

ИЗВЛЕЧЕНИЕ ТОНКОВКРАПЛЕННОГО ЗОЛОТА ИЗ ПИРИТНЫХ И ПИРРОТИНОВЫХ РУД¹

Проф. И. Н. Масленицкий

По мере развития золотодобывающей промышленности с каждым годом увеличивается переработка коренных руд, среди которых сульфидные приобретают все большее значение. С другой стороны, при обогащении руд цветных металлов часть золота теряется в сульфидных хвостах флотации и для его извлечения в некоторых случаях эти хвосты должны быть подвергнуты дополнительной гидрометаллургической обработке цианированием. Практика работы современных золотоизвлекательных предприятий показывает, что во многих случаях сульфидные руды и концентраты являются упорными для гидрометаллургической обработки. Извлечение золота из таких материалов процессом цианирования иногда находится на недостаточно высоком уровне.

Упорность золота при гидрометаллургической обработке сульфидных руд может быть иллюстрирована технологическими показателями. Так, для многих канадских золотосодержащих руд при переработке по обычным схемам содержание золота в хвостах цианирования получается в пределах от 3 до 12 г/т (руды Киркленд, Матачьюан, Стар Майн и др.). Извлечение золота из таких руд получается ниже 90% (78—80%), а иногда падает до 40%. Среди руд Советского Союза также можно найти примеры упорного золота, извлечение которого гидрометаллургическим способом находится на недостаточно высоком уровне, а остаточное содержание золота в хвостах цианирования получается высокое.

Чаще такую упорность золота объясняют его тесной связью с сульфидами (в первую очередь с пиритом). Это в большинстве случаев оказывается справедливым и может быть подтверждено изучением хвостов гидрометаллургической переработкой. В выделенных после амальгамации и цианирования сульфидах сразу констатируется концентрация упорного золота. Попытки извлечения такого золота из сульфидного концентрата обычными гидрометаллургическими путями часто оказываются весьма неэффективными. Несмотря на применение интенсивной многократной обработки, остаточное содержание золота в хвостах очень высокое и в отдельных случаях достигает 20—25 г/т.

Все это требует более углубленного анализа причин упорности золота, связанного с сульфидами. Предлагаемая работа имеет целью обобщение и анализ результатов исследования некоторых сульфидных (пиритных и пирротиновых) руд. Большинство экспериментальных исследований, использованных в настоящей статье, получено в процессе технологических испытаний обработки золотосодержащих пиритных и пирротиновых руд в металлургической лаборатории Горного института в 1950—1953 гг.

¹ В экспериментальной части работы (раздел II) принимали участие Н. В. Зверевич, Л. Н. Полиевский, А. Н. Суховольская.

1. Геолого-минералогические данные о наличии тонковкрапленного и дисперсного золота в пиритах

Упорность золота во многих золотых рудах уже давно объясняли тонкой диспергацией золота в сульфидах и, в первую очередь, в пирите.

Тесная связь золота с пиритом в некоторых месторождениях была констатирована уже в конце XIX в. Однако среди исследователей существовало два предположения: 1) золото в основном находится на поверхности кристаллов пирита; 2) частицы золота могут находиться внутри кристаллов пирита не только в микротрещинах, но и в форме мельчайших дисперсных включений.

Первое предположение подтверждалось макро- и микроскопическими наблюдениями выделений золота на поверхности зерен пирита. Второе — долгое время не могло быть экспериментально проверено и оставалось гипотезой. Совершенствование техники минераграфического исследования с 30-х годов текущего столетия позволило с бесспорностью установить правильность и второго предположения о наличии в некоторых пиритах чрезвычайно дисперсных внутренних включений золота.

Возможность нахождения золота в тонкодисперсном состоянии внутри кристаллов пирита может быть обоснована и сопоставлением геохимических диаграмм времени выделения золота и других минералов [1]. Существование мелкого, не видимого даже при максимальных увеличениях под микроскопом золота может быть объяснено его нахождением или в форме дисперсных металлических включений, размер которых лежит за пределами разрешающей способности обычного микроскопа, или в состоянии твердого раствора в пирите.

Последняя форма нахождения золота в пирите в настоящее время многими оспаривается. Например, А. А. Иванов [2] на основе электронно-микроскопического метода исследования рудных минералов пришел к выводу, что золото в пиритах (естественных и синтезированных) находится в виде механической примеси в форме частиц, близких к изометрической, с размерами от нескольких микронов до 10^{-6} см. Таким образом, А. А. Иванов считает, что в кристаллическую решетку пирита золото не входит.

Для практических целей не имеет значения форма нахождения золота — чрезвычайно тонкие дисперсные включения, лежащие за пределами видимости в микроскопе, или истинный твердый раствор, — так как и в том и в другом случае такое золото не может быть извлечено обычными приемами гидрометаллургической обработки.

Проведенные нами в Ленинградском горном институте еще в 1939—1940 г. исследования синтеза золотосодержащих сульфидов железа экспериментально подтвердили возможность образования в них таких чрезвычайно дисперсных включений золота [3]. Эти выделения золота не констатируются под микроскопом при больших увеличениях (свыше 1750), несмотря на то, что абсолютное содержание золота в синтезированных пиритах доходило до 300 г/т.

Как следует из указанного выше, в пиритах некоторых золоторудных месторождений вполне возможно наличие золота в форме чрезвычайно дисперсных включений. Для практических целей недостаточно констатации одного этого факта. Важно не только наличие дисперсного золота в пирите, но и количественная доля такого золота от всего содержания и степень его дисперсности. Эта задача может быть решена различными путями.

2. Минераграфический метод констатации тонковкрапленного золота

Канадские исследователи, повидимому, одни из первых пытались осуществить построение кривых распределения по крупности золотых частиц для различных руд северо-американских месторождений. Эти характеристики крупности, как показал наш анализ работ Канадского горного бюро, построены на основании подсчета под микроскопом золотинок в явно недостаточном количестве полированных шлифов (обычно 6 шт.) и потому носят сугубо качественный характер.

На основании даже оптимальной предпосылки о равномерном распределении частиц золота в руде нами было доказано, что для получения надежной гранулометрической характеристики включений необходим систематический просмотр под микроскопом сотен аншлифов. Число шлифов зависит от содержания и характера включений золота. При преобладании по весу крупных включений число шлифов для просмотра требуется значительно большее, чем при равномерном распределении частиц разного размера. Особенно должно возрасти число шлифов при преобладании мелких зерен, когда возможность попадания в поле шлифа крупных зерен менее вероятна. Графически результаты статистических расчетов представлены на рис. 1.

Вместе с тем не следует забывать, что получаемая при минераграфическом анализе характеристика крупности по числу зерен недостаточна еще для выявления роли дисперсного золота. Проведенные расчеты для трех типов гранулометрической характеристики показали, что во всех случаях число тонкодисперсных зерен будет резко превышать число грубодисперсных и крупных.

Во всех случаях характеристика по числу зерен будет иметь однотипный характер, не отражающий истинного весового соотношения зерен различной крупности.

Следовательно, минераграфический анализ при просмотре небольшого числа шлифов может дать искаженное представление о гранулометрической характеристике включений золота в рудах. Как показала наша работа, лишь при просмотре и подсчете включений в значительном количестве шлифов в соответствии с приведенным графиком (см. рис. 1) и при обязательном переводе числовой характеристики и весовую минераграфическим методом можно достаточно надежно количественно оценить дисперсное золото. Однако такой метод является очень трудоемким и может быть применен при механизации счетных операций с помощью пушинтегратора Глаголева или других аналогичных приборов.

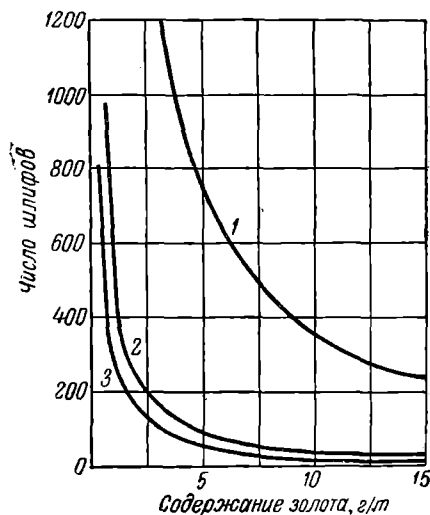


Рис. 1. Зависимость числа шлифов от содержания золота. Характеристика:

1 — вогнутая; 2 — выпуклая; 3 — прямая

3. Химические методы определения крупности включений золота в пирите

Важному для технологии руд вопросу о форме и крупности включений золота посвящено большое число работ. Если для кварцевых и охристых руд существует достаточно разработанная методика, то для золотосодержащих сульфидов железа такой методики не существовало.

