

# Переход с конвертера верхней продувки на купель с донной продувкой кислородом для купелирования сплава верблей на предприятии компании Rand Refinery

**М. Гриффин**

*Rand Refinery, Ltd., ЮАР*

## Аннотация

В 1986 г. компания Rand Refinery модернизировала свой плавильный комбинат, на котором происходит восстановление золота и серебра из побочной продукции золотых рудников, с целью внедрения процесса плавления сплава верблей, полученного в дуговых печах, и его последующего купелирования во вращающемся конвертере верхней продувки (ВКВП). Несмотря на то, что новый технологический процесс внес важные улучшения по сравнению со старым методом производства в доменной / купеляционной печи, эксплуатация вращающегося конвертера верхней продувки оказалась сложной, при этом не удалось успешно преодолеть проблему быстрого разрушения огнеупоров.

В 1993 г. руководство пересмотрело стратегические требования плавильного комбината, и совет утвердил проект дальнейшего переоборудования для устранения различных недостатков, включая сложности с вращающимся конвертером верхней продувки. Общая стоимость проекта составила 10,5 миллионов рандов, из которых примерно 25% относятся к установке 4-тонного купеля с донной продувкой кислородом (КДПК) и вспомогательного оборудования для замены двух 1,5-тонных вращающихся конвертеров верхней продувки. Изучены причины изменения в технологии купелирования, альтернативные технологии и технологические процессы, и обсуждаются общие эксплуатационные улучшения, достигнутые за счет КДПК.

## 1 Введение

С тех пор, как в сентябре 1986 был сдан в эксплуатацию новый плавильный контур, вся обработка сплава верблей, полученного методом дуговой электроплавки, осуществлялась через два 1,5-тонных вращающихся конвертера верхней продувки и небольшую статическую отражательную купеляционную печь с целью получения слитка сплава Доре, содержащего золото и серебро. Конструкция и основные рабочие данные вращающихся конвертеров верхней продувки на комбинате компании Rand Refinery приведены в справочных материалах (1).

Оригинальная концепция подразумевала получение слитка сплава Доре непосредственно из вращающихся конвертеров верхней продувки, но это оказалось невозможно, поскольку выяснилось, что очень трудно довести до конца стадию окисления, а также поддерживать температуры, при которых слиток сплава Доре останется в расплавленном состоянии. Это сделало необходимым гибридный процесс, согласно которому обработка сплава верблей, полученного методом дуговой электроплавки, была сосредоточена (т.е. окислялось приблизительно 75% свинца) во вращающемся конвертере верхней продувки, а оставшееся относительно небольшое количество высококачественного слитка передавалось в отражательную купеляционную печь для окончательного окисления до получения слитка сплава Доре. Другие технологические трудности, обнаруженные при эксплуатации вращающихся конвертеров верхней продувки, включают следующее:

- i) сложности локализации дымов при разливке продукции;
- ii) сложности управления температурой, в особенности при уменьшении концентрации свинца и приближении конца реакции;
- iii) отсутствие средств поддержания температуры в конвертере при окончательной отливке слитка сплава Доре;
- iv) относительно низкая эффективность окисления (приблизительно 30%);

v) высокие требования к техническому обслуживанию (подшипников качения и т.д.) в дополнение к частому демонтажу кожуха печи для ремонта или замены огнеупоров;

vi) разрушения огнеупоров, вызванные различными комбинациями перегрева; эрозией, выкрашиванием, проникновением свинца через швы кирпичной кладки, а также неравномерным качеством огнеупоров; и

vii) необходимость завершения окисления в традиционной купеляционной печи (следствие вышеуказанных пунктов ii и iii), что также добавляет трудностей с точки зрения локализации дымов и проблем, связанных со здоровьем операторов, металлургических потерь и сохранности драгоценных металлов.

В январе 1993 г. был организован руководящий комитет проекта плавильного комбината, задачей которого являлись исследования альтернативных технологий для замены контура вращающегося конвертера верхней продувки / купеляционной печи. Комитет постановил, что при рассмотрении вопроса, "что будет наиболее подходящей технологией для нашего конкретного процесса", важно соблюсти следующие критерии:

- процесс **должен** обеспечивать производство слитка сплава Доре из сплава верблей, полученного методом дуговой электроплавки, в ходе одноэтапной операции, таким образом, исключая традиционную купеляционную печь;
- эксплуатация и управление не должны представлять трудностей;
- процесс не должен требовать сложного технического обслуживания, должен быть экономичным и обеспечивать увеличенный срок службы огнеупоров;
- очень важное значение имеет высокий уровень безопасности труда (т.е. должно достигаться пренебрежимо малое количество свинцовых дымов, выделяемых на всех этапах работы);
- процесс должен обеспечить точность металлургической отчетности и высокий уровень безопасности; а также
- оборудование должно иметь достаточную технологическую мощность для обработки всего образующегося сплава верблей, полученного методом дуговой электроплавки, и должно быть способно при необходимости справляться с любыми резервными объемами.

Было рассмотрено несколько альтернативных процессов для вращающегося конвертера верхней продувки, и в конечном итоге было сочтено, что три из них следует изучить подробно. К этим технологиям относятся:

- преобразование комбинированного расположения фурм / горелок вращающегося конвертера верхней продувки в отдельную конфигурацию фурм и горелок "Outokumpu";
- технология конвертерной плавки при погруженной фурме (в том виде, как она была изначально разработана австралийским агентством CSIRO); и
- инъекция кислорода с донной продувкой.

Эти варианты обсуждаются далее.

## **2 Исследование альтернативных процессов**

### **2.1 Изменение существующих вращающихся конвертеров верхней продувки**

Применение технологии конвертерной плавки "Outokumpu" к существующему оборудованию вращающихся конвертеров верхней продувки предположительно обеспечивает следующие преимущества:

- использование существующих корпусов вращающихся конвертеров верхней продувки, механизмов вращения и наклона;

- изменению подлежит только расположение фурм / горелок и существующий зонт отходящих газов;
- более низкие капитальные затраты, чем при других рассматриваемых процессах;
- монтаж нового расположения фурм / горелок и зонта отходящих газов будет гораздо быстрее, чем внедрение полностью нового процесса; и
- меньше нарушений в обычном производстве методом дуговой электроплавки, благодаря относительно короткой продолжительности преобразования.

Детальные исследования показали, что для конкретного применения на предприятии компании Rand Refinery вращающийся конвертер верхней продувки должен иметь правильное вспомогательное оборудование, чтобы выдержать конкуренцию с технологией донной продувки. Это не подходит для существующего вращающегося конвертера верхней продувки, и Руководящий комитет проекта плавильного комбината рассмотрел вариант замены существующей комбинированной горелки / кислородной фурмы на фурмовую балку с двумя отдельными фурмами (т.е. одну фурму горелки и одну аффинажную фурму). В связи с этим были предложены следующие модификации:

- Повысить мощность горелки до 2 МВт и адаптировать ее для работы с аффинажной фурмой.
- Внедрить аффинажную фурму с хорошо продуманной сверхзвуковой форсункой высокого давления. Обычная работа осуществляется со сжатым воздухом (15 нм<sup>3</sup>/мин. при давлении минимум 3 бар), но также должно быть возможно добавление кислорода.
- Изменить конструкцию системы отходящих газов таким образом, чтобы весь охлаждающий (сжатый) воздух попадал через зазор между устьем и шлемной частью печи, таким образом, охлаждая отходящие газы до температуры меньше 200°С. По оценкам необходимо обрабатывать общий объем отходящих газов 10000 нм<sup>3</sup>/ч.

