

ТЕХНОЛОГИЯ ПЕРЕРАБОТКИ УПОРНЫХ ЗОЛОТОСОДЕРЖАЩИХ КОНЦЕНТРАТОВ НА ОСНОВЕ УЛЬТРАТОНКОГО ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ И АТМОСФЕРНОГО ОКИСЛЕНИЯ

А.Е. Сенченко, А.В. Аксенов, А.А. Васильев, Ю.Г. Серёдкин

Институт ТОМС

Почтовый адрес: ул. Лермонтова, 83/1, а/я 367, 664074, Иркутск, Россия.

Тел.: +7 3952 405 673, Факс: +7 3952 405 300.

*(*Ответственный автор: senchenko@tomsgroup.ru)*

АБСТРАКТ

Для переработки упорных сульфидных концентратов, содержащих золото, разработан ряд процессов, предполагающих как полное разрушение золотоносных сульфидов, так и частичное изменение указанных минералов. К первым относят процессы автоклавного окисления, бактериально-химического вскрытия, обжиг, кислотно-кислородные процессы и прочие, ко вторым – мягкое атмосферное окисление материала перед цианированием. Наибольший эффект в плане извлечения золота позволяют получать процессы, при которых происходит полное разрушение сульфидов и золото становится доступным для последующего цианирования за счёт высвобождения из сульфидной «рубашки». Однако эффект существенного повышения извлечения часто сопровождается сложностью процесса, высокими затратами на приобретение и эксплуатацию оборудования. Совокупность осложняющих факторов может сделать переработку материала непривлекательной с экономической точки зрения. В результате оптимизации процессов имеется прогресс в развитии технологий ультратонкого измельчения, бактериального и автоклавного окисления. Наибольший интерес, по мнению авторов, статьи представляют процессы атмосферного окисления сульфидов, то есть процессы, при которых окисление происходит без применения высоких температур (до 100 °С), избыточного давления (открытые аппараты) и при кислотности среды, близкой к нейтральной. Технология переработки сульфидных концентратов под названием «Альбион» (*Albion Process*) представляет собой комбинацию ультратонкого измельчения и окисления кислородом без давления и внешнего нагрева. Процесс обладает рядом преимуществ: сера, переходящая в раствор при окислении сульфидов, осаждается в виде гипса, а осаждение железа и мышьяка протекает с образованием гётита и скородита, в результате чего последующее цианирование золота из концентрата сопровождается меньшим расходом цианида натрия. Отмечается и высокая «экологичность» процесса. В Институте ТОМС проведены испытания технологии «Альбион» для вскрытия тонковкрапленного золота из флотационного концентрата, полученного из упорной руды одного из месторождений России. Исследования показали, что технология «Альбион» позволяет с относительно небольшими капитальными вложениями организовать переработку упорных продуктов. Возможна организация локального производства небольшой мощности, что позволит вовлекать в переработку средние и малые месторождения упорного золота.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Золото, атмосферное окисление, упорный концентрат, выщелачивание

ВВЕДЕНИЕ

Значительная доля мировых запасов золотосодержащего сырья представлена упорными рудами с тонковкрапленным золотом. Золото в данных рудах зачастую ассоциировано с сульфидными минералами и находится в так называемой сульфидной «рубашке», т.е. закрыто внутри плотных зёрен сульфида и недоступно для извлечения по цианистой технологии. Для переработки упорных сульфидных концентратов, содержащих золото, разработан ряд процессов, которые условно можно разделить на три группы (рисунок 1).



Рисунок 1 – Способы вскрытия тонковкрапленного золота

Процессы химического вскрытия тонковкрапленного золота предполагают либо полное разрушение золотоносных сульфидов, либо частичное изменение указанных минералов. К первым относят процессы автоклавного окисления, бактериально-химического вскрытия, кислотно-кислородные процессы и прочие, ко вторым – мягкое атмосферное окисление материала перед цианированием.