Обычно в практике исследования золотосодержащих сульфидных руд для разложения и растворения сульфидов практиковалось растворение таких руд в азотной кислоте. Как показали наши опыты, применение для разложения сульфидов азотной кислоты в некоторых случаях может вызвать потери золота (табл. 1).

Таблица 1

Обработанный материал	Золото в навеске мг	Золото в азотнокислых растворах	
			% от общего количества
Средняя проба пиритных хвостов	2,13	0,20	9,4
I пиритная фракция со стола	2,65	0,47	17,7
III пиритная фракция со стола	14,35	0,80	5,6

Поэтому по установлению гранулометрической характеристики в качестве растворителя пирита нами применялась разбавленная азотная кислота (1 : 1,1 2) с обязательным контролем растворов на содержание золота.

Выделяющаяся при растворении пирита в азотной кислоте сера иногда растворялась в 10%-ном растворе щелочи. В этих условиях, как показали опыты, в форме дитиоураторов может теряться значительное количество золота (до 50%). Поэтому для растворения серы следует применять сероуглерод или подвергать растворы, полученные при щелочной обработке, анализу на золото.

Поскольку при щелочной обработке в раствор переходит преимущественно дисперсное золото, анализ растворов дает представление о содержании такого золота. Если не учитывать этого факта, как это имело место в некоторых работах по установлению крупности золота, то можно получить неправильное представление о степени дисперсности золота. Во многих работах золото, выделенное химической обработкой для последующих замеров, составляет лишь 15—20% от общего количества. Этот грубодисперсный и зернистый остаток, естественно, не является представительным для всей массы золота, содержащегося в сульфидах.

Получившийся после обработки азотной кислотой и щелочью (или сероуглеродом) нерастворимый остаток обычно содержит кварц и силикаты. Их отделение от золота может осуществляться путем обработки остатка смесью плавиковой и серной кислот или в тяжелых жидкостях. При большом количестве такого остатка отделение золотинок производилось нами в струе восходящей воды в специально сконструированном конусе-пульсаторе. В последнем случае рекомендуется предварительно отделить от мучиванием фракцию —20 м.

Сопоставление содержания золота в щелочных растворах и шламах с количеством золота в зернистом остатке и гранулометрический анализ последнего позволяют установить количественные соотношения крупного и дисперсного золота и произвести корректировку результатов минераграфического анализа.

Проведенные исследования показали, что количество дисперсного золота в пиритах иногда достигает больших относительных величин.

В табл. 2 приведены, например, соотношения зернистого и дисперсного золота, полученные при исследовании образцов пиритов и продуктов их обогащения.

Таблица 2

Распределение золота	П р о б а					
				iv	v	vi
Зернистое (грубодиспер- сное), %	47,7	16,0	10,44	9,55	32,3	13,8
В шламах — 20 μ , %	13,6	77,7	88,11	89,00	2,7	7,4
Механические и химиче- ские потери дисперсного золота в растворах, %	38,7	6,3	,46	1,45	65,0	78,8

Таким образом, для надежного определения количеств дисперсного золота в сульфидах химическим методом необходимо учитывать золото в растворах при всех операциях обработки.

С помощью описанной методики были исследованы пробы сульфидных фракций флотационных хвостов. Так как исследованию подвергались большие навески (10—15 кг), полученные результаты достаточно надежно определили характер вкрапленности золота в этих пробах. Исследованиями была установлена чрезвычайно тонкая вкрапленность значительной части содержавшегося золота. Химическое исследование двух проб показало, что золото в пирите одного месторождения представлено более крупными выделениями — максимум на кривой распределения, как видно на рис. 2, лежит в интервале крупностей 10—17 μ , для пиритов другого месторождения — в интервале 3—6 μ .

Таковыми усовершенствованными методами минератрафического и химического исследований в ряде других пиритов отечественных месторождений было количественно определено содержание высокодисперсного золота.

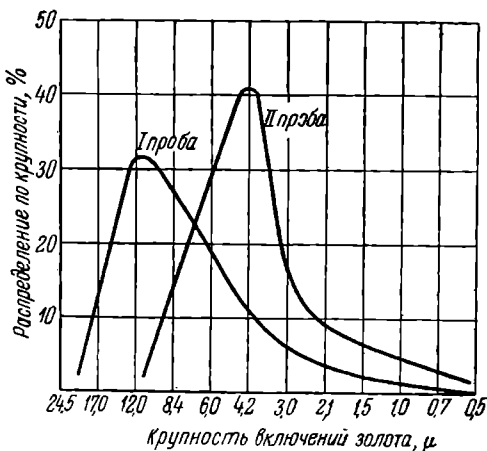


Рис. 2. Характеристика крупности включений золота в двух пробах пирита

4. Наличие дисперсного золота в пирротинах

В отличие от пирита возможность образования твердых растворов золота в пирротине исключается вследствие резкого различия кристаллической решетки пирротина и золота. Следовательно, тонковкрапленное и дисперсное золото в пирротине может образоваться лишь за счет механического захватывания частиц пирротинном в процессе выделения его из расплавов или растворов. Так как генетически золото обычно выделяется позже пирротина, оно осаждается между зернами

или в тонких трещинах пирротина в форме относительно крупных включений.

К сожалению, форма и крупность включений золота в пирротине изучены крайне недостаточно, повидимому, из-за той небольшой роли, которую пирротин играет в большинстве известных сульфидных золоторудных месторождений. Лишь в некоторых рудах пирротин встречается в заметных, соизмеримых с пиритом количествах. Золотосодержащие руды, в которых пирротин является преобладающим сульфидом, пока еще редки. Поэтому в литературе имеется описание лишь единичных химико-минералогических исследований и результатов технологических испытаний таких руд.

О форме и крупности включений золота в пирротинах отечественных месторождений существуют противоречивые сведения. Некоторые исследователи считают, что и в наших пирротинах значительная часть золота представлена тонкими включениями. Однако эти выводы не обоснованы экспериментальными данными и базируются на технологических показателях цианирования пирротиновых руд.

Таблица 3

Крупность частиц золота, мм	Сплошная пирротиновая руда		Пирротиновая фракция руды	
		суммарный %	%	суммарный %
—0,3	35,8	35,8	4,4	4,4
+0,2 —0,3	7,7	43,5	31,9	36,3
+0,15—0,20	8,0	51,5	10,6	46,9
+0,10—0,15	6,4	57,9	37,9	84,4
+0,05—0,10	11,0	68,9	10,4	94,8
—0,05	31,0	100,0	5,0	100,0

Есть только одно детальное минералогическое исследование двух проб одной из отечественных руд (Гинзолото). Показатели крупности золота этих проб, приведенные в табл. 3, свидетельствуют о том, что только в сплошной пирротиновой руде, в которой помимо пирротина обычно содержится большое количество пирита и марказита, около 35% золота представлено частицами мельче 0,05 мм. В штуфной пирротиновой руде количество такого золота всего 5%¹.

В наших работах в пирротине той же руды преобладание крупного и грубодисперсного золота устанавливалось непосредственным замером крупности частиц золота, выделенного в конусе-пульсаторе после растворения двух относительно больших (до 2 кг) проб пирротина в кислотах. Как видно из табл. 4, где сведены результаты замеров крупности частиц и прямого взвешивания выделенных фракций, мелкого золота (частиц меньше 0,02 мм) в первой пробе оказалось 14,0%, а во второй — всего 8,5%.

Одновременно с опытами непосредственного выделения золота и замеров его крупности были поставлены технологические испытания вскрываемости золота в пирротине после различной степени измельчения. Для выделения максимально чистого (мономинерального) пирротина была применена магнитная сепарация измельченной пробы штуфной руды. Уже при крупности — 1,2 мм оказалось возможным выделить довольно чистый продукт, содержащий около 88% пирротина. Освобождение и переход в немагнитную фракцию (при малом выходе

¹ При исследовании в Гинзолото фиксировались только частицы 0,05 мм, количество более мелких частиц не устанавливалось.