Эти модификации обеспечат следующие преимущества:

- Увеличенная мощность горелки сократит период расплавления, а также сделает возможным загрузку большего количества холодных материалов непосредственно во вращающийся конвертер верхней продувки
- Высокое давление верхней продувки во много раз более эффективно, чем существующая система, и способно проникать через толстые слои шлака без высокой скорости вращения. Достигаемая высокая эффективность окисления обеспечит хороший контроль температуры и более короткое время технологического цикла.

Также было предложено, чтобы были сделаны другие непосредственные изменения в работе вращающегося конвертера верхней продувки. Считается, что высокий уровень очень жидкого шлака PbO поверх слитка уменьшает эффективность кислорода во время окисления. Чтобы избежать этого де-шлакования, необходимо значительно уменьшить объем ванны после двух третей периода рафинирования. Затем должны быть добавлены флюсы, которые собирают PbO и формируют фазу кускового шлака, покидающего участки высококачественного слитка, открытые рабочему пространству печи. Это предотвращает избыточное окисление PbO в высшие оксиды за счет уменьшения активности Pb в оставшемся высококачественном слитке. Комбинация продувки высокого давления с небольшим количеством добавок должна обеспечить возможность перехода непосредственно к слитку с содержанием < 2% Pb. Это также сократит время цикла >50% и сделает возможным замедления скорости вращения конвертера верхней продувки, что должно затем увеличить срок службы огнеупоров.

## 2.2 Технология конвертерной плавки при погружённой фурме

Технология конвертерной плавки при погружённой фурме, разработанная компанией Ausmelt для купелирования сплава верблей, содержащего серебро, эксплуатируется на предприятии Pasminco Metals - BHAS, Порт Пири, Австралия, более 4 лет, обеспечивая производство серебряных слитков сплава Доре с чистотой как минимум 98,5% (2).

В мае 1993 г. состоялся визит в Порт Пири для наблюдения за операциями купелирования на BHAS. В ходе этого визита подробные обсуждения с изготовителями печей и руководством компании BHAS показали, что технология конвертерной плавки при погружённой фурме в применении к частному процессу купелирования на предприятии компании Rand Refinery может обеспечить следующие преимущества;

- производство слитка сплава Доре с чистотой до 98,5% из сплава верблей, содержащего Ag-Au; высокая эффективность окисления (достигающая 100%) и использование сжатого воздуха вместо кислорода;
- лучший заявленный срок службы огнеупоров из всех трех изучаемых процессов ( $\pm 24$  недели), на базе работы 8 часов в день;
- обработка 5 тонн сплава верблей, полученного методом дуговой электроплавки, в день при работе только дневной смены;
- печь легко разместится в существующем помещении дуговой электропечи;
- хорошие показатели выбросов у печи, если правильно сконструированы вытяжные зонты; и
- использование процесса для другого применения (т.е. сразу для процессов окисления и восстановления).

После визита в компанию BHAS, Порт Пири, базовое описание установки и процесса было сформулировано следующим образом.

Предлагаемый процесс подразумевает выпуск сплава верблей из погружной дуговой электропечи дважды в день приблизительно по 2,5 тонн за выпуск. В зависимости от возможностей печи с погружной фурмой слиток будет подаваться непосредственно в расплавленном виде или будет гранулироваться для использования в другую смену, если печь будет недоступна.

Количественный анализ сплава верблей должен показывать приблизительно 1% Au и 3% Ag. Будет присутствовать некоторое количество примесей в сплаве верблей в виде штейна. Считается, что это вряд ли существенно влияет на работу печи, поскольку окислительные условия, преобладающие в купеле, приведут к окислению штейна до шлака.

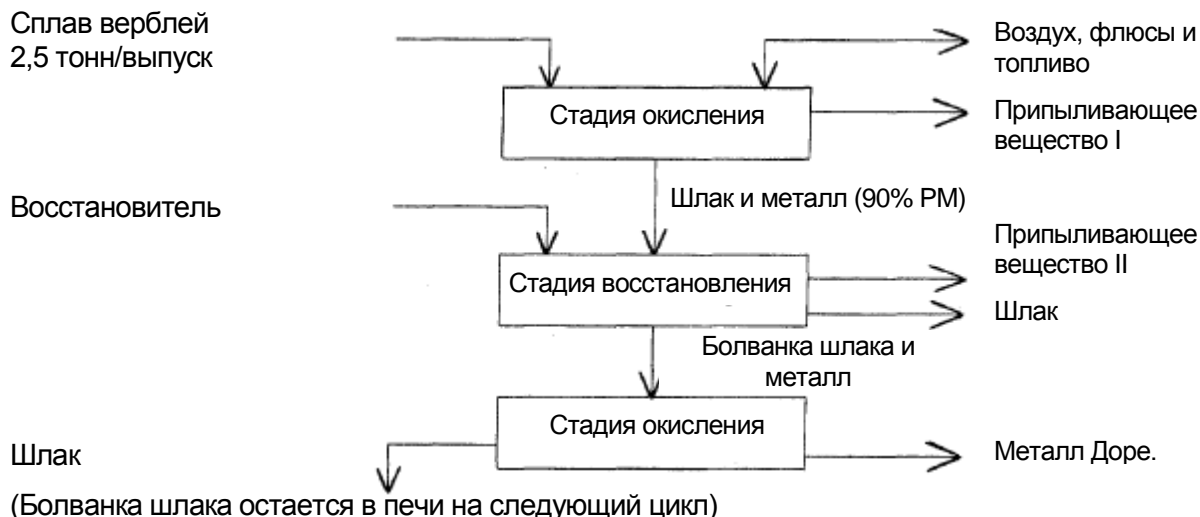
Было предложено, что печь будет иметь внутренний диаметр приблизительно 1,2 м и высоту 2,5 м. Печь будет оснащена стальной оболочкой с водяным экраном; в качестве огнеупорной футеровки будут использованы высококачественные хром-магнетитовые кирпичи.

Система верхнего погружения фурмы обеспечит горение и окисление в ванне в турбулентных условиях, обеспечивая эффективный перенос тепла и массы для плавки и окисления. Конструкция фурмы обеспечит хороший контакт между металлом и газом, увеличивая до максимума скорость реакции и перемешивание ванны без необходимости внешних механизмов, таким образом, обеспечивая работу с высокой удельной

скоростью плавки. Фурма будет опускаться, подниматься и заменяться с помощью простого механизма подъема фурмы и узла кран-балки; входное отверстие фурмы располагается в верхней части печи. Технологическая разработка реакторов с погруженной фурмой, а также характеристики фурмы и перемешивания в ванне хорошо документированы в справочных материалах (3).

Блок-схема предлагаемого процесса для работы одной печи приводится ниже на рисунке 1:

**Рисунок 1 Блок-схема предлагаемого процесса**



Было предложено, чтобы в начале каждого цикла в печи находилось некоторое количество слитка (приблизительно 50-100 кг) и приблизительно 400 кг шлака окиси свинца (свинцовый глёт).

Выпускное отверстие металла должно быть расположено в донной части печи; выпускное отверстие шлака – на противоположной стороне на высоте, достаточной для обеспечения пропускной способности 500 кг слитка сплава Доре, что гарантирует высоту уровня металла в конце цикла выпуска ниже выпускного отверстия шлака.

Приблизительно 2,5 тонн расплавленного методом дуговой электроплавки сплава верблей будет добавлено в печь с помощью кранового ковша через загрузочное отверстие в своде печи.