Технологии, предполагающие полное разрушение сульфидных минералов, дают наибольший эффект в отношении извлечения золота, т.к. позволяют практически полностью вскрыть тонковкрапленное золото, которое становится благоприятным для последующего цианирования. Однако данные процессы, как правило, характеризуются сложностью организации, высокими затратами как на приобретение оборудования, так и на его эксплуатацию. Нередко получаемые продукты окисления обладают цианисидными свойствами, что в совокупности с прочими осложняющими факторами делает переработку материала уже не такой привлекательной с экономической точки зрения.

Поиски процессов, лишённых указанных недостатков, ведутся непрерывно: имеется определённый прогресс в развитии процессов ультратонкого измельчения, развиваются процессы бактериального и автоклавного окисления. Наибольший интерес, по мнению авторов, представляют процессы атмосферного окисления сульфидов, т.е. процессы, при которых окисление происходит без применения высоких температур (до 100°C), избыточного давления (открытые аппараты) и при кислотности среды, близкой к нейтральной.

ОПИСАНИЕ ПРОЦЕССА «АЛЬБИОН»

Одним из таких процессов атмосферного окисления является технология «Альбион» (*Albion Process*), разработанная австралийской компанией *Xstrata Plc (Glencore Technology Pty Limited)*. Данная технология представляет собой комбинацию ультратонкого измельчения и окисления кислородом без давления и внешнего нагрева. В общем виде последовательность операций технологии «Альбион» показана на рисунке 2.

Измельчение концентрата проводится в бисерных мельницах до крупности порядка 80% -10 мкм. За счёт применения ультратонкого помола концентрата значительно повышается площадь поверхности минералов, а также происходит механохимическая активация сульфидов, что обеспечивает высокую скорость последующего процесса окисления.

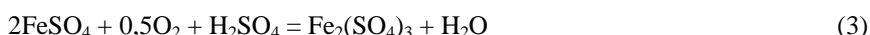
Окисление тонкоизмельчённого концентрата проводится в нескольких последовательно установленных чанах при атмосферном давлении. Для окисления сульфидов в чаны подаётся технически чистый кислород. За счёт активного протекания химических реакций происходит самопроизвольный нагрев

пульпы до температуры более 80°C, но ниже температуры кипения воды, т.е. процесс «Альбион» является автотермическим.

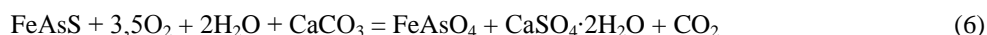
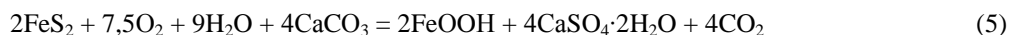


Рисунок 2 – Схема переработки упорных сульфидных золотосодержащих концентратов по технологии «Альбион»

По данным разработчиков процесса окисление сульфидных минералов может быть описано следующими уравнениями реакций:



Как отмечалось ранее, процесс «Альбион» проводится в относительно нейтральной среде: при pH пульпы более 4,0. Для нейтрализации, образующейся при окислении по реакциям (1) и (4) серной кислоты, используют наиболее дешёвый реагент – известняк. Таким образом, в общем виде окисление сульфидов в процессе «Альбион» может быть описано следующими уравнениями реакций:



Преимуществом процесса «Альбион» перед рядом других традиционных процессов разложения сульфидных минералов является относительная инертность продуктов окисления по отношению к цианиду и их экологическая безопасность.

В связи с тем, что процесс «Альбион» проводится в относительно нейтральной среде, практически вся сера, переходящая в раствор при окислении сульфидов, осаждается в виде гипса. В результате этого не происходит накопления серы в растворе (концентрация серы в растворе при окислении поддерживается на уровне менее 2 г/л). В данных условиях процесс окисления сульфидов протекает с образованием сульфатов, а не элементарной серы, как в процессах, протекающих при более низком уровне pH (бактериальное окисление, кислотно-кислородное окисление и др.). При последующем цианировании продукта окисления элементарная сера (в случае её наличия в материале) активно взаимодействует с цианид-ионом с образованием тиоцианатов, приводя к повышенному расходу цианида натрия. Таким образом, применение технологии «Альбион» позволяет не только вскрыть тонковкрапленное золото, но и обеспечить относительно низкий расход реагентов при последующем цианировании окисленного материала.

