно переходит в шлак. На рисунке 7 показана зависимость между содержанием цинка в питании и содержанием цинка в штейне (сплошная линия) и в шлаке (пунктирная линия).

На рисунке 8 показана зависимость между содержанием кобальта в питании и распределением кобальта между штейном, шлаком и газообразной фазой при содержании меди в штейне 60%, температуре ванны 1170°C, содержании кислорода в обогащенном воздухе 60% и содержании кобальта в питании от 0,006% до 0,012%. Символы соответствуют расчетным значениям (круг - штейн, треугольник - шлак), а кривые обозначают регрессию, построенную согласно расчетным значениям (сплошная линия - штейн, пунктирная линия - шлак). Расчетное распределение указывает на то, что переход кобальта в штейн и шлак увеличивается по мере увеличения его содержания в питании. На рисунке 9 показана зависимость между содержанием кобальта в питании и содержанием кобальта в штейне (сплошная линия) и в шлаке (пунктирная линия).

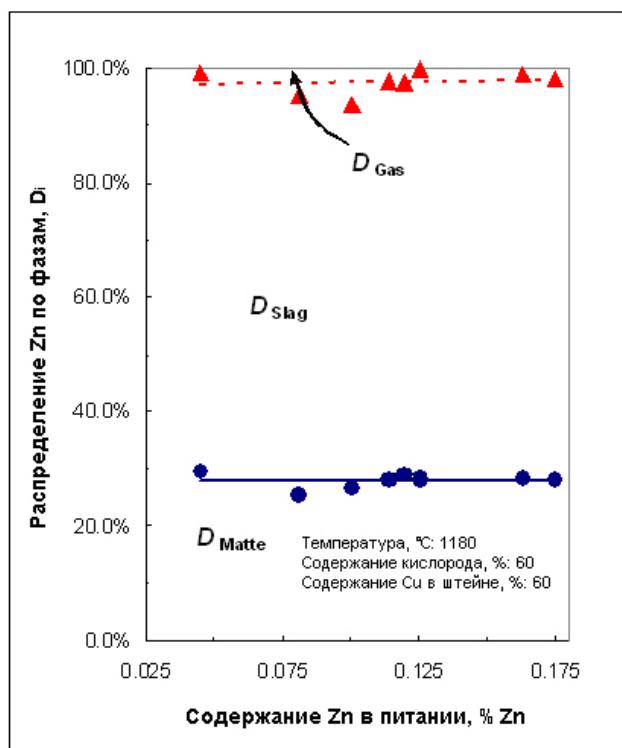


Рисунок 6 - Распределение цинка между штейном, шлаком и газообразной фазой
 (содержание Cu в штейне: 60%, Т: 1180°С, содержание кислорода: 60%,
 содержание Zn в питании: 0,025 и 0,175%).

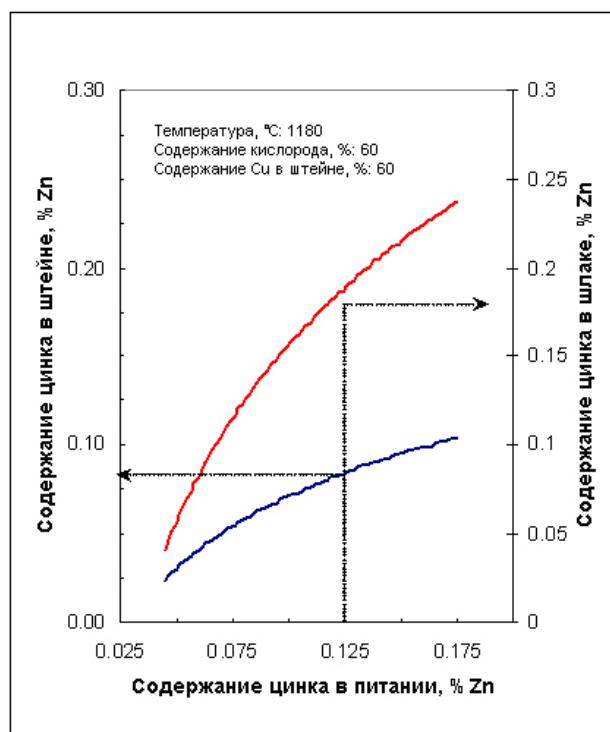


Рисунок 7 - Зависимость между содержанием цинка в питании и содержанием цинка в медном штейне (сплошная линия, основная ось у) и в шлаке (пунктирная линия, дополнительная ось у)

