

Оптимизация схемы переработки магнетитовых руд месторождения в Западной Австралии

D David¹, M Larson² and M Li³

1. FAusIMM, Process Consultant, AMEC Minproc, Level 14, 140 St Georges Terrace, Perth WA 6000. Email: dean.david@amec.com
2. Senior Process Engineer, Xstrata Technology, 5th Floor, 509 Richards Street, Vancouver BC, V6B 2Z6, Canada. Email: mlarson@xstratatech.com
3. Senior Metallurgy Manager, Grange Resources, Level 11, 200 St Georges Terrace, Perth WA 6000. Email: Michelle.Li@grangeresources.com.au

АННОТАЦИЯ

Разработка магнетитовых месторождений в Западной Австралии привело к проектированию нескольких самых крупных мельниц и фабрик в мире. Один из проектов демонстрирует рост эффективности, который возможен благодаря разработке простой, но всеобъемлющей программе испытаний технологической схемы. На основании опыта существующих предприятий, перерабатывающих магнетитовую руду в Австралии, и месторождений Месаби и Маркетт в США, была разработана основная технологическая схема. Благодаря расширенным испытаниям с мельницами самоизмельчения, шаровыми и смесительными мельницами, была оптимизирована технологическая схема, с целью использовать сильные стороны мельниц каждого типа для получения необходимой конечной крупности помола. Лабораторные работы были подтверждены на демонстрационной установке, с целью оптимизировать КПД энергии каждой стадии измельчения с обеспечением достаточного высвобождения на каждой стадии для достаточной отбраковки пустой породы. При использовании трехстадийного помола, шаровая мельница может лучше всего гарантировать высвобождение и выведение всей пустой породы верхнего продукта на второй стадии магнитного обогащения. Включение мельницы IsaMill в качестве третьей стадии помола с ее характерным точным гранулометрическим составом продукта, гарантировало получение максимального качества и упростило процесс переработки после установки, при этом обеспечивая дальнейшие улучшения в части общих капитальных и эксплуатационных затрат на измельчение продукта. В этом случае сочетание двух технологий после мельницы самоизмельчения является более эффективным, чем установка этих мельниц по отдельности при снижении общей установленной мощности на 1/3 и годовых затрат на мелющие тела на 2/3.

ВВЕДЕНИЕ

За последнее десятилетие интерес к железорудным месторождениям Австралии сместился в сторону включения огромных магнетитовых месторождений, разбросанных по Западной Австралии. Заинтересованность в этих месторождениях на данном этапе проявилась в многочисленных фабриках для обогащения магнетитовых руд, которые находятся на стадии проектирования и строительства. Более ранние обогатительные фабрики для магнетитовых руд в Австралии были ограничены небольшими производствами, такими как Savage River и OneSteel's Project Magnet.

С производительностью питания 3600 т/ч и конечным помолом $P_{80} = 34$ мкм, количество помола, необходимого для данного проекта, будет большим. Ожидается более низкое конечное качество по сравнению с типичным, т.е. ниже 3% SiO_2 . К тому же, в руде присутствует небольшое количество магнитного колчедана, который необходимо обогащать флотацией, чтобы соответствовать требованиям по сере. В этом случае проверили всю технологическую схему, тестируя ранее проверенные технологии существующих заводов с целью оптимизировать все стадии процесса. Лабораторные испытания сочетали с пилотными, чтобы гарантировать максимальную экономическую эффективность при сохранении качества продукта.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТИПИЧНОЙ ОБОГАТИТЕЛЬНОЙ ФАБРИКИ ДЛЯ МАГНЕТИТОВЫХ РУД

Ниже изображены пять технологических схем обогатительных фабрик для магнетитовых руд из Миннесоты (рис. 1, 4 и 5), Мичигана (рис. 3) и Австралии (рис. 2). Хотя в этих схемах присутствует смесь стержневых, шаровых мельниц и мельниц самоизмельчения (в зависимости от того, какая технология была наиболее распространена или что было в наличии на момент проектирования этих фабрик), необходимо выделить два этапа в этих процессах.

Использование гидросепараторов является общепринятым на фабриках с обратной флотацией кремнезема или без нее. Выведение шламов абсолютно необходимо перед стадией флотации кремнезема, это также помогает выводить тонкодисперсный кремнезем, который вероятнее всего перешел бы в магнитный концентрат.

Независимо от того, называется ли он гидросепаратором, гидроклассификатором, классификатором сифонного типа или классификатором-сгустителем, основной принцип одинаков. “Сгуститель” используется, но с добавлением воды восходящим потоком. Более крупные и тяжелые частицы магнетита осаждаются на дне, а восходящий поток воды выносит тонкодисперсный кремнезем в верхний слив. Также для повышения скорости осаждения и минимизации потребления химического флокулянта можно добавлять в питание магнитный флокулянт.

Грохоты для тонкой классификации необходимы, чтобы перенаправить на доизмельчение материал класса крупности +105 мкм, присутствие которого отрицательно сказалось бы на качестве конечного концентрата, а в случае обогатительной фабрики Savage River это вылилось в недопустимый износ трубопровода для концентрата. В случае руд восточной гряды Месаби, например, Миннтак, концентрат, измельченный до класса крупности $P_{80} = 325$ меш (44 мкм), обычно имеет 8% SiO_2 , половина этого кремнезема в 10% массы составляет фракция крупностью +140 меш (105 мкм). При использовании грохотов для тонкой классификации эту фракцию можно вывести, и снизить конечное содержание кремнезема в концентрате до 4-5%.

Среди всех представленных производств только в технологической схеме Empire Mine не применяют грохоты тонкой классификации. В результате измельчения на фабрике Empire Mine получали конечный продукт класса $P_{80} = 20$ мкм, что делает использование грохотов тонкой классификации не практичным и не нужным. Также, как выяснилось, только на фабрике Empire Mine применяют обратную флотацию в качестве конечной стадии обогащения.