За счёт того, что применение технологии «Альбион» протекает при повышенной температуре (более 80°C), осаждение железа и мышьяка из растворов протекает с образованием гётита и скородита, которые имеют кристаллическую структуру. Данные формы соединений являются наиболее инертными по отношению к цианиду натрия. Кроме этого, кристаллический скородит является наиболее стабильной и экологически безопасной формой хранения мышьяк содержащих отходов. В процессах окисления, протекающих при более низких по сравнению с процессом «Альбион» температурах, железо и мышьяк могут осаждаться в форме гидроксидов железа и скородита аморфной структуры, а также ярозитов, сложных сульфатов. Наличие данных соединений в окисленном материале приводит к повышенному расходу цианида натрия при выщелачивании золота. Наличие аморфного скородита приводит к частичному растворению мышьяка в процессе хранения хвостов выщелачивания, что оказывает негативное воздействие на окружающую среду.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В Институте ТОМС проведены испытания технологии «Альбион» для вскрытия тонковкрапленного золота из флотационного концентрата, полученного из упорной руды одного из месторождений России.

Описание концентрата

Содержание золота в исходном флотационном концентрате находилось на уровне 29,6 г/т. Исходная крупность концентрата – 80% -80 мкм. Минеральный состав концентрата на 17% представлен породообразующими минералами, на 59% – пиритом и на 24% – арсенопиритом. Крупность золота (рисунок 3) в исследуемом концентрате составляла менее 10–15 мкм, отмечалось наличие частиц золота крупностью менее 1,0 мкм.

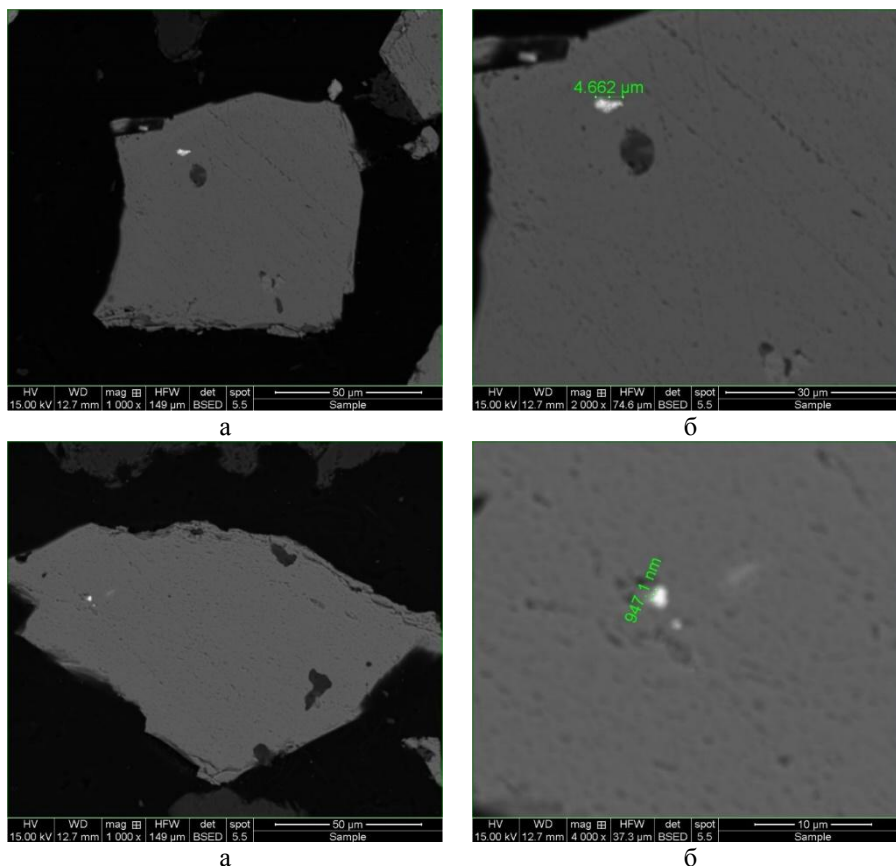


Рисунок 3 – Включения частиц золота в сульфидных минералах:
а – общий вид зерна, б – увеличение

Цианирование исходного концентрата

На основании изучения вещественного состава концентрата и тестов по сорбционному цианированию (таблица 1) было установлено, что доля цианируемого золота в концентрате составляет порядка 20-25%, основная масса золота в концентрате (более 70%) представлена тонковкрапленным в сульфидные минералы металлом и не доступна для выщелачивающих растворов.