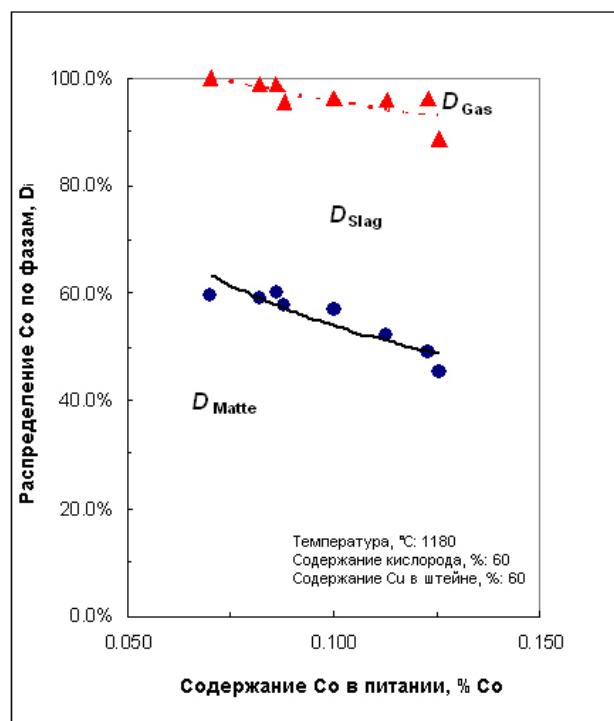


Рисунок 8 - Распределение кобальта между штейном, шлаком и газообразной фазой (содержание Cu в штейне: 60%, Т: 1180°С, содержание кислорода: 60%, содержание Co в питании: 0,006 и 0,012%.

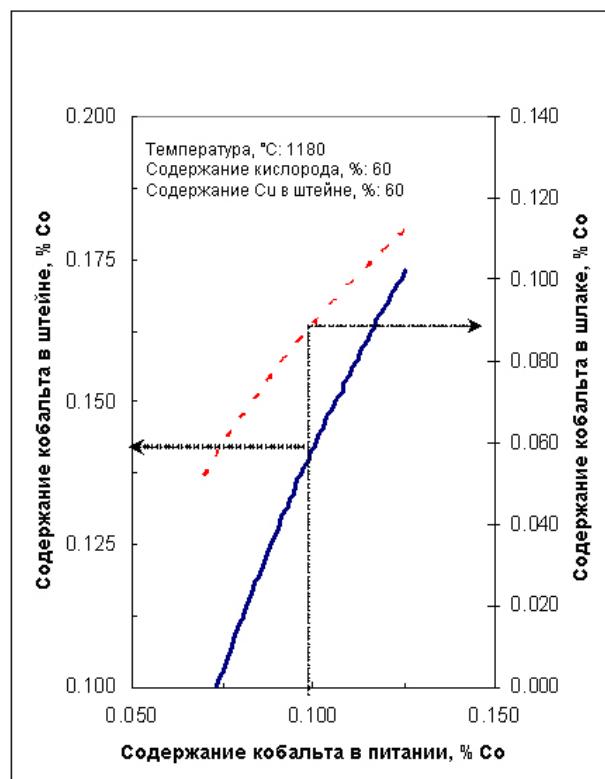


Рисунок 9 - Зависимость между содержанием кобальта в питании и содержанием кобальта в медном штейне (сплошная линия, основная ось у) и в шлаке (пунктирная линия, дополнительная ось у)

Концентрация сурьмы в питании печи ISASMELTTM на заводе Маунт Айза, как правило, слишком мала для получения точных данных о распределении. Для определения его концентрации в штейне и шлаке требуется химический анализ с точностью до 1 м.д. Чтобы определить распределение сурьмы и висмута в печи ISASMELTTM, были выполнены две программы измерений на медеплавильном заводе Маунт Айза в Австралии, и на заводе Yunnan Copper Corporation (YCC) в Китае. В таблице 3 показаны эксплуатационные параметры каждой из печей ISASMELTTM и их значения.

