
ГОРНАЯ КНИГА

ISSN 0236-1493

ГОРНЫЙ

**ИНФОРМАЦИОННО-
АНАЛИТИЧЕСКИЙ
БЮЛЛЕТЕНЬ**

(НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ)

**MINING INFORMATIONAL
AND ANALYTICAL
BULLETIN**

(SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL)

**ОТДЕЛЬНЫЙ
ВЫПУСК 4**

2013

ДАЛЬНИЙ ВОСТОК

УДК 622.7

**Т.Н. Александрова, И.Ю. Рассказов,
А.В. Александров**

НЕКОТОРЫЕ ТЕНДЕНЦИИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ ПЕРЕРАБОТКИ УПОРНЫХ РУД БЛАГОРОДНЫХ МЕТАЛЛОВ И АЛМАЗОВ¹

Приведены основные направления инновационного развития технологий переработки золото- и алмазосодержащих руд. Показано, что тенденции совершенствования технологий переработки связаны с оптимизацией технологических режимов рудоподготовки с использованием современных компьютерных программ, внедрением технологий сверхтонкого измельчения. Вектор оптимизации технологии и техники определяются комплексностью использования сырья и экологическими требованиями.

Ключевые слова: упорные руды, золото, алмазы, оптимизация рудоподготовки, тонкое измельчение.

Современное состояние технологий обогащения полезных ископаемых обеспечивает достаточно высокую степень комплексного использования минерального сырья. Вместе с тем для эффективного инновационного развития необходимо решение взаимосвязанных проблем рационального использования природных ресурсов и экологии, что требует нового подхода к технологическим основам переработки минерального сырья.

Благородные металлы принадлежат к стратегическим полезным ископаемым. Они служат источником валютных поступлений, используются в базовых отраслях промышленности. Их роль сохранится в перспективе, о чем свидетельствует рост потребления в связи с благоприятными мировыми ценами и кризисом мировой экономики. По добыче металлов платиновой группы (МПГ) Россия занимает второе место в мире, золота и серебра — шестое-седьмое. В последние годы темпы

¹ Работа выполнена в рамках федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007—2013 годы», гос. контракт № 14.515.11.0066.

роста их производства в стране вышли на среднемировой уровень. Минерально-сырьевая база (МСБ) золота по массе запасов обеспечивает до 2030 г., рост добычи по золоторудным, комплексным золотосодержащим и россыпным месторождениям [1, 2].

В алмазодобывающей промышленности существует два типа промышленных источников алмазов, содержащих рентабельные для отработки концентрации:

1. Кимберлитовые трубки (ЮАР, Ботсвана, Ангола, Россия, Китай, Канада, Финляндия, Бразилия, Сьерра-Леоне);

2. Лампроитовые трубки (Австралия).

В настоящее время отрабатывается только одно лампроитовое месторождение — трубка Аргайл (Австралия), а коренные месторождения остальных типов не предполагается отрабатывать в ближайшем будущем, поскольку они содержат только технические алмазы. Низкая стоимость технических алмазов позволяет добывать их только попутно из месторождений с достаточно высокой долей ювелирных разностей, определяющих высокую среднюю цену добываемых алмазов.

В Анголе разработка россыпей и кимберлитовых трубок ведется с 1917 г. На ангольских трубках «Катока», «Камачия», «Камафука» довольно высокое содержание алмазов — 3—4 кар/т. Для них характерен светло-зеленый оттенок. Добыча до 1,2 млн кар в год, при этом много ювелирных кристаллов размером свыше 1 кар.

На территории Российской Федерации открыто более 750 кимберлитовых трубок, из которых 2,5 % содержат промышленные содержания алмазов. Из нескольких десятков россыпей, содержащих повышенные концентрации алмазов, разведаны и учтены балансовые запасы по 32 россыпям.

Особенности обогащения алмазосодержащих руд обусловлены чрезвычайно низким содержанием алмазов в исходном сырье (всего около 0,000005 %), их хрупкостью и большой ценностью, предопределяющей необходимость достижения высокой степени извлечения алмазов.

Особенности рудоподготовки золото- и алмазосодержащего сырья

Современная история развития процесса самоизмельчения тесно связана с совершенствованием золото- и алмазодобывающей промышленности. Появление в 1890 году метода из-

влечения золота с помощью цианидов потребовало более тонкого измельчения руды, что и повлекло за собой изменение всей техники рудоподготовки и, в частности, создание первых трубных мельниц самоизмельчения.