Затем на этапе начального окисления ванна нагревается приблизительно до 1000°C. Сплав верблей будет окисляться для производства металла, содержащего приблизительно 90% драгоценных металлов. Как только будет достигнут этот уровень, количество шлака будет быстро уменьшено за счет добавки кускового угля, что позволит печному шлаку осесть перед выпуском и грануляцией.

Оставшийся сплав затем будет дополнительно окисляться с получением металла Доре. Окончательный состав сплава Доре будет определяться путем визуального осмотра образцов металла, отобранных операторами. Когда будет получен сплав Доре, содержащий 2% Pb и Cu, оставшийся шлак будет выпущен и гранулирован, а сплав Доре затем будет разлит в формы.

Шлак и топочные газы будут подвергаться переработке на существующем оборудовании Rand Refinery для восстановления свинца.

### *2.3 Инжекция кислорода с донной продувкой*

Эта конкретная технология изучалась руководством компании Rand Refinery с 1990, (4)(5)(6). В мае 1993 г. был организован визит через MIM Technology Marketing Ltd (MIMTM) для ознакомления с работой их 3-тонного купеля с донной продувкой кислородом (КДПК) в компании Britannia Refined Metals Limited в Нортфлите, Кент.

Этот КДПК функционировал в компании Britannia Metals в течение 8 лет и использовался для извлечения свинца и меди из 60-70% сплава серебра/свинца, прошедшего через процесс переработки в вакуумной реторте. После того, как этот сплав прошел купелирование в КДПК, из печи выпускался слиток сплава Доре, содержащий более 99,85% серебра.

Обсуждения с компанией MIMTM показали, что инжекция кислорода с донной продувкой может обеспечить следующие преимущества перед существующим вращающимся конвертером верхней продувки на предприятии компании Rand Refinery:

- Концентрация и окончательное купелирование сплава верблей, расплавленного методом дуговой электроплавки, содержащего  $\pm 3\%$  Ag и  $1\%$  Au, в одностадийной операции для производства слитка сплава Доре чистотой  $>98,0\%$ ;
- Очень высокая тепловая и окислительная эффективность с достижением экономии средств;
- Сильно уменьшается зависимость от проблем, связанных с огнеупорами (заявленный срок службы огнеупоров приблизительно 14 недель), на базе круглосуточной работы;
- Легкость эксплуатации персоналом с относительно низким уровнем квалификации;
- Процесс очень прост в управлении, поскольку подача фурмы является автоматической, и конвертер может быть оставлен без присмотра;
- Снижение потребности в рабочей силе с одного человека до  $\frac{1}{2}$  человека в смену;
- Низкий объем отходящих газов и отличные показатели выбросов у печи во время выполнения всех операций;
- Высокая скорость восстановления металла, низкие объемы свинцового шлака;
- Возможность как твердой, так и жидкой загрузки;
- Печь может быть легко установлена в существующем здании дуговой электропечи;
- Повышенная безопасность, поскольку возможен легкий мониторинг всех операций выпуска.

После нашего визита в Britannia Metals Limited, компания MIMTM подготовила предложение на строительство, поставку и ввод в эксплуатацию 4-тонного КДПК, который будет перерабатывать 5 тонн в день слитков сплава верблей, расплавленных методом дуговой электроплавки, в слитки сплава Доре.

Принцип функционирования КДПК обсуждается ниже в настоящей статье.

### *2.4 Сравнение исследованных технологий купелирования*

С целью облегчения и принятия грамотного решения о лучшей и наиболее подходящей технологии для замены вращающегося конвертера верхней продувки, была подготовлена сравнительная схема на рис. 2, на которой указано все различное оборудование и критерии функционирования, и сравниваются данные, полученные в ходе исследований, проведенных по трем различным конвертерным технологиям.

**Рисунок 2 Сравнение оборудования и критериев надежной работы**

	ВРАЩАЮЩИЙСЯ КОНВЕРТЕР ВЕРХНЕЙ ПРОДУВКИ (ТЕХНОЛОГИЯ КОНВЕРТЕРНОЙ ПЛАВКИ "OUTOKUMPU")	КДПК	ТЕХНОЛОГИЯ КОНВЕРТЕРНОЙ ПЛАВКИ ПРИ ПОГРУЖЁННОЙ ФУРМЕ
Работа фурмы	Включает фурмовую балку с двумя фурмами, т.е. одна фурма горелки и одна аффинажная фурма. Фурма работает выше ванны расплавленного металла как сверхзвуковая форсунка высокого давления.	Узел гидравлического привода автоматически подает фурму в печь, как только появляется износ. Износ определяется по температуре, измеренной термопарой фурмы. Конвертер с донной продувкой.	Верхнее погружение. Требуется, чтобы фурма была погружена в шлак. Во время работы необходима частая регулировка фурмы.
Замена фурмы	Выдвижная аффинажная фурма с водяным охлаждением. Продолжительность срока службы фурмы не определена при условии правильного использования и технического обслуживания.	Расходная фурма из нержавеющей стали, замена которой требуется через каждые 15 часов. Замена фурмы занимает приблизительно 5 минут.	Срок службы фурмы является переменным в зависимости от рабочих параметров, но в среднем составляет 8 часов. Замена фурмы требует 10 минут.
Источник тепла	Отдельная газовая горелка с водяным охлаждением мощностью приблизительно 2 МВт, полностью выдвигаемая из корпуса печи.	Полностью дозирующая газовая горелка с оборудованием управления. Горелка располагается в корпусе печи.	Фурма является источником тепла и может использовать мазут, угольную пыль или газ. Отдельная высокоскоростная газовая горелка необходима для розжига холодной печи.
Подаваемые газы	Обычная работа со сжатым воздухом (15 нм3 в минуту при давлении 5 бар), но также возможно добавление кислорода.	Использует чистый кислород для инъекции через фурму и азот для охлаждения фурмы. Кислород уже в наличии; потребуется установка мощностей по азоту	Обычная работа со сжатым воздухом (6,25 нм3/мин при давлении 5 бар), но также возможно добавление кислорода.
Эффективн ость сгорания	Горелка необходима только во время прогрева шихты. Во время цикла окисления реакция является экзотермической, и горелка отключается.	Горелка необходима только во время прогрева шихты и при операциях, связанных с разливкой слитка сплава Доре. Во время цикла окисления реакция является экзотермической, и горелка отключается.	Фурма работает все время, даже в ходе окисления. Износ фурмы также оказывает влияние на эффективность из-за эрозии наружной трубы из нержавеющей стали около кончика фурмы, что позволяет защиту от брызг и последующую блокировку.
Контроль температур ы ванны	Зная работу существующего вращающегося конвертера верхней продувки, предполагаем, что контроль температуры будет нелегким делом.	Точность и легкость контроля, благодаря опции включения или отключения горелки и точному контролю инъекции кислорода на этапах окисления.	Поскольку этот процесс идет интенсивно, вырабатывается избыток тепла, особенно в ходе окисления. Тепло удаляется или абсорбируется за счет добавления инертных материалов, так что контроль не является очень точным.
Эффективн ость окисления	Должна быть лучше приблизительно на 30% от достигнутого к настоящему времени, благодаря использованию сверхзвуковой форсунки высокого давления, которая способна легче проникать через толстые слои шлака.	Высокая (приблизительно 100%), благодаря инъекции технологических газов в погруженном состоянии непосредственно в зону реакции.	Высокая (приблизительно 100%), благодаря инъекции технологических газов в погруженном состоянии.