Таблица III - Распределение сурьмы между штейном, шлаком и газообразной фазой на заводах Маунт Айза и YCC

Характеристика	Ед. изм.	Маунт Айза	YCC
Интенсивность подачи концентрата	т/ч	140.0	103.0
Содержание Cu в концентрате	%	23.0	22.5
Содержание влаги	%	8.0	10.0
Содержание кислорода, O ₂	%	61.2	50.0
Содержание меди в штейне	%	60.9	55.0
Содержание Sb в питании	%	0.0035	0.0150
<i>Распределение Sb</i>			
<i>D_{штейн}</i>	%	19.0	31.0
<i>D_{шлак}</i>	%	9.0	3.0
<i>D_{газ}</i>	%	72.0	66.0

Испарение сурьмы составляет от 66 до 72%. В работе Итагаки сообщается об испарении сурьмы 62% при продувке воздухом [10]. Эти показатели выше обычных ожидаемых показателей испарения. Однако испарению способствует увеличение объема газа благодаря содержанию влаги в питании.

ISASMELTTM при плавке концентратов с высоким содержанием мышьяка

При выплавке меди необходимо эффективное удаление примесей. Это требование связано с минералогической природой сульфидных руд, которые, как правило, помимо жильных минералов содержат целый ряд примесей.

Рассматривая возможность применения пирометаллургических технологий в новых проектах, необходимо оценить способность технологии испарять или удалять в шлак

примеси, содержащиеся в медных концентратах. Кроме того, особое внимание следует уделять процессам очистки и осаждения шлака, при которых возможно повторное загрязнение полученного медного штейна из-за восстановительных условий в реакторе, используемом для очистки шлака.

Возможным решением этой проблемы, позволяющим получать медный штейн приемлемого качества на этапе конвертерной плавки, является использование печи ISASMELT™ для плавки концентратов и миксера для гравитационного разделения штейна и шлака. Процесс осаждения, происходящий в миксере, может протекать в нейтральных условиях с добавлением минимального количества восстановителя. Это позволяет свести к минимуму загрязнение медного штейна примесями, а следовательно, обеспечивает эффективное удаление примесей в газообразную фазу (в печи ISASMELT™) и в шлак.

Как было показано на рисунке 2, печь ISASMELT™ отличается очень высокими показателями перехода мышьяка в газообразную фазу. В таблице 4 сравниваются показатели удаления мышьяка в печи ISASMELT, печи взвешенной плавки, при использовании процесса Mitsubishi и конвертера Teniente.

Таблица IV - Удаление мышьяка при использовании различных технологий выплавки меди

Технология	Ист.	As в питании, % As	Содержание кислорода, %O ₂	Содержание меди в штейне, % Cu	D _{штейн}	D _{шлак}	D _{газ}
Конвертер Teniente	[11]	0.30	36	70 - 75	35	13 - 38	75 - 42
Процесс Mitsubishi	[12]	0.30	48	68%	19.0	27.2	53.8
Печь взвешенной плавки	[11]	0.30	60	60 - 65	35	32	33
ISASMELT™	HP*	0.26	60	60	5.5	4.2	90.3

* Настоящая работа.

Хотя содержание штейна, температура и содержание кислорода отличаются, можно сделать следующие выводы:

- Несмотря на меньшее содержание меди в штейне и большее содержание кислорода в обогащенном воздухе, печь ISASMELT™ отличается наиболее высоким показателем перехода мышьяка в газообразную фазу
- Высокий показатель перехода мышьяка в шлак с последующим пирометаллургическим извлечением меди при восстановительных условиях, как в

конвертерной технологии Teniente, приведет к повторному загрязнению медного штейна

- При применении печи ISASMELTTM даже осаждение при восстановительных условиях в электропечи не приведет к значительному повторному загрязнению медного штейна мышьяком благодаря очень малому переходу в шлак.

