

## **ПОВЫШЕНИЕ ИЗВЛЕЧЕНИЯ МЕТАЛЛА ИЗ ОСОБО УПОРНЫХ ЗОЛОТО-СУЛЬФИДНЫХ РУД**

**Мазманиян Г.А.**

**Научный руководитель д-р техн. наук Брагин В.И.**

*Сибирский федеральный университет*

### **Актуальность**

В минерально-сырьевом комплексе России намечается тенденция роста дисбаланса между добычей и приростом балансовых запасов золотосодержащих руд, что создаёт серьёзную проблему для развития экономики страны. Практически исчерпаны запасы богатого легкообогащаемого золотосодержащего минерального сырья. Отечественная золотоизвлекающая промышленность постоянно вовлекает в переработку новые золоторудные месторождения. Во многих случаях руды этих месторождений относятся к категории упорных и особо упорных. По некоторым оценкам, доля этих руд составляет более 30% от всех запасов, следовательно, за счет более широкого вовлечения в эксплуатацию упорных золотых и комплексных золотосодержащих руд в текущем столетии можно обеспечить значительный прирост добычи золота.

Значительная часть запасов коренного золота составляют упорные руды, в которых золото находится в тонковкрапленном состоянии в сульфидах и породообразующих минералах. Размер частиц составляет от десятков до тысячных долей микрона. Золото главным образом связано с пиритом и арсенопиритом, поэтому оно не растворяется при цианировании при стандартной крупности измельчения 80 - 95% класса -0,074мм и даже при сверхтонком помоле, без применения подготовительных технологий перед цианированием. Следовательно, необходима подготовительная стадия, улучшающая показатели дальнейшего извлечения до приемлемых величин. Подготовка заключается во вскрытии дисперсной вкрапленности золота, тем или иным способом, для обеспечения доступа к нему цианистого раствора. Так как основные минеральные носители золота – сульфиды и арсенопирит, то подготовка обычно заключается в окислении сульфидной или арсенидной матрицы. Для руд, содержащих активный углерод, также необходимо его окисление или пассивация.

Первичные руды золота называют упорными, если извлечение из них золота с использованием традиционной технологии цианирования не превышает 80%. Упорность золота связана, чаще всего, с рассеянием его в сульфидных минералах и арсенопирите в изоморфной или дисперсной форме, затрудняющей доступ выщелачивающего раствора. Вторая по распространенности причина упорности – наличие в руде значимых количеств углеродистого вещества, являющегося сорбентом золота, или иных природных сорбентов, которые могут сорбировать благородные металлы из цианистых растворов, увеличивая тем самым потери золота и серебра с хвостами технологического процесса. Эти два фактора могут проявляться одновременно, что особо усложняет технологию переработки. Такие руды принято называть рудами двойной упорности (double refractory ores). Проблема переработки этих руд достаточно актуальна.

К типу технологически упорного минерального сырья также следует причислить руды и концентраты, содержащие металлоорганические, кластерные, коллоидные и иные химические и композиционные соединения, затрудняющие технологическое извлечение полезных компонентов.

Распространенность особо упорного золота значительна. Наиболее крупные и известные представители в России – первичные руды Олимпиадинского месторождения, золотосульфидные руды Майского месторождения, руды месторождений Сухой Лог и другие; за рубежом – Barrick Goldstrike, Barrick Mercur, Cortez, Newmont, Carlin (США),

Hillgrove (Австралия), Macraes (Новая Зеландия) и другие.

## **О методах извлечения упорного золота**

Последнее 20-30 лет наблюдается рост количества разведанных и вовлеченных в разработку месторождений упорного и особо упорного золота. В основном два фактора контролируют этот процесс в золотодобыче: открытие крупных и особо крупных месторождений упорного золота с одной стороны, и промышленная отработка технологий окислительного обжига, автоклавного и бактериального окисления с другой.

В России и за рубежом проводится широкий комплекс исследований по разработке и внедрению в промышленность нетрадиционных методов переработки упорного сырья благородных металлов: окислительный обжиг, автоклавное и бактериальное (биогидрометаллургическая технология) окисление, ультратонкое измельчение, энергетические воздействия. К последним относятся различные методы обработки: ускоренными электронами, ультразвуком, мощными электромагнитными импульсами, а также сверхвысокочастотная и магнитно-импульсная обработки и другие.

Большинство научных разработок и публикаций последних лет в области обогащения и металлургической переработки руд благородных металлов так или иначе связаны с проблемами извлечения упорного золота. В их решении принимают участие научно-исследовательские организации, предприятия и фирмы всех стран, являющихся основными (или просто крупными) производителями этого металла из рудного сырья.