Рисунок 2 (Продолжение)

	ВРАЩАЮЩИЙСЯ КОНВЕРТЕР ВЕРХНЕЙ ПРОДУВКИ (ТЕХНОЛОГИЯ КОНВЕРТЕРНОЙ ПЛАВКИ "OUTOKUMPU")	КДПК	ТЕХНОЛОГИЯ КОНВЕРТЕРНОЙ ПЛАВКИ ПРИ ПОГРУЖЁННОЙ ФУРМЕ
Требования к отходящим газам	Низкий объем отходящих газов (приблизительно 10000м³/час)	Низкий объем отходящих газов (приблизительно 7500м³/ час), благодаря относительно спокойно кипящей ванне, поскольку чистый кислород используется только в реакции окисления.	Значительный объем отходящих газов (приблизительно 40000 м³/час), благодаря турбулентному состоянию в ванне, высокоинтенсивным характеристикам процесса и использованию сжатого воздуха для окисления (используется только 10% объема, 90% используется для отходящих газов).
Контроль выбросов	Хорошие условия на этапах плавления и окисления. Однако из-за высоты разливки во время разливки очень трудно контролировать объем выбросов у печи	Великолепные условия, поскольку печь полностью закрыта в ходе операций расплавления / окисления и разливки. Из-за близости к оси разливки в ковш достигается хорошее отделение шлака / металла и непосредственная отливка анодов.	Обычно хорошие условия на этапах расплавления и окисления, тем не менее, будут проявляться потенциальные проблемы с фурмой и загрузочными отверстиями в сводчатом поде печи. Также для всех разливочных операций необходима хорошая система вытяжки.
Подготовка сырья	Гибкая – может получать твердый или жидкий слиток из дуговой печи. Тем не менее, твердая загрузка связана с тенденцией повреждения огнеупорной футеровки из-за загрузки по наклонной оси.	Гибкая - может получать твердый или жидкий слиток. Твердый слиток может загружаться блоками по 300 кг в вертикальном положении.	Исследовалась возможность использования жидкой шихты. Твердая шихта должна быть в гранулированном виде и высушена до содержания влаги меньше 3%. Будут возникать проблемы гранулирования из-за смешанной фазы блейштейна в слитке из дуговой печи.
Окончательная чистота сплава Доре	Заявлено, что комбинация продувки под высоким давлением с небольшим количеством добавок даст возможность непосредственно добиться качества слитка сплава Доре 98% Ag/Au.	КДПК компании Britannia Metals Limited может производить слиток сплава Доре чистотой свыше 99,5% Ag.	Технология Порт-Пири может обеспечивать производство слитка сплава Доре с чистотой приблизительно 98,5% Ag.
Срок службы огнеупоров	Поскольку скорость вращения печи может быть значительно снижена во время стадий окисления, было заявлено, что срок службы огнеупоров будет увеличиваться. Тем не менее, не было предоставлено никаких данных, подтверждающих это заявление. Срок службы огнеупоров существующего вращающегося конвертера верхней продувки составляет приблизительно 2 недели.	Компания Britannia Metals заявляет средний срок службы приблизительно 14 недель. Износ обычно сконцентрирован вокруг линии шлака, так что не требуется полная замена футеровки. Рекомендуется иметь полностью футерованный запасной кожух, на замену которого потребуется приблизительно 8 часов.	Было заявлено, что потребуются частичная замена футеровки приблизительно через 24 недели. Также рекомендуется иметь запасной кожух с футеровкой, для замены которого требуется приблизительно 5 часов. Сводчатый под или свод конвертера обычно заменяются приблизительно каждые 12 недель.
Требования к рабочей силе	Необходим один человек в смену для работы на двух вращающихся конвертерах верхней продувки. Тем не менее, у него есть возможность выполнять другую работу в промежутке между операциями разливки и расплавления / окисления, поскольку процесс может быть оставлен без присмотра, один раз для каждой операции. Эти конвертеры будут работать 7 дней в неделю в 3 смены.	Заявлено, что необходимо только ½ человека в смену, поскольку все операции, относящиеся к этой печи, могут выполняться одним человеком. В среднем один человек занят работой на этой печи только в течение четырех часов в смену. Во время циклов расплавления / окисления печь остается без присмотра. Этот купель будет работать 7 дней в неделю в 3 смены.	Может работать на основе только одной смены в день, но для работы необходимо два человека. Печь нельзя оставить без присмотра, поскольку для эффективной работы высота фурмы требует постоянной регулировки. Этот конвертер будет работать 7 дней в неделю в 1 смену.



Рисунок 2 (Продолжение)

	ВРАЩАЮЩИЙСЯ КОНВЕРТЕР ВЕРХНЕЙ ПРОДУВКИ (ТЕХНОЛОГИЯ КОНВЕРТЕРНОЙ ПЛАВКИ "OUTOKUMPU")	КДПК	ТЕХНОЛОГИЯ КОНВЕРТЕРНОЙ ПЛАВКИ ПРИ ПОГРУЖЕННОЙ ФУРМЕ
Требования к пространству	Вращающиеся конвертеры верхней продувки в настоящее время расположены в помещении дуговой электропечи. Не потребуются существенных конструктивных изменений.	Требуется общая площадь 5м x 4м, которая может быть легко выделена рядом с вращающимся конвертером верхней продувки № 1.	Требуется общая площадь 4м x 4м, которая может быть выделена в помещении существующей дуговой электропечи рядом с вращающимся конвертером верхней продувки №1.
Безопасность	Если эта модификация позволит непосредственное производство или получение слитка сплава Доре из вращающегося конвертера верхней продувки, безопасность сильно улучшится.	Очень хорошая, поскольку купелирование слитка является одностадийным процессом. Слиток сплава Доре будет разливаться в дневную смену дважды в неделю под наблюдением.	Очень хорошая, поскольку купелирование слитка является одностадийным процессом. Разливка сплава Доре как в КДПК. Гранулированный свинец, расплавленный в дуговой печи, может стать потенциальной проблемой безопасности.
Относительные издержки *Оценка	Полная технология конвертерной плавки "Outokumpu" на обоих существующих вращающихся конвертерах верхней продувки Tolltreck, что включает:  2 х горелки с водяным охлаждением, 2МВт из нержавеющей стали  2 х аффинажных фурмы с форсунками с водяным охлаждением  2 х системы поддержки фурм  Относительные издержки составили 62%* от общей цены за поставку КДПК.  Исключения: 1) Фрахт и страховка из европейского порта 2) Полная стоимость монтажа.	Для поставки 4-тонного КДПК - объем поставки:  1 х полный узел печи 1 х полный узел печи (футерованный) 1 х горелка 1 х комплект гидравлического подъемного оборудования 1 х гидравлический узел фурмы 1 х комплект контрольного оборудования для измерения потока кислорода / азота, управления горелкой, наклона печи и подачи фурмы.  Относительные издержки, 100% включая плату за лицензию.  Исключения: 1) Полная стоимость монтажа. 2) Затраты на предоставление услуг 3) Фрахт и страховка из порта Великобритании.	Для поставки одного 4-тонного конвертера с технологией плавки при погруженной фурме – объем поставки  1 х полный узел печи (футерованный) 3 х погружные плавильные фурмы. 1 х полный узел фурмы  Относительные издержки включают плату за лицензию в объеме 98% от общей цены за поставку КДПК.  Исключения: 1) Полная стоимость монтажа 2) Затраты на предоставление услуг 3) Приборы и оборудование управления процессом (предполагается использование существующих устройств управления вращающимися конвертерами верхней продувки). 4) Фрахт и страховка из австралийского порта.
Стоимость оборудования (оценки не включены в относительные издержки)	1) 1 х гранулятор свинцового глета 175000 рандов  <b>ВСЕГО 175000 рандов</b>	1) 1 х гранулятор свинцового глета: 175000 рандов 2) 1 х рабочая платформа 30000 рандов 3) 1 х запасной кожух 30000 рандов 4) 1 х необходимые запасные части 85000 рандов  <b>ВСЕГО 320000 рандов</b>	1) 1 х Гранулятор свинцового глета 175000 рандов 2) 1 х Рабочая платформа 30000 рандов 3) 1 х Система питания печи 30000 рандов 4) 1 х гранулятор свинца 150000 рандов 5) 1 х запасной кожух 30000 рандов 6) 1 х необходимые запасные части 60000 рандов  <b>ВСЕГО 475 000 рандов</b>