Высокий показатель испарения мышьяка в печи ISASMELTTM предположительно связан с интенсивным перемешиванием ванны, обеспечивающим тщательное перемешивание штейна и газообразной фазы, способствующее насыщению газообразной фазы мышьяком. Кроме того, присутствие влаги в питании увеличивает объем газа, доступного для извлечения мышьяка из ванны.

Пригодность печи ISASMELTTM к переработке концентратов с высоким содержанием мышьяка была оценена на основании данных, полученных на заводе Маунт Айза. В таблице 5 показано ожидаемое распределение мышьяка в печи ISASMELTTM в зависимости от содержания мышьяка в питании при содержании меди в штейне 60%, кислорода 60% и температуре 1180°C (если принять содержание меди в концентрате равным 25%). Данные таблицы 5 указывают на то, что печь ISASMELTTM идеально подходит для плавки медных концентратов с высоким содержанием мышьяка.

Таблица V - Ожидаемое распределение мышьяка в печи ISASMELTTM при плавке концентратов с высоким содержанием мышьяка

Содержание мышьяка в питании, % As	Расчетное распределение As в ISASMELT TM			Расчетное распределение As в конвертере Teniente S = 0.7			Расчетное распределение As в печи взвешенной плавки S = 0.3		
	D _{штейн}	D _{шлак}	D _{газ}	D _{штейн}	D _{шлак}	D _{газ}	D _{штейн}	D _{шлак}	D _{газ}
0.26	5.5	4.2	90.3						
0.50	4.0	3.0	92.0	22	22	56	32	42	26
1.00	3.0	2.0	95.0	15	15	70	26	36	38
3.00	1.0	1.0	98.0	8	6	86	16	20	64

В таблице 5 сравнивается расчетное распределение мышьяка в печи ISASMELTTM с распределением мышьяка в конвертере Teniente (содержание кислорода 36%, 1270°C, содержание штейна 75%) и в печи взвешенной плавки (содержание кислорода 55%, 1290°C, содержание меди в штейне 65%) (ист.). Из таблицы 5 следует, что печь ISASMELTTM отличается большим переходом мышьяка в газообразную фазу по сравнению как с конвертером Teniente, так и с печью взвешенной плавки. Печь ISASMELTTM также отличается меньшим переходом мышьяка в шлак по сравнению с конвертером Teniente. Это означает меньший риск повторного загрязнения штейна при очистке шлака. Наконец, необходимо отметить, что высокие ожидаемые показатели удаления мышьяка в печи ISASMELTTM уменьшают количество примесей, требующих удаления при конвертировании и рафинировании анодной меди, по сравнению с двумя другими технологиями.

Заключение

1. Было определено распределение примесей As, Sb, Pb, Zn и Co в печи ISASMELTTM на медеплавильном заводе Маунт Айза
2. Технология ISASMELTTM позволяет эффективно удалять примеси путем интенсивного испарения. Этому способствуют такие особенности технологии, как интенсивное перемешивание ванны, а также гибкость технологического процесса, позволяющая оператору выбирать оптимальное для отделения примесей содержание штейна, и положительная роль влажности питания
3. ISASMELTTM имеет более высокие показатели перехода мышьяка в газообразную фазу по сравнению с печью взвешенной плавки и конвертером Teniente
4. ISASMELTTM отличается меньшим переходом мышьяка в шлак, чем конвертер Teniente, что уменьшает риск повторного загрязнения штейна при очистке шлака
5. Высокие ожидаемые показатели удаления мышьяка в печи ISASMELTTM уменьшают количество примесей, требующих удаления при конвертировании и рафинировании анодной меди, по сравнению с двумя другими технологиями

Благодарности

Авторы выражают признательность компаниям Mount Isa Mines и Yunnan Copper за разрешение на публикацию производственных данных. Также авторы выражают особую благодарность сотрудникам завода Маунт Айза Марте Бейли и Лорен Фанг за помощь в сборе данных.