Обратная флотация кремнезема используется в крайнем случае при обогащении магнетита, так как часть магнетита будет потеряна с хвостами. Магнитные сепараторы тонкой классификации отбракуют весь высвободившийся кремнезем (исключая кремнеземистые шламы, которые присутствуют в процессе вместе с водой) перед флотацией. Следовательно, практически весь крупный кремнезем флотации будет с прилипшими частицами магнетита. Флотация кремнезема с использованием амина также выявляет проблемы со шламами и является очень восприимчивой к химическому составу воды. Хотя гидросепараторы должны быть установлены несмотря ни на что, чтобы удалять шламы перед стадией магнитной флотации, дополнительное преимущество гидросепаратора в виде сокращения растворимых солей является преимуществом только в том случае, когда выполняется стадия флотации кремнезема. По мнению Ивасаки (1983) флотация железных руд жирными кислотами довольно чувствительна к ионам магния и кальция в растворах пульпы. Для оптимальной работы уровень этих ионов необходимо удерживать ниже 100 ppm.

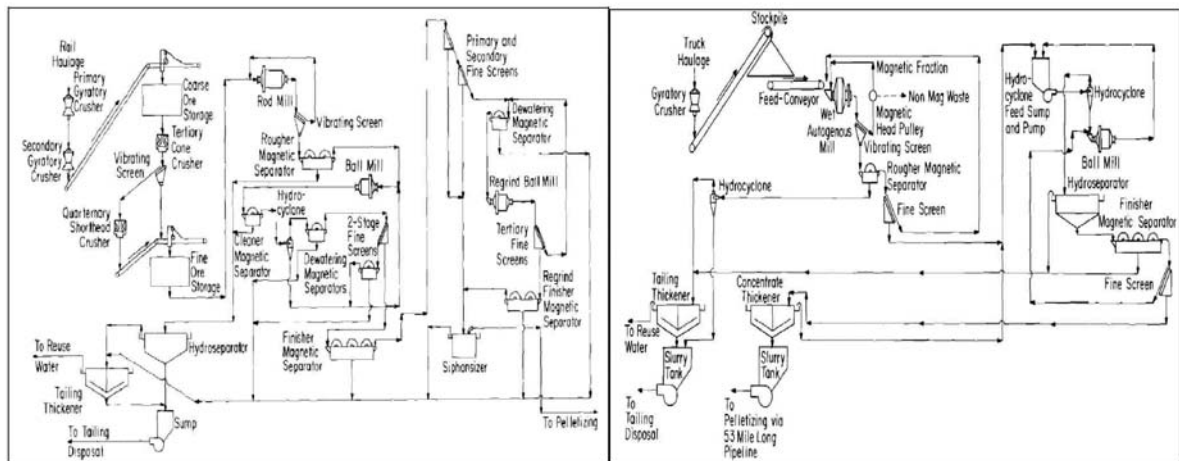


Рис. 1 и 2: Технологические схемы Erie Magnetite и Savage River (Девани, 1985)

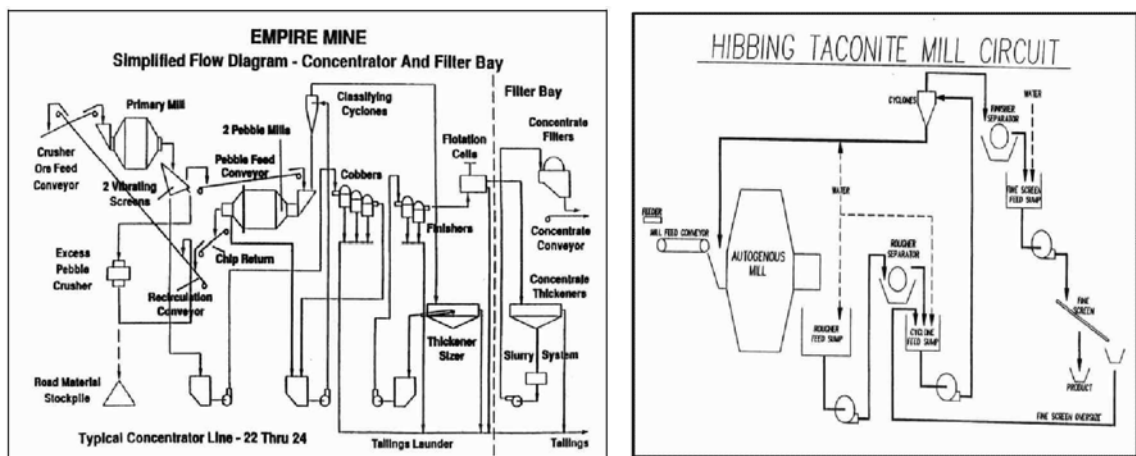


Рис. 3 и 4: Технологические схемы Empire Mine и Hibbing Taconite (МасАйвор и Гринвуд, 1996)

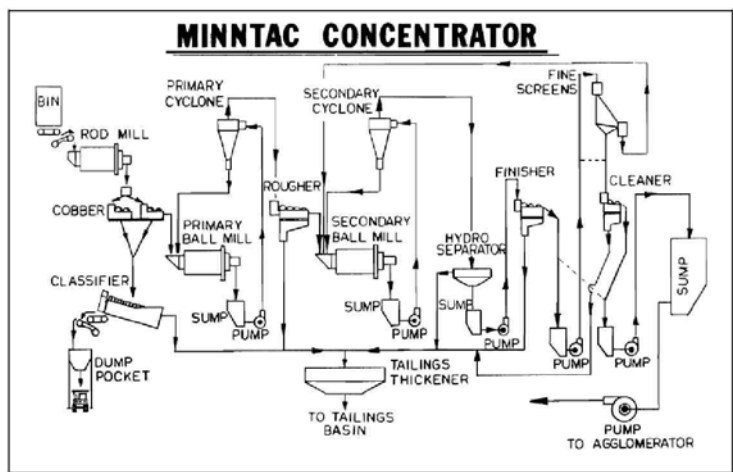


Рис. 5: Технологическая схема Minntac (Девани)