После исчерпывающего исследования трех технологий был выбран КДПК из-за следующих ощутимых преимуществ:

- высокая эффективность окисления (почти 100%) и сниженные эксплуатационные издержки;
- возможность производства слитка сплава Доре (точное содержание металла > 98%) в одну стадию, таким образом, ликвидируется старый купель;
- снижение численности работников;
- отличная локализация дымов, даже при отливке;
- значительно увеличенный срок службы огнеупоров;
- легкость эксплуатации, даже при работе персонала с относительно низким уровнем квалификации;
- низкие требования к техническому обслуживанию; и
- улучшенная инвентаризация металлов и безопасность.

### **3 Описание новой установки купелирования**

#### **3.1 Кислородный купель с донной продувкой кислородом**

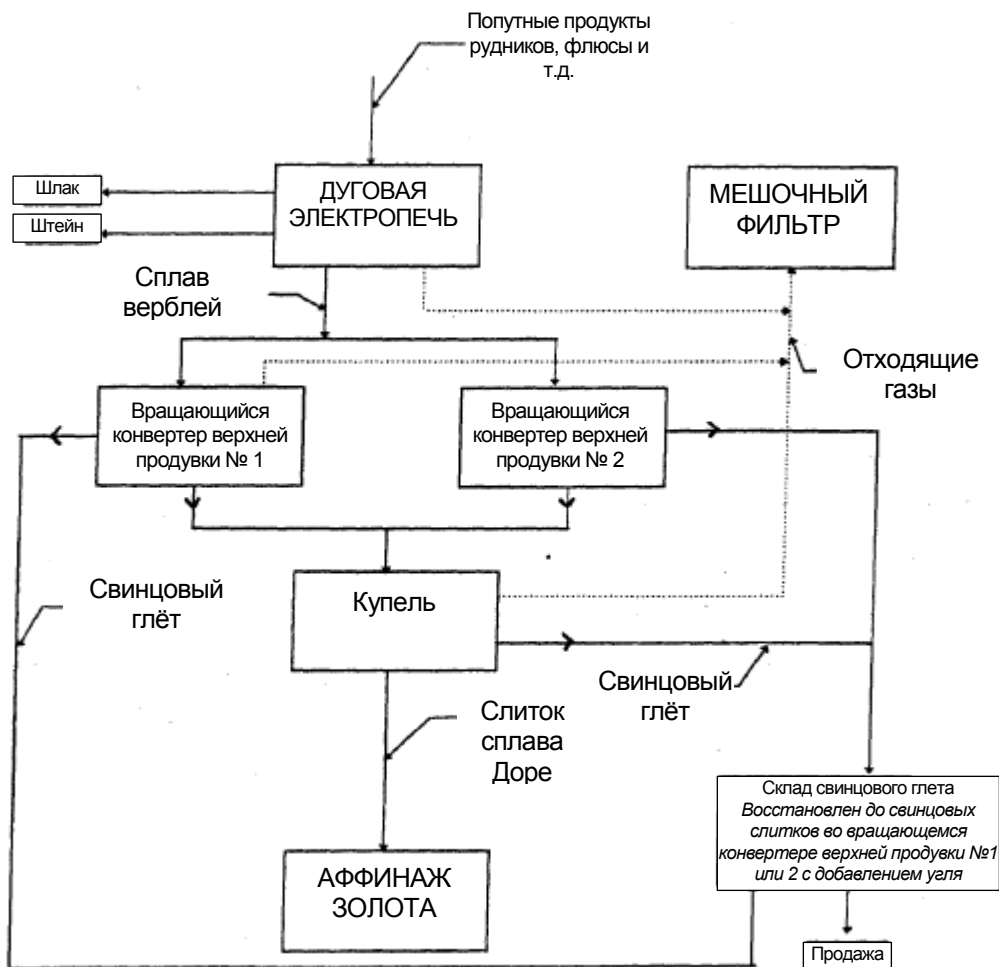
Конструкционные параметры, размеры и т.д. нового 4-тонного КДПК приводятся в таблице 1. Основными конструктивными и эксплуатационными особенностями являются:

- полностью смесительная газовая горелка;
- инжекция кислорода осуществляется при использовании азота, обдувающего расходную фурму,
- техническое обслуживание осуществляется в вертикальном положении;
- операция подачи фурмы является полностью автоматической и управляемой программируемым контроллером;
- основной корпус печи с водяным охлаждением;
- печь фактически полностью закрыта в ходе всех операций с целью сдерживания всех выбросов, содержащих свинцовые газы;
- гидравлическая система предназначена для подачи гидравлической энергии при управлении наклоном корпуса печи, управлении дверцей и крышкой, а также управлении автоматической системой фурмы;
- произведенный слиток сплава Доре может быть переплавлен непосредственно в аноды, без печи выдержки; и
- конструкция включает функции безопасности, которые применимы для контуров и блокировок, что предотвращает или защищает от срыва пламени, отказа кислорода или азота для фурмы, неуправляемый гидравлический наклон.

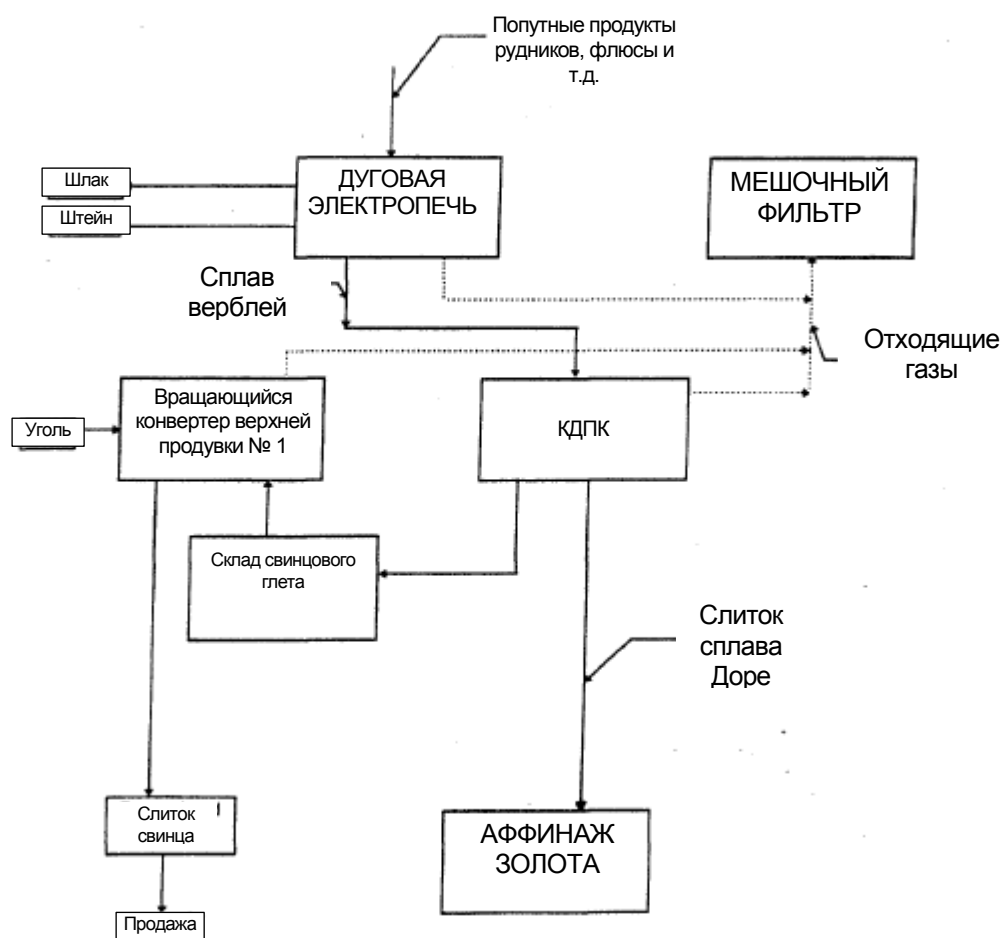
ТАБЛИЦА 1	КОНСТРУКЦИОННЫЕ ДАННЫЕ - КИСЛОРОДНЫЙ КУПЕЛЬ С ДОННОЙ ПРОДУВКОЙ КИСЛОРОДОМ
Номинальная мощность	4,0 тонны
Рабочий объем	0,45 м3
Наружный диаметр	1426 мм
Наружная длина	2488 мм
Наклон дуги	125°
Максимальный поток кислорода через фурму	36,0 нм3/ч
Максимальный поток через фурму	14.0 нм3/ч
Максимальный поток газа через горелку	200.0 нм3/ч
Теплоотдача	0,70 x 105 ккал/ч
Вода для охлаждения печи	32,0 м3/ч
Объем отходящих газов	
- вытяжка при открытой дверце	3000 нм3/ч
- вытяжка при закрытой дверце	7500 нм3/ч