Таблица 1 – Результаты тестов по сорбционному цианированию концентрата флотации до окисления (режим цианирования: концентрация NaCN – 2 г/л; продолжительность выщелачивания – 24 ч; pH пульпы – 10,5; содержание твёрдого в пульпе – 40%; загрузка сорбента (активированного угля Norit RO 3515) – 8% от объёма пульпы)

Крупность концентрата, мкм	Содержание Au, г/т		Извлечение Au, %	Расход реагента, кг/т концентрата		
	в исходном	в кеке		NaCN		CaO
				полный	с учётом остатка	
80% -80 (исходная)	29,6	23,7	19,9	3,0	1,8	3,7
		23,5	20,6	3,0	1,8	3,7
80% -20		23,5	20,6	4,0	2,8	4,7
		23,2	21,6	4,0	2,8	4,7
80% -10		22,1	25,3	6,5	5,2	6,5
		22,0	25,7	6,5	5,3	6,5

Измельчение концентрата

Для оценки расхода электроэнергии на измельчение концентрата был выполнен тест на измельчаемость в бисерной мельнице Netzsch IsaMill M4. Исследования были проведены по методике компании Glencore Technology – производителя бисерной мельницы. На основании результатов испытаний было установлено, что для ультратонкого измельчения концентрата до крупности 80% -10 мкм потребуется удельный расход электроэнергии равный 87 кВт·ч/т. Удельный расход мелющих тел на измельчение (по данным практики работы бисерных мельниц) составит 0,9 кг/т.

Окислительное выщелачивание концентрата

Окисление измельчённого концентрата проводили в специализированной установке, изготовленной под руководством разработчиков процесса «Альбион». Продолжительность окисления составляла 48 ч. Основные результаты исследований представлены на рисунке 4. В таблице 2 приведено сравнение показателей переработки концентрата по технологиям «Альбион» и автоклавного окисления.

Цианирование окисленного концентрата

Цианирование окисленного концентрата проводили в режиме, аналогичном цианированию концентрата до окисления. Расход NaCN на цианирование концентрата, окисленного по технологии «Альбион» составил 19,8 кг/т.