Таблица 4

Проба	Класс крупности, мм	Вес мг	Распределение %
I	+0,3	1,2	7,0
	-0,3 +0,2	1,1	6,5
	-0,2 +0,15	4,0	24,0
	-0,15+0,074	6,6	40,0
	-0,07+0,02	1,42	8,5
	-0,02	2,36	14,0
		16,68	100,0
II	-0,15+0,06	1,68	17,3
	-0,05+0,02	7,22	74,2
	0,02	0,84	8,5
		9,74	100,0

ее) значительной части золота (около 45%) даже при этой крупности опровергает существовавшие предположения о связи большей части (около 70%) золота с пирротином.

Результаты магнитной сепарации штучной руды при крупности — 1,2 мм (табл. 5) показывают, что большая часть золота легко

Таблица 5

Продукты разделения	Выход	Состав, %			Содержание г/т	Распределение %
		пирротин	пирит	халькопирит		
Магнитная фракция	87	88	7		5,7	55
Немагнитная фракция	13	36	42	3	30,0	45

освобождается от пирротина при относительно грубом измельчении. При разделении руды на минералогические фракции и расчете извлечения золота в этих фракциях еще более четко видно отсутствие тесной связи основной массы золота с пирротином и выявление ассоциации золота с пиритом (рис. 3).

При более тонком измельчении магнитной фракции (пирротиновой) и повторной магнитной сепарации содержание золота в ней снижается еще резче. Так, в нескольких опытах такая пирротиновая фракция после измельчения до —0,074 мм и повторной сепарации содержала золота 2,0; 1,5; 1,2 г/т. В то же время содержание золота в немагнитной фракции соответственно возрастало и доходило до 60 г/т.

Учитывая неэффективность сухой магнитной сепарации тонкоизмельченного материала, можно допустить, что содержание тонкодиспергированного золота в пирротине должно быть меньше полученного в наших опытах (т. е. меньше 1,0 г/т). Для исследованной пробы это составит не более 15—20% от всего золота в пирротине. Это предположение подтвердилось последующими опытами цианирования пробы штучной руды, при которых неизвлекаемого золота в пирротине оставалось около 1,0 г/т.

Например, при цианировании пробы руды (около 40% пирротина и приблизительно 30% пирита) в магнитной фракции хвостов цианиро-

вания содержание золота составило всего 1 г/т, а немагнитная фракция (пиритная) содержала золота примерно в пять раз больше.

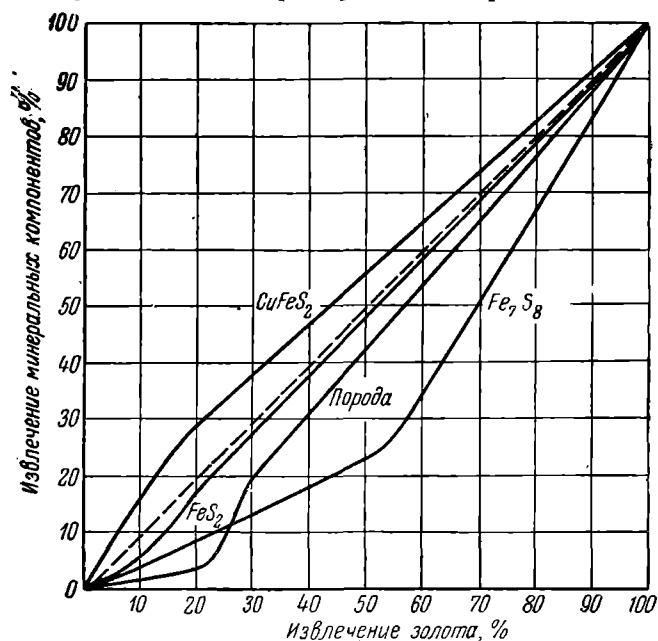


Рис. 3. Взаимосвязь золота с компонентами

Проба руды после измельчения до $-0,15$ мм и мокрого отделения шламов была подвергнута разделению ручным магнитом. Полученные в результате этого продукты указаны в табл. 6.

Таблица 6

Продукты разделения	Выход %	Содержание г/т	Распределение %
Магнитная (пирротиновая) фракция	34,5	3,4	7
Немагнитная (кварцево-пиритная) фракция	65,5	24,0	93
	100,0	16,93	100,0

И та и другая фракции подвергались обработке в течение 54 час. раствором цианистого калия 0,1% при щелочности 0,02%. Результаты анализа растворов и остатков цианирования приведены в табл. 7.

Таблица 7

Содержание золота	Распределение золота в пирротиновой фракции		Распределение золота в кварцево-пиритной фракции	
	г/т исходное		г/т исходное	
В растворе	2,2	65	20,4	85
В остатке	1,2	35	3,6	15

В пересчете на исходную пробу (до разделения магнитом):

Золота в растворе от обработки:		
пирротиновой фракции	4,5%	} 83,5%
пиритной фракции	79,0	
Упорного (дисперсного) золота:		
в пирротиновой фракции	2,5	} 16,5%
в пиритной фракции	14,0	

Таким образом, после цианирования штучной руды, измельченной до $-0,15$ мм, от общего содержания упорного (дисперсного) золота в сульфидах, связанного с пиритом, будет $\sim 84\%$, а связанного с пирротинном $\sim 16\%$.

После измельчения руды до крупности $-0,074$ мм количество остающегося золота, естественно, уменьшается. В пирротине остается всего $0,6$ г/т, в пирите -3 г/т.

Проведенные химические и технологические исследования дают основание утверждать, что в исследованной руде пирротин не является носителем основной массы тонкодиспергированного золота, которое связано преимущественно с пиритом.

Многочисленные исследования зарубежных ученых также подтверждают отсутствие тесной связи золота с пирротинном. Так, по анализам Канадского Горного бюро, в руде Голд Кап с пирротинном ассоциировано всего $22,9\%$ золота. В рудах Норанда при измельчении до $-0,074$ мм пирротиновая фракция содержала $0,56$ г/т золота.

Таким образом, по состоянию изученности пирротинов из золото-содержащих руд можно заключить, что для пирротинов характерна относительно крупная вкрапленность золота и отсутствие в них тонкой диспергации золота.

II. ЗАТРУДНЕНИЯ ПРИ ИЗВЛЕЧЕНИИ ТОНКОВКРАПЛЕННОГО ЗОЛОТА ИЗ ПИРИТА И ПИРРОТИНА

Всякая гидрометаллургическая операция перед выщелачиванием требует вскрытия ценного извлекаемого минерала для обеспечения доступа к нему растворителя. Это вскрытие минерала осуществляется дроблением и измельчением. Естественно, что чем мельче вкраплен растворимый минерал и чем менее проницаема растворителем вмещающая его порода или другой минерал, тем тоньше должно быть предварительное измельчение.

Описанная комбинированная химическая и гравитационная методика исследования крупности включений золота в природных сульфидах позволяет достаточно надежно учесть и оценить включения золота в сульфидах. Как указано выше, пириты часто содержат заметные количества тонковкрапленного и дисперсного золота. Практика показывает, что извлечение тонкого золота обычными приемами гидрометаллургической обработки протекает неэффективно. Затруднения, возникающие при обработке таких руд, в основном сводятся к невозможности вскрытия и растворения тонкодисперсного золота и к высокому расходу цианида, вызываемому активным взаимодействием тонкоизмельченных сульфидов с цианидом.

1. Степень вскрытия тонковкрапленного золота в процессе измельчения

Особо интенсивное измельчение сульфидных, преимущественно пиритных, руд перед цианированием практикуется довольно часто, однако отвалы по золоту (около 1 г/т) хвосты цианирования получаются далеко не всегда.

В некоторых случаях тонкое измельчение позволяет все-таки вскрыть значительную часть золота и получить отвальные по золоту хвосты. Примером могут служить руды Флин-Флон и Норанда, в которых доля тонкодисперсного золота не так велика.