К настоящему времени наблюдается массовое применение мельниц полусамоизмельчения с последующим шаровым помолом и как дополнение — додрабливание «критической» крупности в дробилке с возвратом продукта дробления в голову мельницы. добавка шаров. Для оптимального управления режимными параметрами процесса измельчения и последующего обогащения за последние 40 с лишним лет моделирование процессов обогащения полезных ископаемых утвердилось как весьма важный инструмент для инженеров-обогащителей. Принципиальные сферы его применения включают проектирование, анализ/оптимизацию и управление технологическими процессами. Благодаря широким возможностям, которые предоставляет нам современная компьютерная техника, моделирование позволяет из множества рассматриваемых вариантов выбрать те, которые позволяют минимизировать затраты и риски.

Из компьютерных пакетов выделим три основных программных продукта, которые могут быть использованы для моделирования технологических процессов рудоподготовки на обогатительных фабриках:

1. Пакет USIMPAC (BRGM, Франция)
2. Пакет MODSIM (Mineral Technologies, США)
3. Пакет JKSImMet (JKMRC, Австралия)

Если в основу сравнения положить критерии применимости, вариантность решаемых задач и степень востребованности на рынке, то пакет JKSImMet является лучшим. За свою почти 40-летнюю историю пакет JKSImMet имеет уникальный уровень внедрения (свыше 300 горно-обогатительных предприятий) и широчайшую географию распространения по всему миру, включая страны СНГ и Россию. Впечатляет также перечень решаемых задач: от проектирования мельниц и схем само- и полусамоизмельчения до проведения исследований по оптимизации технологического режима рудоподготовки [3, 4].

Таким образом, в настоящей работе использовался пакет JRSimMet в качестве инструмента исследований.

Моделирование процесса измельчения

Моделирование процесса измельчения проводилось для оптимизации работы действующего технологического узла на примере алмазосодержащей руды месторождения «Катока» (Ангола).

Коренное месторождение алмазов — трубки «Катока» по своим размерам относится к числу крупнейших кимберлитовых тел мира. Главным породообразующим минералом является сапонит, которым нацело замещены все магматические компоненты пород (литокласты — округлые обломки типа «кимберлит в кимберлите» размером до 2—3 см; кристаллокласты — оливин двух генераций и хлоритизированный флогопит) и их связующая масса. Содержание этого минерала достигает 90—95% от общего объема пород и в целом коррелируется с содержанием собственно глинистой фракции. Этой главной особенностью обусловлен химический состав «туфобречии пород», который приведен в таблице.

Химический состав кимберлитов трубки «Катока»

Компоненты	SiO ₂	Na ₂ O	MgO	K ₂ O	CaO	Al ₂ O ₃	P ₂ O ₅	TiO ₂	MnO	Fe
Массовая доля, %	53,68	2,68	26,90	1,73	2,90	3,72	0,26	1,67	0,14	6,32

Помимо сапонита и упоминавшегося выше кварца, в рудах присутствуют гидрослюда (в среднем, 2—5 %) и карбонатные минералы (до 2—5 %).

Выход тяжелой фракции весьма низкий и составляет в среднем 5,38 %, в т.ч.

- ксеногенных минералов (биотит, амфибол, турмалин, реже — циркон, апатит, ильменит, пироксены, эпидот, дистен, сфен, анатаз и т.д.) — 0,37 %;

- постмагматических минералов (пирит, барит, галенит, марказит, пиролюзит, халькопирит, гематит, гидрогетит и т.д.) — 4,80 %;

- парагенетических спутников алмаза — 0,21 %, среди которых доминируют хромшпинелиды — 156,3 кг/т, содержание пиропов — 11,1 кг/т и хромдиопсидов — 8,1 кг/т.

Преобладающее количество минералов тяжелой фракции сосредоточено во фракции минус 2+0,2 мм (90 % и более) при