Технологические схемы старого и нового процесса приведены на рис. 3 и 4.

Рисунок 3 Технологическая схема старого процесса



**Рисунок 4 Технологическая схема нового процесса**



#### 4 Ввод в эксплуатацию КДПК

Новый купель с донной продувкой кислородом и различное вспомогательное оборудование поступили на предприятие компании Rand Refinery из Великобритании в начале августа 1994. Потребовалось шесть недель для завершения установки печи в существующем здании дуговой электропечи. Установленный 4-тонный КДПК и оставшийся 1,5-тонный вращающийся конвертер верхней продувки показаны на рисунке 5.

КДПК был введен в эксплуатацию в "горячем" режиме в течение трех недель в октябре 1994 г. с помощью двух инженеров из компании MIMTM на базе круглосуточной работы 7 дней в неделю посменно. В течение этого периода времени КДПК взял на себя все операции купелирования из существующего вращающегося конвертера верхней продувки/купелирования. Ознакомление технического, эксплуатационного и обслуживающего персонала с оборудованием и процессом было сведено к минимуму благодаря тому, что несколько человек из числа персонала плавильного комбината было отправлено на 10 дней для интенсивного обучения в компании MIMTM в Норфлите в мае 1994 г. В обучение входили лекции и семинары, относящиеся как к эксплуатационным, так и к инженерным требованиям. Также было включено обучение на работающем КДПК в компании Britannia Metals Limited, что обеспечило операторов практическим опытом.

В целом ввод в эксплуатацию КДПК прошел очень хорошо, только с небольшим количеством незначительных проблем. За исключением полного ввода в эксплуатацию КДПК, этот период пуско-наладки также использовался для подтверждения, что печь может соответствовать конкретным технологическим гарантиям, выданным Rand Refinery компанией MIMTM как часть их лицензионного соглашения.

##### 4.1 Гарантия технологических показателей

Согласованную гарантию технологических показателей можно вкратце изложить следующим образом:

###### Этап 1

Преобразование до 5 тонн сплава верблей, полученного методом дуговой электроплавки, с содержанием благородных металлов (PMV)  $\geq 3\%$ , в концентрированный сплав верблей с содержанием благородных металлов  $\geq 50\%$  во временном диапазоне  $\leq 21$  час, отводимом на эту операцию.

###### Этап 2

Преобразование до 2 тонн концентрированного сплава верблей с содержанием благородных металлов  $\geq 50\%$ , в слиток сплава Доре с содержанием благородных металлов  $\geq 98\%$  во временном диапазоне  $\leq 7,75$  часа, отводимом на эту операцию.

Ориентировочное распределение времени цикла выглядит следующим образом:

	Этап (1)	Этап (2)
Загрузка / расплавление	3,00	1,00
Продувка O <sub>2</sub>	12,25	3,00
Разливка свинцового глётта	3,25	1,25
Разливка концентрированного сплава верблей	0,50	-
Разливка слитка сплава Доре	-	1,50
Простой	<u>2,00</u>	<u>1,00</u>
	21,00 час	7,75 часа

Во время периода ввода в эксплуатацию и до конца 1994 г. КДПК, установленный на предприятии компании Rand Refinery Limited, в целом соответствовал требованиям гарантии технологических показателей (доказывая успешность управления).

Следует отметить, что с точки зрения гарантии технологических показателей, купелирование осуществляется в два этапа. Тем не менее, печь последовательно работала как при одноэтапном процессе. Это включает непрерывный цикл загрузки/расплавления/выпуска шлака, пока в печи не образуется слиток сплава Доре достаточного размера, т.е. ( $\pm 500$  кг) для соответствующего выпуска слитка сплава Доре.

Это обеспечивает гибкость для работы КДПК либо в один этап, либо в два этапа, в зависимости от наличия слитка в дуговой электропечи и т.д.

**Рис. 5 Установленный 4-тонный КДПК и оставшийся 1,5-тонный вращающийся конвертер верхней продувки.**

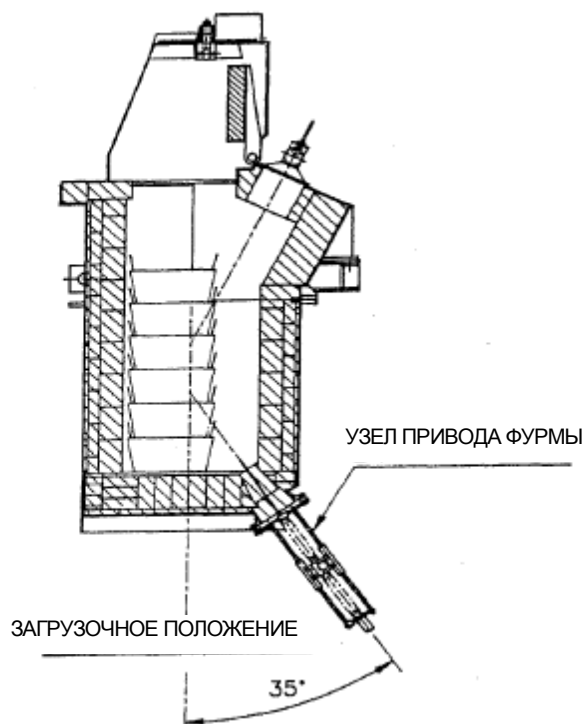


## 5 Эксплуатационные данные КДПК

### 5.1 Загрузка

Существующие операции загрузки включают загрузку в печь твердых блоков сплава верблей, полученных методом дуговой электроплавки, весом  $\pm 300$  кг каждый, с помощью мостового крана. Загрузочное положение печи представлено на рис. 6.