В пиритных концентратах, поступающих на фабрику Флин-Флон, исходное содержание золота составляет всего 1—1,5 г/т или в пересчете на чистый пирит 1,72—2,5 г/т. Так как пиритный концентрат является хвостами обогатительной фабрики, то он поступает на золотоизвлекающую фабрику в тонкоизмельченном состоянии (84%—200 меш. при 21,9%—9 μ) и поэтому перед цианированием не подвергается дополнительному измельчению.

Пиритный концентрат Норанда также получается после извлечения основной массы золота в голове процесса в форме золото-медного концентрата, но содержание золота в нем значительно больше, чем в пиритном концентрате фабрики Флин-Флон (около 4,5 г/т). Кроме того, концентрат Норанда имеет и меньшую степень измельчения. Он содержит 70% класса—200 меш при 10% класса—9 μ , поэтому перед цианированием он подвергается доизмельчению до 90% класса—325 меш (—45 μ) при 20—24% класса—10 μ , т. е. доводится до крупности измельчения, близкой к крупности концентрата Флин-Флон.

После цианирования на той и на другой фабрике получают хвосты, отвальные по золоту: на фабрике Флин-Флон около 0,42 г/т (или по пириту приблизительно 0,7 г/т), на фабрике Норанда 1,2—1,5 г/т. В первом случае извлечение золота в раствор составляет около 60% (при исходном содержании 1 г/т), во втором—67—72%.

Таким образом, пириты Флин-Флон и Норанда, хотя и содержат упорное дисперсное золото, но его количество относительно общего содержания в исходной руде не так велико, и при достигнутой фабриками степени измельчения потери в хвостах получаются вполне допустимые. Из этих пиритов значительная часть золота может быть извлечена обработкой по обычной гидрометаллургической схеме при измельчении до 90%—325 меш. Однако если представить графически изменение содержания золота в классах крупности хвостов цианирования (рис. 4), станет видно, что и в рудах Норанда часть золота представлена чрезвычайно дисперсными включениями, не вскрываемыми даже при измельчении до 3 μ .

Примеры наличия в пиритах более дисперсного золота, не вскрываемого чрезвычайно тонким измельчением, представлены на рис. 5 в виде графической интерпретации результатов цианирования ряда упорных канадских руд [5]. При крупности зерен пирита 40 μ содержание остающегося после цианирования золота для большинства приведенных руд очень высокое (от 18 до 32 г/т). По мере уменьшения крупности зерен пирита содержание неизвлеченного золота падает довольно резко, однако только для одной пробы руды Поркупайн (более бедной) оно снижается после измельчения до 10 μ примерно до 2 г/т. Во всех остальных случаях даже при таком тонком измельчении содержание остающегося (недоступного растворителю) золота очень высокое (от 12 до 24 г/т). Эти технологические показатели подтверждают наличие в приведенных пиритных рудах значительных количеств высокодисперсного золота. Очевидно, для таких руд технически невозможно вскрытие всего золота, так как необходимая степень измельчения трудно достижима и экономически вряд ли целесообразна.

В практике работы отечественных золотоизвлекающих предприятий имеется много примеров, когда доля тонкодиспергированного

золота в пирите невелика и поэтому при гидрометаллургической обработке получается достаточно высокое извлечение золота при допустимом содержании его в отвальных хвостах.

Но наряду с такими объектами встречаются и упорные золотосодержащие пириты, обработка которых обычными приемами не дает

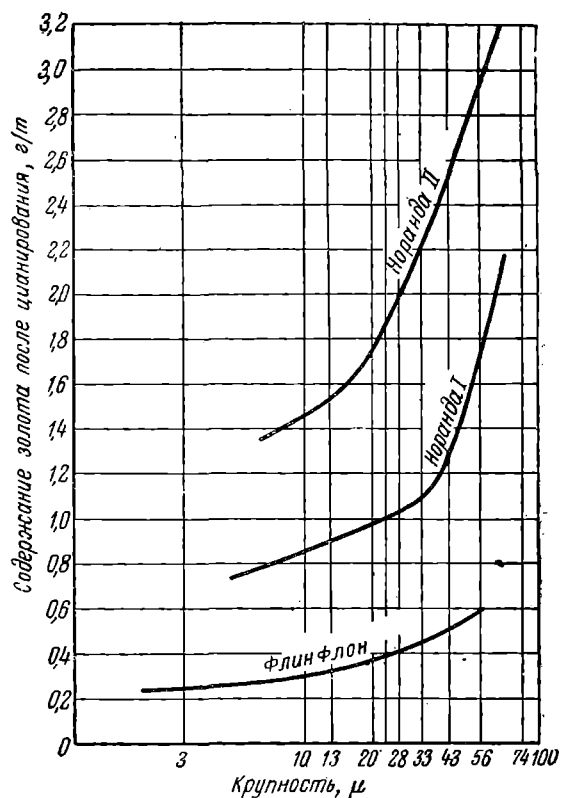


Рис. 4. Освобождение и растворение золота в зависимости от степени измельчения пирита

приемлемых технологических показателей. Выше приводилось несколько аналогичных случаев, когда после цианирования сульфидных концентратов содержание золота в хвостах остается высоким (от 3 до 30 г/т), причем такие высокие содержания удерживаются даже при весьма тонком измельчении сульфидов (—325 меш).

Наглядным примером наличия такого упорного золота в пирите может служить и проба руды, испытанная в 1951 г. в Ленинградском горном институте. Руда была представлена породой, содержащей включения сульфидов, преимущественно пирита. Поставленные опыты цианирования показали, что после измельчения руды до —200 меш (50% — 20 м) извлечение золота в раствор достигает 80%. Дальнейшее увеличение степени измельчения незначительно снижает содержание золота в хвостах, которое в зависимости от времени выщелачивания (рис. 6 и 7) составляет 1,1—0,9 г/т, т. е. уже приближается к допустимому отвальному содержанию.

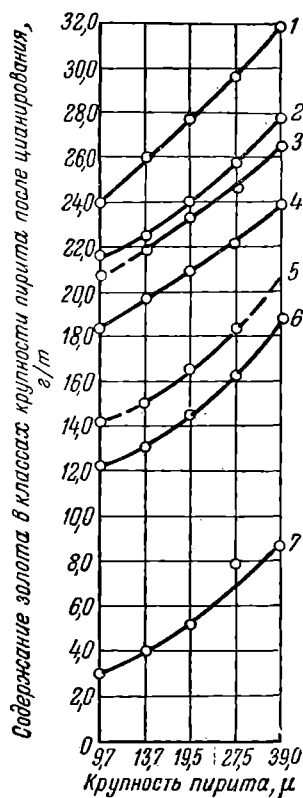


Рис. 5. Зависимость остаточного содержания золота в пирите от степени измельчения [5] руды:

1 — Кирклэнд; 2 — Лэйк Шор (1937 г.); 3 — Норт Серн Квебек; 4 — Лэк Шор (1939 г.); 5 — Кирклэнд; 6 — Поркупайн; 7 — Поркупайн

Вялый характер падения кривых содержания золота в хвостах, в зависимости от увеличения степени измельчения и удлинения времени обработки, указывает на тонкую вкрапленность неизвлекаемого золота,

практически не обнажающегося даже при измельчении до 60μ — 20μ .

При флотации сульфидов из хвостов цианирования этой руды получается концентрат с содержанием золота около 13 г/т . Классификация по крупности этого сульфидного концентрата и анализ на золото классов дали результаты, представленные на рис. 8. Как видно на графике, в исследованной руде часть золота находится внутри кристаллов пирита в состоянии очень тонкой вкрапленности, так как при измельчении до крупности мельче 5μ невоскрываемого золота остается почти 4 г/т . Очевидно, для руд такого типа полное извлечение золота из пирита не мо-

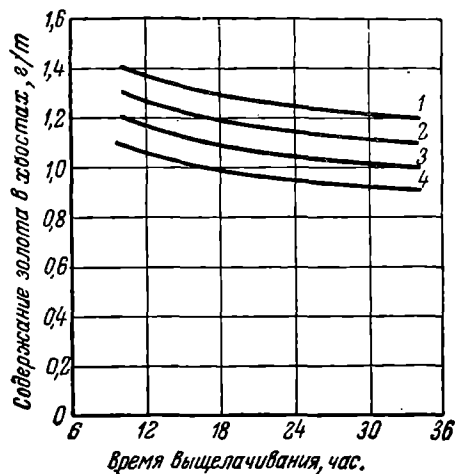


Рис. 6 Зависимость извлечения золота в раствор от времени обработки. Время выщелачивания: 1 — 12 час.; 2 — 18 час.; 3 — 24 час.; 4 — 36 час.