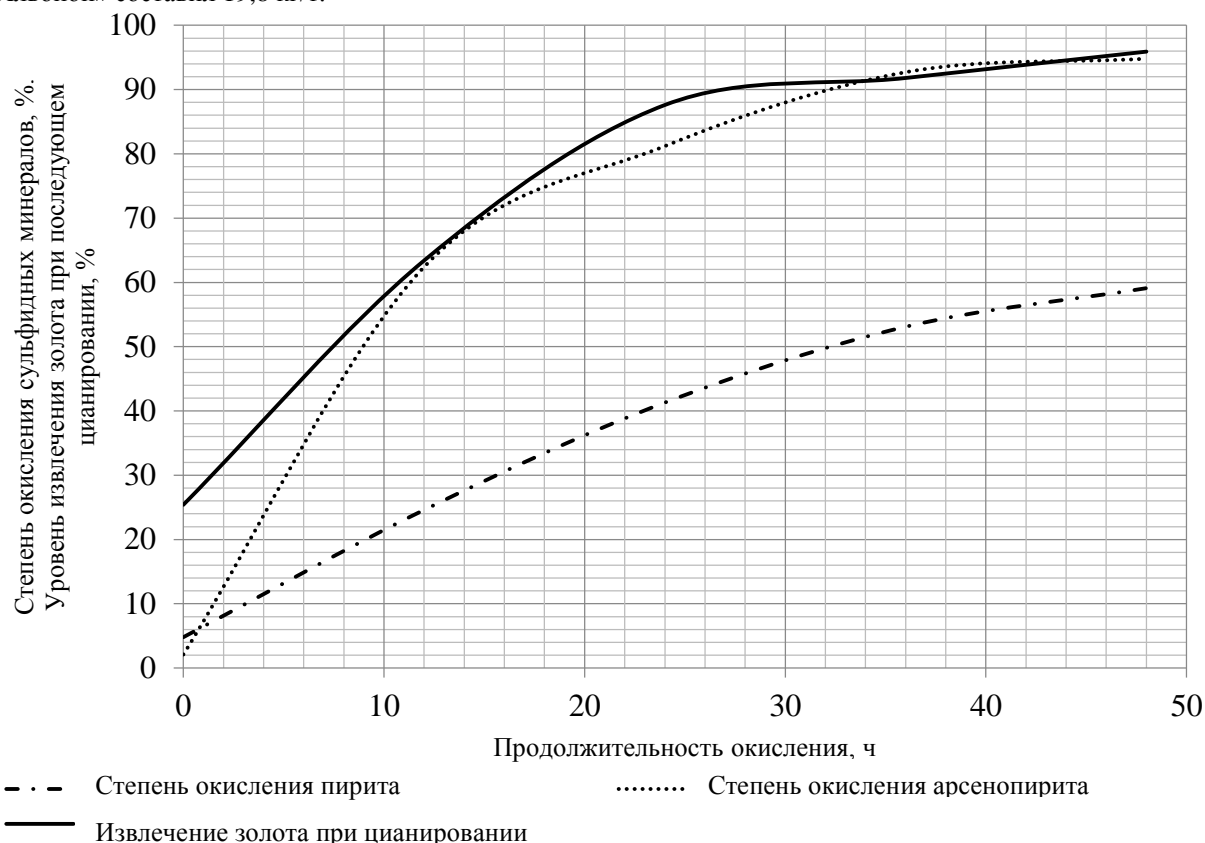


Рисунок 4 – Основные результаты окисления концентрата в установке «Альбион»

В таблице 2 представлено сравнение показателей переработки концентрата по технологиям «Альбион» и автоклавного окисления

Таблица 2 – Сравнение показателей переработки концентрата по технологиям «Альбион» и автоклавного окисления

Наименование процесса	Выход кека окисления, %	Степень окисления сульфидов (расчёт по S), %	Удельный расход реагента, кг/т исходного концентрата			Уровень извлечения золота при последующем цианировании, %
			кислород	известняк	известь	

Автоклавное окисление*	81	более 98	520	670	94	97,2
Альбион	190	64	360	660	11	95,9

* Режим автоклавного окисления: температура 210°C, давление кислорода 10 бар, продолжительность окисления 1 ч

ВЫВОДЫ

Представленные результаты исследований показали, что технология «Альбион» позволяет эффективно перерабатывать концентраты с тонковкрапленным золотом при меньших эксплуатационных затратах (расход кислорода, известняка, извести) и сопоставимом уровне извлечения золота по сравнению с технологией автоклавного окисления.

Технология «Альбион» позволяет со значительно меньшими капитальными вложениями организовать переработку упорных продуктов. В отличие от реальных конкурентов – автоклавного и бактериального окисления – не требует участия специалистов высокой категории, нет необходимости создания предприятия большой производительности по концентрату или портала для переработки концентратов с нескольких объектов. Следовательно, возможна организация локального производства небольшой мощности, что позволит вовлекать в переработку средние и малые месторождения упорного золота.

Использованные источники

- Bowen, P.J. & Hourn, M.M. *Treatment of sulphidic materials*, Patent WO 2013 020175, prior. 2011-08-08, pub. 2013-02-14.
- Corrans, I.J. & Angove, J.E. (1991). *Ultrafine milling for the recovery of refractory gold*, Minerals Engineering, vol. 4, no. 7-11, pp. 763–776.
- Fraser, K.S., Walton, R.H. & Wells, J.A. (1991). *Processing of refractory gold ores*, Minerals Engineering, vol. 4, no. 7-11, pp. 1029–1041.