**Рисунок 6 Загрузочное положение**

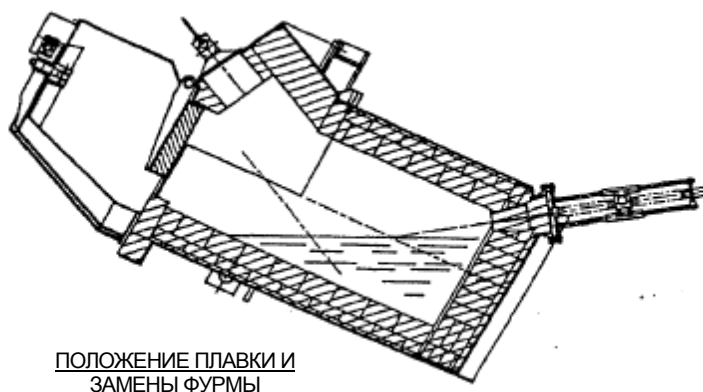




## 5.2 Плавка шихты

Печь наклоняется из загрузочного положения в положение плавки шихты, которое отражено на рис. 7. Затем разжигается горелка для обеспечения процесса плавки. Операции загрузки и плавления в настоящее время занимают приблизительно 3 часа в день.

**Рисунок 7 Плавка шихты**



ПОЛОЖЕНИЕ ПЛАВКИ И  
ЗАМЕНЫ ФУРМЫ

Обратите внимание, что печь должна быть наклонена в положение, которое позволяет замену расходной фурмы (замена фурмы осуществляется каждые  $\pm 15$  часов).

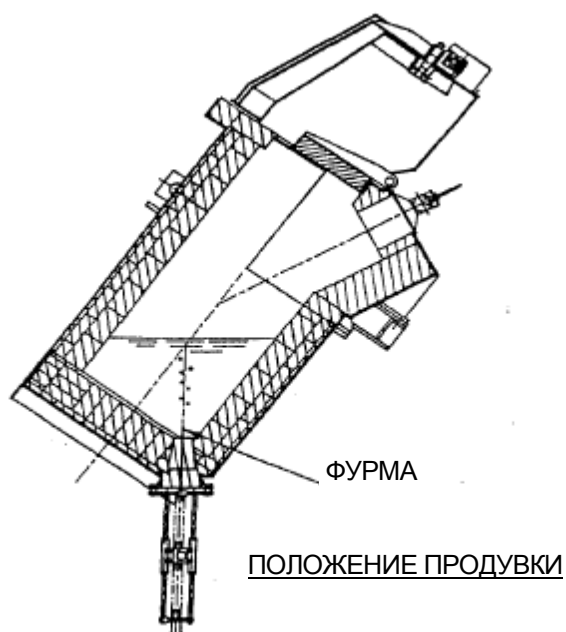
### 5.3 Окисление шихты

Как только завершается расплавление сплава верблей, и печь наклоняется в положение продувки, включается подача кислорода, и начинается продувка шихты. Положение продувки конвертера показано на рис. 8. Свинец окисляется в шлак (свинцовый глёт) со скоростью приблизительно 400 кг/ч.

Примерно каждые три часа расплавленный свинцовый глёт выпускается из конвертера.

В настоящее время операция продувки занимает всего 12 часов в день.

**Рисунок 8 Окисление шихты**



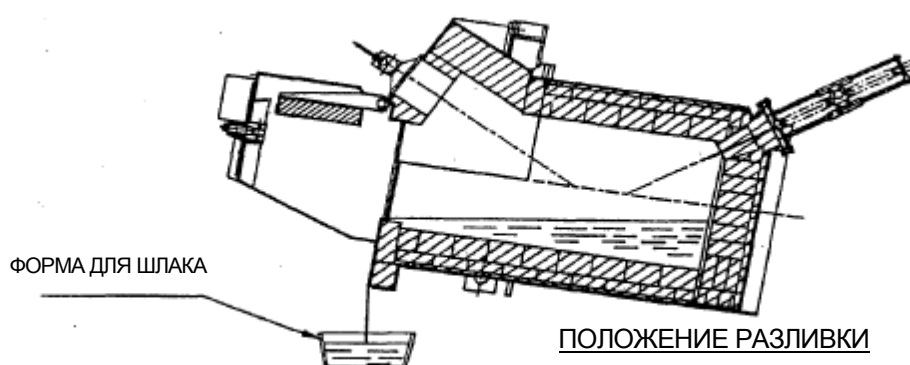
#### 5.4 Операции разливки

Печь наклоняется в положение разливки, как показано на рис. 9. Свинцовый глёт осторожно выпускается через профилированный выпускной блок и затем гранулируется в воду. Эта операция продолжается до тех пор, пока не будет удалена большая часть имеющегося свинцового глёт. Печь наклоняется обратно либо в положение загрузки (при наличии дополнительной твердой загрузки), либо в положение продувки для возобновления окисления.

При разливке концентрированного сплава верблей из печи слиток отливается в формы, которые формируют блоки металла весом  $\pm 400$  кг.

Во время отливки слитка сплава Доре (который обычно разливается приблизительно каждые пять дней) горелка должна работать в течение всей операции разливки, чтобы предотвратить замерзание металла. Слиток сплава Доре в настоящее время разливается в рудничные плавильные формы, которые обеспечивают стержни весом приблизительно 20 кг.

**Рисунок 9 Операции разливки**



## 6 Общие комментарии

### 6.1 Начальные эксплуатационные результаты для КДПК

Следует отметить, что все эксплуатационные и финансовые результаты основываются только на первых трех месяцах работы нового КДПК на предприятии компании Rand Refinery, т.е. с октября 1994 по декабрь 1994 г. включительно.

В течение этого периода КДПК проработал 62 рабочих дня. Оставшуюся часть этого периода КДПК простаивал из-за 14 дней отключения на Рождество и из-за отсутствия сплава верблей, полученного методом дуговой электроплавки. Это отсутствие сплава верблей связано с проблемами ввода в эксплуатацию, возникшими на новой установке загрузки и подмешивания флюсов, которая обеспечивает загружаемый материал для электропечи с погруженной дугой.

КДПК был отключен для технического обслуживания и в связи с инженерными проблемами в течение 5 рабочих дней, которые потребовались для незначительного ремонта огнеупоров блока амбразуры и разливочного блока, а также замены блока фурмы.

За 62 дня у КДПК было в наличии достаточно шихты, он всего переработал 244,7 тонны слитков сплава верблей, полученных из дуговой электропечи, в среднем 3,95 тонн в день. Тем не менее, наибольшее количество переработки за 24 часа составило 6,2 тонны, что указывает на более чем достаточную мощность 4-тонного КДПК для переработки 5 тонн в день слитков сплава верблей, полученных методом дуговой электроплавки.

Из 244,7 тонн переработанного материала было произведено всего 4980,7 кг слитков сплава Доре, которые содержали 1448,9 кг золота и 3358,8 кг серебра. Это дает среднее содержание благородных металлов в слитке сплава Доре 96,52%, что ниже гарантии технологических показателей содержания благородных металлов  $\geq 98\%$ . Это связано с проблемами, возникающими в ходе процесса окончательного окисления перед разливкой слитка сплава Доре, поскольку горелка едва способна поддерживать температуру приблизительно от 1000 до 1020°C, что является типичной температурой плавления для слитка сплава Доре. Эта проблема усугубляется газообразным топливом Sasol, которое имеет низкую теплоту сгорания и дает пламя с низкой излучательной способностью, в особенности на той высоте, на которой расположено предприятие компании Rand Refinery (1900 метров выше уровня моря).