Список использованной литературы

- (1) W.J. Errington, J.H. Fewings, V.P. Keran, and W.T. Denholm, "The Isasmelt Lead Smelting Process." *Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy*, Section C, 96 (1987), 1-6.
- (2) M.D. Coulter and C.R. Fountain, "The Isasmelt Process for Copper Smelting", *Non-ferrous Smelting Symposium*, (Port Pirie, South Australia, 17-21 September 1989, Aus.I.M.M., Melbourne, 1989), 237-240.
- (3) C.R. Fountain, M.D. Coulter, and J.S. Edwards, "Minor Element Distribution in the Copper Isasmelt Process," *Copper '91, Vol. IV*, ed. C. Diaz, C. Landolt, A. Luraschi, and C.J. Newman (Pergamon Press, New York, 1991), 359-373.
- (4) R. Player, C.R. Fountain, T.V. Nguyen, and F.R. Jorgensen, "Top-entry Submerged Injection and the Isasmelt Technology," *Proceedings of the Savard/Lee International Symposium on Bath Smelting*, ed. J.K. Brimacombe, P.J. Mackey, G.J.W. Kor, C. Bickert and M.G. Ranade (The Minerals, Metals and Materials Society, Warrendale, Pennsylvania, 1992), 215-229.

- (5) J.L. Cribb, J.S. Edwards, C.R. Fountain, and S.P. Matthew, "Isasmelt Technology for the Smelting of Copper," *15th CMMI Congress*, Vol. 2 (SAIMM, Johannesburg, 1994), 99-103.
- (6) R. Player, "Copper ISASMELT - Process Investigations", *The Howard Worner International Symposium on Injection in Pyrometallurgy*, ed. M. Nilmani and T. Lehner, Melbourne, (The Minerals, Metals and Materials Society, Warrendale, Pennsylvania, 1996), 439-446.
- (7) W.J. Errington, P.S. Arthur, C.R. Fountain, "ISASMELT - Clean Efficient Smelting", *GME'99 Global Metals Environment Conference, Beijing, 24-27 May 1999*, (Nonferrous Metals Society of China, Beijing, 1999), 164-172.
- (8) J.S. Edwards, C.R. Fountain, and R.L. Morland, "ISASMELT—Extending the Envelope"; *Proceedings of the Brimacombe Memorial Symposium, October 1 to 4, 2000* ed. by W. Poole: Poster Session Proceedings, (CIM, October 2000).
- (9) J.L. Bill, T.E. Briffa, A.S. Burrows, C.R. Fountain, D. Retallick, J.M.I. Tuppurainen, J.S. Edwards, and P. Partington, "ISASMELT—Mount Isa Copper Smelter Progress Update", *Sulfide Smelting 2002*, ed. R.L. Stephens and H.Y. Sohn, (The Minerals, Metals and Materials Society, Warrendale, Pennsylvania, 2002), 181-193.
- (10) K. Itagaki, "Thermodynamic Evaluation of Distribution Behaviour of VA Elements and Effect of the Use of Oxygen in Copper Smelting", *Metallurgical Review of the Mining and Materials Processing Institute of Japan, MMIJ*, 3 (1986), 87-100.
- (11) J. Font, G. Alvear, A. Moyano and C. Caballero, "Fractional distribution of arsenic in the Teniente Continuos Converting Process", *Arsenic Metallurgy*, ed. R. G. Reddy and V. Ramachadran, (TMS USA, 2005), 195-205.
- (12) S. Surpunt and N. Hasegawa, "Distribution behavior of arsenic, antimony and bismuth in the smelting stage of the Mitsubishi process", *Proceedings of the Yazawa International Symposium, Vol I*, ed. F. Kongoli, K. Itagaki, C. Yamauchi, H. Sohn, (The Minerals, Metals and Materials Society, Warrendale, Pennsylvania, 2003), 375-381.