ПРОГРАММА ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАТЕЛЬНЫХ РАБОТ

Испытательные работы, проведенные компанией АММТЕС, для данного месторождения магнетитовых руд в Западной Австралии состояли из:

- Пилотного испытания мельницы первичного самоизмельчения,
- Лабораторных испытаний (тест Левина) и пилотного испытания шаровой мельницы вторичного измельчения,
- Лабораторных и ограниченных непрерывных испытаний мельницы IsaMill вторичного измельчения,
- Лабораторного испытания третичного измельчения, ограниченных непрерывных и пилотных испытаний IsaMill,
- Испытаний трубки Дэвиса и пилотных испытаний магнитного обогащения на различных промежуточных и конечных продуктах,
- Испытаний гидросепарации на конечном магнитном концентрате IsaMill,
- Испытаний флотации сульфида на конечном магнитном концентрате, и
- Тестирования классификации конечного концентрата, выполняется поставщиками.

Мельница первичного самоизмельчения

Вся руда перемалывалась на демонстрационной мельнице самоизмельчения АММТЕС (1,74 м – диаметр внутренней футеровки и 0,46м – эффективная длина измельчения) и затем прогонялась через магнитный сепаратор. Для защиты магнитного сепаратора мельницу самоизмельчения закрывали 1 мм экраном. Предполагается, что промышленная мельница самоизмельчения будет закрыта экраном более крупного размера, до 4 мм максимум. На промышленной установке требуется перерабатывать 3600 т/ч питания, в идеале через две линии измельчения, каждая из которых оснащена большой мельницей самоизмельчения с двойной шестерней или с безредукторным приводом. С энергией, поступающей от демонстрационной мельницы самоизмельчения при заполнении 25% , класс крупности питания магнитного сепаратора P_{80} (-1мм) составлял примерно 330 мкм. Магнитный концентрат был значительно крупнее, чем немагнитный с классом крупности $P_{80} = 420$ мкм и 200 мкм соответственно. На первой стадии магнитного обогащения выводили 40% от общей массы в виде бедных хвостов. Оставшиеся 2200 т/ч подают на вторую стадию измельчения. Дополнительный анализ позволяет предположить, что P_{80} магнитного концентрата увеличиться с 420 мкм до 770 мкм при использовании 3 мм экрана на промышленной установке по сравнению с 1 мм экраном демонстрационной установки.

Результаты испытания шаровой мельницы

Перед проведением испытаний на демонстрационной шаровой мельнице, выполнили один тест Левина на питании вторичного измельчения, результаты представлены на рис. 6. Тест Левина является заменой стандартного теста на определение индекса Бонда с тонкодисперсным питанием, в нем используют последовательные проходы измельчения в открытом цикле с применением известной энергии при каждом проходе. Результаты этого теста с классом крупности P_{80} в микронах, нанесенные на кривую удельного потребления энергии (кВтч/т), показаны на рис. 6.

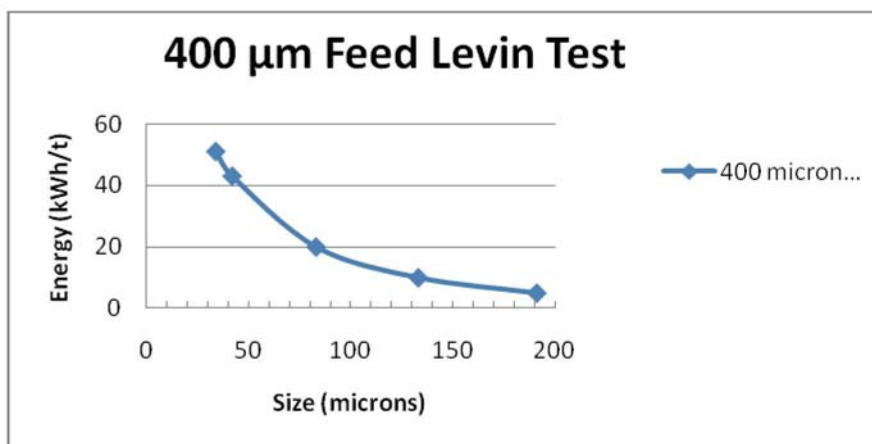


Рис. 6: Тест Левина для шаровой мельницы

Тест Левина для тонкодисперсного продукта шаровой мельницы прогнозирует удельное потребление энергии 52,5 кВтч/т для измельчения питания класса $F_{80} \sim 400$ мкм (продукт мельницы самоизмельчения/магнитного сепаратора) до продукта класса $P_{80} 34$ мкм. Дополнительные 2,3 кВтч/т будут необходимы в случае снижения крупности питания $P_{80} 770$ мкм до питания, используемого при проведении теста, $P_{80} 420$ мкм, тем самым требование к удельному потреблению энергии составляет 54,8 кВтч/т. Однако, если в тест Левина не будет включен этап классификации для выведения мелочи, энергия расходуется без надобности на измельчение материала, который уже достиг конечной целевой крупности помола или даже мельче. Следовательно, ожидается, что тест даст преувеличенную оценку удельного потребления энергии, особенно для широких диапазонов крупности. Действительные результаты, полученные при использовании демонстрационной шаровой мельницы АММТЕС 6' с мелющими телами 25 мм, представлены классом крупности $P_{80} 37$ мкм, полученным с использованием энергии 40 - 45 кВтч/т. При подаче смешенного питания 2200 т/ч на линии 1 и 2 и вводом 2,3 кВтч/т для понижения крупности с 770 мкм до 420 мкм при однократной проходке через шаровую мельницу для снижения крупности с 770 мкм до 34 мкм потребуется около 114 МВт энергии шаровой мельницы за исключением энергии, связанной с питающими насосами циклона. Это равно 6 самым крупным шаровым мельницам, 3 на линию. К тому же около \$86 миллионов будут уходить на закупку стальных мелющих тел ежегодно. Высокий расход мелющих тел обусловлен высоким средним индексом абразивности Бонда 0,44, вызванным присутствием силикатов и гранатов пустой породы. У типичной магнетитовой руды будет A_i (индекс абразивности) 0,25 или меньше. Требование использовать стальные шары 25 мм для достижения требуемой тонины помола усиливает скорость износа среды. Также потребуются капитальные затраты в размере \$15 миллионов в случае цикла с шаровой мельницей имеющего целью получение продукта 34 мкм на разгрузочные грохоты, которые необходимы для минимального снижения кремнезема и защиты трубопровода концентрата. Комбинация шаровой мельницы и циклона не может гарантировать выведения частиц крупностью +100 мкм из питания трубопровода.