Данная сложность должна преодолеваться за счет добавления 4% кислорода для обогащения смеси воздуха / топлива в горелке, что увеличит температуру пламени приблизительно на 150°C, в модификации на февраль 1995 г.

Следует отметить, что наибольшее достигнутое содержание благородных металлов в слитке сплава Доре за этот период составило 99,2%, что выше гарантии технологических показателей содержания благородных металлов  $\geq 98\%$ .

В рассматриваемый период оригинальная хром-магнетитовая огнеупорная облицовка КДПК продемонстрировала очень хорошие эксплуатационные качества. Несмотря на некоторые замеченные сколы кирпичей, износ кирпичей, в особенности вокруг обычной зоны контакта шлака / воздуха, был минимальным, даже после приблизительно 9 недель работы. Блок амбразуры был дважды заменен в течение этого периода времени, и срок службы блока фурмы обычно составлял 1 ½ месяца.

## 6.2 Начальные эксплуатационные расходы КДПК

Одним из главных поводов для выбора компанией Rand Refinery процесса в КДПК было то, что он, предположительно, требует меньших затрат на техническое обслуживание и сам процесс по сравнению с вращающимся конвертером верхней продувки. Таким образом, сравнивались относительные эксплуатационные расходы за период с октября 1993 г. по декабрь 1993 г. и с октября 1994 г. по декабрь 1994 г. включительно. Хотя было бы предпочтительнее использовать для сравнения полный финансовый год 1993 – 1994, поскольку основной проект плавильного комбината начался в январе 1994 г., эта работа значительно нарушает нормальную работу контуров дуговой электропечи, вращающегося конвертера верхней продувки, купеля. Это, в свою очередь, искажает картину эксплуатационных расходов с января 1994 г. по сентябрь 1994 г., так что сравнение расходов за этот период не будет иметь смысла.

Сравнительные издержки для процессов с вращающимся конвертером верхней продувки / купеляционной печи и КДПК приводятся в таблице 2.

**Таблица 2 Сравнение эксплуатационных расходов**

	Вращающийся конвертер верхней продувки / купеляционная печь октябрь 1993г. – декабрь 1993г.	КДПК октябрь 1994г. – декабрь 1994г.
Перерабатываемые материалы	29208 (91)	12890 (52)
Огнеупоры	104974 (326)	42953 (176)
Газ Sasol	51347 (160)	46219 (189)
Технический кислород	140704 (437)	58920 (241)
Технический азот	- ( - )	12560 (51)
Техническое обслуживание и текущий ремонт	76340 (237)	42017 (172)
Затраты на оплату труда	108000 (335)	63000 (257)
ВСЕГО (ранды ЮАР)	510573 рандов (1586)	278559 рандов (1138)
<b>Всего обработано слитков сплава верблей (тонны)</b>	<b>321,8</b>	<b>244,7</b>

Обратите внимание, что цифры в скобках представляют собой индивидуальную себестоимость в рандах за тонну обработанных слитков сплава верблей. В целом все эксплуатационные расходы были уменьшены с 1586 рандов до 1138 рандов за тонну переработанных слитков сплава верблей, полученных путем плавки в дуговой электропечи, в слитки сплава Доре путем установки КДПК.

## 7 Выводы

На основании начальных эксплуатационных и финансовых результатов изначально подразумеваемые преимущества КДПК перед вращающимся конвертером верхней продувки выглядят достигнутыми.

Они определяются следующим образом:

1 Была достигнута высокая эффективность окисления, что подтверждается снижением затрат на технический кислород на сегодняшний день в размере 45%.

2 Были значительно снижены общие эксплуатационные затраты с 1586 рандов за тонну до 1138 рандов за тонну (уменьшение общих затрат на 28,3%).

3 Процесс обеспечивает возможность производства слитков сплава Доре (содержание благородных металлов  $\geq 98\%$ ) за один этап, таким образом, отпадает необходимость в старой купеляционной печи.

4 Численность персонала была уменьшена с 3 до 1,5 человек в смену.

5 Локализация дымовых газов во всех режимах работы КДПК далеко превосходит как вращающийся конвертер верхней продувки, так и купеляционную печь. Это следует из факта, что с момента установки и ввода в эксплуатацию КДПК занятый у конвертера персонал не пришлось удалять из зоны плавки с высоким уровнем свинца в крови.

6 Эксплуатационный срок службы огнеупоров КДПК составил 13 недель по состоянию на конец января 1995 г. Это выглядит очень выгодно по сравнению со средним сроком службы огнеупоров 2 недели для вращающегося конвертера верхней продувки.

7 Было получено подтверждение легкости управления и контроля процесса. Очень точное гидравлическое управление при наклоне и характеристики выравнивания разливочного носка обеспечивают проведение всех операций разливки легко и сравнительно без выплесков.

Операции, связанные с кислородной фурмой, полностью автоматизированы, и операции окисления могут быть оставлены практически без присмотра.

8 Требования к техническому обслуживанию были значительно снижены за счет оцененной экономии во времени технического обслуживания и материалам в размере 27,4%, по сравнению со старыми процессами.

9 Целостность системы безопасности и металлургический контроль были значительно улучшены за счет следующих действий:

- не требуется транспортировать концентрированный слиток из вращающегося конвертера верхней продувки в купеляционную печь;
- фактически одностадийный процесс (подача слитков сплава верблей, выпуск слитков сплава Доре);
- весь шлак в виде свинцового глета теперь гранулируется, что устраняет необходимость разбивать затвердевшие глыбы свинцового глета, которые могут содержать концентрированный свинец и/или слиток сплава Доре;
- все операции на КДПК контролировались системой внутреннего видеонаблюдения, и все операции разливки регистрировались видеосъемкой в замедленном темпе; а также
- все разливы слитков сплава Доре осуществлялись с понедельника по пятницу в дневные смены под контролем руководства.

## **Благодарности**

Автор приносит свою благодарность руководству компаний Rand Refinery и MIM Technology Marketing Limited за их разрешение опубликовать эти материалы. Также нужно отметить усилия проектной команды плавильного комбината, эксплуатационного и обслуживающего персонала, направленные на достижение успеха этого конкретного проекта.

## Справочные материалы

- 1 Фишер К.Г. Восстановление благородных металлов из попутных продуктов золотых рудников с использованием электропечи с погруженной дугой и вращающихся конвертеров верхней продувки на предприятии компании Rand Refinery Limited, Южная Африка. Симпозиум по обогатительной металлургии, 1989 г. I.M.M. Лондон, 1989, стр. 499-519.
- 2 Бултитюд-Пол Дж.М. и др. Разработка процесса инъекции в погруженном состоянии для производства серебряносодержащего сплава Доре в В.Н.А.С. Симпозиум по выплавке цветных металлов. Порт-Пири, Австралия, сентябрь 1989 г.
- 3 Ранкин В.Дж. и др. Технологическое проектирование реакторов Sirosmelt: характеристики фурмы и смешивания в ванне. Симпозиум по обогатительной металлургии, 1989 г. I.M.M. Лондон, 1989, стр. 577-600.
- 4 Баррет К.Р. и Найт Р.П. Работа купеля с донной продувкой кислородом. Конференция 6-IME. Лас-Вегас, февраль 1989 г.
- 5 Баррет К.Р. и Найт Р.П. Улучшение восстановления серебра из сплава верблей в Britannia Refined Metals, Англия. Материалы конференции по серебру. Мехико-Сити, ноябрь 1988г.
- 6 Найт Р.П. Дальнейшее применение КДПК. Международный симпозиум по инъекции в технологии металлов. Ежегодное собрание TMS, Новый Орлеан, 1991 г.