Одним из главных путей повышения эффективности процесса выщелачивания золота из труднообогатимого сырья является интенсификация процесса вскрытия упорной матрицы химическими, биологическими, физическими методами. Кроме того, в меньших масштабах испытывались также сверхтонкое измельчение; хлоринация, электрогидравлическая и электрохимическая обработка; микроволновое облучение; облучение электронным пучком, магнитно-импульсная обработка и другие. Из этих методов значимая промышленная реализация имеется только для технологии сверхтонкого измельчения в мельницах IsaMill (Xstrata Technology). Метод сверхтонкого помола упорных концентратов не обеспечивает существенного прироста извлечения золота. Существующие технологии переработки упорного золотосодержащего сырья позволяют извлекать из упорных руд и концентратов золото на уровне 82-97%.

Однако, необходимо учитывать, что показатель извлечения золота является главным, но не единственным критерием выбора технологии переработки золотосодержащих руд и концентратов. Следует учитывать эксплуатационные и капитальные затраты, запасы сырья, географию района, наличие развитой инфраструктуры и квалифицированных кадров. Для каждого конкретного золоторудного месторождения необходимо проводить технологические исследования и технико-экономическое обоснование разработанной технологии.

Окислительный обжиг позволяет повысить извлечение золота при последующем цианировании до 88–93 %. Высокое извлечение золота обеспечивает автоклавное окисление, в процессе которого окисляются практически все сульфиды, а также происходит разложение некоторых порообразующих минералов. Однако в условиях автоклавного окисления происходит активация углистого вещества. Для сорбционно-активных концентратов (присутствие углистых веществ) извлечение золота из продуктов автоклавного и бактериального окисления одинаково, хотя степень окисления сульфидов при автоклавном окислении существенно выше, чем при бактериальном.

Институтом Иргиредметом проведены исследования по установлению сорбционной активности (СА) большого числа углеродистых руд России и стран СНГ. По результатам исследований произведена ранжировка руд (по величине СА) на 3 группы:

1. Руды со слабо выраженной СА, которые в принципе не являются упорными и могут быть переработаны по обычной цианистой технологией;
2. Руды с умеренной СА (Сухой Лог, Наталкинское, и другие);
3. Руды с сильно выраженной СА (Бакырчик, Миндяк, Майское и другие).

Извлечение золота из руд с умеренной СА обычно осуществляется прямым цианированием с соблюдением специальных режимов, основным из которых является совмещение процессов выщелачивания с одновременным выведением золота из пульпы синтетическими гранулированными сорбентами: ионообменными смолами или активированными углями (CIL, RIL), или с введением в цианистую пульпу различных минеральных добавок (флотационные масла, керосин, крезилловая кислота, ализарин и др.), которые образуют на поверхности углеродистых частиц пленки, изолирующие эти частицы от контакта с золотосодержащим раствором. Переработку руд с сильно выраженной СА рекомендовано производить путем отработки их газообразным хлором (хлорсодержащие окислители углерода) и далее – цианированием в режиме сорбционного выщелачивания (CIL).

### **Преимущества технологии окислительного обжига**

Наиболее радикальным способом подготовки углистых руд (и концентратов) с повышенной СА является окислительный обжиг с полным выгоранием углерода. Эффективность данного метода доказана практикой работы многих крупных предприятий мира. На большинстве из них перерабатывают руды и концентраты, содержащие, наряду с сорбционноактивным углеродом, значительное количество золотосодержащих сульфидов (пирит, арсенопирит).

Окислительный обжиг решает сразу две проблемы: «уничтожение» углерода и вскрытие тонковкрапленного золота в сульфидных рудах.

Известные способы извлечения золота из упорного минерального сырья (автоклавное и бактериальное окисление, сверхтонкое измельчение), содержащего углеродистую составляющую или иные упорные соединения, во многих случаях не обеспечивают удовлетворительных показателей. Это связано, прежде всего, с высокой стойкостью к окислению и сорбционной активностью углеродистой составляющей минерального сырья, что обуславливает большие потери золота с твердыми остатками.

Так, например, при цианировании упорных углеродистых руд и концентратов в ряде случаев в растворе вообще не обнаруживается даже следов золота, то есть образующиеся в результате взаимодействия с цианидом комплексные соединения золота полностью сорбируются углеродистой составляющей сырья. Цианирование в присутствии ионообменных смол и углей, а также с использованием пассиваторов сорбции типа керосина или аполярных жидкостей, несколько улучшают извлечение благородных металлов, но в целом ряде случаев также имеют низкие технологические показатели.