Вторичное измельчение на IsaMill

То же питание, что было испытано в предыдущем тесте Левина, пропустили через мельницу M4 IsaMill для построения кривой энергоемкости. Для обеспечения размолва верхнего продукта использовали 5 мм керамические мелющие тела. Тест на энергоемкость состоит из двух емкостей, одна – для питания мельницы, и другая используемая в качестве емкости для выгрузки. В середине каждого прохода отбирают пробу для определения крупности и плотности. Расход, время и чистая затрата энергии на проход регистрировались, а крупность отмечалась на кривой удельного потребления энергоемкости (кВтч/т). Затем положение клапанов меняется, чтобы включить баки питания и разгрузки, этот процесс повторяется много раз, при каждом прохождении повышая потребляемую энергию. На основании чего была построена кривая энергопотребления. Эта кривая представлена прямой линией

гранулометрического состава частиц на логарифмической сетке в сравнении с кривой энергопотребления, которая масштабируется напрямую на промышленные мельницы IsaMill. Результат теста на определение энергоемкости изображен на рис. 7.

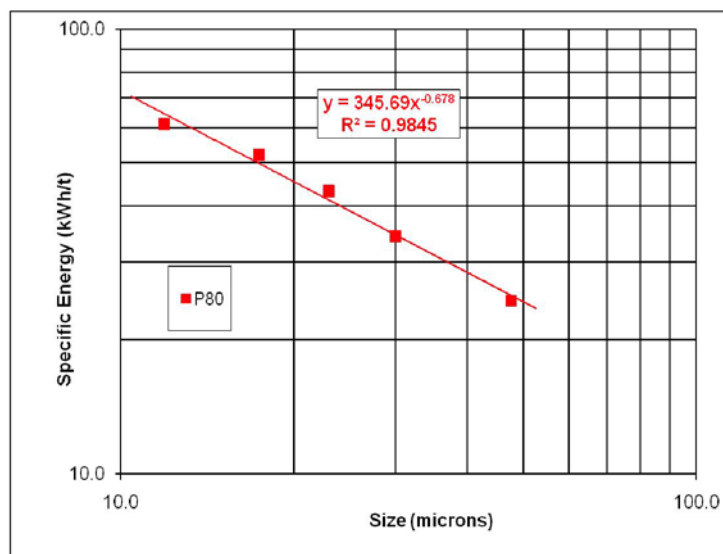


Рис. 7: Кривая энергоемкости для IsaMill, 400 мкм

На мельнице IsaMill можно было сократить питание вторичного измельчения крупностью 400 мкм до 34 мкм с использованием 31,7 кВтч/т. Общая прогнозируемая энергия IsaMill составляет 34 кВтч/т с 2,3 кВтч/т необходимыми для сокращения крупности от 770 мкм до 420 мкм (в предыдущем испытании шаровой мельницы) (обратите внимание, что данный расчет является теоретическим, так как питание магнетитовой руды F_{80} 770 мкм для IsaMill нецелесообразно, и неэффективность IsaMill на материале такой крупности означает, что значение 2,3 кВтч/т является оптимистичным). Это явное улучшение удельного энергопотребления на 30% по сравнению с шаровой мельницей (для данной теоретического более крупного питания). Это привело бы к установленной мощности 78 МВт, если бы использовали мельницы IsaMill в сравнении с 114 МВт которые требуются для шаровой мельницы. К тому же годовые затраты на мелющие тела снизятся с \$86М за стальные шары до \$57М за керамическую мелющую среду IsaMill. Помимо высокой абразивности руды, гальваническое действие магнитного колчедана, присутствующего в руде, может способствовать высокому уровню износа стальных мелющих тел (Ивасаки, 1999г). Эта опасность отсутствует в случае использования керамических тел.

Даже в случае такого радикального улучшения, как в случае с шаровой мельницей, все равно остаются проблемы с использованием IsaMill а одностадийном процессе для данной цели. Из-за присутствия крупного и прочного гранита и жильного силиката, а также из-за трения, создаваемого при перемешивании этих частиц, износ мелющих тел был выше, чем ожидалось. Несмотря на улучшенные показатели по износу по отношению к стальным мелющим телам шаровой мельницы, износ керамической среды IsaMill был в два раза выше предполагаемого уровня. Энергию, затраченную на измельчение этого гранита до 34 мкм, можно считать потраченной впустую. Изучаемый гранит представляет собой прочный глиноземный силикат и действительно имеет свойства близкие к свойствам типичной мелющей среды IsaMill. Было бы намного эффективнее вывести это утильсырье по возможности сразу перед высвобождением. На рис. 8 крупным планом изображены кристаллы гранита, полностью высвободившиеся в диапазоне крупности 125-150 мкм.