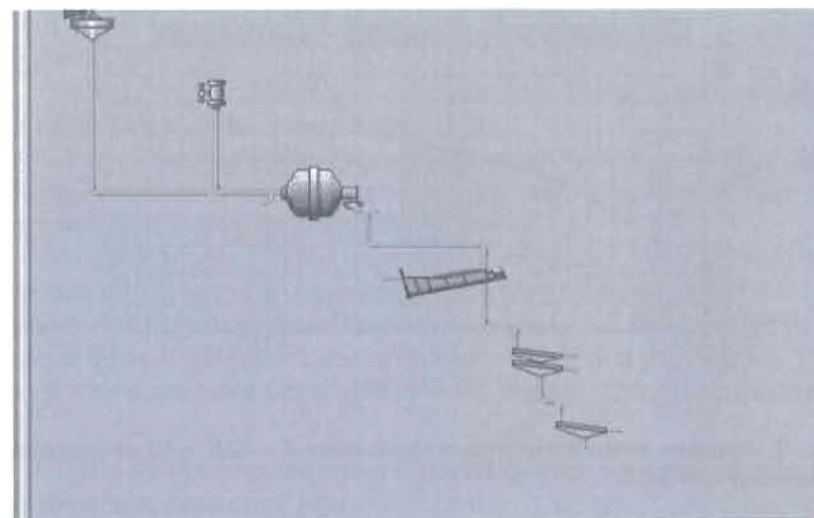


Рис. 1. Схема моделирования в пакете JKSImMet (технологический узел: измельчение — классификация — грохочение).

примерно равном распределении по классам -2+0,5 мм и -0,5+0,2 мм.

Подготовка руды к обогащению занимает особое место в её переработке. Основное требование, предъявляемое к технологической схеме и оборудованию — не допускать переизмельчения алмазов при максимальном их раскрытии в процессах дробления и измельчения. Поэтому целесообразно применение дробления в одну стадию с дальнейшим измельчением в мельницах самоизмельчения.

Исследовалось влияние основных технологических факторов на гранулометрический состав и выход класса измельченного продукта (-25+0 мм). Моделирование проводилось в три этапа:

1 — влияние степени загрузки мельницы рудой (фактор — F1) на выход класса измельченного продукта (-25+0 мм) при фиксированной производительности (фактор — F3) и частоте вращения барабана мельницы (фактор — F2);

2 — влияние частоты вращения барабана мельницы (фактор — F2) на выход класса измельченного продукта (-25+0 мм) при фиксированной производительности (фактор — F3) и степени загрузки мельницы рудой (фактор — F1);

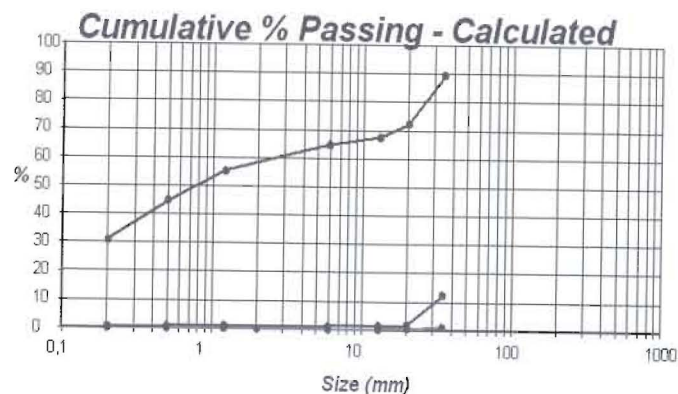
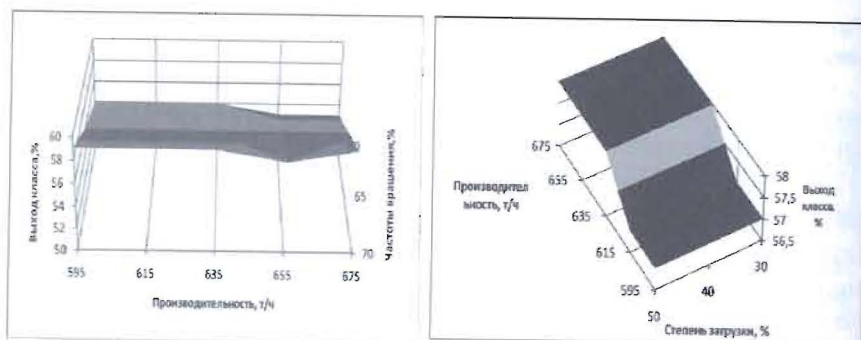


Рис. 2. График зависимости выхода класса ($-25+0$) от загрузки мельницы $n = 50\%$



а) Влияние частоты вращения барабана мельницы (фактор — F2) и изменения производительности на гранулометрическую характеристику измельченного материала
б) Влияние степени загрузки мельницы (F1) и изменения производительности (F3) на гранулометрическую характеристику измельченного материала

Рис. 3. Влияния технологических факторов на изменение гранулометрической характеристики измельченного материала

3 — влияние изменения производительности фабрики (фактор — F3) на выход класса измельченного продукта ($-25+0$ мм) при фиксированной степени загрузки мельницы рудой (фактор — F1) и частоте вращения барабана мельницы (фактор — F2).