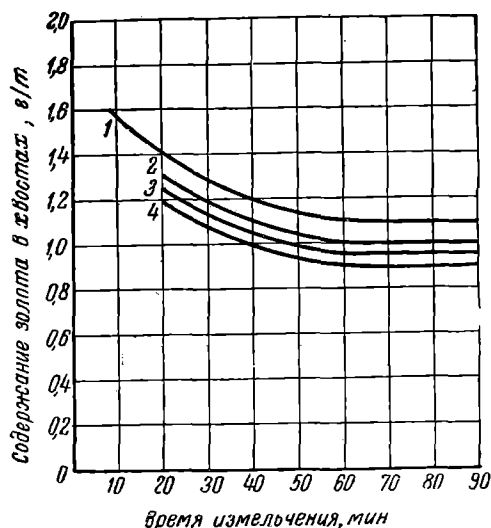


Рис. 7. Зависимость извлечения золота в раствор от степени измельчения. Измельчение: 1 — $22,5\%$ — 20μ ; 2 — $28,0\%$ — 20μ ; 3 — $36,0\%$ — 20μ ; 4 — $62,8\%$ — 20μ .

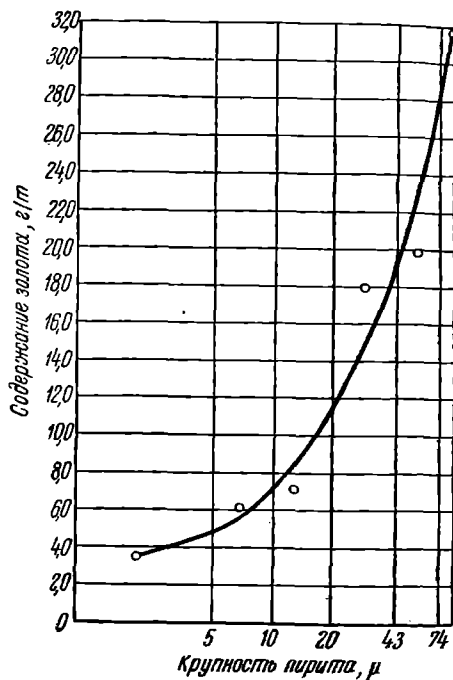


Рис. 8. Содержание упорного дисперсного золота в пирите в зависимости от степени измельчения

жет быть с экономической целесообразностью осуществлено обычными приемами непосредственной гидрометаллургической обработки.

2. Взаимодействие цианистых растворов с имельченным пиритом

Как свидетельствуют приведенные примеры, из некоторых пиритов золото может быть достаточно полно извлечено после тонкого измельчения (—325 меш). Но извлечение золота, вскрытого тонким измельчением, может оказаться нецелесообразным вследствие активного взаимодействия тонкоизмельченного пирита с цианистыми растворами. Это вызывает, как свидетельствует практика работы золотоизвлекательных предприятий, иногда слишком высокий расход цианида. Поэтому представляет интерес анализ характера взаимодействия пирита с цианистыми растворами.

Известно, что природные сульфиды, в том числе и пирит, довольно легко окисляются воздухом. В результате такого окисления получаются сульфаты железа, серная и сернистая кислоты и выделяется элементарная сера. При гидрометаллургической обработке золотосодержащих пиритов окисление их начинается уже в процессе мокрого измельчения. При нормальном содержании кислорода в воде (8—9 мг/л) в растворах обнаруживаются значительные количества продуктов окисления пирита. Химический анализ растворов после измельчения в них пирита позволил констатировать в растворах ионы S^{-2} , SO_4^{-2} , $S_2O_3^{-2}$ и SO_3^{-2} и в заметных количествах ионы Fe^{+2} и Fe^{+3} .

При контакте пирита в пульпе с цианистыми растворами имеет место взаимодействие с ними как самого пирита, так и продуктов его окисления. Особенно сложен, повидимому, процесс окисления и последующего взаимодействия с цианидом серы пирита. При анализе растворов ионы SO_4^{-2} и $S_2O_3^{-2}$ обычно констатируются в преобладающих количествах и в значительно меньшем числе присутствует ион SO_3^{-2} . Характерно, что суммарное содержание серы в растворах, как правило, превышает констатированное анализом количество серы в виде ионов SO_4^{-2} , $S_2O_3^{-2}$, SO_3^{-2} . Это указывает на присутствие в растворе еще и других продуктов окисления серы¹.

Перешедшие в раствор сульфиды, сульфиты, тиосульфаты и соли железа будут не только взаимодействовать с кислородом, но и вступать в химические реакции с цианидом. В результате будут образовываться роданиды, сульфиды щелочных и щелочно-земельных металлов, ферроцианиды и, несомненно, другие соединения.

Процесс взаимодействия с цианистыми растворами сульфидов железа и продуктов их окисления чрезвычайно сложен и поэтому недостаточно изучен. Вопросами цианирования сульфидных материалов занимались многие отечественные исследователи (В. Я. Мостович, И. Н. Плаксин с сотрудниками, В. Л. Заблуждая и др). При цианировании измельченного пирита было неоднократно констатировано накопление в растворах значительных количеств железа, роданидов, цианатов, измеряемых иногда килограммами на тонну обработанного материала. Суммарный расход цианида за это время достигает больших значений (свыше 10 кг/т).

Однако в проведенных до настоящего времени работах не ставился и не изучался вопрос о возможности торможения процесса взаимодействия продуктов окисления сульфидов с цианидом.

Г. В. Иллювиева. Исследование процесса взаимодействия пирротина со щелочными цианистыми растворами. См. настоящий сборник.

В исследованиях Ленинградского горного института была сделана попытка нахождения условий, обеспечивающих некоторое замедление процессов взаимодействия пирита с цианистыми растворами.

По нашим опытам, кинетика взаимодействия измельченного пирита (51,76% S; 46,86% Fe; нерастворимый остаток 1,27%) с цианистыми растворами (около 0,2% KCN при $T = 10^\circ$) может быть охарактеризована результатами анализа цианистых растворов во времени (табл. 8).

Таблица 8

Время час.	Пирит крупностью — 100 + 140 меш						Пирит крупностью — 200 + 325 меш					
	S _{общ}	SO ₄ ⁻²	S ⁻²	SO ₃ ⁻²	S ₂ O ₃ ⁻²	CNS ⁻	S _{общ}	SO ₄ ⁻²	S ⁻²	SO ₃ ⁻²	S ₂ O ₃ ⁻²	CNS ⁻
1	0,67	0,35	0,0096	Нет	0,860	0,750	0,85	—	—	—	1,45	0,75
3,5	1,03	0,89	0,048	»	1,20	1,04	1,17	1,22	0,03	—	1,37	0,65
5,5	1,27	1,10	1,001	»	1,30	2,08	1,55	0,83	0,06	—	1,38	2,14
7,5	1,68	0,85	Следы		1,28	1,99	1,57	0,61	—		1,31	2,20
9,5	1,87	1,91	Нет		1,26	2,96	1,90	1,37	—	—	1,30	2,27

Примечание. Содержание в растворах продуктов окисления пирита дается в килограммах на тонну обработанного материала.

Расход цианида (KCN) за 9,5 час. для пирита крупностью — 100 + 140 меш составил 5,0 кг/т; для пирита крупностью — 200 + 325 меш — 7,5 кг/т.

Как следует из табл. 8, зернистый пирит (без шламов) реагирует почти с одинаковой скоростью независимо от степени измельчения, поэтому графическая интерпретация результатов на рис. 9 дана по средним цифрам — суммарная.