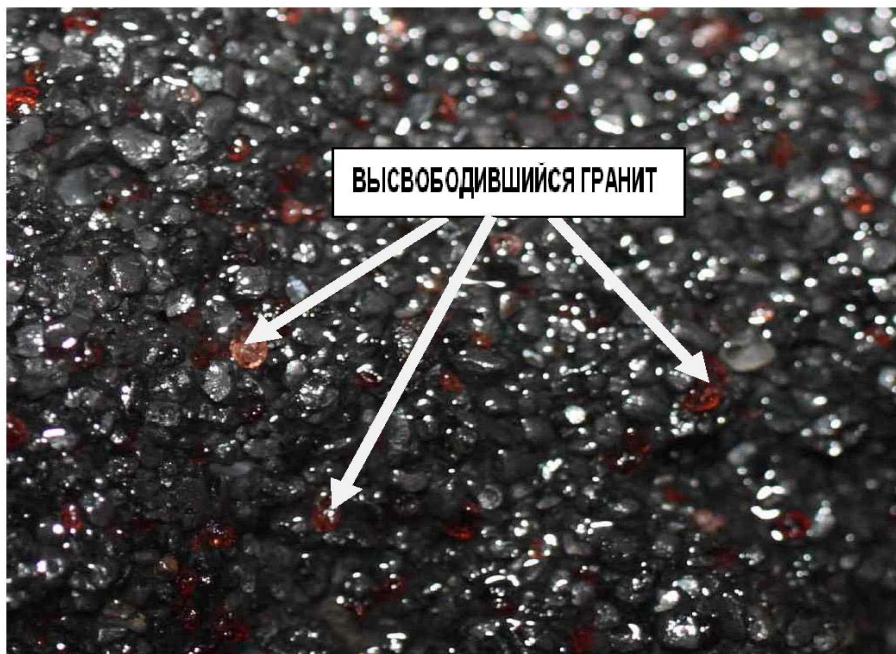


Рис. 8: Высвободившиеся частицы гранита после измельчения 150 мкм

Отображая результаты теста Левина и вторичного измельчения IsaMill вместе (рис. 9) можно увидеть, что рост эффективности при использовании мельницы IsaMill для определенного типа руды начинается при классе крупности продукта P_{80} приблизительно 100 мкм. При крупности продукта выше данной точки, шаровая мельница является более эффективной. Это в основном функция крупности мелющих тел. Мелющая среда крупнее 5 мм, используемая в мельнице IsaMill, обеспечила бы более эффективное сокращение крупности до 100 мкм, но не была бы настолько эффективная при целевой конечной крупности 34 мкм. При таком снижении крупности, применяемом к прочной породе, измельчение всего потока в одной стадии никогда не достигнет оптимальной эффективности для всех классов крупности при использовании любой технологии измельчения.

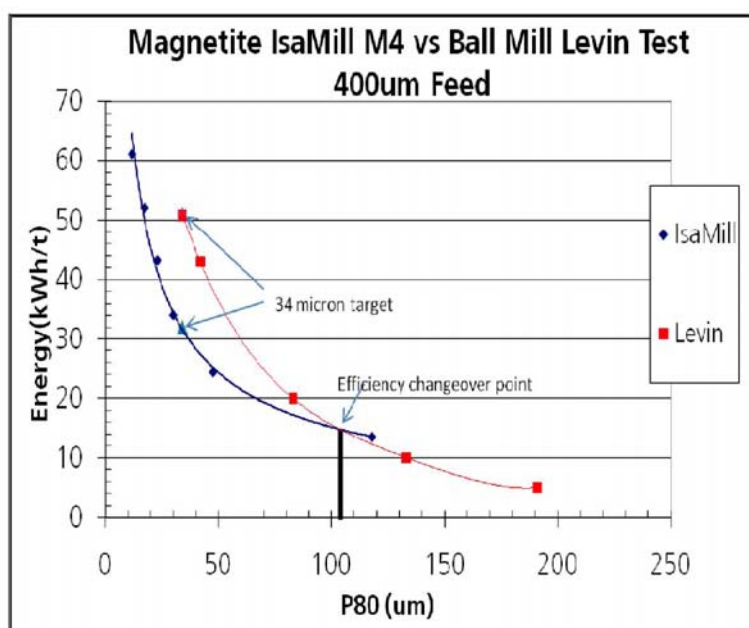


Рис. 9: Сравнение результатов тестирования IsaMill/Левина

Улучшение эффективности IsaMill при тонкодисперсных классах крупности можно объяснить механизмом измельчения и используемой мелющей средой. При тонкодисперсных продуктах крупностью ниже 70-100 мкм, истирание становится главным механизмом измельчения. 5 мм мелющая среда дает не только большую площадь поверхности по сравнению с 25 мм мелющей средой шаровой мельницы, но и более высокую вероятность ударов, чем в случае более крупной стальной мелющей среды, также она является более плотной, чем стальная среда.

Более эластичная стальная среда не переносит энергию до частиц руды так же эффективно, как керамическая среда. Твёрдость по Виккерсу для используемой керамики около 1000, в то время как для стальной среды она обычно находится в диапазоне 500-600.

Изменение эффективности также видно на рис. 10 (Бурфорд и Нива, 2008г), сравнение IsaMill с башенной мельницей на магнетитовом питании Ernest Henry, взятом из хвостов медной обогатительной фабрики. В случае крупности ниже 70 мкм более мелкая и прочная среда IsaMill считается более эффективной, чем 12 мм стальные тела, используемые в башенной мельнице. Это тестирование проводили с использованием 3,5 мм керамической среды. При использовании 5 мм среды эта точка пересечения будет сдвинута в сторону более крупную.