Схема моделирования процесса мокрого самоизмельчения приведена на рис. 1.

Результаты моделирования (при изменении степени загрузки мельницы) приведены на рис. 2.

Исследование совместного влияния технологических факторов на изменение гранулометрической характеристики измельченного материала приведен на рис. 3.

Анализ приведенных данных показывает, что увеличение выхода критических классов крупности можно добиться при увеличении производительности мельницы по исходному питанию и увеличению частоты вращения барабана ($n = 70\%$). При скорости вращения барабана $n = 60\%$ наблюдается снижение.

Тонкое и сверхтонкое измельчения при переработке золотосодержащих руд

Минералы с тонким взаимным прорастанием частиц, либо с другими минералами или минералами пустой породы добываются во всё возрастающем количестве. Это сырьё создает новые проблемы на обогатительных фабриках, требуя тонкого и ультратонкого измельчения для того, чтобы получить необходимые качество и извлечение. Прогресс флотационных технологий теперь позволяет эффективно флотировать минералы крупностью ниже 10 микрон, делая возможным сепарацию тонко диссоциированных с пустой породой ценных минералов. Аналогично, способность производить ультратонкое питание для различных процессов выщелачивания, включая биовыщелачивание и окисление при низком давлении, часто требуют тонкого или ультратонкого измельчения для улучшения кинетики реакций до уровня, при котором эти процессы становятся промышленно осуществимыми. Экономически процессы ультратонкого измельчения также становятся осуществимыми для прямого выщелачивания тугоплавких золотых руд, что выгоднее, чем обжиг или автоклавные процессы при высоком давлении [5].

Острая необходимость измельчения и доизмельчения частиц до 10—15 мкм и менее делает актуальной необходимость развития техники и технологии тонкого и ультратонкого измельчения. В настоящее время в мире появилось много разработок, направленных на решение этой проблемы, в том числе и

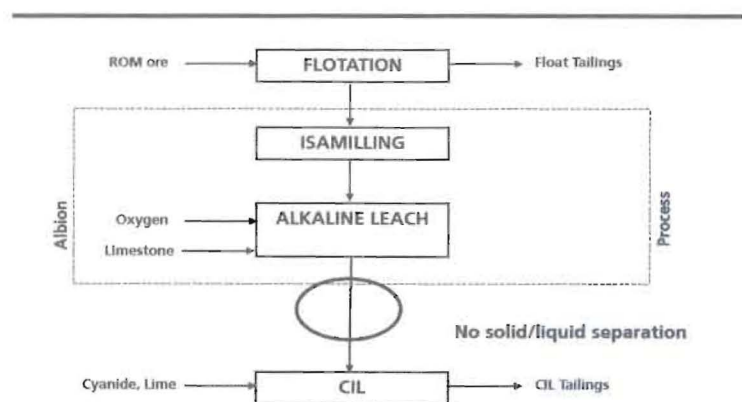


Рис. 4. Схема переработки упорных золотосодержащих руд с использованием сверхтонкого измельчения (Австралия)

в аспекте промышленного масштаба. Современная технология тонкого помола базируется на применении в основном мельниц 3-х типов, использующих принцип истирания: башенной (вертикальной), Isa Mill и Detritor. Процесс измельчения в мельнице IsaMill радикально отличается от шаровой мельницы, которой свойственны длительное время пребывания частиц руды, неудовлетворительная растянутая ситовая характеристика продукта, низкая степень измельчения. Это и приводит в конечном итоге к переизмельчению, повышению расхода реагентов, а также перерасходу энергии. Напротив, измельчение в мельнице IsaMill способствует не растяжению, а сжатию ситовой характеристики. При этом достигается высокая степень измельчения в открытом цикле, благодаря использованию энергии в основном для измельчения крупных частиц, чем минимизируется ошламование. Типичное время пребывания частицы в мельнице — около 90 сек, что минимизирует вероятность ошламования. Комбинация сжатой ситовой характеристики продукта небольшая занимаемая производственная площадь, инертная измельчающая среда — все это является привлекательным при проектировании. Мельница измельчает только крупную часть питания при сжатой ситовой характеристике, без классификации в гидроциклонах, что идеально для последующей флотации. Одновременно это важно и для выщелачивания, где извлечение определяется длиной грубой части сито-

вой характеристики питания, оцениваемой не по 80%, а по 95 % и 98 % остатку. Внедрение сверхтонкого измельчения совместно со щелочным вскрытием (Albion process (рис. 4.)) позволяет снизить расход цианида при переработке упорных золотосодержащих руд [6, 7].