Пассивация сорбционной активности углерода с помощью продуктов жизнедеятельности бактерий требует специальных ферментеров для выращивания бактерий, тонкого измельчения материала, строгого соблюдения температурных и химических режимов, большой продолжительности процесса. При наличии больших количеств мышьяка и сурьмы, бактериальное выщелачивание становится вообще невозможным вследствие отравления бактерий. Бактериальное окисление не нашло широкого применения для переработки упорного углеродистого минерального сырья.

Попытки снизить сорбционную активность углеродсодержащего сырья путем термической обработки в вакууме не нашли практического применения из-за сложности аппаратного оформления, дороговизны процесса и низких технологических показателей.

В процессе окислительного обжига происходит трансформация плотных зерен сульфидов железа в пористые оксиды, что обеспечивает хороший доступ растворителя (цианида) к внутренним включениям золота. Сдерживающими началами обжига всегда считались его «неэкологичность» и необходимость создания сложных систем пыле- и газоочистки. Однако в последние годы данный процесс настолько усовершенствовался и модернизировался, что снова стал выходить на передовые позиции при переработке технологически упорных сульфидных и, особенно, углисто-сульфидных золотых руд.

Этому, в частности, способствовали:

- создание и успешная эксплуатация высокоэффективных обжиговых печей с циркулирующим кипящим слоем (печи Лурджи);
- удачное решение проблем, связанных с очисткой и утилизацией обжиговых газов (например, получение товарных серу- и мышьяксодержащих продуктов).

На основании выше сказанного и практики работы большинства зарубежных предприятий, а также научно-исследовательских работ многих российских и зарубежных институтов, можно сказать, что для пассивации углистого вещества и подготовки вскрытия дисперсной вкрапленности золота в упорных золотосодержащих рудах и концентратах, подвергаемых цианированию, наиболее технологически целесообразным и технико-экономический обоснованным решением является применение термического метода подготовки (окислительный обжиг).

### **Состояние вопроса**

Для обоснования целесообразности применения технологии окислительного обжига концентрата перед цианированием, рассмотрим одно из месторождений России, руда которого характеризуется как особо упорная золотосульфидная (с повышенным содержанием углеродистого вещества).

Сульфидные руды являются преобладающей разновидностью, концентрирующей основную долю запасов золота (до 88-90% запасов месторождения). Содержание золота в сульфидных рудах в среднем составляет 11,5г/т, содержание серебра – 3,7г/т. Количество сульфидов не превышает 6,3%. Среди сульфидов преобладают пирит (4,3%), арсенопирит (1,7%). Пирит и арсенопирит образует агрегаты мелких и весьма мелких идиоморфных и кристалломорфных зерен размером 0,004-0,15мм.

Нерудная часть представлена кварцем (37,8%), серицитом и гидрослюдами (36%), полевым шпатом (5,5%), глинистыми минералами (5,0%), карбонатами (5,0%). Окисная составляющая представлена гидроокислами железа, скородитом, рутилом.

Месторождения характеризуется повышенным содержанием углеродистого вещества от 0,5 до 1,3%. Количество свободного золота редко превышает 5-6%.

В течении 30-40 лет проводились исследования на базе этих руд отечественными и зарубежными научно-исследовательскими организациями. Исследования проводились на рудах, как сульфидных, так и окисленных (полуокисленных).

Так, например, изучался материал с содержанием золота 16г/т, представленный первичной сульфидной рудой с содержанием сульфидов более 7,5% (арсенопирит, пирит). В углисто-глинистых серицитовых сланцах присутствовало большое количество углистых веществ (0,9%).

Извлечение золота в процессе гравитационного обогащения составило – 55,3%. Флотация хвостов гравитационного обогащения позволила дополнительно извлечь золота – 36%. Объединенный гравитационно-флотационный концентрат имел следующие показатели: выход составил – 39%, с содержанием золота 37,9г/т, при извлечении – 91,3%. Предварительный обжиг полученного концентрата перед цианированием позволил повысить извлечение золота – 90%.

Полученные в результате переработки хвосты флотации по содержанию золота (выше 2г/т) не являются отвальными. Рассматривается цианирование этих хвостов.

Практически одновременно изучался материал, представленный окисленной золотосодержащей рудой с содержанием золота – 38г/т, сульфидов – 0,4%. Тонкая вкрапленность золота не позволила применить гравитационные процессы. Флотация также оказалась малоэффективна. Трехстадиальное цианирование позволило извлечь около 85% золота, при содержании золота в кеке – 4,3г/т.

Наиболее высокое извлечение золота – 96% получено при окислительном обжиге с последующим цианированием огарка (содержание золота в кеке цианирования – 1,4г/т).

### Основная идея проекта. Формулировка задач

Нами предлагается технологическая схема обогащения и гидрометаллургической переработки концентратов особо упорных золотосульфидных руд с получением лигатурного золота и мышьяксодержащего товарного продукта.