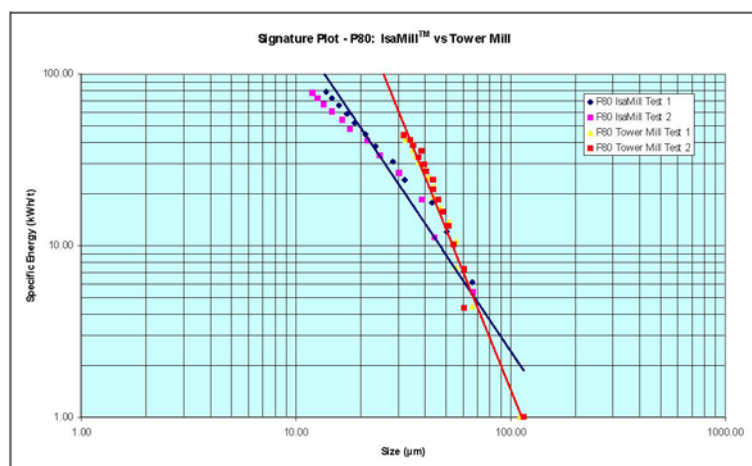


Рис. 10: Сравнение измельчения магнетитовой руды Ernest Henry на мельнице IsaMill и на башенной мельнице

Из рисунков 9 и 10 ясно видно, что измельчение в шаровой или башенной мельнице с использованием типичной среды более эффективно, когда применяется к производству “крупного” продукта в диапазоне +80 мкм. Следовательно, измельчение на шаровой мельнице выбрали, чтобы перекрыть «пробел» в эффективности, который имеется между измельчением в мельницах самоизмельчения с данной рудой до около 400 мкм P_{80} и применением IsaMill для крупности питания 100 мкм и тоньше. Согласно тесту Левина, для измельчения питания 400 мкм P_{80} до продукта 100 мкм P_{80} требуется 15 кВтч/т. При пилотном испытании было достигнуто измельчение в шаровой мельнице (с мелющими телами 32 мм) с 420 мкм до 78 мкм при удельном энергопотреблении 11,6 кВтч/т, что значительно более продуктивно, чем прогноз теста Левина. При переводе измельчения в полномасштабное производство с мощностью 2200 т/ч с крупности 770 мкм до 100 мкм, требование по установленной мощности шаровой мельницы составляет 34 МВт, это достижимо при использовании двух больших шаровых мельниц с двойной шестерней (одна на линии).

Только при необходимости получить продукт шаровой мельницы крупностью 80 – 100 мкм можно получить дополнительную выгоду в виде перехода со стальных шаров 25 или 32 мм, которые использовались при тестировании, на 40мм шары. Использование 40 мм шаров обеспечивает достаточное сокращение верхнего продукта при переработке питания 770 мкм F_{80} и значительно снижает износ стальных мелющих тел.

Третичное измельчение на IsaMill

Продукт промежуточной пилотной шаровой мельницы затем передавали на стадию магнитного обогащения, где выводили еще 20% по массе, большая была представлена кварцем, и небольшая часть гранитом. В результате на стадию измельчения IsaMill подавали менее абразивное питание крупностью 76 мкм, этот материал перерабатывали на мельнице M4 IsaMill, применяя стандартную кривую энергоемкости и керамическую мелющую среду 5мм. Результаты, показанные на рисунке 11, говорят о том, что для измельчения питания F_{80} 76,5микрон до продукта P_{80} 34 мкм требуемая энергия IsaMill составляет 12,4 кВтч/т.

Испытание IsaMill на более крупном материале (рис. 7) показало, что 13,4 кВтч/т будет необходимо для измельчения с F_{80} 76,5микрон до P_{80} 34микрон. Эта разница в 7,5% может быть результатом более мягкого питания благодаря дополнительной стадии магнитного обогащения. Она также очень близка к 5% пределу погрешности, относящемуся к этим испытаниям.

Эта кривая энергопотребления сравнима с другими испытаниями IsaMill на железной руде, которые выполнялись на похожем питании железной руды F_{80} и с энергией, приспособленной к 76,5 мкм, как показано на рисунке 12 (Ларсон, 2011).

Тест Левина показывает, что шаровая мельница требует 30 кВтч/т для подобного снижения крупности. Однако, эта разница двух испытаний на демонстрационной шаровой мельнице (420 мкм до 34 мкм против 420 мкм до 100 мкм) составила только 22 кВтч/т, необходима более тщательная оценка мощности шаровой мельницы для достижения конечного измельчения. Еще раз нужно отметить, что тест Левина дал преувеличенную оценку требования по питанию шаровой мельницы. Самое лучшее из имеющихся сравнение двух испытанных «соперников» тонкого измельчения – 22 кВтч/т для шаровой мельницы против 12 кВтч/т для IsaMill, Преимущество удельного энергопотребления в 45% только для IsaMill на данном этапе. К тому же реализовалась экономия на установленной мощности и капитальных затратах за счет отсутствия необходимости в циклонах в цикле IsaMill, в то время как они необходимы для шаровой мельницы.

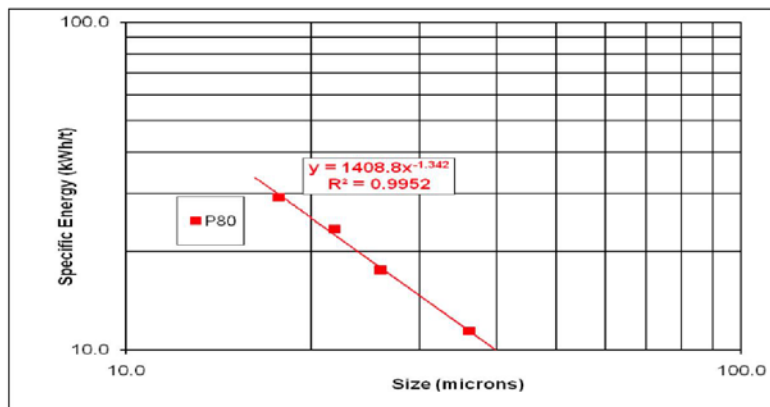


Рис. 11: Кривая энергоемкости для тонкодисперсного питания магнетитовой руды IsaMill