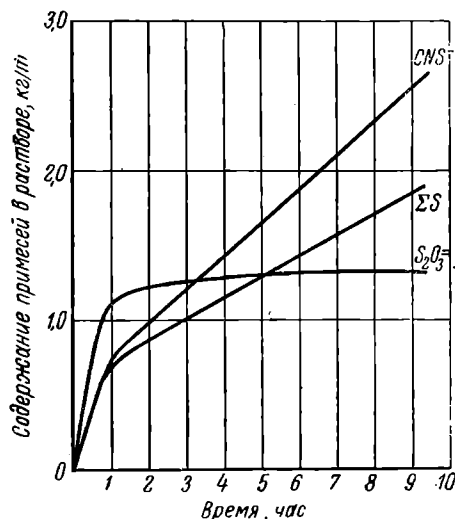


Рис. 9. Кинетика взаимодействия пирита с цианистыми растворами

В растворе непрерывно возрастает, как видно из графика, суммарное содержание серы и содержание иона роданида. Количество тиосульфатного иона после трехчасового контакта практически становится постоянным. Сульфидный и сульфитный ионы при аэрации растворов, имевшей место в проведенных опытах, исчезают очень быстро. Количество сульфатного иона в растворе медленно и непрерывно растет. Опыты предварительной аэрации растворов показали положительный эффект при условии цианирования в тех же растворах. В последующих исследованиях процесса взаимодействия пирита с циани-

стыми растворами, проведенных Г. В. Иллювиевой¹, была уточнена специфика взаимодействия пирита с растворами в условиях ограниченного (при измельчении и перемешивании в заполненных нацело пульпой ап-

¹ Г. В. Иллювиева. Исследование процесса взаимодействия пирротина со щелочными цианистыми растворами. См. настоящий сборник.

паратах) и нормального содержания воздуха в пульпе. Было показано, что тонкоизмельченный пирит и марказит активно взаимодействуют с раствором цианида. При недостатке воздуха в пульпе вначале преимущественно образуется ферроцианид, количество которого во времени убывает вследствие окисления железа и выпадения его в виде гидрата. При интенсивной аэрации количество ферроцианида резко убывает. Для марказита оказалось характерным повышенное по сравнению с пиритом содержание роданида в растворе.

Интенсивная аэрация пульпы и присутствие в растворе сульфата кальция и для пирита и для марказита играют положительную роль в процессе цианирования. Сульфат кальция тормозит окисление железа, а предварительная аэрация переводит продукты окисления в высшие формы, менее активные по отношению к цианиду. В результате происходит снижение расхода цианида почти в два раза (с 4,5 до 2 кг/т). Таким образом, по нашим опытам, предварительная аэрация пульпы дает положительные результаты.

Однако этот положительный эффект предварительной аэрации растворов некоторыми исследованиями отрицается. Причиной такого расхождения в оценке действия аэрации является различие в методике экспериментирования. Обычно после предварительной аэрации растворы сливаются и цианирование проводится на свежих растворах. Такой сменой растворов по существу уничтожается положительное действие аэрации, так как вместе с растворами уводится и сульфат кальция, играющий важную роль в процессе взаимодействия тонкоизмельченных сульфидов с растворами цианида. Как показали работы, проведенные в Ленинградском горном институте, задача аэрации сводится не только к окислению закисных соединений железа, но и к образованию за счет введенной извести достаточных количеств сульфата кальция. Есть основание полагать, что сульфат кальция, являясь коагулятором тонкоизмельченных частиц сульфидов железа, уменьшает их активную поверхность и тем замедляет процессы взаимодействия сульфидов с цианидом. Как показано ниже, аналогичный эффект был констатирован и при цианировании пирротинов.

Суммируя результаты исследований по взаимодействию тонкоизмельченного пирита с цианистыми растворами, можно прийти к следующим выводам:

1. В большинстве случаев в процессе мокрого тонкого измельчения пирит легко окисляется. Он и продукты его окисления интенсивно реагируют с растворами цианидов. Наиболее интенсивно этот процесс протекает в первые 6—9 часов.

2. В результате окисления пирита и его взаимодействия с цианистыми растворами образуется большое число химических соединений, до настоящего времени полностью не выявленных. Главнейшими и количественно преобладающими соединениями являются: ферроцианид, роданиды, сульфаты и тиосульфаты. На образование этих соединений расходуется цианид и кислород, необходимые для нормального течения процесса растворения золота.

Количественное соотношение продуктов взаимодействия пирита и цианида зависит от природы пирита, степени его измельчения, характера и длительности контакта частиц пирита с цианистыми растворами. При ограниченной аэрации растворов в преобладающем количестве обнаруживается ферроцианид, сульфиды и сульфиты. При интенсивной аэрации как перед контактом пирита с цианистыми растворами, так и во время

контакта (перемешивания пульпы) содержание ферроцианида в растворах резко падает, сульфиты и растворимые сульфиды практически отсутствуют.

3. В результате такого взаимодействия тонкоизмельченного пирита с цианистыми растворами расход цианида во многих случаях достигает значительной величины (10, 15 кг и более цианида на 1 т обрабатываемого материала). Скорость растворения золота вследствие недостатка кислорода снижается.

4. Предварительная аэрация растворов и пульпы с добавкой извести благоприятно сказывается на последующем процессе цианирования, снижая расход цианида в два и более раза. Однако это благоприятное действие имеет место только тогда, когда аэрированные растворы не сменяются. Полная смена растворов и особенно промывка материала в значительной степени уничтожают весь эффект предварительной аэрации.

Положительный эффект интенсивной аэрации на процессе цианирования сульфидных материалов следует объяснить пополнением расходуемого кислорода и переводом сульфидов и сульфитов в неактивные по отношению к цианиду сульфаты и тиосульфаты. Кроме того, образующийся в процессе аэрации сульфат кальция, повидимому, коагулирует тонкие пиритные шламы в крупные флоккулы, менее активные по отношению к цианиду.

3. Взаимодействие цианистых растворов с тонкоизмельченным пирротинном

Вследствие относительно редкого присутствия в золотосодержащих рудах значительного количества пирротина вопросом его взаимодействия с цианистыми растворами занимались немногие исследователи. Общеизвестно, что пирротины по сравнению с пиритами окисляются легче. Уже при лежании на воздухе через короткое время измельченный пирротин покрывается окислами и основными сульфатами железа.

При мокром измельчении окисление пирротина протекает весьма интенсивно. Изучая золотосодержащие пирротины, В. Я. Мостович первый установил, что при мокром измельчении пирротина в результате окисления выделяется около 4 кг/т элементарной серы и при последующем цианировании переходит в раствор в форме сульфата до 10 кг железа на тонну обработанного пирротина. В результате такого окисления и взаимодействия с цианистыми растворами получается чрезвычайно высокий расход цианида (от 60 кг/т) и, кроме того, при обработке богатых пирротинном золотосодержащих руд вследствие быстрого падения содержания цианида и кислорода в пульпе значительно тормозится растворение золота [4].

Последующими работами ряда исследователей было подтверждено, что гидрометаллургическая переработка пирротиновых руд связана с исключительно большим расходом цианида, определяемым степенью измельчения пирротина, временем перемешивания (контакта) и концентрацией цианида. Была также констатирована пониженная скорость растворения золота в пирротиновых пульпах.

Проведенные нами экспериментальные исследования также показали, что интенсивность взаимодействия пирротина с цианистыми растворами, в первую очередь, определяется степенью измельчения пирротина, вернее, количеством переизмельченного материала — шламов (табл. 9). Узкие классы крупности измельченного материала ($-0,15 + 0,10$ мм и даже $-0,07 + 0,045$ мм) примерно одинаково интенсивно реагируют с цианидом (от 10 до 12 кг/т).

Время час.	Пирротин крупностью — 0,15+0,10 мм				Пирротин крупностью — 0,07+0,045 мм			
	ΣS	SO_4^{-2}	$S_2O_3^{-2}$	KCN Σ	ΣS	SO_4^{-2}	$S_2O_3^{-2}$	KCN Σ
1,0	0,48	0,72	—	—	0,68	—	0,84	—
3,5	0,54	0,51	0,87	1,21	0,87	0,74	0,72	1,85
5,5	1,14	0,96	0,81	2,0	1,42	—	1,15	1,50
8,0	—	0,33	0,87	2,16	1,77	0,87	1,24	2,50
10,0	,14	0,39	1,53	2,42	1,88	0,62	1,86	2,60

¹ Содержание в растворах продуктов окисления пирротина дается в килограммах на тонну обработанного материала.