Технологическая схема состоит из рудоподготовительного комплекса, предназначенная для физико-механического вскрытия тонкодисперсного золота (около 88-92% класса -0,074мм); предварительного флотационного обогащения руды с выделением богатого флотоконцентрата (золота с сопутствующими минералами) из основного потока руды, с возможным выделением углеродистого промпродукта; окислительного обжига для пассивации сорбционной активности углерода («уничтожение» углерода и вскрытие тонковкрапленного золота в сульфидах); гидрометаллургический процесс сорбционного выщелачивания золота.

Принципиальная технологическая схема получения лигатурного золота из особо упорных золотосульфидных руд представлена в виде рисунка.

Для практического подтверждения данной технологии на базе руд конкретного месторождения, запланированы технологические исследования с детальным технико-экономическим обоснованием. При этом будут учитываться эксплуатационные и капитальные затраты, запасы сырья, география района, наличие инфраструктуры и квалифицированных кадров, а также, планировочно-компоновочные решения по строительству. Предполагается детальное исследование углеродистого вещества, для обоснования температурного режима и кинетики окисления.

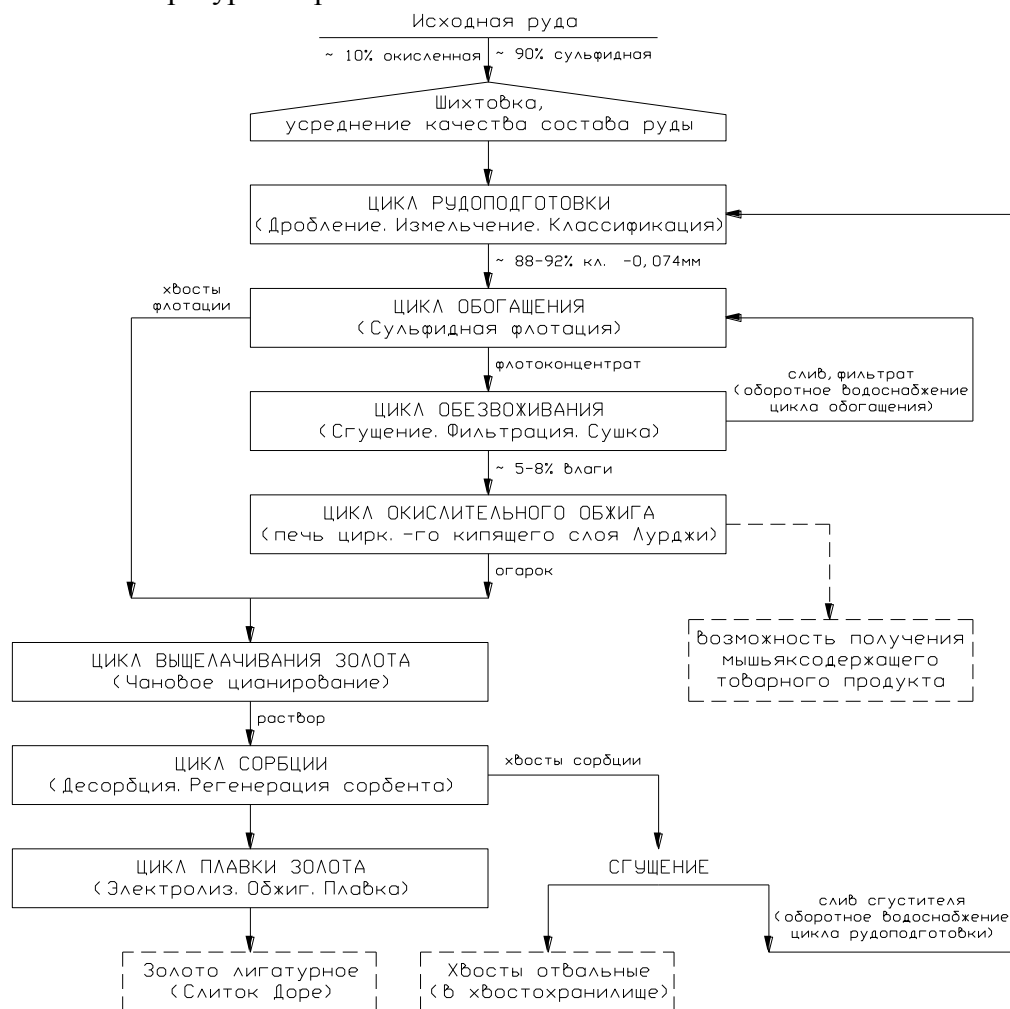


Рисунок - Принципиальная технологическая схема получения лигатурного золота из особо упорных золотосульфидных руд