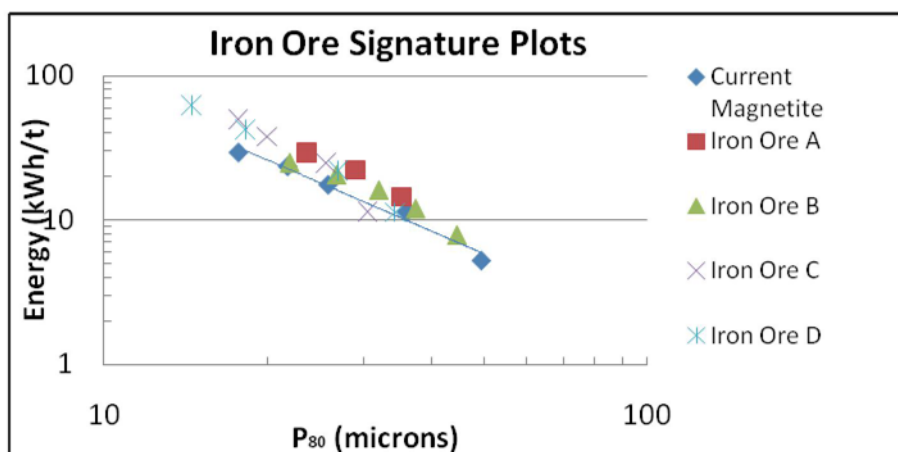


Рис. 12: Кривая энергоемкости для обычной железной руды

Более тонкое питание F_{80} 76,5 микрон также пропускали через мельницу M4 IsaMill в ходе короткого непрерывного испытания 180 кг и затем непрерывно как часть демонстрационной установки. Энергия 12-13 кВтч/т была намечена при помощи регулирования скорости мельницы. Целевую крупность P_{80} 34 мкм поддерживали при проведении этих тестов, включая снижение крупности верхнего продукта.

Также было обнаружено еще одно преимущество в износе керамической мелющей среды при измельчении этого более тонкого обогащенного материала. Износ среды был сокращен на 35% на кВтч по сравнению с вторичным питанием IsaMill (420 мкм F_{80}).

При условии, что в верхнем продукте может иметься примесь силиката с примесью железа, важно рассмотреть полностью распределение продукта по крупности, полученное при доизмельчении. Этот гранулометрический состав в зависимости от энергопотребления, который является наиболее близким к целевому значению 34 мкм, показан на рисунке 13.

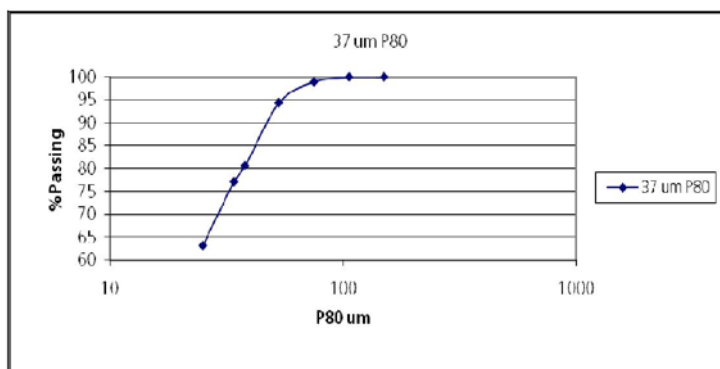


Рис. 13: Кривая гранулометрического состава продукта IsaMill

Гранулометрический состав продукта IsaMill составляет 98,9% класса 75 мкм и 100% класса 105 мкм при P_{80} 37 мкм. Это устраняет необходимость в более тонких грохотах, что экономит до \$15 миллионов капитальных затрат вместе с эксплуатационными затратами, связанными с потенциальным техобслуживанием высокопроизводительного оборудования. Обычно 15 дюймовые циклоны будут давать соотношение P_{98}/P_{80} около 3-4 и это определенно требует использования нижних грохотов. В данном случае соотношение IsaMill ниже 2.

Кроме того природное улучшение качества концентрата без надобности в тонких грохотах и более лучший гранулометрический состав имеют дополнительное преимущество при получении еще более сверхтонких частиц. На промежуточном этапе магнитного обогащения после шаровой мельницы выводили 80% кремнезема, присутствующего в этом потоке. Это в результате приводит к меньшему количеству кремнезема, который необходимо перемалывать до 34 мкм. Это сокращение материала, который можно превратить в кремнеземистые шламы, вместе с ранее упомянутым более точным гранулометрическим составом, может привести к проектированию менее крупного гидросепаратора, что снижает занимаемую площадь одной из самых крупных единиц оборудования в технологической схеме. Также преимущества можно найти в фильтровании концентрата. Это испытание все еще продолжается на момент написания данной статьи.

Конечные результаты

Для определения наиболее эффективного средства сокращения первично раздробленной магнетитовой руды до целевой крупности P_{80} около 34 мкм использовали сочетание лабораторных и полупромышленных испытаний. Эффективность была увеличена использованием специальных машин для различного помола в сочетании с отбраковкой пустой породы по возможности на более ранних этапах технологической схемы.

Было выяснено, что на стадии помола в мельнице самоизмельчения создается относительно крупный продукт в полупромышленном масштабе и этот поток будет более крупный в промышленном масштабе. Такая крупность первичного магнетитового концентрата делает его непригодным для подачи на устройство тонкого измельчения, такое как мельница IsaMill, но является идеальным для питания шаровой мельницы. Однако, как выяснилось шаровая мельница не подходит для приема руды из разгрузки мельницы самоизмельчения для конечного целевого измельчения на одном этапе, так как она становится относительно неэффективной для помола тоньше 80 мкм. Испытательные работы показали, что уместно использовать шаровую мельницу для помола до около 100 мкм P_{80} с последующим магнитным обогащением и с завершающим измельчением до 34 мкм в мельнице IsaMill. Экономится около 60 МВт мощности (40% от общей мощности и ~50% мощности для этапа измельчения) по сравнению с одностадийным циклом шаровой мельницы и \$62 млн. ежегодно на затратах на мелющую среду как показано в Таблице 1. Необходимо включить в технологическую схему дополнительную стадию магнитного обогащения, а тонкие грохоты можно исключить, а также снизить требование к гидросепаратору. В мельнице IsaMill имеется внутренний центробежный классификатор, поэтому нет необходимости в установке циклонов на стадии третичного помола. Там, где это возможно, будет использоваться самотек, чтобы избежать установки дополнительных насосов. Например, верхний слив циклона шаровой мельницы будет самотеком стекать в промежуточный распределитель магнитного сепаратора, и сами магнитные сепараторы будут расположены таким образом, чтобы магнетит стекал непосредственно в питающие баки IsaMill.