Результаты анализа, приведенные в табл. 9, показывают на некоторую неустойчивость в содержании отдельных ионов, но общая закономерность возрастания продуктов окисления в растворах намечается довольно четко. Отчетливо видна одинаковая интенсивность взаимодействия зернистых, хотя и тонких, классов крупности пирротина. Ионы S^{-2} и SO_3^{-2} в растворе в заметных количествах обнаружены не были.

Пирротин, измельченный до крупности — 0,045 мм (325 меш) без отделения шламов, реагирует с цианистыми растворами значительно интенсивнее. Расход цианида за 9 час. контакта достигает 35 кг/т. Накопление в растворах продуктов окисления и взаимодействия с цианидом графически представлено на рис. 10.

Как видно на графике, тонкоизмельченный пирротин настолько интенсивно окисляется и взаимодействует с цианидом, что поступающего в пульпу при обычных условиях перемешивания воздуха не хватает для окисления сульфидов, сульфатов и закисных соединений железа. Поэтому в растворах констатируются значительные количества ферроцианида.

Следовательно, прямое цианирование тонкоизмельченного пирротина без каких-либо защитных мероприятий нецелесообразно, так как расход цианида вследствие высокой химической активности пирротиновых шламов через короткое время контакта достигает десятков килограммов на тонну обработанного пирротина. Как показали наши опыты, проведенные как в лаборатории, так и в промышленных условиях, укрупнение помола пирротина и более интенсивное перемешивание пульпы, обеспечивающее

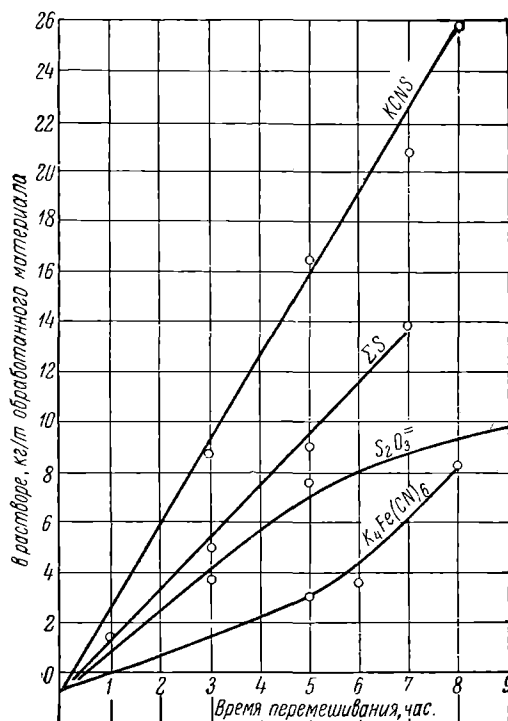


Рис. 10. Взаимодействия пирротина с цианистыми растворами

пополнение растворов кислородом, дают заметный положительный эффект — повышение извлечения золота и снижение расхода цианида. При обработке, например, богатой пирротином руды в обычно принятых пневмомеханических чанах перемешивание пульпы происходит очень вяло. Процесс цианирования вследствие недостатка кислорода затягивался, а цианида расходовалось свыше 10 кг/т. За 12 час. извлечение золота составляло лишь 40%. И, несмотря на то, что интенсификация перемешивания и аэрации, казалось, должна была повысить расход цианида ввиду увеличения скорости окисления пирротина, повышение интенсивности перемешивания дало резкий положительный эффект.

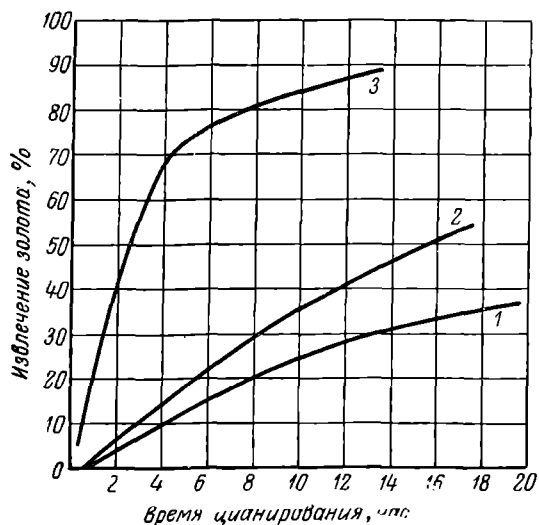


Рис. 11. Влияние интенсивности перемешивания сульфидной пульпы на показатели извлечения золота:

1 — в обычном пневмомеханическом чане; 2 — в пневмомеханическом чане с добавочными лопастями; 3 — в пневмомеханическом чане с интенсивной аэрацией

Таким образом, на основании проведенных в Ленинградском горном институте исследований положительное действие более интенсивного перемешивания можно объяснить превращением активных цианисидов (сульфидов, сульфатов и закисных соединений железа) в неактивные по отношению к цианиду высшие формы окисления. Повышение скорости растворения золота объясняется увеличением содержания кислорода в рас-

творе. Сокращение времени цианирования и защитное действие образовавшегося сульфата кальция дали заметное снижение расхода цианида. Эти результаты были неоднократно подтверждены заводской практикой. Сопоставление результатов работы в чанах с различной интенсивностью аэрации пирротиновой пульпы представлено на рис. 11. Полученные показатели дают основание считать, что в некоторых случаях при обработке пирротиновых руд, не требующих для вскрытия золота особо тонкого измельчения, увеличение степени аэрации и интенсивности перемешивания пульпы может дать заметное повышение эффективности процесса извлечения золота и снижение расхода цианида.

В последующей работе Г. В. Иллювиева¹ исследовала процесс взаимодействия измельченного пирротина с цианистыми растворами. Она показала, что характер этого взаимодействия зависит от условий перемешивания пульпы и количества поступающего в него воздуха. При отсутствии аэрации (при измельчении и цианировании в нацело заполненных растворами аппаратах и их герметизации) взаимодействие пирротина с цианистыми растворами протекает своеобразно. В растворе в значительных количествах констатируются сульфиды, сульфаты и в меньших — сульфиты, тиосульфаты и роданид. Содержание в растворе ферроцианида через короткое время резко возрастает.

¹ Иллювиева Г. В. Исследование процесса взаимодействия пирротина со щелочными растворами. См. настоящий сборник.

При сопоставлении полученных результатов с показателями взаимодействия цианистых растворов с пиритом видно, что при взаимодействии пирротина с цианидом образуется значительно больше (в 4—5 раз) ферроцианида.

При интенсивной аэрации пульпы характер взаимодействия пирротина с цианистыми растворами меняется: в растворах исчезают сульфиды и ферроцианид, возрастает количество роданидов и сульфатов. Опытами было подтверждено выявленное при технологических испытаниях положительное влияние на процесс цианирования интенсивной аэрации и введения в раствор сульфата кальция.

III. ПУТИ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ТОНКОВКРАПЛЕННОГО ЗОЛОТА ИЗ ПИРИТОВ И ПИРРОТИНОВ

Извлечение тонковкрапленного золота из пиритов и пирротинов обычными приемами гидрометаллургии часто встречает большие технические и экономические трудности, а иногда и не осуществимо с достаточно приемлемыми показателями извлечения. Не всегда технически возможно вскрытие тонкого золота даже при измельчении до крупности —325 меш (до 20% класса —10 м), причем, как это было показано экспериментальными исследованиями, цианирование таких переизмельченных сульфидов имеет следствием большой расход цианида.

Применение приемов пассивирования продуктов окисления сульфидов путем предварительной щелочной аэрации в некоторых случаях дает заметный положительный эффект — снижение расхода цианида (в 2—3 раза). Однако для сильно измельченных материалов абсолютные расходы цианида остаются все-таки очень высокими. Поэтому для некоторых сульфидных руд и концентратов, содержащих тонковкрапленное золото, единственными путями переработки, проверенными исследованиями и практикой, будет передача их на пирометаллургические заводы или гидрометаллургическая обработка цианированием после предварительного окислительного обжига.

В практике заграничных золотоизвлекательных предприятий предварительный окислительный обжиг сульфидных концентратов получил широкое распространение.

Несмотря на то, что многочисленными исследовательскими работами была неоднократно доказана целесообразность применения окислительного обжига к некоторым отечественным сульфидным золотосодержащим рудам, в производстве наших золотоизвлекательных фабрик этот процесс до сего времени, к сожалению, не нашел применения.