Закключение

Тенденции совершенствования технологий переработки золото- и алмазосодержащего сырья связаны, в первую очередь, с оптимизацией технологий рудоподготовки. Главными преимуществами технологии рудного самоизмельчения и полусамозмельчения являются их высокая эффективность, не зависящая от физико-механических свойств сырья, и относительная простота проектно-компоновочных решений — наиболее капиталоемкого и энергоемкого передела любой обогатительной фабрики. Поэтому, несмотря на существенный недостаток этой технологии — повышенное энергопотребление — она остается по-прежнему привлекательной для проектантов и операторов современных фабрик обогатительных фабрик, перерабатывающих как алмазосодержащее сырье, так и упорные золотосодержащие руды.

Внедрение тонкого и сверхтонкого измельчения — перспективная тенденция в технологиях переработки упорного золотосодержащего сырья. Применительно к рудам с пирит-арсенопиритной минерализацией золота, важным моментом является селекция пирит-арсенопиритных концентратов. Основными путями повышения селекции пирита и арсенопирита до сих пор являются использование окислителей при их значительных расходах, регулирование щелочности, включая использование портландцемента, и применение модификаторов — в основном аммонийных и медьсодержащих соединений [8]. Окислительно-восстановительные процессы, происходящие в сульфидных пульпах и приводящие к изменению физико-химических поверхностных свойств минералов, являются основной причиной возникающих при селективной флотации трудностей в выделении селективных концентратов [9]. При этом наибольшее влияние на селективную флотацию оказывают: окисление минералов и реагентов, механизм взаимодействия компонентов жидкой фазы пульпы между собой и с поверхностью рудообразующих минералов, сорбция собирателя и серосодержащих модификаторов [8].

Таким образом, для эффективного инновационного развития технологий переработки данного типа руд, необходимо решение взаимосвязанных проблем рационального использования природных ресурсов, экологии, энергетики и управления производством, что требует качественно нового уровня техники и технологии переработки минерального и других видов сырья.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Беневоольский, Б.И. Состояние. Проблемы и пути развития минерально-сырьевой базы благородных металлов / Б.И. Беневоольский [и др.] // Руды и металлы. — 2009. — № 1. — С. 14—18.
2. Александрова Т.Н. Проблемы извлечения золота из упорных руд юга Дальневосточного региона России и некоторые пути их решения / Т.Н. Александрова, М.А. Гурман, С.А. Кондратьев // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2011. — № 5. — С. 124—135.
3. John A. Herbst and Lawrence K. Nordell. Emergence of HFS as a Design Tool in Mineral Processing. Proceedings. Vol. 1. Published by the Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc. Edited by Andrew L. Mular, Dough N. Halbe, and Derek J. Barratt. 2002.
4. Morrison R.D. and Richardson J.M. JKSimMet: A Simulator for Analysis, Optimisation and Design of Comminution Circuits. Proceedings. Vol. 1. Published by the Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc. Edited by Andrew L. Mular, Dough N. Halbe, and Derek J. Barratt. 2002.
5. Alan Taylor. Gold technology developments and trends Alta // Metallurgical Services, Australia <http://www.altamet.com.au/>
6. P. Roberts et al, Parker Centre CSIRO, «In place leaching of oxidised gold deposits. A new method for recovering stranded gold resources?», Proceedings of World Gold 2009, Oct. 2009, Gauteng, South Africa.
7. Jacques Eksteen & William Staunton, The Gold Technology Group and the AMIRA 420 Project: 25 Years of Research, Development and Service to Industry ALTA // 2012 Gold Proceedings, Australia 2012.
8. Чантурия В.А. Электрохимия сульфидов. Теория и практика / В.А. Чантурия, В.Е. Вигдергауз. — М.: Издательский дом «Руда и Металлы». 2008. — 320 с.
9. Wang L.K. Flotation technology / L.K. Wang, N.S. Shammas, W. Selke, D.B. Aulenbach London: Springer — New York- Dordrecht- Heidelberg —London, 2010. — P. 670. **ГИАБ**

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Александрова Татьяна Николаевна — доктор технических наук, профессор НСМУ «Горный», e-mail: IGD@rambler.ru;
Рассказов Игорь Юрьевич — доктор технических наук, директор Института горного дела ДВО РАН, г. Хабаровск, e-mail: adm@igd.khv.ru .ru;
Александров Александр Васильевич — доктор технических наук, главный научный сотрудник, Институт горного дела ДВО РАН, г. Хабаровск, e-mail: IGDALEX@rambler.ru.