Таблица 1. Сравнение установленной мощности и годовых затрат на мелющую среду

	Скорость подачи питания (т/ч)	Удельное потребление энергии (кВтч/т)	Установленная мощность (МВт)	Оценка по приблизительным годовым затратам на мелющие тела
Мельница самоизмельчения, продукт 770 мкм	3800	8,5	40	\$0
Одностадийная шаровая мельница, продукт 34 мкм	2200	47	114	\$86 млн
Одностадийная мельница IsaMill, продукт 34 мкм	2200	34	78	\$57 млн
Шаровая мельница, продукт 100 мкм	2200	12	34	\$13 млн
Мельница IsaMill, продукт 34 мкм	1720	13	24 58	\$11 млн \$24 млн

Хотя будет установлена мощность 58 МВт шаровой мельницы и мельницы IsaMill, только около 50 МВт рабочей мощности будет необходимо при средних эксплуатационных условиях. Установка восьми мельниц IsaMill M10 000 мощностью 3,0 МВт (четыре на линии) также оставляет некоторое место для расширения в будущем. Хотя каждая мельница запитывается от двигателя мощностью 3 МВт, в среднем необходимо только 2,7-2,8 МВт на мельницу. В таком случае, при остановке мельницы IsaMill на техобслуживание, можно активизировать другие мельницы до полной мощности, не воздействуя на производительность.

Добавление гидросепаратора в этот цикл является критичным для достижения содержания кремнезема менее 2%. Нижние магнитные грохоты не способны полностью вывести шламы, присутствующие и захватываемые при конечной крупности помола. Как выяснилось, гидросепараторы снижают содержание кремнезема в концентрате магнитного сепаратора на примерно 1%.

После гидросепаратора и магнитного обогащения имеется стадия флотации сульфида. В то время как пирит выводится в хвосты на стадиях магнитного обогащения, магнитный колчедан, присутствующий в руде, является магнитным и будет переходить в конечный концентрат. Содержание серы в конечном магнитном концентрате составляет 0,6%, а это неприемлемо для установок гранулирования. После стадии флотации сульфида содержание серы в конечном продукте снижается до менее 0,1%, что приемлемо.

Таким образом, конечная технологическая схема получения концентрата для данного проекта следующая:

Две мельницы самоизмельчения мощностью 20 МВт с 3мм грохотами с последующей стадией магнитного обогащения. Этот концентрат является питанием двух шаровых мельниц мощностью 17 МВт с гидроциклонами, верхний слив которых является питанием второго комплекта магнитных сепараторов. Магнитный концентрат является питанием для восьми мельниц M10 000 IsaMill мощностью 3 МВт. Продукт IsaMill имеет конечную крупность помола без дальнейшей классификации и последовательно загружается в гидроциклоны, с последующей стадией конечного магнитного обогащения и, наконец, флотацией сульфида. Нижний продукт флотации сульфида откачивается на фильтрационную установку, которая находится в стороне. На каждой стадии магнитного обогащения, гидроциклонов и флотации получают отвальные хвосты без их

повторной циркуляции.

ВЫВОДЫ

Данное исследование можно считать успешным, так как были достигнуты значительные улучшения по сравнению с предварительным проектом в отношении капитальных и эксплуатационных затрат. К тому же были выполнены строгие требования по содержанию кремнезема и серы в конечном концентрате при этом снижении затрат. Еще более впечатляющим эти результаты делают короткие временные рамки выполнения этой работы и завершения проекта. Кампания полупромышленных испытаний на разгрузке мельницы самоизмельчения продлилась одну неделю. Она включала работу двух разных шаровых мельниц с добавлением мельницы M4 IsaMill, для последовательной работы в полупромышленном масштабе. Экономия +56 МВт мощности помола и более \$60млн. ежегодно на мелющей среде свидетельствует об эффективности простого, но в то же время хорошо продуманного плана.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы хотели бы выразить свою благодарность работникам АММТЕС за испытания, проведенные в ходе данной кампании полупромышленной установки.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

Burford B, Niva E, 2008. Comparing Energy Efficiency in Grinding Mills, in *Metallurgical Plant Design and Operating Strategies (MetPlant 2008)*, pp 45-64, (AUSIMM, Melbourne).

Devaney F, 1985. Section 20, Iron Ore, in *SME Mineral Processing Handbook (ed: NL Weiss)*, Society of Mining Engineers of AIME.

Iwasaki I, 1983. Iron Ore Flotation, Theory and Practice, Gaudin Lecture, 1982 Annual AIME Meeting, *AIME Transactions Volume 274* pp 622-631.

Iwasaki I, 1999. Iron Ore Flotation-Historical Perspective and Future Prospects, Nonsulfide Minerals, Section 3: in *Advances in Flotation Technology* pp 231-243.

Larson M, 2011. Xstrata Technology Internal Iron Ore Report.

McIvor R, Greenwood B, 1996. Pebble Use and Treatment at Cleveland-Cliffs' Autogenous Milling Operations, in *SAG 1996*, pp 1129-1141 (Mining and Mineral Processing Engineering, UBC, Vancouver).