1. Окислительный обжиг сульфидных руд и концентратов

Для сульфидных руд и концентратов, содержащих золото в состоянии тонкой вкрапленности, предварительный окислительный обжиг в некоторых случаях следует считать весьма эффективной подготовительной мерой для последующего извлечения золота цианированием.

В результате правильно проведенного окислительного обжига происходит превращение активных по отношению к цианиду сульфидов железа в окислы, не взаимодействующие с цианидом. И, если сульфидная руда не содержит в значительных количествах меди, сурьмы и мышьяка, то задача последующей гидрометаллургической обработки может считаться разрешенной как в отношении достаточно высокого извлечения золота, так и в отношении приемлемых расходов цианида.

Вместе с тем, правильно проведенный окислительный обжиг производит превращение обычно плотного кристаллического пирита в рыхлую пористую окись железа, легко проникаемую растворами цианида, что облегчает и ускоряет перевод золота в раствор. Для получения такого рыхлого пористого материала температура обжига должна поддерживаться в довольно узких пределах, так как чрезмерное повышение температуры вызывает уплотнение и даже спекание и оплавление частиц руды, что сказывается на замедлении скорости растворения золота, а иногда и снижает его извлечение. Извлечение понижается вследствие образования на поверхности золотых частиц пленок, особенно при наличии в материале свинцовых минералов, и за счет укрупнения самих золотых частиц, что дает уменьшение активной удельной поверхности растворяющегося золота.

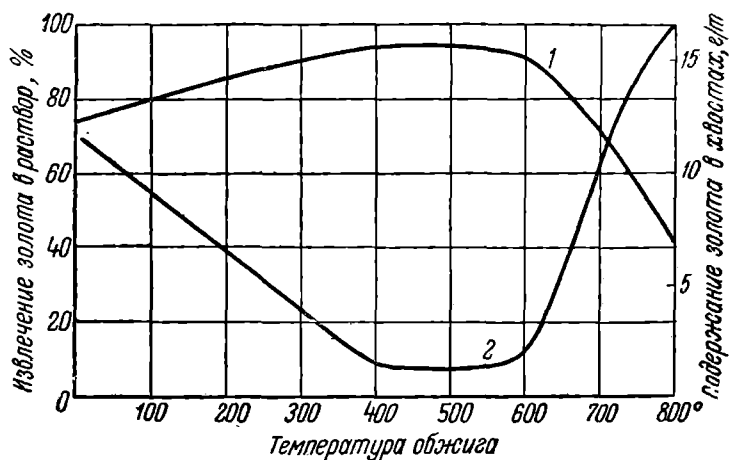


Рис. 12. Зависимость извлечения золота от температуры обжига пиритного концентрата:

1 — извлечение золота в раствор, %; 2 — содержание золота в хвостах,

Многими исследованиями было установлено, что оптимальной температурой обжига для большинства пиритных материалов следует считать интервал 500—600°. Так, например, при исследовании в Ленинградском горном институте технологии извлечения золота из пиритных концентратов оказалось, что из сырых концентратов при самом тонком измельчении максимальный переход золота в раствор составляет всего около 70%, в хвостах при этом остается золота приблизительно 4 г/т. Цианирование обожженного концентрата позволило резко увеличить извлечение золота. Однако, как и следовало ожидать, температура обжига имела решающее значение.

На основании большого числа опытов была установлена зависимость извлечения золота из огарков от температуры обжига (рис. 12). Как видно на рис. 12, после обжига при температуре выше 500° начинает снижаться извлечение золота и соответственно повышаться его содержание в хвостах. Обжиг при температуре 700° и выше резко снижает извлечение золота. Аналогичные примеры в большом количестве можно найти и в практике заграничных золотоизвлекательных предприятий.

Таким образом, целесообразность окислительного обжига золотосодержащих сульфидов железа перед цианированием доказана исследовательскими работами и практикой работы промышленных предприятий.

Организация на некоторых золотоизвлекательных заводах обжиговых цехов обеспечит получение более высоких технологических показателей по извлечению золота и даст снижение расхода цианида, а в некоторых случаях позволит осуществить попутное извлечение ценных металлов-спутников.

2. Пути извлечения золота из пирротиновых руд и концентратов

Обработку пирротиновых руд и концентратов вследствие большого расхода цианида даже при относительно грубом измельчении также нецелесообразно осуществлять прямым цианированием без подготовки обжигом.

При некоторых рудах можно подвергать обжигу не всю массу материала. Так, приведенными выше результатами исследований Ленинградского горного института показано, что в некоторых пирротинах практически отсутствует тонковкрапленное золото и сам пирротин по существу не является золотосодержащим. Поэтому для таких руд снижение расхода цианида без значительного ущерба по извлечению золота может быть осуществлено при использовании в начале процесса селективной флотации. После надлежащего измельчения, обеспечивающего освобождение и вскрытие золотых частиц, флотация должна проводиться таким образом, чтобы, удалив пирротин в хвосты, вывести его из гидрометаллургической обработки и тем самым исключить расход цианида на него.

Современная практика флотации располагает надежными методами разделения сульфидов меди, пирита и пирротина (применение интенсивной аэрации в щелочной среде). Такой прием обработки позволит снизить до нормальных значений расход цианида и обеспечить достаточно высокое извлечение золота.

Однако для большинства пирротиновых концентратов наиболее радикальным мероприятием вскрытия упорного золота является окислительный обжиг. Неудовлетворительные показатели извлечения золота из огарков окислительного обжига в некоторых случаях в основном объясняются образованием на золотинках пленок легкоплавких соединений сурьмы и мышьяка. Поэтому следует считать обязательным перед окислительным обжигом удаление медных, свинцовых и сурьмяных минералов в отдельный концентрат, который наиболее целесообразно передавать заводам цветной металлургии. Весьма перспективным является гидрометаллургическое окисление пирротина кислородом в мульпе под давлением в автоклавах при температуре 115—120°.

Заключение

Проведенная работа позволяет сделать следующие выводы по технологии извлечения золота из пиритных и пирротиновых руд и концентратов:

1. Разработанная методика позволяет с достаточной надежностью констатировать и выявлять количество и крупность включений золота в природных сульфидах железа.

2. Во многих пиритах включения золота лежат за пределами возможности вскрытия их приемами тонкого измельчения. Поэтому такое золото не может быть извлечено обычными приемами гидрометаллургической обработки.

3. Пириты и пирротины в процессе измельчения окисляются, и при последующем цианировании измельченные сульфиды железа и продукты их окисления взаимодействуют с цианидом, вызывая большой расход его.

Это обстоятельство делает неэкономичным прямое цианирование пирротинов и некоторых пиритов.

4. Предварительный окислительный обжиг пиритных и пирротиновых руд и концентратов является весьма эффективным мероприятием, обеспечивающим вскрытие золота и понижение расхода цианида при последующей гидрометаллургической обработке. Оптимальная температура обжига должна быть установлена для каждого объекта специальными исследованиями.

5. Для обработки некоторых пирротиновых золотосодержащих руд на основе изучения формы включений золота в пирротине намечаются также другие пути снижения расхода цианида и повышения извлечения золота — селективная флотация с выдачей в отвал пирротиновых хвостов. Это мероприятие позволит резко сократить объем перерабатываемого материала и снизит расход цианида без заметного снижения извлечения золота.

ЛИТЕРАТУРА

1. Звягинцев О. Е. Геохимия золота. Изд. АН СССР, 1941, стр. 50—76.
 2. Иванов А. А. Опыт применения электронно-микроскопического метода в исследовании рудных минералов. Записки Всесоюзного минералогического общества, 1951, т. LXXX, стр. 167—174.
 3. Масленицкий И. Н. Дисперсные включения золота в сульфидах железа. Записки Ленинградского горного института, 1948, т. XVII—XVIII, стр. 101—115.
 4. Мостович В. Я., Анисимов С. М., Верховцев М. П. Исследование золотосодержащих руд. Сборник трудов проф. В. Я. Мостовича. ОНТИ. 1936, т. 1, стр. 543—547.
 5. Can. Min. and Metallurgical Bull., 1947, № 419, p. 142—143.
-